

# Radioattività - 2<sup>a</sup> Edizione 1905

Ernest Rutherford

### **Prefazione alla prima edizione**

In questo lavoro, ho cercato di dare un resoconto completo e collegato, da un punto di vista fisico, delle proprietà possedute dai corpi naturalmente radioattivi. Sebbene l'argomento sia nuovo, la nostra conoscenza delle proprietà delle sostanze radioattive è aumentata con grande rapidità, e vi è ora una grande quantità di informazioni sull'argomento distribuite tra le varie riviste scientifiche.

I fenomeni presentati dai corpi radioattivi sono estremamente complessi, ed è necessaria anche una parte teorica per collegare in modo intellegibile la quantità di dati sperimentali accumulatisi. Ho basato la teoria sul fatto che gli atomi dei corpi radioattivi subiscono una disintegrazione spontanea estremamente funzionale, non solo nel correlare i fenomeni noti, ma anche nel suggerire nuove linee di ricerca.

L'interpretazione dei risultati si è basata sulla teoria della disintegrazione, e sulle deduzioni logiche applicabili alla stessa per passare dalle applicazioni della teoria ai fenomeni radioattivi.

Il rapido progresso delle nostre conoscenze della radioattività è dipeso dalle informazioni già acquisite tramite le ricerche sulle proprietà elettriche dei gas. La capacità posseduta dalle radiazioni provenienti dai corpi radioattivi di produrre portatori di carica o ioni nei gas, ha costituito la base di un accurato metodo quantitativo di esame delle proprietà delle radiazioni e dei processi radioattivi, e ha pure permesso di determinare con notevole precisione l'ordine di grandezza delle diverse quantità coinvolte.

Per questi motivi, ho creduto utile dare un breve riassunto delle proprietà elettriche dei gas, perché necessarie alla interpretazione dei risultati delle misure in radioattività con il metodo elettrico. Il capitolo sulla teoria della ionizzazione dei gas è stato scritto prima della pubblicazione di J. J. Thomson del recente libro "Sulla Conduzione dell'Elettricità nei Gas", nel quale l'intero argomento è trattato in modo completo e coerente.

È stato aggiunto un breve capitolo, nel quale si espongono i metodi sperimentali che, nelle esperienze dell'autore e di altri, descrivono i lavori più accurati in radioattività. Spero che un tale resoconto possa essere di qualche utilità a coloro che vogliono ottenere una conoscenza pratica dei metodi impiegati nelle misure di radioattività.

Ringraziamenti sono dovuti a Mr. W. C. Dampier Whetam, F.R.S. uno degli editori della Serie Fisica di Cambridge, per molti suggerimenti significativi, e per la grande cura nel rivedere i fogli. Sono in debito anche con mia moglie e Miss H. Brooks per la loro assistenza nel correggere le bozze e a Mr R. K. McClung per la revisione dell'indice.

E.R.

**PREFAZIONE ALLA SECONDA EDIZIONE**

Sento di dovermi in parte scusare con i lettori per aver presentato a poca distanza di tempo dalla precedente una nuova edizione che include molto materiale nuovo, e nella quale i riaggiustamenti sono così estesi da costituire quasi un nuovo lavoro. Sebbene sia trascorso solo un anno dal primo libro, le ricerche effettuate in questo arco di tempo sono state troppo numerose e di grande importanza da consigliare una nuova pubblicazione.

I tre nuovi capitoli aggiunti rappresentano le principali modifiche nel lavoro. Questi capitoli comprendono un dettagliato resoconto dei cambiamenti nella teoria e nelle sue applicazioni all'analisi delle serie di trasformazioni che avvengono in radio, torio e attinio.

La teoria della disintegrazione, che era posta nella prima edizione come spiegazione dei fenomeni radioattivi, ha in queste ultime ricerche dimostrato di essere un potente metodo di analisi delle connessioni tra le serie di sostanze che derivano dalla trasformazione dei radio-elementi. Ho svelato l'origine del radio, e nuovi legami in forma coerente con l'intera grande quantità di fatti sperimentali in apparenza eterogenei accumulatisi a partire dal 1896. La teoria ha ottenuto un significativo livello di verifica negli anni passati, e, in molti casi, ha offerto una spiegazione sia qualitativa che quantitativa delle connessioni tra le varie proprietà mostrate dai corpi radioattivi. Alla luce di tali evidenze, la radioattività può rivendicare di aver assunto la posizione di tema indipendente, sebbene con strette affinità alla fisica da un lato e alla chimica dall'altro.

La presente edizione include una grande quantità di nuovo materiale riguardante la natura e le proprietà delle radiazioni e delle emanazioni. Nel limiti di questo testo, sono trattati anche gli effetti fisiologici dei raggi. La letteratura, a tale riguardo, è già molto ampia e in rapida crescita. Per motivi di spazio, posso riferire solo brevemente la massa di articoli pubblicati sulla presenza della radioattività in sorgenti e fonti d'acqua, nel suolo, nei sedimenti, per la presenza di materia radioattiva.

Per rendere il libro più autosufficiente, nel Capitolo II viene trattato il campo magnetico prodotto dal moto degli ioni, dell'azione di campi elettrici e magnetici esterni e della determinazione della velocità e massa delle particelle che costituiscono il fascio catodico.

Sono poi aggiunte due appendici, per presentare un lavoro sui raggi  $\alpha$  che furono completati troppo tardi per includerli nel libro e l'altra contenente un breve sommario delle conoscenze sulla costituzione chimica dei vari minerali radioattivi, le località nelle quali sono stati trovati e la loro probabile età geologica. Per la preparazione di quest'ultima, sono debitore al mio amico Dr Boltwood di New Haven, che, nel corso delle sue ricerche, ha avuto occasione di analizzare la maggior parte di questi minerali per determinarne il contenuto di uranio e radio. Spero che questo resoconto dei minerali radioattivi dimostri il valore di coloro che hanno tentato di chiarire il legame tra le varie sostanze radioattive e i prodotti inattivi che derivano dalle loro trasformazioni.

Per comodità di coloro che hanno letto la prima edizione, viene aggiunto un elenco delle sezioni e capitoli che contengono le più importanti aggiunte e modifiche nella tabella dei contenuti.

La scrittura di un completo riesame di un tema come la radioattività, sul quale compaiono sempre nuovi lavori, è stato un elemento di non piccola difficoltà. Tra le altre cose ha richiesto una continua revisione del lavoro mentre il volume passava per la stampa.

Voglio esprimere i miei ringraziamenti al mio collega Professor Harkness per la cura e la fatica prestata nel rivedere le bozze e per molti utili suggerimenti; anche a Mr. R. K. McClung per la sua assistenza nella correzione di alcune delle bozze e nella preparazione dell'indice.

E.R.

## Contents

Prefazione alla prima edizione	2
PREFAZIONE ALLA SECONDA EDIZIONE	3
Chapter 1. SOSTANZE RADIOATTIVE	5
1.Introduzione.	5
Chapter 2. Teoria di Ionizzazione dei Gas	17
Chapter 3. Metodi di Misura	41
Chapter 4. Natura delle radiazioni	53
4.1. Parte I - Confronto tra le radiazioni	53
4.2. Parte II - I $\beta$ o Raggi Catodici	55
Parte IV - I Raggi $\alpha$	68
Parte V - I $\gamma$ o raggi molto penetranti	87
Raggi Secondari	90
Parte sesta	94
Chapter 5. Proprietà delle radiazioni	98
Chapter 6. Produzione continua di materia radioattiva	106
Chapter 7. Emanazioni Radioattive	115
Chapter 8. Radioattività eccitata	141
Chapter 9. Teoria dei cambiamenti successivi	156
Chapter 10. Prodotti di trasformazione di Uranio, Torio e Attinio.	166
Chapter 11. Prodotti di Trasformazione del Radio	179
Chapter 12. Tasso di emissione dell'energia	200
Chapter 13. Processi Radioattivi	209
Chapter 14. Radioattività dell'atmosfera e dei materiali ordinari	234
APPENDICE A	251
Proprietà dei raggi $\alpha$	251
APPENDICE B	257
Minerali radioattivi	257

## SOSTANZE RADIOATTIVE

### 1. Introduzione.

La fine del vecchio secolo e l'inizio del nuovo sono stati caratterizzati da un aumento molto rapido della nostra conoscenza di quegli aspetti molto importanti ma in compenso poco noti - il collegamento tra elettricità e materia. Nessuno studio è stato più ricco di sorprese, sia per l'importante natura dei fenomeni scoperti sia per le leggi che li caratterizzano. Più si studia l'argomento, più complessa deve essere ipotizzata la struttura della materia per poter spiegare gli effetti osservati. Mentre i risultati sperimentali hanno condotto all'idea che la costituzione dello stesso atomo sia assai complessa, allo stesso tempo hanno confermato la vecchia teoria di una struttura atomica o discontinua della materia. Lo studio delle sostanze radioattive e della scarica elettrica nei gas ha fornito numerose prove sperimentali a sostegno delle idee fondamentali della teoria atomica. Ha pure indicato che lo stesso atomo non è la più piccola unità di materia, ma che è una complessa struttura composta di un certo numero di corpi più piccoli.

Un grande slancio allo studio di questo tema fu inizialmente dato dagli esperimenti di Lenard sui raggi catodici, e dalla scoperta di Röntgen dei raggi X. Un esame della conduttività prodotta nei gas dai raggi X ha portato ad una chiara immagine del meccanismo di trasporto della elettricità attraverso i gas tramite ioni carichi. Questa teoria della ionizzazione dei gas ha spiegato in modo soddisfacente non solo il passaggio di elettricità attraverso fiamme e vapori, ma anche i complessi fenomeni osservati quando una scarica elettrica passa in un tubo a vuoto. Nello stesso tempo, uno studio ulteriore dei raggi catodici ha mostrato che essi consistevano di un fascio di particelle materiali, dotate di grande velocità e di una massa apparentemente piccola rispetto a quella dell'atomo di idrogeno. È stato pure chiarito il legame tra i raggi catodici e quelli di Röntgen e la natura di questi ultimi. Molti di questi pregevoli lavori sperimentali sulla natura della carica elettrica sono stati proposti dal Professor J. J. Thomson e dai suoi studenti nel Cavendish Laboratory di Cambridge.

Un esame delle sostanze naturali per vedere se esse producono radiazioni oscure simili ai raggi X, portò alla scoperta dei corpi radioattivi che possiedono la proprietà di emettere radiazioni spontaneamente, invisibili agli occhi, ma rivelabili per la loro azione su lastre fotografiche e la loro capacità di scaricare corpi elettricamente carichi. Uno studio dettagliato dei corpi radioattivi ha rivelato molti nuovi e sorprendenti fenomeni che hanno fatto molta più luce, non solo sulla natura delle radiazioni stesse, ma anche sui processi che avvengono in queste sostanze. Nonostante la complessa natura dei fenomeni, la conoscenza dell'argomento è aumentata con grande rapidità, e una grande quantità di dati sperimentali è stata accumulata.

Per spiegare i fenomeni di radioattività. Rutherford e Soddy hanno proposto una teoria che considera gli atomi degli elementi radioattivi come soggetti a disintegrazioni spontanee che producono una serie di sostanze radioattive che differiscono per le proprietà chimiche dagli elementi genitori. Le radiazioni accompagnano la rottura degli atomi, e permettono una misura comparativa del tasso di disintegrazione. Questa teoria è fatta per tener conto in modo soddisfacente di tutti i fatti noti riguardanti la radioattività, e riunisce una serie di fatti scollegati in un insieme omogeneo. L'emissione continua di energia dai corpi attivi è derivata dall'energia interna dell'atomo, senza che ciò contraddica la conservazione dell'energia. Allo stesso tempo, indica che negli atomi stessi si trova un'enorme riserva di energia latente. Questa riserva di energia non è stata in precedenza osservata, a causa dell'impossibilità di dividere in forme più semplici gli atomi degli elementi mediante l'intervento di forze fisiche e chimiche a nostra disposizione.

Alla luce di questa teoria, abbiamo assistito nei corpi radioattivi ad una reale trasformazione di materia. Questo processo di disintegrazione è stato investigato, non con metodi chimici diretti, ma per mezzo delle proprietà dei corpi radioattivi nel produrre specifici tipi di radiazione. Tranne il caso di un elemento molto attivo come il radio, il processo di disintegrazione avviene così lentamente, che centinaia se non migliaia di anni sono necessari prima che la quantità trasformata possa essere rivelata degli strumenti. Nel radio, tuttavia, il processo di disintegrazione avviene ad un ritmo tale che dovrebbe essere possibile entro un limitato intervallo di tempo ottenere chiare evidenze chimiche di tale trasformazione. La recente scoperta che l'elio può essere ottenuto dal radio aggiunge una forte conferma alla teoria; l'elio fu indicato come un probabile prodotto di disintegrazione degli elementi radioattivi prima che si ottenesse una tale evidenza sperimentale. Numerosi prodotti di disintegrazione dei corpi radioattivi sono già stati esaminati, e ulteriori studi di queste sostanze promettono di aprire nuovi e importanti campi di indagine chimica.

In questo libro i fatti sperimentali della radioattività e le connessioni tra di essi sono interpretati nell'ambito della teoria della disintegrazione. Molti dei fenomeni osservati si possono investigare in modo quantitativo, ed è stata data importanza alla ricerca dell'accordo tra teoria e fatti da spiegare, ricerca che deve dipendere in ultima analisi dai risultati di accurate misure sperimentali.

Il valore di ogni lavoro teorico dipende dal numero di fatti sperimentali che è in grado di correlare, e dalla sua capacità di suggerire nuove linee di indagine. In questo ambito, la teoria della disintegrazione, sia che venga dimostrata corretta oppure no, ha già trovato giustificazione nei risultati che ha fornito.

**2. Sostanze radioattive.** Il termine “radioattivo” è ora generalmente applicato ad una classe di sostanze, come uranio, torio, radio e suoi composti, che possiedono la proprietà di emettere *spontaneamente* radiazioni capaci di passare attraverso lastre di metallo o altri corpi opachi alla luce ordinaria. La proprietà caratteristica di questa radiazione, oltre al suo potere di penetrazione, consiste nell’azione sulle lastre fotografiche e nella sua capacità di scaricare corpi elettrizzati. Inoltre, un corpo fortemente radioattivo come il radio è in grado di causare evidenti fosforescenze e fluorescenze su altre sostanze poste nelle sue vicinanze. Le radiazioni possiedono proprietà analoghe ai raggi Röntgen, ma mostreremo che, per la maggior parte delle radiazioni emesse, la somiglianza è solo superficiale.

La proprietà più significativa dei corpi radioattivi è il loro potere di irradiare energia spontaneamente e con continuità ad un tasso costante, senza nessuna azione esterna su di essi. I fenomeni, a prima vista, appaiono essere in diretta contraddizione con la legge di conservazione dell’energia, poiché non avviene alcun evidente cambiamento nel materiale irraggiante. Essi appaiono ancora più significativi quando si considera che i corpi radioattivi devono aver irradiato energia con continuità dal tempo della loro formazione nella crosta terrestre.

Immediatamente dopo la scoperta di Röntgen della produzione di raggi X, numerosi fisici hanno esaminato la possibilità che ogni corpo naturale possieda la proprietà di emettere radiazioni capaci di penetrare metalli e altre sostanze opache alla luce. Come la produzione di raggi X appariva legata in qualche modo con i raggi catodici, che causano forti effetti di fluorescenza e fosforescenza su vari corpi, anche le sostanze prima esaminate mostravano fenomeni di fosforescenza se esposte alla luce. La prima osservazione in questa direzione fu fatta da Niewenglowski<sup>1</sup>, il quale scoprì che il solfuro di calcio esposto ai raggi solari emetteva raggi in grado di passare attraverso fogli di carta nera. Un ulteriore risultato simile fu registrato da H. Becquerel<sup>2</sup> con una speciale preparazione di solfuro di calcio, e da Troost<sup>3</sup> per un campione di blenda esagonale. Questi risultati furono confermati ed estesi in un successivo articolo da Arnold<sup>4</sup>. Nessuna spiegazione soddisfacente di tali risultati a volte dubbi è stata fino ad allora data, tranne l’osservazione che la carta nera era trasparente ad alcune delle onde luminose. Nello stesso tempo Le Bon<sup>5</sup> mostrò che, per effetto della luce solare su certi corpi, era emessa una radiazione, invisibile agli occhi, ma attiva su una lastra fotografica. Questi risultati sono stati oggetto di molte discussioni; sembravano esserci pochi dubbi che gli effetti fossero dovuti alla luce ultravioletta di corta lunghezza d’onda, in grado di attraversare alcune sostanze opache alla luce visibile. Questi effetti, pur interessanti in sé, sono del tutto distinti per caratteristica da quelli mostrati dai corpi radioattivi che ora considereremo.

**3. Uranio.** La prima importante scoperta nell’ambito della radioattività fu fatta nel febbraio 1896 da M. Henri Becquerel<sup>6</sup>, il quale scoprì che un sale di uranio, il bisolfato di uranio e potassio, emetteva alcuni raggi che impressionavano una lastra fotografica avvolta da una carta nera. Questi raggi potevano passare attraverso sottili lastre di metallo e di altre sostanze opache alla luce. L’immagine sulla lastra non era dovuta ai vapori prodotti da tali sostanze, poiché lo stesso effetto era prodotto con il sale posto direttamente sulla carta nera o su una sottile lastra di vetro appoggiata sopra di esso.

Becquerel trovò poi che tutti i composti dell’uranio, compreso lo stesso metallo, possedevano la stessa proprietà, e, sebbene l’effetto variasse leggermente tra i diversi composti, era in ogni caso confrontabile. Fu naturale supporre inizialmente che l’emissione di questi raggi fosse in qualche modo connessa con il potere della fosforescenza, ma ulteriori osservazioni mostrarono che non vi era connessione tra questi due fenomeni. I sali uranici sono fosforescenti, mentre l’uranio puro no. I sali uranici, se esposti alla luce ultravioletta nel fosforoscopio, producono una luce fosforescente che dura 0,1 s. Quando i sali sono sciolti in acqua, la durata si riduce ulteriormente. L’effetto sulla lastra fotografica non dipende dal particolare composto di uranio impiegato, ma solo dalla quantità di uranio presente in quel composto. I non fosforescenti sono ugualmente attivi come i composti fosforescenti. La quantità di radiazione emessa è invariata se il corpo attivo è mantenuto continuamente al buio. I raggi sono emessi da soluzioni, e da cristalli che sono stati depositati da soluzioni al buio e poi esposti alla luce. Ciò mostra che la radiazione non può essere dovuta in ogni modo alla graduale emissione di energia accumulata nel cristallo in conseguenza di una esposizione ad una sorgente luminosa.

**4.** La capacità di emettere raggi penetranti sembra essere una proprietà specifica dell’elemento uranio, poiché è presente nel metallo e in tutti i suoi composti. Queste radiazioni dall’uranio sono persistenti, e, come mostrato dalle osservazioni, invariabili, sia in intensità sia in caratteristiche, nel tempo. Osservazioni per testare la costanza delle radiazioni su lunghi periodi di tempo sono state eseguite da Becquerel. Campioni di sali uranici e uraniosi sono stati tenuti in una doppia scatola di piombo spesso, e il tutto è stato preservato dall’esposizione luminosa. Con un semplice dispositivo, è stata introdotta una lastra fotografica in una precisa posizione sopra i sali di uranio, che erano ricoperti con

<sup>1</sup>Niewenglowski, C. R. 122, p. 385, 1896.

<sup>2</sup>Becquerel, C. R. 122, p. 559, 1896.

<sup>3</sup>Troost, C. R. 122, p. 564, 1896.

<sup>4</sup>Arnold, Annual. d. Phys. 61, p. 316, 1897.

<sup>5</sup>Le Bon, C. R. 122, pp. 188, 233, 386, 462, 1896.

<sup>6</sup>Becquerel, C. R. 122, p. 420, 501, 559, 689, 762, 1086, 1896.

uno strato di carta nera. La lastra era esposta ad intervalli di 48 ore, e le immagini ottenute furono confrontate. Nessun indebolimento percettibile della radiazione è stato osservato per un periodo di quattro anni. Madame Curie<sup>7</sup> ha effettuato misure dell'attività dell'uranio per cinque anni con un metodo elettrico, descritto in seguito, ma non ha trovato variazioni apprezzabili in questo arco di tempo.

Poiché l'uranio irradia continuamente energia, senza una sorgente di eccitazione nota, la questione che si apre è se un agente noto è in grado di garantire il tasso della sua emissione. Nessuna alterazione è stata osservata quando il corpo è stato esposto alla luce ultravioletta o infrarossa o ai raggi X. Becquerel affermò che il bisolfato di uranio e potassio mostrava un debole aumento dell'attività se esposto all'arco di luce e alla scintilla, ma considerò che il debole effetto osservato fosse un'altra azione sovrapposta alla radiazione costante proveniente dall'uranio. L'intensità della radiazione dell'uranio non è modificata da una variazione di temperatura tra 200° e la temperatura dell'aria liquida. Questa questione è discussa con maggiore dettaglio nel seguito.

**5.** Oltre a questa azione su una lastra fotografica, Becquerel mostrò che i raggi dell'uranio, come i raggi Röntgen, possiedono l'importante proprietà di scaricare sia i corpi carichi positivamente sia negativamente. Questi risultati furono confermati ed estesi da Lord Kelvin, Smolan e Beattie<sup>8</sup>. L'autore fece un dettagliato confronto<sup>9</sup> tra la scarica prodotta dall'uranio e quella prodotta dai raggi Röntgen, e mostrò che la proprietà dell'uranio è dovuta alla produzione di ioni carichi da parte delle radiazioni nel volume del gas. La proprietà è stata posta alla base di un esame quantitativo e qualitativo delle radiazioni per tutti i corpi radioattivi, ed è discussa in dettaglio nel capitolo II.

Le radiazioni dall'uranio sono allora analoghe, rispetto alle loro azioni fotografiche ed elettriche, ai raggi Röntgen, ma, rispetto ai raggi da un comune tubo X, queste sono estremamente deboli. Mentre con i raggi Röntgen si produce una forte immagine su una lastra fotografica in qualche minuto o anche secondo, sono necessari molti giorni di esposizione ai raggi dell'uranio per produrre un effetto evidente, anche se il composto d'uranio, avvolto in carta nera, è posto vicino alla lastra. L'azione di scarica, mentre era facilmente misurabile con i metodi opportuni, è piccolo rispetto a quello dei raggi X da un tubo ordinario.

**6.** I raggi dall'uranio non mostrano alcuna evidenza di riflessione, rifrazione e polarizzazione diretta<sup>10</sup>. Se non vi è una diretta riflessione dei raggi, vi è in apparenza una diffusione dove i raggi incontrano un ostacolo solido. Ciò è dovuto in realtà ad una radiazione secondaria generata nell'urto con la materia. La presenza di questa radiazione secondaria all'inizio genera l'erronea idea che i raggi possano essere riflessi e rifratti come la luce ordinaria. L'assenza di riflessione, rifrazione o polarizzazione nei raggi penetranti dell'uranio deriva necessariamente dalle attuali conoscenze degli stessi. È ora noto che i raggi dell'uranio, responsabili soprattutto dell'azione sulle lastre fotografiche, sono deviabili da un campo magnetico, e sono simili in tutto ai raggi catodici, cioè, i raggi sono composti da piccole particelle sparate a grandi velocità. L'assenza delle proprietà ordinarie delle onde luminose trasversali è quindi preventivabile.

**7.** I raggi dell'uranio hanno caratteristiche complesse e, oltre ai raggi penetranti deviabili, vi è anche una radiazione molto facilmente assorbibile nel passaggio attraverso strati sottili di fogli metallici, o in qualche centimetro d'aria. L'azione fotografica dovuta a questi raggi è molto debole rispetto a quella dei raggi penetranti, sebbene la scarica dei corpi elettrici sia causata principalmente da questi. Oltre a questi due tipi di raggi, ve ne sono alcuni particolarmente penetranti e non deviati da un campo magnetico. Questi sono difficili da rilevare per via fotografica, ma possono facilmente essere esaminati con il metodo elettrico.

**8.** Si presenta naturalmente la questione se la proprietà di emettere spontaneamente radiazioni penetranti sia confinata al solo uranio e ai suoi composti o se possa essere estesa anche ad altre sostanze.

Con il metodo elettrico, con un elettrometro di sensibilità ordinaria, si può rivelare l'attività di ogni corpo dell'ordine di 1/100 di quella dell'uranio. Con un elettroscopio speciale, come per esempio quello costruito da C.T.R. Wilson proprio per esperienze di naturale ionizzazione dell'aria, si può rivelare una sostanza di attività 1/10000 e probabilmente 1/100000 di quella dell'uranio.

Se un corpo attivo come l'uranio è mescolato con uno inattivo, l'attività risultante nella miscela è generalmente assai minore rispetto alla sola sostanza. Ciò è dovuto all'assorbimento della radiazione da parte della materia inattiva presente. Il valore della riduzione dipende in larga parte dallo spessore dello strato dal quale l'attività è determinata.

Madame Curie ha fatto un esame dettagliato con il metodo elettrico della maggior parte delle sostanze note, inclusi molti elementi assai rari, per vedere se possedevano un'attività. Nei casi in cui era possibile, furono esaminati anche numerosi composti degli elementi. Con l'eccezione del torio e del fosforo, nessuna delle altre sostanze possedeva un'attività dell'ordine di 1/100 dell'uranio.

<sup>7</sup>Madame Curie, Tesi presentato alla Facoltà di Scienze di Parigi, 1903.

<sup>8</sup>Nature, 56, 1897; Phil. Mag. 43, p. 418, 1897; 45, p. 277, 1898.

<sup>9</sup>Rutherford, Phil. Mag. Gennaio 1899.

<sup>10</sup>Ibid.

La ionizzazione del gas da parte del fosforo non sembra, tuttavia, essere dovuta alla radiazione penetrante del tipo di quella trovata per l'uranio, ma piuttosto ad una azione chimica che avviene alla sua superficie. I composti del fosforo non mostrano alcuna attività, e a tale riguardo differiscono dall'uranio e dagli altri corpi attivi.

Le Bon<sup>11</sup> ha pure osservato che il solfato di chinino, se riscaldato e poi raffreddato, possiede per un breve tempo la proprietà di scaricare i corpi carichi sia positivamente sia negativamente. È necessario, tuttavia, tracciare una netta linea di distinzione tra i fenomeni di questo tipo e quelli mostrati dai corpi naturalmente radioattivi. Mentre entrambi, in particolari condizioni, possiedono la proprietà di ionizzare il gas, le leggi che controllano i fenomeni sono completamente distinte nei due casi. Per esempio, solo un composto del chinino mostra la proprietà e solo quando è preliminarmente riscaldato. L'azione del fosforo dipende dalla natura del gas, e varia con la temperatura. D'altro canto, l'attività dei corpi naturalmente radioattivi è spontanea e permanente. È mostrata da tutti i componenti, e non è alterata dal mutamento delle condizioni chimiche o fisiche.

**9.** I soli effetti di scarica e fotografico non possono essere presi come un criterio per stabilire se una sostanza è o meno radioattiva. È necessario inoltre esaminare le radiazioni, e testare se gli effetti hanno luogo attraverso apprezzabili spessori di tutti i tipi di materiali opachi alla luce ordinaria. Per esempio, un corpo che emette onde nell'ultravioletto può per alcuni aspetti essere assimilato ai corpi radioattivi. Come ha mostrato Lenard<sup>12</sup>, la luce nel corto ultravioletto ionizzerà il gas nel suo cammino, e sarà assorbita rapidamente. Produrrà un forte effetto fotografico, e potrà passare attraverso alcune sostanze opache alla luce visibile. La somiglianza con i corpi radioattivi è allora abbastanza completa rispetto a queste proprietà. D'altro canto, l'emissione di queste onde luminose, diversamente da quelle delle radiazioni dai corpi attivi, dipenderà in larga parte dallo stato molecolare dei composti, o dalla temperatura e da altre condizioni fisiche. Ma il grande elemento di distinzione si trova nella natura delle radiazioni dai corpi in questione. In un caso le radiazioni si comportano come onde trasversali, che obbediscono alle usuali leggi delle onde luminose, mentre nel caso di corpi naturalmente attivi, esse consistono per la maggior parte di uno sciame di particelle materiali proiettate a grande velocità. Prima che una sostanza sia chiamata radioattiva, nel senso in cui il termine è usato per descrivere le proprietà degli elementi naturalmente radioattivi, è necessario analizzare la sua radiazione; è pertanto sconsigliabile estendere l'uso del termine "radioattivo" alle sostanze che non possiedono la caratteristica proprietà di irradiare degli elementi radioattivi che abbiamo descritto, e i prodotti attivi che da essi possono essere ottenuti. Alcuni dei corpi pseudo-attivi saranno tuttavia considerati in seguito nel capitolo IX.

**10. Il Torio.** Nel corso dell'esame di un grande numero di sostanze, Schmidt<sup>13</sup> trovò che il torio, i suoi composti, e i minerali contenenti torio, possiedono proprietà simili a quelle dell'uranio. La stessa scoperta fu fatta indipendentemente da Madame Curie<sup>14</sup>. I raggi dai composti del torio, come quelli dell'uranio, possiedono la proprietà di scaricare corpi elettrizzati e di agire su lastre fotografiche. Nelle stesse condizioni l'azione di scarica dei raggi è circa uguale in quantità a quella dell'uranio, ma l'effetto fotografico è decisamente inferiore.

Le radiazioni dal torio sono più complesse di quelle dall'uranio. Fu inizialmente osservato da numerosi sperimentatori che la radiazione dai composti del torio, specialmente l'ossido, se analizzata con il metodo elettrico, era molto variabile e incerta. Una ricerca dettagliata delle radiazioni dal torio in varie condizioni fu compiuta da Owens<sup>15</sup>. Egli mostrò che l'ossido di torio, specialmente in strati sottili, era in grado di produrre conduttività nel gas se ricoperto con un largo spessore di carta, e che il valore di tale conduttività poteva variare molto soffiando una corrente d'aria sul gas. Nel corso di un esame<sup>16</sup> di questa azione dell'aria corrente, l'autore mostrò che i composti del torio producevano una emanazione materiale composta di particelle molto piccole *esse stesse radioattive*. L'emanazione si comporta come un gas radioattivo; si diffonde rapidamente attraverso sostanze porose come la carta ed è trasportata da una corrente d'aria. L'evidenza dell'esistenza dell'emanazione e delle sue proprietà, è considerata nel dettaglio nel capitolo VIII. Oltre a produrre emanazione, il torio si comporta come l'uranio emettendo tre tipi di radiazioni, ognuna delle quali con proprietà simili alla corrispondente radiazione dell'uranio.

**11. Minerali radioattivi.** Madame Curie ha esaminato la radioattività di un grande numero di minerali contenenti uranio e torio. Il metodo usato era quello elettrico e la corrente era misurata tra due piastre parallele del diametro di 8 *cm* e distanti 3 *cm*, una delle quali piastra era ricoperta con uno strato uniforme di materia attiva. I valori seguenti danno l'ordine della corrente di saturazione ottenuta in ampere.

<sup>11</sup>Le Bon, C. R. 130, p. 891, 1900.

<sup>12</sup>Lenard, Annal. d. Phys. 1, p. 498; 3, p. 298, 1900.

<sup>13</sup>Schmidt, Annal. d. Phys. 65, p. 141, 1898.

<sup>14</sup>Madame Curie, C. R. 126, p. 1101, 1898.

<sup>15</sup>Owens, Phil. Mag. Ottobre 1899.

<sup>16</sup>Rutherford, Phil. Mag. Gennaio 1900.

	$i \times 10^{-11}$
Pechblenda da Johanngeorgenstadt	8.3
Pechblenda da Joachimstahl	7.0
Pechblenda da Pzibran	6.5
Pechblenda da Cornwall	1.6
Clevite	1.4
Calcolite	5.2
Autunite	2.7
Torite	da 0.3 a 1.4
Orangite	2.0
Monazite	0.5
Xenotime	0.03
Aschenite	0.7
Fergusonite	0.4
Samarskite	1.1
Niobite	0.3
Carnotite	6.2

Ci si deve aspettare qualche attività in questi materiali, poiché tutti contengono torio o uranio o entrambi. Un esame dell'azione dei composti dell'uranio con lo stesso apparato e nelle stesse condizioni porta ai seguenti risultati

	$i \times 10^{-11}$ ampere
Uranio (con un poco di carbonio)	2.3
Ossido di uranio nero	2.6
Ossido di uranio verde	1.8
Acido Idrato di uranio	0.6
Uranato di sodio	1.2
Uranato di potassio	1.2
Uranato di ammonio	1.3
Solfato uranoso	0.7
Solfato di uranio e potassio	0.7
Acetato di uranio e potassio	0.7
Fosfato di rame e uranio	0.9
Oxisolfato di uranio	1.2

L'aspetto interessante di questi risultati è che alcuni campioni di pechblenda hanno un'attività quadrupla di quella dell'uranio metallico; per la calcolite, il fosfato cristallizzato di rame e uranio è doppia dell'uranio; per l'autunite, un fosfato di calcio e uranio, è pari all'uranio. Dalle precedenti considerazioni, nessuna delle sostanze dovrebbe mostrare più attività di quella dell'uranio e del torio. Per assicurarsi che la grande attività non fosse dovuta alla particolare composizione chimica, Madame Curie preparò della calcolite artificialmente, partendo dai prodotti puri. Questa calcolite artificiale aveva l'attività attesa dai suoi composti, cioè circa 0.4 dell'attività dell'uranio. Il minerale naturale della calcolite è allora cinque volte più attivo di quello artificiale.

Sembrava, pertanto, probabile che la grande attività di alcuni di questi minerali, confrontata con l'uranio e il torio, fosse dovuta alla presenza di piccole quantità di alcune sostanze molto attive, diverse da torio e uranio.

Questa ipotesi venne completamente verificata dal lavoro dei coniugi Curie, che furono in grado di separare dalla pechblenda, con metodi chimici di purificazione, due sostanze attive, una delle quali allo stato puro era oltre un milione di volte più attiva dell'uranio metallico.

Questa importante scoperta fu dovuta interamente alla proprietà della radioattività posseduta dai due corpi. La sola guida nella separazione fu l'attività dei prodotti ottenuti. La scoperta di questi elementi è del tutto analoga a quella degli elementi rari con il metodo dell'analisi spettrale. Il metodo impiegato nella separazione consisteva nell'esaminare l'attività relativa dei prodotti dopo il trattamento chimico. In questo modo si vedeva se la radioattività era confinata a uno o all'altro dei prodotti, o divisa tra entrambi, e in quale rapporto fosse.

L'attività dei campioni servì quindi come base per approssimative analisi qualitative e quantitative, analoghe per certi aspetti all'indicazione dello spettroscopio. Per ottenere dati confrontabili era necessario testare tutti i prodotti allo stato secco. La principale difficoltà consisteva nel fatto che la pechblenda è un minerale complesso e contiene in varie quantità quasi tutti i metalli noti.

**12. Radio.** L'analisi delle pechblenda con i metodi chimici, usando la procedura sopra schematizzata, portò alla scoperta di due sostanze molto attive, il polonio e il radio. Il nome polonio fu dato al primo elemento scoperto da Madame Curie in onore del suo paese di origine. Il nome radio fu un ispiratore delle scoperte per il fatto di possedere allo stato puro la radioattività ad un livello straordinario.

Il radio è estratto dalla pechblenda con il procedimento usato per separare il bario, che è accomunato al radio per le proprietà chimiche<sup>17</sup>. Dopo aver rimosso gli altri elementi, rimane il radio mescolato con il bario. Possono, tuttavia, essere parzialmente separati con il metodo della cristallizzazione frazionata. Dopo un grande numero di precipitazioni, il radio può essere liberato quasi completamente dal bario.

Sia il polonio che il radio sono presenti in quantità infinitesimali nella pechblenda. Per ottenere qualche decigrammo di radio molto attivo, è necessario usare parecchie tonnellate di pechblenda, o i residui ottenuti dal trattamento dei minerali di uranio. È ovvio che la spesa e il lavoro necessari alla preparazione di una piccola quantità di radio sono molto grandi.

M. e M.me Curie si indebitarono per la loro prima lavorazione del materiale con il governo austriaco, che aveva donato loro una tonnellata di residui dei minerali di uranio provenienti dall'industria di Stato di Joachimsthal in Boemia. Con l'aiuto dell'Accademia delle Scienze e di altre società francesi, furono assegnati capitali per affrontare il laborioso impegno della separazione. Ai Curie fu poi assegnata una tonnellata di residui dal trattamento della pechblenda da parte della Società Centrale dei Prodotti Chimici di Parigi. Il generoso aiuto fornito in questo importante lavoro fu un segno dell'interesse cresciuto in questi stati per le ricerche di scienza pura.

La concentrazione e separazione dei residui venne fatta in modo chimico, e richiese una grande quantità di lavoro in purificazione e concentrazione. In questo modo, i Curie seppero ottenere una piccola quantità di radio che era enormemente attiva se paragonata all'uranio. Risultati non definitivi sono ora stati dati sull'attività del radio puro, ma i Curie stimano che sia intorno al milione di volte quella dell'uranio, e forse anche di più. La difficoltà di effettuare una stima numerica per corpi attivi di tale intensità è molto grande. Nel metodo elettrico, le attività sono confrontate annotando l'intensità relativa del massimo o corrente di saturazione tra due piatti paralleli, su uno dei quali è distribuita la sostanza attiva. A causa dell'intensa ionizzazione del gas tra i piatti, non è possibile raggiungere la corrente di saturazione se non applicando tensioni molto alte. Confronti approssimati si possono fare utilizzando schermi metallici per ridurre l'intensità della radiazione, se la parte di radiazione trasmessa da tali schermi è stata determinata con esperienze dirette sul materiale impuro di cui è facile misurare l'attività. Il valore dell'attività del radio confrontato con quello dell'uranio variava tuttavia ampiamente a secondo di quale dei tre tipi di raggi presi come riferimento.

È inoltre difficile controllare gli stadi finali della purificazione del radio misurando la sola attività. In più l'attività del radio immediatamente dopo la sua preparazione è solo circa un quarto del suo valore finale; risale poi gradualmente fino a un massimo dopo che il sale di radio è stato lasciato in uno stato essiccato per circa un mese. Per esperimenti di controllo della purificazione, è consigliabile misurare l'attività iniziale piuttosto che quella finale.

Madame Curie ha utilizzato la colorazione dei cristalli di bario radifero per controllare il processo finale di purificazione. I cristalli di sali di radio e bario depositati dalle soluzioni acide sono indistinguibili ad occhio. I cristalli di bario radifero sono inizialmente senza colore, ma, dopo poche ore, diventano gialli, passando poi all'arancio e a volte al rosso. La rapidità di questa colorazione dipende dalla quantità di bario presente. Cristalli di radio puro non sono colorati, o quanto meno non si colorano così rapidamente come il bario. La colorazione ha un massimo per una data proporzione di radio, e ciò può essere utilizzato per testare la quantità di bario presente. Quando i cristalli sono disciolti in acqua la colorazione scompare.

Giesel<sup>18</sup> ha osservato che il bromuro di radio puro presenta un bel colore carminio alla fiamma Bunsen. Se il bario è presente in una certa quantità, si osserva solo il colore verde dovuto al bario, ed un esame spettroscopico mostra solo le righe del bario. Questa colorazione carminio della fiamma Bunsen è un buon indicatore della purezza del radio.

Dall'annuncio iniziale della scoperta del radio, Giesel<sup>19</sup> si è fortemente impegnato nella separazione di radio, polonio e altre sostanze attive dalla pechblenda. È debitore per questo lavoro materiale alla ditta del P. de Haen di Hannover, che gli diede una tonnellata di residui di pechblenda. Usando il metodo della cristallizzazione frazionata del bromuro invece che del cloruro, fu in grado di preparare considerevoli quantità di radio puro. In questo modo è stata meglio raggiunta la purificazione finale del radio. Affermò che sei o otto cristallizzazioni con il bromuro sono sufficienti per liberare quasi completamente il radio dal bario.

**13. Spettro del radio.** È stato di grande importanza stabilire nel miglior modo possibile se il radio fosse in realtà bario modificato o un nuovo elemento con uno spettro definito. A questo scopo i Curie prepararono alcuni campioni di cloruro di radio e li sottoposero all'esame del loro spettro a Demarçay, un'autorità a tale riguardo. Il primo campione di cloruro di radio esaminato da Demarçay<sup>20</sup> non era molto attivo, ma oltre alla linee del bario, era presente una nuova riga molto intensa nell'ultravioletto. In un altro campione di maggiore attività, la linea era ancora più intensa e ne comparivano altre, mentre l'intensità delle nuove righe era paragonabile a quelle dovute al bario. Con un campione di ancora maggiore attività che era probabilmente anche più puro, apparivano solo tre righe del bario, mentre il nuovo spettro era molto brillante. La tabella seguente mostra la lunghezza d'onda delle nuove righe osservate per il radio. Le lunghezze d'onda sono espresse in Ångstrom e l'intensità di ogni riga è indicata con un numero, dove con 16 è indicata intensità massima.

<sup>17</sup>M. e M.me Curie e G. Bemont, C. R. 127, p. 1215, 1898.

<sup>18</sup>Giesel, Phys. Zeit. 8. No. 24 p. 578, 1902.

<sup>19</sup>Giesel, Annal. d. Phys. 69, p. 91, 1890. Ber. D. Chem. Gen. p. 3608, 1902.

<sup>20</sup>Demarçay, C. R, p. 1218, 1898; p. 716, 1899; p. 258, 1900.

Lunghezza d'onda	Intensità	Lunghezza d'onda	Intensità
4826,3	10	4600,3	3
4726,9	5	4533,5	9
4699,6	3	4436,1	6
4692,1	7	4340,6	12
4683,0	14	3814,7	16
4641,9	4	3649,6	12

Le righe sono tutte strettamente definite e tre o quattro di esse hanno un'intensità non confrontabile con alcuna riga nota di altri elementi. Vi sono pure nello spettro due forti bande indistinte. Nella parte visibile dello spettro, che non è stato fotografato, la sola riga evidente ha una lunghezza d'onda di 5665, che è, tuttavia, molto debole se confrontata con quella di lunghezza d'onda 4826,3. L'aspetto generale dello spettro è simile a quello delle terre alcaline; è noto che questi metalli hanno forti righe accompagnate da bande indistinte.

La riga principale dovuta al radio può essere distinta nel radio impuro di attività 50 volte quella dell'uranio. Con il metodo elettrico è facile distinguere la presenza di radio in un corpo che ha un'attività di solo  $\frac{1}{100}$  dell'uranio. Con un elettrometro più sensibile si può arrivare a  $\frac{1}{10000}$  dell'attività dell'uranio. Per la rivelazione del radio, l'esame della radioattività è quindi un processo quasi un milione di volte più sensibile dell'analisi spettrale.

Le ultime osservazioni sullo spettro del radio sono state fatte da Runge<sup>21</sup>, Exner e Haschek<sup>22</sup>, con campioni di radio preparati da Giesel. Crookes<sup>23</sup> ha fotografato lo spettro del radio nell'ultravioletto, mentre Runge e Precht<sup>24</sup>, usando un campione di radio altamente purificato, ha osservato un numero di nuove righe nello spettro a scintilla. È già stato ricordato che il bromuro di radio produce una colorazione caratteristica rosso carminio alla fiamma Bunsen. Lo spettro alla fiamma mostra due ampie bande brillanti nel rosso-arancio, non osservate nello spettro di Demarçay. In aggiunta vi è una riga nel blu-verde e due righe deboli nel violetto.

**14. Peso atomico del radio.** Madame Curie ha effettuato successive determinazioni del peso atomico del nuovo elemento con campioni di purezza crescente. Nella prima osservazione il radio era molto mescolato con il bario, e il peso atomico ottenuto era lo stesso del bario, 137,5. Nelle successive osservazioni con campioni sempre più puri, i pesi atomici delle miscele andavano da 146 a 175. Il valore finale ottenuto recentemente era 225, che può essere preso come il peso atomico del radio nell'assunzione che sia bivalente.

In questi esperimenti circa 0.1 g di cloruro di radio puro veniva ottenuto tramite successivi frazionamenti. La difficoltà nella preparazione di una quantità sufficientemente grande di cloruro di radio puro per valutare il peso atomico può essere valutata dal fatto che solo pochi centigrammi di radio abbastanza puro, o pochi decigrammi di materiale meno concentrato, sono ottenibili dal trattamento di circa 2 ton di minerale.

Runge e Precht<sup>25</sup> hanno esaminato lo spettro del radio in un campo magnetico, e hanno mostrato l'esistenza di serie analoghe a quelle osservate per calcio, bario e stronzio. Queste serie sono connesse con i pesi atomici degli elementi in questione, e Runge e Precht hanno calcolato in questo modo che il peso atomico del radio dovrebbe essere 258, un valore considerevolmente maggiore del valore 225 ottenuto da M.me Curie con l'analisi chimica. Marshall Watts<sup>26</sup> usando un'altra relazione tra le righe spettrali, ha dedotto il valore ottenuto da M.me Curie. Runge<sup>27</sup> ha criticato il metodo di deduzione impiegato da Marshall Watts poiché le righe usate per il confronto dei diversi spettri non erano omologhe. Considerando che il valore trovato da M.me Curie è in accordo con quello richiesto dal sistema periodico, è opportuno per le conoscenze attuali accettare il valore sperimentale piuttosto che quello dedotto da Runge e Precht dall'evidenza spettroscopica.

Non vi è dubbio che il radio è un nuovo elemento che possiede significative proprietà fisiche. La rivelazione e separazione di questo elemento, esistente in minuta parte nella pechblenda, è dovuta interamente alla proprietà caratteristica considerata, ed è il primo significativo trionfo dello studio della radioattività. Come vedremo più avanti, la proprietà di radioattività può essere usata, non solo come un mezzo di ricerca chimica, ma anche come un metodo straordinariamente sensibile di rivelazione di variazioni chimiche di un tipo molto speciale.

**15. Radiazioni dal radio.** Come prova di questa enorme attività, le radiazioni del radio sono molto intense: uno schermo di solfuro di zinco, posto vicino a qualche centigrammo di bromuro di radio, è illuminato fino a diventare visibile in una camera oscura, mentre si produce una fluorescenza brillante su uno schermo di cianuro di platino-bario. Un elettroscopio posto vicino al sale di radio è scaricato quasi istantaneamente, mentre una lastra fotografica è immediatamente impressionata. Ad una distanza di un metro, un giorno di esposizione ai raggi del radio produce una forte immagine. Le radiazioni dal radio sono analoghe a quelle dell'uranio e consistono di tre tipi di raggi: facilmente assorbibili, penetranti e molto penetranti. Il radio produce pure una emanazione simile a quella del torio, ma con un tasso di decadimento molto

<sup>21</sup>Runge, *Astrophys. Journal*, p. 1, 1900. *Annal. d. Phys.* No. 10, p. 407, 1908.

<sup>22</sup>Exner e Haschek, *Wien. Ber.* 4 luglio 1904

<sup>23</sup>Crookes, *Proc. Roy. Soc.* 72, p. 295, 1904.

<sup>24</sup>Runge e Precht, *Annal. d. Phys.* XIV. 2, p. 418, 1904.

<sup>25</sup>Runge e Precht, *Phil. Mag.* Aprile 1903.

<sup>26</sup>Watts, *Phil. Mag.* Luglio 1903; Agosto 1904.

<sup>27</sup>Runge, *Phil. Mag.* Dicembre 1903.

più lento. L'emanazione del radio mantiene la propria attività per parecchie settimane, mentre quella del torio si esaurisce dopo solo pochi minuti. L'emanazione ottenuta da alcuni centigrammi di radio illumina uno schermo di solfuro di zinco con grande brillantezza. I raggi molto penetranti del radio sono in grado di illuminare uno schermo per raggi X in una stanza scura, dopo il passaggio attraverso parecchi centimetri di piombo o numerosi pollici di ferro.

Così come nel caso di uranio e torio, l'azione fotografica è principalmente dovuta ai raggi penetranti o catodici. Le immagini ottenute con il radio sono molto simili a quelle ottenute con i raggi X, ma prive della nitidezza e del dettaglio di queste ultime. I raggi sono diversamente assorbiti dai diversi tipi di materia, variando l'assorbimento all'incirca con la densità. Nelle fotografie di una mano le ossa non spiccano come con i raggi X.

Curie e Laborde hanno mostrato che i composti del radio possiedono la proprietà di mantenere sempre una temperatura di parecchi gradi sopra quella dell'aria circostante. Ogni grammo di radio irradia una quantità di energia corrispondente a 100 grammo-calorie per ora. Queste e altre proprietà del radio sono discusse in dettaglio nei capitoli V e XII.

**16. Composti del radio.** Se preparati sin dall'inizio allo stato solido, tutti i sali di radio - cloruro, bromuro, acetato, solfato e carbonato - sono molto simili nell'aspetto ai corrispondenti sali di bario, ma nel tempo tendono gradualmente a colorarsi. Le proprietà chimiche dei sali di radio sono praticamente le stesse di quelle del bario, con l'eccezione che il cloruro e il bromuro di radio sono meno solubili in acqua dei corrispondenti sali di bario. Tutti i sali di radio sono naturalmente fosforescenti. La fosforescenza di preparazioni impure è in alcuni casi molto marcata.

Tutti i sali di radio possiedono la proprietà di determinare rapide colorazioni dei loro contenitori di vetro. Per materiali di debole attività il colore è di solito violetto, per quelli più attivi un giallo-bruno e infine nero.

**17. Attinio.** La scoperta del radio nella pechblenda diede un grande impulso all'esame chimico dei residui dell'uranio, e una sistematica ricerca portò alla rivelazione di parecchie nuove sostanze radioattive. Sebbene queste mostrino proprietà radioattive proprie, nessuna di esse è stata purificata a sufficienza per ottenere uno spettro come per il radio. Una delle più interessanti e importanti tra queste sostanze fu scoperta da Debierne<sup>28</sup> mentre lavorava con i residui di uranio, avuti dai coniugi Curie dal governo austriaco, e fu chiamata attinio. Questa sostanza attiva è precipitata con il gruppo del ferro, ed appare strettamente vicina per le proprietà chimiche al torio, sebbene sia molte migliaia di volte più attiva. È molto difficile separarla dal torio e dalle terre rare. Debierne ha utilizzato i seguenti metodi per una separazione parziale:

- (1) Precipitazione in soluzioni calde, poco acidulate con acido cloridrico, per eccesso di iposolfito di soda. La materia attiva è presente quasi interamente nel precipitato.
- (2) Azione dell'acido idrofluorico sugli idrati appena precipitati, e messi in sospensione in acqua. La parte disciolta è poco attiva. Con questo metodo si può separare il titanio.
- (3) Precipitazione di soluzioni nitrato neutre con acqua ossigenata. Il precipitato trasporta la sostanza attiva.
- (4) Precipitazione di solfati insolubili. Se il solfato di bario, per esempio, è precipitato nella soluzione contenente il corpo attivo, il bario trasporta la materia attiva. Il torio e l'attinio sono liberati dal bario per conversione del solfato in cloruro e precipitazione con ammoniacca.

In questo modo Debierne ha ottenuto una sostanza confrontabile per attività con il radio. La separazione, che è difficile e laboriosa, non è avvenuta in modo sufficiente per portare nuove righe nello spettro.

## 18.

Dopo gli annunci iniziali della scoperta dell'attinio, passarono numerosi anni prima che fosse pubblicato un risultato preciso da parte di Debierne. Frattanto, Giesel<sup>29</sup> aveva indipendentemente ottenuto una sostanza radioattiva dalla pechblenda che sembrava simile per molti aspetti all'attinio di Debierne.

La sostanza attiva appartiene al gruppo delle terre del cerio ed è precipitata con esso. Con una successione di operazioni chimiche, la sostanza attiva è separata mescolata con il lantanio. Seppur intensamente attiva rispetto al torio, la nuova sostanza gli assomiglia molto nelle proprietà radioattive, sebbene, dal metodo di separazione il torio non sia presente se non in minuscole quantità. Giesel per primo osservò che la sostanza produceva una emanazione radioattiva. Basandosi sull'intensità della radiazione da essa emessa, la chiamò la "sostanza emanante". Recentemente questo nome è stato cambiato in "emanium", e con questo nome sono state poste in vendita preparazioni di sostanze attiva preparate da Giesel.

Giesel trovò che l'attività di questa sostanza era permanente e sembrava aumentare durante l'intervallo di sei mesi dopo la preparazione. Sotto questo aspetto è simile ai composti del radio e l'attività del radio, misurata con il metodo elettrico, aumenta nel corso di un mese da uno a quattro volte il suo valore iniziale al momento della separazione.

Non vi sono dubbi che l'"attinio" di Debierne e l'"emanium" di Giesel contengono lo stesso costituente radioattivo e il recente lavoro<sup>30</sup> ha mostrato che essi presentano identiche proprietà radioattive. Entrambi emettono raggi facilmente assorbibili e penetranti e una caratteristica emanazione il cui tasso di decadimento è lo stesso. Il tasso di decadimento dell'emanazione è il metodo più semplice per distinguere l'attinio dal torio, che è così somigliante nelle proprietà radioattive

<sup>28</sup>Debierne, C. R. p. 593, 1899; 180, p. 206, 1900.

<sup>29</sup>Giesel, Ber. d. D. Chem. Ges. p. 3608, 1902; p. 342, 1903.

<sup>30</sup>Debierne, C. R. 139, p. 538, 1904. Miss Brooks, Phil. Mag. Settembre 1904. Giesel, Phys. Zeit. 5, p. 822, 1904. Jahrbuch. d. Radioaktivität, no. 4, p. 345, 1904.

come in quelle chimiche. L'emanazione dell'attinio perde il proprio potere radiante molto più rapidamente di quella del torio, essendo i tempi di dimezzamento nei due casi di 3.7 s e 52 s rispettivamente.

La rapida e continua emissione di questa emanazione di breve vita è la proprietà più impressionante posseduta dall'attinio. Anche in aria, gli effetti radioattivi di questa emanazione sono confinati ad una distanza di qualche centimetro dal materiale attivo, ed è in grado di diffondere a breve distanza attraverso l'aria prima di perdere il suo potere radiante. Con preparazioni molto attive di attinio, il materiale appare circondato da un alone luminoso prodotto dall'emanazione. Le radiazioni producono una forte luminosità in alcune sostanze, per esempio, solfuro di zinco, willemite e platinocianuro di bario. La luminosità è particolarmente evidente sugli schermi di solfuro di zinco. La maggior parte di questi effetti è dovuta all'emanazione, facendo dolcemente scorrere una corrente d'aria sulla sostanza, la luminosità si sposta nella direzione della corrente. Con uno schermo di solfuro di zinco, l'attinio mostra i fenomeni della "scintillazione" anche in modo più marcato del radio.

Le preparazioni di emanio sono in alcuni casi luminose, e un esame spettroscopico della luce ha mostrato righe luminose.<sup>31</sup>

La caratteristica distintiva dell'emanazione dell'attinio, così come degli altri prodotti radioattivi che produce, accoppiata con permanenza alla sua attività, rende molto probabile che l'attinio si possa dimostrare un nuovo elemento radioattivo di intensità molto elevata. Nonostante siano state ottenute preparazioni molto attive dell'attinio, non è ancora stato possibile liberarlo dalle impurità. Di conseguenza, nessuna osservazione definitiva è stata fatta sulle sue proprietà chimiche, e nessuna nuova riga spettrale è stata osservata.

Una discussione più completa delle proprietà radioattive e di altre caratteristiche dell'attinio è presentata nel prossimo capitolo.

**19. Polonio.** Il polonio è stata la prima sostanza attiva ottenuta dalla pechblenda. È stata studiata in dettaglio dalla sua scopritrice M.me Curie<sup>32</sup>. La pechblenda fu disciolta in acido con l'aggiunta di idrogeno solforato. I solfuri precipitati contenevano una sostanza attiva, che, dopo la separazione dalle impurità, risultava associata al bismuto. Questa sostanza attiva, che è stata chiamata polonio, ha proprietà così vicine a quelle del bismuto da renderne finora impossibile la separazione. Una parziale separazione del polonio può essere fatta per frazionamenti successivi mediante uno dei seguenti metodi:

- (1) Sublimazione in vuoto. Il solfuro attivo è più volatile di quello del bismuto. È depositato come una sostanza nera in quella parte del tubo dove la temperatura è tra 250° e 300° C. In questo modo si è ottenuto polonio con una attività pari a 700 volte quella dell'uranio.
- (2) Precipitazione di soluzioni di acido nitrico in acqua. Il sub-nitrato precipitato è molto più attivo della parte che rimane in soluzione.
- (3) Precipitazione con idrogeno solforato in una soluzione di acido cloridrico molto acida. I solfuri precipitati sono molto più attivi del sale che rimane in soluzione.

Per concentrare la sostanza attiva M.me Curie<sup>33</sup> ha utilizzato il secondo metodo. Il processo è, tuttavia, molto lento e noioso, e diventa anche più complicato per la tendenza al formarsi di precipitati insolubili in acidi forti o deboli. Dopo un grande numero di frazionamenti, si ottiene una piccola quantità di materia, enormemente attiva rispetto all'uranio. Esaminando la sostanza spettroscopicamente, si osservavano solo le righe del bismuto. Un esame spettroscopico del bismuto attivo da parte di Demarçay e di Runge ed Exner non ha portato alla scoperta di nuove righe. D'altro canto sir William Crookes<sup>34</sup> affermò di aver trovato una nuova riga nell'ultravioletto, mentre Berndt<sup>35</sup>, lavorando con il polonio di attività 300, osservò un gran numero di nuove righe nell'ultravioletto. Questi risultati attendono ulteriori conferme.

Il polonio preparato da M.me Curie differisce dagli altri corpi radioattivi in numerosi particolari. In primo luogo la radiazione include solo raggi molto facilmente assorbibili. I due tipi di radiazione penetranti prodotti dall'uranio, torio e radio sono assenti. In secondo luogo l'attività non rimane costante, ma diminuisce continuamente nel tempo. M.me Curie affermò che diverse preparazioni di polonio avevano a volte diversi tassi di decadimento. In alcuni casi, l'attività si dimezza in circa sei mesi e in altri in undici mesi.

**20.** La diminuzione graduale dell'attività del polonio nel tempo sembrava a prima vista differenziarlo da quelle sostanze come l'uranio e il radio, la cui attività appariva abbastanza permanente. Questa differenza nel comportamento è, tuttavia, di grado piuttosto che di tipo. Mostriamo poi che nella pechblenda è presente una serie di sostanze radioattive, la cui attività non è permanente. Il tempo di dimezzamento di tali elementi varia da pochi secondi a parecchie centinaia di anni. Infatti, questa graduale perdita di attività è una caratteristica essenziale della nostra teoria riguardante i fenomeni radioattivi. Nel caso di elementi come l'uranio e il radio, la perdita di attività è così lenta che non si è osservata alcuna alterazione significativa su un periodo di parecchi anni, ma si può dedurre teoricamente che l'attività del radio dimezzi in

<sup>31</sup>Giesel, Ber. d. D. Chem. Ges. 37, p. 1696, 1904; Hartmann, Phys. Zeit. 5, No. 18, p. 570, 1904.

<sup>32</sup>M.me Curie, C. R. 127, p. 175, 1898.

<sup>33</sup>M.me Curie, Tesi di Dottorato, Parigi, 1903.

<sup>34</sup>Crookes, Proc. Roy. Soc. Maggio, 1900.

<sup>35</sup>Berndt, Phys. Zeit. 2, p. 180, 1900.

un periodo di circa 1000 anni, mentre nel caso di una sostanza debolmente radioattiva come l'uranio, saranno necessari più di 100 milioni di anni.

È interessante qui considerare brevemente il suggerimento proposto in diversi momenti di tener conto del carattere temporaneo dell'attività del polonio. La sua associazione con il bismuto portò a vedere che il polonio non era un nuovo elemento, ma semplicemente bismuto radioattivo, cioè, bismuto che in qualche modo è stato attivato per mescolanza con sostanze radioattive. È ora noto che un corpo posto nelle vicinanze di torio o radio diviene temporaneamente attivo. La stessa azione fu supposta avere luogo quando una materia inattiva era in soluzione con una attiva. Si supponeva che la non attiva acquistasse attività per "induzione", come è chiamata, a causa del suo intimo contatto con il materiale attivo.

Il tema sarà più efficacemente discusso nel capitolo XI. Si è mostrato che il polonio, cioè il costituente radioattivo mescolato con il bismuto, è una sostanza chimica distinta che ha le proprietà chimiche del bismuto, ma possiede alcune proprietà analitiche distinte che ne permettono una parziale separazione.

Il polonio, se ottenuto allo stato puro, dovrebbe inizialmente essere centinaia di volte più attivo del radio puro. Questa attività, tuttavia, non è permanente; esso decade, dimezzandosi in circa sei mesi.

L'assenza di nuove righe nello spettro del bismuto radioattivo era attesa, perché anche nelle preparazioni di bismuto più attivo, la materia attiva è presente in proporzioni molto piccole.

**21.** La discussione sulla natura del polonio fu ripresa con la scoperta di Marckwald<sup>36</sup> che una sostanza simile al polonio può essere separata dalla pechblenda; l'attività di questa sostanza, affermò, non decade in modo apprezzabile nel tempo. Il metodo di separazione dalla soluzione di cloruro di bismuto, ottenuto dai residui dell'uranio, era molto semplice. Una verga di bismuto o antimonio, immersa in una soluzione attiva, divenne rapidamente ricoperta da un deposito nero che era fortemente attivo. Questo processo continuò finché l'intera attività fu rimossa dalla soluzione. Il deposito attivo emette solo raggi facilmente assorbibili, e in questo assomiglia al polonio di M.me Curie.

La sostanza attiva era formata principalmente di tellurio, e per questo motivo Marckwald la chiamò radio-tellurio. Nell'ultimo lavoro, tuttavia, Marckwald<sup>37</sup> ha mostrato che il costituente attivo non ha alcuna connessione con il tellurio, ma ne può sempre essere separato con un semplice processo chimico.

Per ottenere una grande quantità di sostanza attiva, furono lavorati 2000 *kg* di pechblenda. Ciò ha prodotto 6 *kg* di ossicloruro di bismuto, e da questo furono separati 1,5 *g* di radio-tellurio. Il tellurio presente fu precipitato dalla soluzione di acido cloridrico con idrocloruro di idrazina. Il tellurio precipitato mostrò anche qualche attività, ma questa fu rimossa con la ripetizione del procedimento. La materia attiva rimase nel filtrato, e, dopo l'evaporazione, l'aggiunta di qualche goccia di cloruro stannoso produsse una piccola quantità di un precipitato scuro che era intensamente attivo. Questo fu raccolto su un filtro e pesava solo 4 *mg*.

Quando piastre di rame, stagno o bismuto furono immerse in una soluzione di acido cloridrico di questa sostanza attiva, furono trovate ricoperte da un deposito molto finemente distribuito. Queste piastre erano intensamente attive, e presentavano una marcata azione fotografica e fosforescente. Per illustrare l'enorme attività di questo deposito, Marckwald affermò che un precipitato di 0.01 *mg* su una lastra di rame di 4 *cm*<sup>2</sup> di area, illuminava uno schermo di solfuro di zinco così brillantemente da poter essere visto da un uditorio di parecchie centinaia di persone.

La sostanza attiva di Marckwald è assai vicina per proprietà chimiche e radioattive al polonio di M.me Curie. Entrambe le sostanze attive sono separate con bismuto ed entrambe emettono solo raggi facilmente assorbibili. I raggi penetranti, come quelli di uranio, radio o torio, sono del tutto assenti.

C'è stata una consistente discussione sull'identità tra la sostanza di Marckwald con il polonio di M.me Curie. Marckwald affermava che la sua sostanza attiva non diminuiva sensibilmente la propria attività nel corso di sei mesi, ma vi sono dubbi sulla precisione del metodo di misura.

L'autore ha trovato che il radio-tellurio di attività moderata, preparato con il metodo di Marckwald e venduto dal Dr. Sthamer di Amburgo, senza dubbio diminuiva la propria attività nel tempo. Il radiotellurio è ottenuto sotto forma di un sottile deposito radioattivo su una sbarra lucida di bismuto o su una piastra. Una sbarra di bismuto dimezzava la propria attività in circa 150 giorni, e un simile risultato è stato ottenuto da altri osservatori.

Le due sostanze sono simili sia nelle proprietà radioattive che chimiche, e non vi sono dubbi che il costituente attivo presente in ognuna di esse sia lo stesso. L'evidenza è discussa in dettaglio nel Capitolo XI dove si mostrerà che la sostanza attiva presente nel radiotellurio di Marckwald è un prodotto a lenta trasformazione del radio.

**22. Piombo radioattivo.** Numerosi osservatori hanno evidenziato che il piombo separato dalla pechblenda mostrava forti proprietà radioattive, ma vi era una notevole differenza di opinioni riguardo alla permanenza di tale attività. Elster e Geitel<sup>38</sup> trovarono che il solfato di piombo ottenuto dalla pechblenda era molto attivo, ma considerarono che l'attività fosse probabilmente dovuta ad un mescolamento con radio o polonio e, con un opportuno trattamento chimico, lo si poteva ottenere in uno stato inattivo. Anche Giesel<sup>39</sup> preparò piombo radioattivo ma trovò che la sua attività diminuiva

<sup>36</sup>Marckwald, Phys. Zeit. 4, No. 1 b, p. 51.

<sup>37</sup>Marckwald, Ber. d. D. Chem. Ges. p. 2662, No. 12, 1903.

<sup>38</sup>Elster e Geitel, Annal. d. Phys. 69, p. 83, 1899.

<sup>39</sup>Giesel, Ber. d. Chem. Ges. p. 3775, 1901.

nel tempo. D'altro canto, Hofmann e Strauss<sup>40</sup> ottennero piombo dalla pechblenda la cui attività appariva permanente. Essi affermarono che il piombo radioattivo assomigliava al piombo ordinario nella maggior parte delle sue reazioni, ma mostrava differenze nel comportamento del solfuro e solfato. Il solfato fu trovato fortemente fosforescente. Questi risultati di Hofmann e Strauss furono sottoposti al tempo della loro pubblicazione a considerevoli critiche, e non vi sono dubbi che il piombo stesso non è radioattivo ma contiene una piccola quantità di sostanza radioattiva che è da esso distinta. Nell'ultimo lavoro<sup>41</sup> è stato mostrato che il radio-piombo contiene parecchi costituenti radioattivi che possono essere eliminati con opportuni metodi chimici.

Non vi è dubbio che il piombo separato dalla pechblenda con determinati metodi mostra una notevole attività e che questa attività è pressoché permanente. Le variazioni radioattive che si verificano nel radio-piombo sono complesse e non possono essere discusse qui, ma saranno trattate in dettaglio nel capitolo XI. Si mostrerà che il principale costituente presente nel piombo è un prodotto a lenta trasformazione del radio. Questa sostanza cambia lentamente nel costituente attivo presente nel polonio, che emette solo raggi facilmente assorbibili.

Questo polonio può essere separato temporaneamente dal piombo con opportuno metodo chimico, ma il radio-piombo continua ancora a produrre polonio, così che una nuova riserva può essere ottenuta da esso, a patto di far trascorrere parecchi mesi.

Sarà in seguito calcolato che in tutta probabilità il radiopiombo dovrebbe dimezzare la propria attività in un intervallo di 40 anni.

Il costituente presente nel radio-piombo non è stato sinora separato, ma si mostrerà che, allo stato puro, dovrebbe avere un'attività considerevolmente maggiore di quella dello stesso radio. Non è stata prestata sufficiente attenzione a questa sostanza, perché, separata allo stato puro, dovrebbe essere scientificamente utile quanto il radio. Inoltre, poiché è parente del polonio, dovrebbe essere possibile ottenere da esso una scorta molto attiva di polonio, nello stesso modo con cui si può ottenerne una dell'emanazione del radio dal radio stesso.

Hofmann e Strauss hanno osservato una peculiare azione dei raggi catodici sul solfato di piombo attivo da esso separato. Essi affermarono che l'attività diminuisce nel tempo, ma è ricoperto per esposizione al piombo di breve durata da solfuro di piombo attivo. Questo effetto è dovuto probabilmente all'azione dei raggi catodici che causano una forte fosforescenza del solfato di piombo e non ha nulla a che vedere con la radioattività propria della sostanza.

**23. Il torio è un elemento radioattivo?** La somiglianza delle proprietà chimiche di attinio e torio ha portato all'ipotesi, in tempi diversi, che l'attività del torio non è dovuta al torio stesso, ma alla presenza di una piccola traccia di attinio. Alla luce della differenza nel tasso di decadimento delle emanazioni di torio e attinio, questa posizione non è sostenibile. Se l'attività del torio fosse dovuta all'attinio, le due emanazioni, così come gli altri prodotti ottenuti da queste sostanze, dovrebbero avere un identico tasso di decadimento. Poiché non vi è la più piccola evidenza che il tasso di decadimento dell'attività dei vari prodotti possa essere alterata da agenti chimici o fisici, possiamo concludere con certezza che qualunque sostanza radioattiva sia responsabile dell'attività del torio non è certo l'attinio. Questa differenza nel tasso di decadimento dei prodotti attivi è molto più importante per decidere se i due corpi contengono lo stesso costituente radioattivo rispetto alle differenze di comportamento chimico, perché è del tutto probabile che il materiale attivo in ogni caso possa esistere solo in quantità minuta nella materia esaminata, e, in tali condizioni, un esame chimico diretto è di poco valore.

Un recente lavoro di Hofmann e Zerban e di Baskerville, tuttavia, tende a mostrare che l'elemento torio è per se stesso non radioattivo, e che la radioattività osservata nei componenti del torio comune è dovuta al mescolamento con un elemento radioattivo sconosciuto. Hofmann e Zerban<sup>42</sup> hanno compiuto un sistematico esame della radioattività del torio ottenuta da diversi minerali. Hanno trovato che il torio, ottenuto da minerali contenenti una grande percentuale di uranio, erano più attivi di quelli ottenuti da minerali che ne erano quasi privi. Ciò indica che la radioattività osservata nel torio può essere dovuta al prodotto di trasformazione dell'uranio che è chimicamente molto vicino al torio ed è da esso sempre separato. Una piccola quantità di torio ottenuta dalla gadolinite fu trovata da Hofmann pressoché inattiva, se valutata con il metodo elettrico o fotografico. Per ultimi Baskerville e Zerban<sup>43</sup> trovarono che il torio ottenuto da un minerale brasiliano era praticamente privo di attività.

A questo riguardo è interessante il recente lavoro di Baskerville sulla complessità del torio comune. Con speciali metodi chimici, egli riuscì a separare due nuove e distinte sostanze dal torio, che chiamò carolinio e berzelio. Entrambe sono fortemente radioattive, e sembra, pertanto, probabile che il costituente attivo osservato nel torio comune possa essere dovuto ad uno di questi elementi.

Se, come abbiamo proposto, il torio di per sé non è attivo, è certamente motivo di sorpresa che il torio comune in commercio e le preparazioni chimiche più pure mostrino all'incirca la stessa attività. Un tale risultato indica che i metodi di purificazione non hanno eliminato ogni costituente radioattivo presente in origine.

<sup>40</sup>Hofmann e Strauss, Ber. d. D. Chem. Ges. p. 3035, 1901.

<sup>41</sup>Hofmann, Gonder e Wölfi, Annal. d. Phys. No. 13, p. 615, 1904.

<sup>42</sup>Hofmann e Zerban, Ber. d. D. Chem. Ges. No. 12. p. 3093, 1903.

<sup>43</sup>Baskerville e Zerban, Amer. Chem. Soc. 26, p. 1642, 1904.

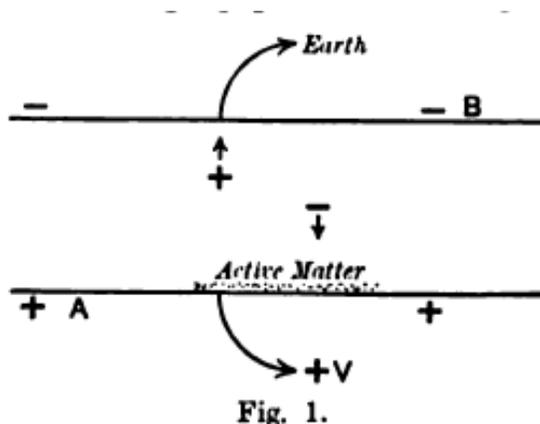
Qualsiasi costituente radioattivo nel torio può essere provato essere non radio né attinio né altra sostanza radioattiva nota.

Negli ultimi capitoli la radioattività del torio sarà discussa assumendo che sia di per sé un elemento radioattivo. L'analisi delle variazioni che avvengono non si riferirà al torio stesso ma alla sostanza radioattiva primaria di solito trovata associata ad esso. Le conclusioni derivate da un esame dei processi radioattivi sono per la maggior parte indipendenti dal fatto se il torio sia o no radioattivo o se la sua attività dipenda da un elemento sconosciuto. Se il torio non è radioattivo, non è possibile trarre conclusioni sulla questione della durata della radioattività ad esso associata. Una tale deduzione non può essere fatta finché non sarà definito tale questione.

**24.** Se esistono elementi più pesanti dell'uranio, è probabile che essi siano radioattivi. L'estrema sensibilità della radioattività come mezzo di analisi chimica dovrebbe essere sufficiente ad analizzare tali elementi anche se presenti in quantità infinitesimali. È probabile che esistano realmente più di tre o quattro elementi radioattivi in minuta quantità, e che il numero attualmente noto possa essere accresciuto nel futuro. Al primo stadio della ricerca, un esame puramente chimico è di poco valore, non essendo probabile che il nuovo elemento esista in quantità sufficiente per essere rivelato con analisi chimica o spettroscopica. I principali criteri sono l'esistenza o l'assenza di radiazioni distintive o emanazioni, e la permanenza della radioattività. La scoperta di una emanazione radioattiva con un tasso di decadimento diverso da quello già noto dovrebbe fornire una forte evidenza della presenza di un nuovo elemento radioattivo. La presenza di torio o radio nella materia può essere rivelata osservando i tassi di decadimento delle emanazioni da essi emesse. Dopo che l'esistenza di un nuovo elemento è stata dedotta dall'esame delle sue proprietà radioattive, si possono ideare i metodi chimici di separazione, utilizzando le proprietà radianti o di emanazione come guida nelle analisi qualitative e quantitative.

## Teoria di Ionizzazione dei Gas

**25. Ionizzazione di gas tramite radiazione.** La proprietà più importante posseduta dalle radiazioni dei corpi radioattivi è la loro capacità di scaricare i corpi elettrizzati sia in modo positivo che negativo. Così come questa proprietà è stata posta alla base di un metodo di analisi quantitativa accurata e di confronto tra le radiazioni, si considereranno con maggiore dettaglio anche la variazione del tasso di scarica in diverse condizioni e i processi sottostanti.



Per spiegare il potere di scarica dei raggi Röntgen, la teoria<sup>1</sup> suppone che i raggi producono portatori di carica positiva e negativa in tutto il volume del gas che circonda il corpo carico, e che il tasso di produzione è proporzionale all'intensità della radiazione. Questi portatori, o ioni<sup>2</sup> come sono stati chiamati, si muovono con velocità uniforme attraverso il gas sotto l'azione di un campo elettrico costante, e la loro velocità varia direttamente con l'intensità del campo.

Supponiamo di avere un gas tra due piastre metalliche *A* e *B* (Figura 1) esposti alla radiazione, e che i piastre siano posti ad una differenza di potenziale costante. Un numero definito di ioni verrà prodotto ogni secondo dalla radiazione, e tale numero dipenderà in generale dal tipo e dalla pressione del gas. Nel campo elettrico gli ioni positivi viaggiano verso il piatto negativo, e gli ioni negativi verso quello positivo, e di conseguenza si avrà un passaggio di corrente dentro il gas. Alcuni ioni si ricombineranno, e tale ricombinazione sarà proporzionale al quadrato del numero presente. Per una data intensità di radiazione, la corrente che passa attraverso il gas aumenterà prima con la differenza di potenziale tra i piastre, ma raggiungerà un limite quando tutti gli ioni sono rimossi dal campo elettrico prima che avvenga la ricombinazione.

Questa teoria giustifica anche tutte le proprietà caratteristiche dei gas resi conduttori dai raggi provenienti dalle sostanze attive, sebbene vi siano alcune differenze osservate tra i fenomeni di conduttività prodotti dalle sostanze attive e dai raggi X. Queste differenze sono per la maggior parte il risultato di un ineguale assorbimento dei due tipi di radiazione. Diversamente dai raggi Röntgen, una grande parte della radiazione dai corpi attivi consiste di raggi che sono assorbiti nel loro passaggio attraverso pochi centimetri d'aria. La ionizzazione del gas è allora non uniforme, ma decade rapidamente al crescere della distanza dalla sostanza attiva.

**26. Variazione della corrente con la tensione.** Supponiamo che uno strato di materiale radioattivo sia distribuito in modo uniforme sul più basso di due piastre *A* e *B* (Figura 1). Il piatto inferiore *A* è connesso con un polo di una batteria a celle mentre l'altro polo è messo a terra. Il piatto *B* è connesso con una coppia di quadranti di un elettrometro, mentre l'altra coppia è posta a terra.

La corrente<sup>3</sup> tra i due piastre, determinata dal movimento dell'ago dell'elettrometro, mostra prima un rapido aumento con la tensione, per poi crescere più lentamente, raggiungendo infine un valore che aumenta molto lentamente con un grande aumento della tensione. Ciò, come indicato, è spiegato semplicemente dalla teoria della ionizzazione.

<sup>1</sup>J.J. Thomson e Rutherford, Phil. Mag. Nov. 1986.

<sup>2</sup>La parola ione è ora comunemente adottata nella letteratura. Usando questa parola, non si assume che gli ioni nei gas siano gli stessi delle soluzioni elettrolitiche.

<sup>3</sup>Una piccola corrente è osservata tra i piastre anche in assenza di sostanze radioattive. Questo è dovuto principalmente alla radioattività naturale della materia che lo compone. (Si veda il cap. XIV).

La radiazione produce ioni con un tasso costante e, prima dell'applicazione del campo elettrico, il numero per unità di volume aumenta fino a quando il tasso di produzione di nuovi ioni è esattamente bilanciato dalla ricombinazione degli ioni già prodotti. Applicando un piccolo campo elettrico, gli ioni positivi si spostano verso l'elettrodo negativo e i negativi verso quello positivo.

Poiché la velocità degli ioni tra i piatti è direttamente proporzionale all'intensità del campo elettrico, in un campo debole gli ioni impiegano un tempo maggiore per spostarsi tra i due elettrodi e la maggior parte di loro subisce una ricombinazione.

La corrente osservata è di conseguenza piccola. Con l'aumento della tensione vi è un aumento della velocità degli ioni e una minore ricombinazione. La corrente, di conseguenza, aumenta e può raggiungere un massimo quando il campo elettrico ha un'intensità tale da rimuovere tutti gli ioni prima che vi sia un'apprezzabile ricombinazione. Il valore della corrente rimarrà poi costante anche con un grande aumento della tensione.

La corrente massima è detta corrente di "saturazione", e il valore della differenza di potenziale associata, la differenza di potenziale di saturazione.<sup>4</sup>

La forma generale della curva corrente-tensione è mostrata in Figura 2, dove le ordinate rappresentano la corrente e le ascisse la tensione.

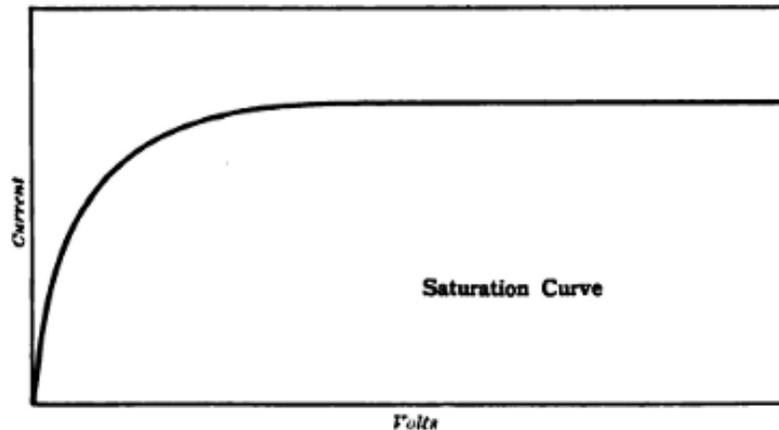


Fig. 2.

Sebbene la variazione della corrente con la tensione dipenda dalla velocità degli ioni e dal loro tasso di ricombinazione, la completa analisi matematica risulta complessa e le equazioni che esprimono la relazione tra corrente e tensione, sono integrabili solo nel caso di ionizzazione uniforme. La questione è complicata dalla diversa velocità degli ioni e dal disturbo del gradiente di potenziale tra i piatti dovuto al moto degli ioni. J. J. Thomson<sup>5</sup> ha trattato il caso di produzione uniforme di ioni tra due piatti paralleli, ed ha trovato che la relazione tra la corrente  $i$  e la differenza di potenziale  $V$  applicata è espressa da

$$Ai^2 + Bi = V$$

dove  $A$  e  $B$  sono costanti per una definita intensità di radiazione e una data distanza tra i piatti.

In alcuni casi di ionizzazione asimmetrica, che si presentano nello studio delle radiazioni da corpi attivi, la relazione tra corrente e tensione è molto diversa da quella attesa in base all'equazione sopra. Alcuni di questi casi saranno considerati in seguito.

**27.** La forma generale delle curve corrente-tensione per i gas esposti alle radiazioni da corpi attivi è mostrata in Figura 3.

<sup>4</sup>Questa nomenclatura ha origine dalla somiglianza tra la forma delle curve corrente-tensione e le curve di magnetizzazione del ferro. Poiché, dalla teoria della ionizzazione, la corrente massima è un risultato della *eliminazione* di tutti gli ioni dal gas, prima della ricombinazione, i termini non sono molto adeguati. Essi sono ormai di uso generale e saranno perciò qui mantenuti.

<sup>5</sup>J.J. Thomson, Phil. Mag. 47, p. 253, 1899; Conduction of Electricity through Gases, p. 73, 1908.

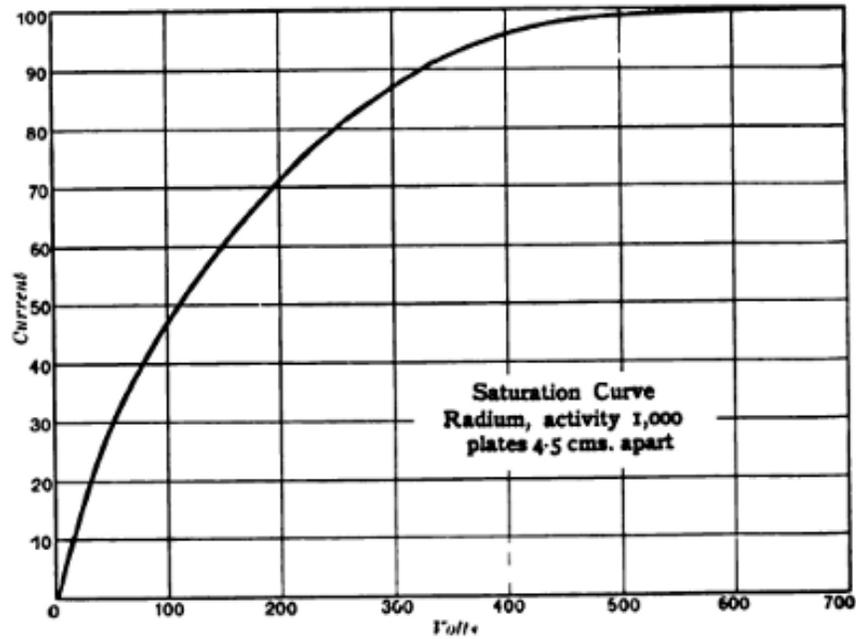


Fig. 8.

Questa curva fu ottenuta da 45 g di cloruro di radio impuro, di attività 1000 volte quella dell'uranio, distribuito su un'area di  $33 \text{ cm}^2$  sullo strato inferiore di due piatti paralleli, distanti 4.5 cm. Il valore massimo osservato della corrente, che è assunto pari a 100, era  $1.2 \cdot 10^{-8}$  ampere, la corrente per basse tensioni era quasi proporzionale alla tensione, ed erano necessari circa 600 V tra i piatti per ottenere una sufficiente saturazione.

Operando con corpi poco attivi come uranio e torio, la saturazione si ottiene per tensioni molto inferiori. Le Tabelle I e II, mostrano i risultati relativi alle correnti tra due piatti paralleli distanti 0.5 cm e 2.5 cm rispettivamente, quando un piatto era ricoperto con un sottile strato uniforme di ossido di uranio.

Tabella I distanza 0.5 cm		Tabella II distanza 2.5 cm	
Tensione	Corrente	Tensione	Corrente
0.125	18	0.5	7.3
0.25	36	1	14
0.5	55	2	27
1	67	4	47
2	72	8	64
4	79	16	73
8	85	37.5	81
16	88	112	90
100	94	375	97
335	100	800	100

I risultati sono rappresentati graficamente nella Figura 4.

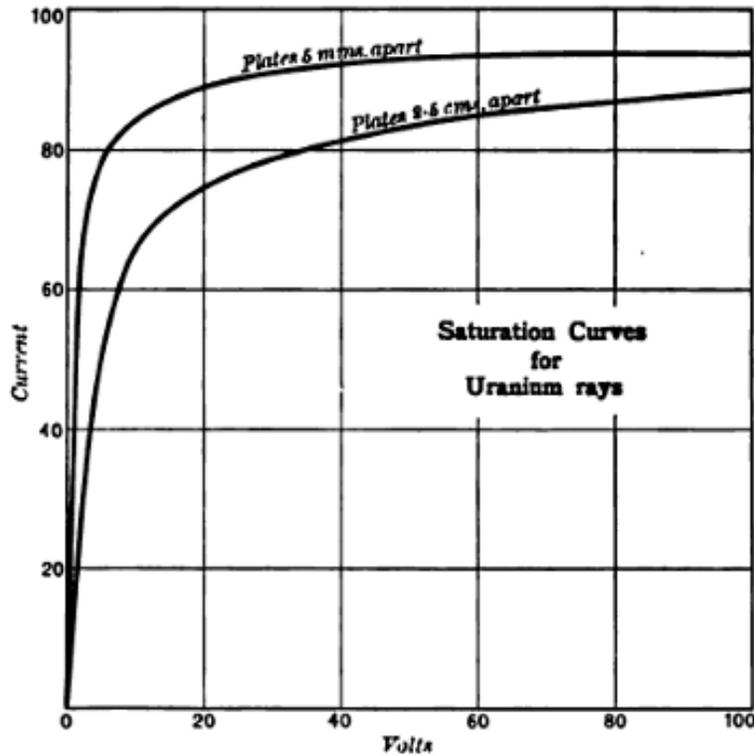


Fig. 4.

Dalle tabelle si vede che la corrente all'inizio aumenta quasi proporzionalmente alla tensione. Non vi è alcuna evidenza di una saturazione completa, sebbene la corrente aumenti molto lentamente per grandi incrementi della tensione. Per esempio, nella Tabella I, una variazione di tensione da  $0.125 V$  a  $0.25 V$  fa crescere la corrente da 18 a 36 del massimo, mentre una variazione di tensione da  $100 V$  a  $335 V$  aumenta la corrente solo del 6%. La variazione della corrente per volt (assunta uniforme tra gli intervalli di tensione considerati) è allora circa 5000 volte maggiore della precedente variazione.

Tenendo in considerazione la prima parte delle curve, la corrente non raggiunge un massimo così come ci si dovrebbe attendere dalla semplice teoria della ionizzazione. Sembra probabile che il lento incremento con le grandi tensioni sia dovuto ad una azione del campo elettrico sul tasso di produzione di ioni, o alla difficoltà nel rimuovere gli ioni prodotti vicino alla superficie dell'uranio prima della ricombinazione. È possibile che la presenza di un forte campo elettrico possa favorire la separazione di ioni che altrimenti non potrebbero inizialmente sfuggire dalla sfera di un'altra attrazione. Dai dati ottenuti da Townsend le condizioni di produzione di nuovi ioni a bassa pressione dal moto degli ioni attraverso il gas, sembra che l'aumento della corrente non sia ascrivibile ad una azione degli ioni in movimento in una ulteriore ionizzazione del gas.

**28.** L'equazione che esprime la relazione tra la corrente e la tensione è molto complessa anche nel caso di un uniforme tasso di produzione di ioni tra i piatti. Una teoria approssimata, che è utile nella interpretazione dei risultati sperimentali, può tuttavia essere dedotta semplicemente se si trascura la perturbazione del gradiente di potenziale, e si assume una ionizzazione uniforme tra i piatti.

Supponiamo che gli ioni siano prodotti ad un ritmo costante  $q$  per  $cm^3$  per  $sec$  nel gas tra i piatti paralleli distanti  $l$   $cm$ . Quando non si applica alcun campo elettrico, il numero  $N$  presente per  $cm^3$ , quando vi è equilibrio tra il tasso di produzione e di ricombinazione, è dato da  $q = \alpha N^2$ , dove  $\alpha$  è una costante.

Se si applica una piccola differenza di potenziale  $V$ , che dà solo una piccola frazione della corrente massima, e di conseguenza non influisce molto sul valore di  $N$ , la corrente  $i$  per  $cm^2$  del piatto, è data da

$$i = \frac{NeuV}{l}$$

dove  $u$  è la somma della velocità degli ioni per unità di gradiente di potenziale ed  $e$  è la carica trasportata da uno ione,  $\frac{uV}{l}$  è la velocità degli ioni nel campo elettrico di intensità  $\frac{V}{l}$ .

Il numero di ioni prodotti per secondo in un prisma di lunghezza  $l$  e l'area unitaria di sezione d'urto è  $ql$ . Il massimo o corrente di saturazione  $I$  per  $cm^2$  del piatto è ottenuto quando tutti questi ioni sono rimossi dagli elettrodi prima che avvenga una ricombinazione.

Allora

$$I = qle$$

e

$$\frac{i}{I} = \frac{NuV}{ql^2} = \frac{uV}{l^2\sqrt{q\alpha}}$$

Questa equazione esprime il fatto precedentemente notato che, per piccole tensioni, la corrente  $i$  è proporzionale a  $V$ . Sia

$$\frac{i}{I} = \rho$$

allora

$$V = \frac{\rho l^2 \sqrt{q\alpha}}{u}$$

Maggiore è il valore di  $V$  richiesto per ottenere un dato valore di  $\rho$  (supposto piccolo rispetto all'unità), maggiore è il potenziale richiesto per produrre saturazione.

Segue allora dall'equazione che:

- (1) Per una data intensità di radiazione, la tensione di saturazione aumenta con la distanza tra i piatti. Nell'equazione, per piccoli valori di  $\rho$ ,  $V$  varia come  $l^2$ . Si trova che così è per la ionizzazione uniforme, ma vale in modo approssimato per quella non uniforme.
- (2) Per una data distanza tra i piatti, la tensione di saturazione è tanto maggiore, quanto maggiore è l'intensità della ionizzazione tra i piatti. Questo è il caso della ionizzazione prodotta da sostanze radioattive. Con una sostanza molto attiva come il radio, la ionizzazione prodotta è così intensa che si richiedono tensioni molto alte per produrre una saturazione approssimata. D'altro canto, solo una frazione di un volt per cm è necessaria per produrre saturazione in un gas in cui la ionizzazione è molto piccola, per esempio, nel caso di ionizzazione naturale osservata in un contenitore chiuso, dove non è presente alcuna sostanza radioattiva.

Per una data intensità di radiazione, la tensione di saturazione diminuisce rapidamente con l'abbassamento della pressione del gas. Ciò è dovuto a due cause che agiscono nella stessa direzione, cioè una diminuzione nell'intensità della ionizzazione e un aumento nella velocità degli ioni. La ionizzazione varia direttamente con la pressione, mentre la velocità varia inversamente alla pressione. Ciò produce una saturazione più rapida, poiché il tasso di ricombinazione è più lento e minore è il tempo di passaggio degli ioni tra gli elettrodi.

Le curve di saturazione osservate per i gas di idrogeno e anidride carbonica<sup>6</sup> sono molto simili nella forma a quelle ottenute in aria. Per una data intensità di radiazione, la saturazione è più facilmente ottenuta nell'idrogeno che in aria, poiché la ionizzazione è minore nell'aria mentre la velocità degli ioni è maggiore. L'anidride carbonica richiede un maggiore tensione per produrre saturazione rispetto all'aria, poiché la ionizzazione è più intensa e la velocità degli ioni è minore nell'aria.

**29.** Townsend<sup>7</sup> ha mostrato che, per basse pressioni, la variazione della corrente con la tensione è molto diversa da quella osservata a pressione atmosferica. Se l'aumento di corrente con la tensione è determinato dai gas, esposti ai raggi Röntgen, a una pressione di circa  $1\text{ mm}$  di mercurio, si trova che per piccole tensioni si ottiene la curva di saturazione ordinaria; ma quando la tensione applicata aumenta oltre un certo valore, dipendente dalla pressione e dal tipo di gas e dalla distanza tra gli elettrodi, la corrente inizia ad aumentare lentamente all'inizio ma molto rapidamente quando la tensione arriva al valore di scarica. La forma generale della curva della corrente è mostrata nella Figura 5.

<sup>6</sup>Rutherford, Phil. Mag. Gennaio 1899.

<sup>7</sup>Townsend, Phil. Mag. febbraio 1901.

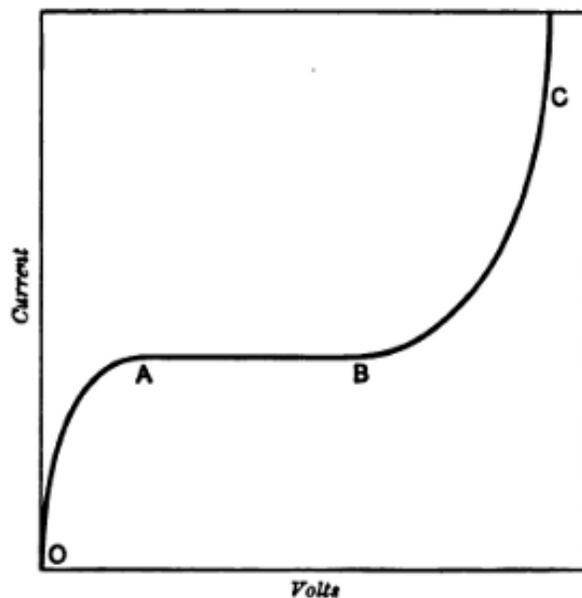


Fig. 5.

Il tratto  $AB$  corrisponde alla curva di saturazione ordinaria. Nel punto  $B$  la corrente inizia ad aumentare. Questo aumento di corrente è dovuto all'azione degli ioni negativi a basse pressioni che producono nuovi ioni collidendo con le molecole lungo il loro cammino. L'aumento della corrente non è osservato in aria ad una pressione di circa  $30\text{ mm}$ , finché la tensione raggiunge quasi il valore richiesto per la produzione di una scintilla. Questa produzione di ioni per collisione è discussa con maggior dettaglio nella sezione 41.

**30. Tasso di ricombinazione degli ioni.** Un gas ionizzato dalla radiazione mantiene il suo potere di conduzione per un certo tempo dopo l'eliminazione del corpo attivo. Una corrente d'aria che fluisce su un corpo attivo scaricherà un corpo elettrizzato posto ad una certa distanza. La durata di questa conduttività può essere opportunamente esaminata in modo molto conveniente in un dispositivo simile a quello mostrato in Figura 6.

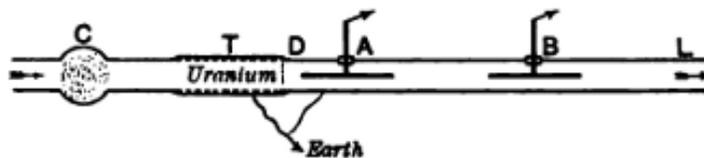


Fig. 6.

Una corrente d'aria secca o di un altro gas passa con ritmo costante attraverso un lungo tubo metallico  $TL$ . Dopo il passaggio attraverso una quantità di ovatta per rimuovere le particelle di polvere, la corrente d'aria passa su un recipiente  $T$  contenente un corpo radioattivo come l'uranio, che non produce emanazione radioattiva. Per mezzo dell'inserimento di elettrodi  $A$  e  $B$ , caricati con un opportuno potenziale, la corrente tra il tubo e uno di questi elettrodi può essere valutata in vari punti lungo il tubo.

Uno schermo di mussola, posto sulla sezione del tubo in  $D$ , serve a prevenire ogni azione diretta del campo elettrico sottraendo ioni nelle vicinanze di  $T$ .

Se il campo elettrico è sufficientemente intenso, tutti gli ioni si spostano verso l'elettrodo  $A$ , e non si osserva alcuna corrente all'elettrodo  $B$ . Se la corrente è osservata in momenti successivi a diverse distanze lungo il tubo, essendo tutti gli elettrodi tranne quello in esame collegati a terra, si trova che la corrente diminuisce con la distanza dal corpo attivo. Se il tubo è di diametro abbastanza grande, la perdita di ioni dovuta alla diffusione è piccola, e la diminuzione di conduttività del gas è dovuta alla ricombinazione dei soli ioni.

Per la teoria della ionizzazione, il numero  $dn$  di ioni per unità di volume che ricomincia nel tempo  $dt$  è proporzionale al quadrato del numero presente. Allora

$$\frac{dn}{dt} = \alpha n^2$$

dove  $\alpha$  è una costante.

Integrando questa equazione,

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{N} = \alpha t$$

se  $N$  è il numero iniziale di ioni, e  $n$  il numero dopo un tempo  $t$ .

I risultati sperimentali ottenuti<sup>8</sup> si sono mostrati in accordo molto buono con questa equazione.

In un esperimento simile a quello illustrato in Figura 6, usando ossido d'uranio come sorgente di ionizzazione, si è trovato che metà degli ioni presenti nel gas si sono ricombinati in 2.4 s, e che dopo 8 s un quarto degli ioni non si era ancora combinato.

Poiché il tasso di ricombinazione è proporzionale al quadrato del numero presente, il tempo affinché metà degli ioni si ricombinino diminuisce molto rapidamente con l'intensità della ionizzazione. Se si usa il radio, la ionizzazione è così intensa che il tasso di ricombinazione è molto rapido. È a causa della rapidità di ricombinazione che sono necessarie grandi tensioni per produrre saturazione nei gas esposti ad una preparazione di radio molto attiva.

Il valore di  $\alpha$ , che può essere chiamato la *coefficiente di ricombinazione*, è stato determinato in modo assoluto da Townsend<sup>9</sup>, McClung<sup>10</sup> e Langevin<sup>11</sup> con diversi metodi sperimentali ma con risultati alquanto simili. Supponiamo, per esempio, con l'apparato di Figura 6, che il tempo  $T$ , richiesto affinché metà degli ioni si ricombinino dopo il passaggio dall'elettrodo  $A$ , sia stato determinato sperimentalmente. Allora  $\frac{1}{N} = \alpha T$ , dove  $N$  è il numero di ioni per  $cm^3$  in  $A$ . Se la corrente di saturazione  $i$  è determinata all'elettrodo  $A$ ,  $i = NVe$ , dove  $e$  è la carica su un ione e  $V$  è il volume del gas uniformemente ionizzato trasportato all'elettrodo  $A$  per secondo. Allora  $\alpha = \frac{Ve}{iT}$ .

La seguente tabella mostra il valore di  $\alpha$  ottenuto per diversi valori di  $\alpha$ .

Gas	Townsend	McClung	Langevin
Aria	$3420 \times e$	$3384 \times e$	$3200 \times e$
Anidride carbonica	$3500 \times e$	$3492 \times e$	$3400 \times e$
Idrogeno	$3020 \times e$		

L'ultima determinazione del valore di  $e$  (si veda la sezione 36) è  $3.4 \times 10^{-10}$  u.e.s; allora  $\alpha = 1.1 \times 10^{-6}$ .

Usando questo valore, si ricava dall'equazione di ricombinazione che, se  $10^6$  ioni sono presenti per  $cm^3$ , la metà di essi si ricombina in circa 0.9 s, e il 99% in 90 s.

McClung mostrò che il valore di  $\alpha$  era approssimativamente indipendente dalla pressione tra 0.125 e 3 atmosfere. Nell'ultima osservazione, Langevin ha trovato che il valore di  $\alpha$  diminuisce rapidamente quando la pressione passa al di sotto dei limiti usati da McClung.

**31.** Negli esperimenti di ricombinazione è essenziale che il gas sia privo di polvere o altre particelle sospese. Nel pulviscolo dell'aria, il tasso di ricombinazione è molto maggiore rispetto all'aria pulita, poiché gli ioni diffondono rapidamente al confronto delle grandi particelle di polvere distribuite nel gas. L'effetto della sospensione di piccole particelle in un gas conduttivo è molto ben descritto dall'esperimento di Owens<sup>12</sup>. Se si diffonde del fumo di tabacco tra due piatti paralleli come nella Figura 1, la corrente tende subito a diminuire di una piccola frazione del suo valore iniziale, sebbene sia applicato una tensione sufficiente a produrre saturazione in condizioni ordinarie. Una tensione maggiore è poi necessaria per produrre saturazione. Se le particelle di fumo sono rimosse da una corrente d'aria, la corrente ritorna subito al suo valore originale.

**32. Mobilità degli ioni.** La determinazione della mobilità degli ioni, cioè della velocità degli ioni sottoposti ad un gradiente di potenziale di  $1 V \cdot cm$ , è stata eseguita da Rutherford<sup>13</sup>, Zeleny<sup>14</sup>, e Langevin<sup>15</sup> per gas esposti ai raggi Röntgen. Sebbene siano stati impiegati metodi assai diversi, i risultati sono stati assai concordi, e supportano pienamente l'ipotesi che gli ioni si muovono con una velocità proporzionale all'intensità del campo. Con l'applicazione di un campo elettrico, gli ioni quasi istantaneamente raggiungono la velocità che corrisponde al campo e si muovono con una velocità uniforme.

Zeleny<sup>16</sup> per primo richiamò l'attenzione sul fatto che gli ioni positivi e negativi hanno diverse velocità. La velocità di quelli negativi è sempre maggiore di quella dei positivi, e varia con la quantità di vapor acqueo presente nel gas.

I risultati, precedentemente discussi, della variazione della corrente con la tensione e del tasso di ricombinazione degli ioni non implicano di per sé che gli ioni prodotti nei gas dalle radiazioni di corpi attivi abbiano dimensioni uguali a quelli prodotti dai raggi Röntgen in condizioni simili. Essi mostrano semplicemente che la conduttività in varie condizioni si può spiegare in modo soddisfacente supponendo che gli ioni carichi sono prodotti nel volume del gas. La stessa relazione generale dovrebbe essere osservata se gli ioni differiscono considerevolmente in dimensione e velocità da quelli prodotti con i raggi Röntgen. Il metodo più soddisfacente per determinare se gli ioni sono identici nei due casi è quello di determinare la loro velocità in condizioni simili.

<sup>8</sup>Rutherford, Phil. Mag. novembre 1897, p. 144, gennaio 1899.

<sup>9</sup>Townsend, Phil. Trans. A, p. 157, 1899.

<sup>10</sup>McClung, Phil. Mag. Marzo 1902.

<sup>11</sup>Langevin, Tesi presente alla Facoltà delle Scienze, p. 151, Parigi, 1902.

<sup>12</sup>Owens, Phil. Mag. Ottobre 1899.

<sup>13</sup>Rutherford, Phil. Mag. p.429, novembre 1897.

<sup>14</sup>Zeleny, Phil. Trans. A, p. 193, 1901.

<sup>15</sup>Langevin, C. R. 134, p. 646, 1902.

<sup>16</sup>Zeleny, Phil. Mag. Luglio, 1898.

Per confrontare la velocità degli ioni<sup>17</sup>, l'autore ha usato un apparato simile a quello della Figura 6.

Gli ioni erano trasportati con un flusso rapido di aria vicino all'elettrodo carico  $A$ , e veniva verificata poco dopo la conducibilità del gas all'elettrodo  $B$ , che era posto vicino ad  $A$ . Gli elettrodi inseriti  $A$  e  $B$  erano fissati centralmente nel tubo di metallo  $L$ , che era messo a terra.

Per praticità di calcolo, si assumeva che il campo elettrico tra i cilindri fosse lo stesso di quello di un cilindro infinitamente lungo.

Siano  $a$  e  $b$  rispettivamente i raggi dell'elettrodo  $A$ , e del tubo  $L$ , e sia  $V$  il potenziale di  $A$ .

L'intensità elettromotrice  $X$  (senza tener conto del segno) alla distanza  $r$  dal centro del tubo è data da

$$X = \frac{V}{r \ln \frac{b}{a}}$$

Siano  $u_1$  e  $u_2$  le velocità degli ioni positivi e negativi per un gradiente di potenziale di  $1 V \cdot cm$ . Se la velocità è proporzionale alla forza elettrica in ogni punto, la distanza  $dr$  attraversata dallo ione negativo nel tempo  $dt$  è data da

$$dr = Xu_2 dt$$

o

$$dt = \frac{\ln \frac{b}{a} r dr}{Vu_2}$$

Sia  $r_2$  la distanza massima misurata dall'asse del tubo da cui lo ione negativo può raggiungere l'elettrodo  $A$  nel tempo  $t$  impiegato per passare in aria lungo l'elettrodo.

Allora

$$t = \frac{(r_2^2 - a^2)}{2Vu_2} \ln \frac{b}{a}$$

Se  $\rho_2$  è il rapporto tra il numero degli ioni negativi che raggiungono l'elettrodo  $A$  e il totale, allora

$$\rho_2 = \frac{r_2^2 - a^2}{b^2 - a^2}$$

Pertanto

$$(2.0.1) \quad u_2 = \frac{\rho_2 (b^2 - a^2) \ln \frac{b}{a}}{2Vt}$$

Analogamente il rapporto  $\rho_1$  tra il numero di ioni positivi che portano la loro carica all'esterno del cilindro e il numero totale di ioni positivi è dato da

$$u_1 = \frac{\rho_1 (b^2 - a^2) \ln \frac{b}{a}}{2Vt}$$

Nelle equazioni precedenti si assume che la corrente d'aria sia uniforme nella sezione del tubo, e che gli ioni siano distribuiti in modo uniforme sulla sezione; inoltre che il moto degli ioni non disturbi in modo significativo il campo elettrico. Poiché il valore di  $t$  può essere calcolato dalla velocità della corrente d'aria e dalla lunghezza dell'elettrodo, i valori delle velocità degli ioni con un potenziale gradiente unitario possono essere determinati.

L'equazione 2.0.1 mostra che  $\rho_2$  è proporzionale a  $V$ , cioè che il tasso di scarica dell'elettrodo  $A$  varia direttamente con il potenziale di  $A$ , supposto che il valore di  $V$  non sia così grande da rimuovere tutti gli ioni dal gas che passano dall'elettrodo. Questo caso è stato verificato sperimentalmente.

Nel confronto delle velocità, il potenziale  $V$  fu posto ad un valore tale che  $\rho_2$  fosse circa la metà, quando l'ossido di uranio era posto nel tubo a  $L$ . La sostanza attiva fu poi rimossa, e il cilindro di alluminio sostituiva il tubo di ottone. I raggi X colpivano il centro di questo cilindro di alluminio, e l'intensità dei raggi era tale da fornire la stessa conduttività al gas come nel caso dell'uranio. In queste condizioni il valore di  $\rho_2$  era lo stesso del primo esperimento.

Questo esperimento mostra in modo conclusivo che gli ioni prodotti dai raggi Röntgen e dall'uranio si muovono con la stessa velocità e sono probabilmente identici in tutti gli aspetti. Il metodo descritto non è molto valido per una determinazione accurata delle velocità, ma dà valori per gli ioni positivi di circa  $1.4 \frac{cm}{s} \cdot V \cdot cm$ , e valori di poco superiori per gli ioni negativi.

**33.** Le determinazioni più accurate della mobilità degli ioni prodotti dai raggi Röntgen sono state eseguite da Zeleny<sup>18</sup> e Langevin<sup>19</sup>. Zeleny utilizzò un metodo simile in linea di principio a quello spiegato prima. I suoi risultati sono mostrati nella tabella seguente, dove  $K_1$  è la mobilità degli ioni positivi e  $K_2$  di quelli negativi.

<sup>17</sup>Rutherford, Phil. Mag. Febbraio 1899.

<sup>18</sup>Zeleny, Phil. Trans. 195. p. 193, 1900.

<sup>19</sup>Langevin, C.R. 134. p. 646, 1902, e Tesi, p. 191, 1902.

Gas	$K_1$	$K_2$	$\frac{K_2}{K_1}$	Temperatura
Aria secca	1.36	1.87	1.375	13.5 °C
Aria umida	1.37	1.51	1.10	14
Ossigeno secco	1.36	1.80	1.32	17
Ossigeno umido	1.29	1.52	1.18	16
Anidride carbonica secca	0.76	0.81	1.07	17.5
Anidride carbonica umida	0.81	0.75	0.915	17
Idrogeno secco	6.70	7.95	1.15	20
Idrogeno umido	5.30	5.60	1.05	20

Langevin determinò la velocità degli ioni con un metodo diretto nel quale fu valutato il tempo impiegato dagli ioni a percorrere una distanza nota.

La tabella seguente mostra i valori comparativi ottenuti per l'aria e l'anidride carbonica.

	Aria			$CO_2$		
	$K_1$	$K_2$	$\frac{K_2}{K_1}$	$K_1$	$K_2$	$\frac{K_2}{K_1}$
Metodo diretto (Langevin)	1.40	1.70	1.22	0.86	0.90	1.05
Corrente di gas (Zeleny)	1.36	1.87	1.375	0.760.81	1.07	

Questi risultati mostrano che per tutti i gas tranne la  $CO_2$ , vi è un marcato aumento nella velocità degli ioni negativi con la secchezza del gas, e che, anche nei gas umidi, la velocità degli ioni negativi è sempre maggiore di quella dei positivi. La velocità degli ioni positivi non è molto influenzata dalla presenza di umidità nel gas.

La velocità degli ioni varia inversamente alla sua pressione. Ciò è stato mostrato da Rutherford<sup>20</sup> per gli ioni negativi prodotti dai raggi ultravioletti che colpivano una superficie carica negativamente, e poi da Langevin<sup>21</sup> per gli ioni positivi e negativi prodotti dai raggi Röntgen. Langevin ha mostrato che la velocità degli ioni positivi aumenta più lentamente con la diminuzione della pressione rispetto agli ioni negativi. Sembra che lo ione negativo, specialmente a pressione di circa 10 mm di mercurio inizi a ridurre la propria dimensione.

**34. Esperimenti sulla Condensazione.** Descriveremo alcune esperienze che hanno verificato in modo diretto la teoria che la conduttività prodotta nei gas da vari tipi di radiazione è dovuta alla produzione di ioni carichi all'interno del volume del gas. In certe condizioni, gli ioni formano nuclei per la condensazione di acqua, e questa proprietà ci permette di mostrare la presenza di ioni singoli nel gas e di contarne il numero.

È da tempo noto che, se l'aria saturata di vapore acqueo viene espansa rapidamente, crea una nube di piccoli globuli di acqua. Queste gocce si formano attorno a particelle di polvere presenti nel gas, che agiscono da nucleo per la condensazione dell'acqua. Gli esperimenti di R. von Helmholtz e Richarz<sup>22</sup> hanno mostrato che le reazioni chimiche, per esempio la combustione di fiamme, che avviene nelle vicinanze, influenza la condensazione di un getto di vapore. Lenard mostrò che un'azione simile era prodotta quando la luce ultravioletta colpiva una superficie di zinco carica negativamente posta vicino al getto di vapore. Questi risultati suggeriscono che la presenza di cariche elettriche nel gas facilitano la condensazione.

Uno studio molto completo delle condizioni di condensazione dell'acqua su nuclei è stata compiuta da C.T.R. Wilson<sup>23</sup>. Fu progettato un dispositivo in grado di espandere molto rapidamente dell'aria in un ampio intervallo di pressione. La quantità di condensazione era osservata in un piccolo contenitore di vetro. Un fascio di luce passava nel dispositivo consentendo la formazione di gocce facilmente osservabili ad occhio nudo.

Piccole espansioni preliminari originavano una condensazione dell'acqua attorno ai nuclei di polvere presenti nell'aria. Questi nuclei erano rimossi permettendo alle gocce di depositarsi. Dopo un numero di successive piccole espansioni, l'aria era completamente liberata dalla polvere, impedendo la formazione di condensazioni.

Sia  $v_1$  = volume iniziale del gas nel recipiente

$v_2$  = volume dopo l'espansione.

Se  $\frac{v_2}{v_1} < 1.25$  non si produce alcuna condensazione nell'aria priva di polvere. Se tuttavia  $1.25 < \frac{v_2}{v_1} < 1.38$ , appare qualche goccia. Questo numero è circa costante fino a  $\frac{v_2}{v_1} = 1.38$ , quando il numero aumenta rapidamente e si produce una nube molto densa di gocce sottili.

Se la radiazione proveniente da un tubo X o da una sostanza radioattiva è fatta passare nel contenitore di condensazione, si osserva una nuova serie di fenomeni. Come prima, se  $\frac{v_2}{v_1} < 1.25$  non si forma condensazione, ma se  $\frac{v_2}{v_1} = 1.25$  vi è una improvvisa formazione di una nube. Le gocce d'acqua di cui la nube è composta sono più piccole e più numerose alle più grandi intensità dei raggi. Il punto nel quale la condensazione ha inizio è molto evidente, e una piccola variazione della quantità di espansione determina o una densa nube o nessuna nube.

<sup>20</sup>Rutherford, Proc. Camb. Phil. Soc. p. 410, 1898.

<sup>21</sup>Langevin, Tesi, p. 190, 1902.

<sup>22</sup>Helmholtz e Richarz, Annal. d. Phys. 40, p. 161, 1890.

<sup>23</sup>Wilson, Phil. Trans. p. 265, 1897; p. 403, 1899; p. 289, 1900.

Rimane da dimostrare che la formazione di una nube per l'azione dei raggi è dovuta alla alla produzione di ioni nel gas. Se il contenitore che si espande è dotato di due piastre parallele tra le quali è applicato un campo elettrico, si vede che il numero di gocce, formate dall'espansione con i raggi che agiscono, diminuisce al crescere del campo elettrico. Più il campo è intenso minore è il numero di gocce che si formano. Questo risultato è da attendersi se gli ioni sono i centri di condensazione; infatti in un campo elettrico intenso gli ioni sono trasportati fino agli elettrodi, e scompaiono dal gas. Se non agisce alcun campo elettrico, a volte si può produrre una nube dopo che i raggi sono stati rimossi; ma se è applicato un intenso campo elettrico, nelle stesse condizioni, non si forma alcuna nube. Questo è in accordo con gli esperimenti che mostrano il tempo per la scomparsa degli ioni per ricombinazione. In aggiunta si può mostrare che ognuna delle sottili gocce trasportano una carica elettrica e si muovono in un intenso campo elettrico.

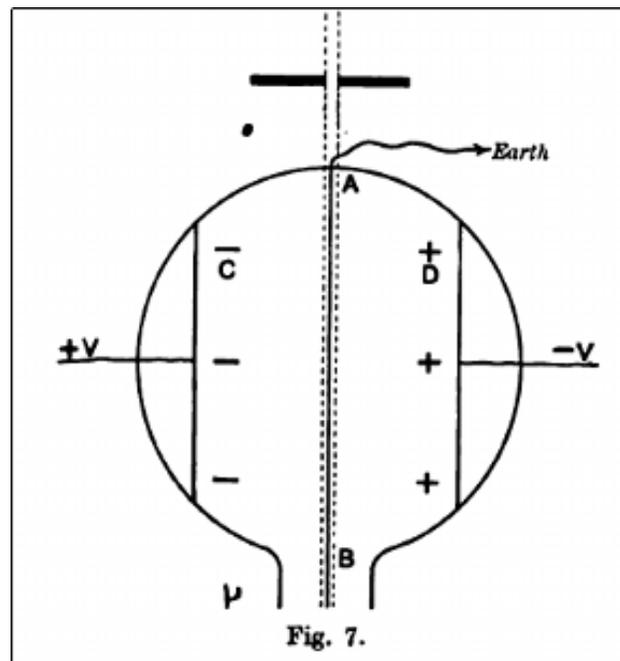
Il più piccolo numero di gocce prodotto senza l'azione dei raggi quando  $\frac{v_2}{v_1} > 1,25$  è dovuto ad una ionizzazione naturale molto piccola del gas. L'esistenza di tale ionizzazione è stata chiaramente mostrata con i metodi elettrici (sezione 284).

L'evidenza che gli stessi ioni siano centri di condensazione di acqua attorno ad essi è pertanto completa. Questi esperimenti mostrano in modo conclusivo che il passaggio di elettricità attraverso un gas è dovuto alla presenza di ioni carichi distribuiti dentro il volume del gas, e verificano in modo evidente l'ipotesi della struttura discontinua della carica elettrica trasportata dalla materia.

Questa proprietà degli ioni di agire come nuclei di condensazione offre un metodo molto sensibile per rivelare la presenza di ioni nei gas. Se è presente solo uno ione o due per  $cm^3$ , la loro presenza dopo l'espansione è subito osservata dalle gocce formate. In questo modo la ionizzazione dovuta a una piccola quantità di uranio è immediatamente resa manifesta.

**35. Differenza tra ioni positivi e negativi.** Nel corso delle esperienze per determinare la carica trasportata da uno ione, J. J. Thomson<sup>24</sup> osservò che la nube formata sotto l'influsso dei raggi X aumentava in densità quando l'espansione era di circa 1.31. e suggerì la spiegazione che gli ioni positivi e negativi avessero diversi punti di condensazione.

Questa differenza nel comportamento degli ioni positivi e negativi fu analizzata in dettaglio da C. T. R. Wilson<sup>25</sup> nel modo seguente. I raggi X in un fascio collimato passavano da entrambe le parti di una piastra  $AB$  (Figura 7) che divideva la camera di condensazione in due parti uguali. I poli opposti di una batteria di celle erano collegati a due piatti paralleli  $C$  e  $D$ , posti simmetricamente rispetto ad  $A$ .



Il punto centrale della batteria e della piastra  $A$  erano messi a terra. Se la piastra  $C$  è caricata positivamente, gli ioni nello spazio  $CA$  a breve distanza da  $A$  sono tutti di segno negativo. Quelli a destra sono tutti positivi. Si è trovato che la condensazione si otteneva solo per gli ioni negativi in  $AC$  quando  $\frac{v_2}{v_1} = 1.25$  ma non si manifestava in  $AD$  per gli ioni positivi finché  $\frac{v_2}{v_1} = 1.31$ .

Pertanto, gli ioni negativi agiscono più facilmente di quelli positivi come centri di condensazione. Il maggiore effetto dello ione negativo nel generare condensazione è stato suggerito come una spiegazione del fatto che la carica positiva è

<sup>24</sup>Thomson, Phil. Mag. p. 528, Dicembre 1898.

<sup>25</sup>Wilson, Phil. Mag. Trans. A, 198, p. 289, 1899.

sempre osservata nella parte superiore dell'atmosfera. Gli ioni negativi in certe condizioni divengono centri di formazione di piccole gocce d'acqua e sono portati verso la terra dalla gravità, mentre gli ioni positivi rimangono sospesi.

Con l'apparato descritto sopra, si è mostrato che gli ioni positivi e negativi sono in numero uguale. Se l'espansione è sufficientemente grande da assicurare condensazione per entrambi gli ioni, le gocce formate nella parte destra e sinistra del contenitore di Figura 7 sono in ugual numero e precipitano con lo stesso ritmo, cioè hanno dimensioni uguali.

Poiché gli ioni sono prodotti in ugual numero da un gas elettricamente neutro, questo esperimento mostra che le cariche su ioni positivi o negativi sono uguali in valore ma opposte in segno.

**36. Carica trasportata da uno ione.** Per una nota e rapida espansione di un gas saturato con vapore acqueo, la quantità di acqua precipitata sugli ioni può essere facilmente calcolata. La dimensione delle gocce può essere determinata osservando il ritmo con cui la nube si fissa sotto l'azione della gravità. Dall'equazione di Stokes, la velocità finale  $u$  di una piccola sfera di raggio  $r$  e densità  $d$  che cade in un gas con coefficiente di viscosità  $\mu$  è data da

$$u = \frac{2dgr^2}{9\mu}$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità. Il raggio della goccia e di conseguenza il peso dell'acqua in ogni goccia può quindi essere determinato. Poiché il peso totale dell'acqua precipitata è noto, si ottiene il numero di gocce presenti.

Questo metodo è stato usato da J. J. Thomson<sup>26</sup> per determinare la carica trasportata da uno ione. Se l'espansione supera il valore 1.31 entrambi i tipi di ione divengono centri di condensazione. Dal ritmo di caduta si può mostrare che le gocce hanno tutte circa le stesse dimensioni.

Il vaso di condensazione era simile a quello impiegato da C. T. R. Wilson. Due piatti orizzontali paralleli erano adattati nel vaso e la radiazione di un tubo X o di una sostanza radioattiva ionizzava il gas tra di esse. Ad una differenza di potenziale  $V$ , piccola rispetto a quella richiesta per saturare il gas, era applicata tra i piatti paralleli distanti  $l$  cm tra loro. La piccola corrente  $i$  attraverso il gas è data da

$$i = \frac{NuVe}{l}$$

dove  $N$  è il numero di ioni presenti nel gas,  $e$  la carica di ogni ione,  $u$  la somma delle velocità degli ioni positivi e negativi.

Poiché il valore di  $N$  è lo stesso del numero di gocce, e la velocità  $u$  è nota, si può determinare il valore di  $e$ .

In quest'ultima determinazione J. J. Thomson trovò che

$$e = 3.4 \cdot 10^{-10} \text{ u.e.s}$$

Un valore in pieno accordo,  $3.1 \cdot 10^{-10}$  u.e.s, è stato ottenuto da H. A. Wilson<sup>27</sup>, usando un metodo modificato di conteggio delle gocce. Una verifica sulla dimensione delle gocce, determinata dal loro tasso di caduta, fu compiuta osservando la velocità con la quale le gocce si muovevano in un forte campo elettrico che agiva lungo la direzione della gravità o contrario alla stessa direzione.

J. J. Thomson trovò che la carica sugli ioni prodotti nell'idrogeno e nell'ossigeno è la stessa. Ciò mostra che la natura della ionizzazione nei gas è distinta da quella che si ha nell'elettrolisi di soluzioni nelle quali lo ione ossigeno trasporta sempre una carica doppia dello ione idrogeno.

**37. Diffusione degli ioni.** Le prime esperienze con gas ionizzati mostrarono che la conduttività era rimossa dal gas mediante un passaggio attraverso una sostanza sottile divisa in piccole parti come l'ovatta, o introducendolo in acqua. Questa perdita di conduttività è dovuta al fatto che gli ioni che passano attraverso stretti spazi diffondono dalla parte del bordo, al quale o aderiscono o cedono la loro carica.

Una determinazione diretta del coefficiente di diffusione degli ioni prodotti nei gas dai raggi Röntgen o da sostanze attive è stata eseguita da Townsend<sup>28</sup>. Il metodo generale impiegato consisteva nel far passare un flusso di gas ionizzato attraverso un contenitore formato da un insieme di sottili tubi metallici disposti in parallelo. Alcuni degli ioni nel loro passaggio attraverso i tubi diffondono verso i lati, essendo la proporzione maggiore per il gas con moto più lento e più vicino al tubo. Sono state fatte osservazioni sulla conduttività del gas prima e dopo il passaggio attraverso il tubo. In questo modo, correggendo se necessario per la ricombinazione durante il tempo di passaggio attraverso i tubi, si può dedurre la porzione  $R$  degli ioni sia positivi sia negativi che sono estratti. Il valore di  $R$  si può esprimere matematicamente con la seguente equazione in termini di  $K$ , il coefficiente di diffusione degli ioni nel gas con cui sono mescolati<sup>29</sup>

$$R = 4 \left( 0.195e^{-\frac{3.66KZ}{a^2V}} + 0.0243e^{-\frac{22.3KZ}{a^2V}} + ecc \right)$$

dove  $a$  è il raggio del tubo,  $Z$  la lunghezza del tubo,  $V$  la velocità media del gas nel tubo.

Si devono considerare solo i primi due termini di questa serie quando si usano tubi stretti.

<sup>26</sup>Thomson, Phil. Mag. p. 528, Dicembre 1898, e Marzo 1903. Conduction of Electricity through Gases, Camb. Univ. Press, 1903, p. 121.

<sup>27</sup>Wilson, Phil. Mag. Aprile 1903.

<sup>28</sup>Townsend, Phil. Trans. A, p. 129, 1889.

<sup>29</sup>Townsend, loc. cit. p. 139.

In questa equazione  $R, V$  e  $a$  sono determinati sperimentalmente e di conseguenza si può dedurre  $K$ .

La tabella seguente mostra i risultati ottenuti da Townsend utilizzando raggi X.

Risultati quasi identici furono ottenuti in seguito, quando si sostituirono i raggi X con radiazioni da sostanze attive.

Gas	Coefficienti di diffusione degli ioni nei gas			Rapporto del valore di $K$
	$K$ per ioni +	$K$ per ioni -	Valore medio di $K$	
Aria secca	0.028	0.043	0.0347	1.54
Aria umida	0.032	0.035	0.0335	1.09
Ossigeno secco	0.025	0.0396	0.0323	1.58
Ossigeno umido	0.0288	0.0358	0.0323	1.24
Acido carbonico secco	0.023	0.026	0.0245	1.13
Acido carbonico umido	0.0245	0.0255	0.025	1.04
Idrogeno secco	0.123	0.190	0.156	1.54
Idrogeno umido	0.128	0.142	0.135	1.11

I gas umidi sono saturati con vapore acqueo alla temperatura di  $15^\circ C$ .

Si vede che lo ione negativo in tutti i casi diffonde più velocemente di quello positivo. La teoria mostra che i coefficienti di diffusione devono essere direttamente proporzionali alle velocità degli ioni, così che questo risultato è in accordo con le osservazioni sulle maggiori velocità dello ione negativo.

Questa differenza nella velocità di diffusione degli ioni chiarisce immediatamente un interessante risultato sperimentale. Se i gas ionizzati fluiscono attraverso un tubo metallico, il tubo acquista una carica negativa quando lo stesso gas mantiene una carica positiva. Il numero di ioni positivi e negativi presenti nel gas è inizialmente lo stesso, ma, a causa della più rapida diffusione degli ioni negativi, un numero maggiore di tali ioni cede la sua carica al tubo, che, di conseguenza, acquista una carica negativa e il gas una carica positiva.

**38.** Un risultato molto importante si può dedurre rapidamente quando le velocità e i coefficienti di diffusione degli ioni sono noti. Townsend (loc. cit) ha mostrato che l'equazione del loro moto è espressa dalla formula

$$\frac{1}{K}pu = -\frac{dp}{dx} + nXe$$

dove  $e$  è la carica di uno ione,  $n$  il numero di ioni per  $cm^3$ ,  $p$  la loro pressione parziale e  $u$  è la velocità dovuta alla forza elettrica  $X$  nella direzione dell'asse  $x$ . Quando si raggiunge uno stato stazionario,

$$\frac{dp}{dx} = 0 \quad e \quad u = \frac{nXeK}{p}$$

Sia  $N$  il numero di molecole in un centimetro cubo di gas alla pressione  $P$  e alla temperatura di  $15^\circ C$ , per il quale sono stati determinati i valori di  $u$  e di  $K$ . Allora  $\frac{N}{P}$  può essere sostituito da  $\frac{n}{p}$ , e, poiché  $P$  alla pressione atmosferica è  $10^6$ ,

$$N_e = \frac{3 \cdot 10^8 u_1}{K} u.e.$$

dove  $u_1$  è la velocità per 1 V (cioè  $\frac{1}{300}$  u.e.s) per  $cm$ .

È noto che una unità elettromagnetica assoluta di elettricità passando attraverso l'acqua libera  $1.23 cm^3$  di idrogeno alla temperatura di  $15^\circ C$  e a pressione standard. Il numero di atomi in questo volume è  $2.46 N$ , e, se  $e'$  è la carica sull'atomo di idrogeno nell'elettrolisi dell'acqua,

$$\begin{aligned} 2.46 N e' &= 3 \cdot 10^{10} u.e.s \\ N e' &= 1.22 \cdot 10^{10} u.e.s \end{aligned}$$

Pertanto

$$\frac{e}{e'} = 2.46 \cdot 10^{-2} \frac{u_1}{K}$$

Per esempio, sostituendo i valori di  $u_1$  e  $K$  determinati in aria umida per ione positivo,

$$\frac{e}{e'} = \frac{2.46}{100} \times \frac{1.37}{0.032} = 1.04$$

Valori di questo rapporto, non molto diversi dall'unità, sono ottenuti per ioni positivi e negativi dei gas di idrogeno, ossigeno e anidride carbonica. Prendendo in considerazione l'incertezza nei valori sperimentali di  $u_1$  e  $K$ , questi risultati indicano che la *carica trasportata da uno ione in tutti i gas è la stessa ed è uguale a quella trasportata dallo ione idrogeno nell'elettrolisi dei liquidi.*

**39. Numero di ioni.** Abbiamo visto che, dai dati sperimentali, Townsend ha trovato che  $N$ , il numero di molecole presenti in  $1\text{ cm}^3$  di gas a  $15^\circ\text{C}$  e alla pressione standard, è dato da

$$Ne = 1.22 \cdot 10^{10}$$

Ora  $e$ , la carica in uno ione, è uguale a  $3.4 \cdot 10^{-10}$  *u.e.s.*; pertanto

$$N = 3.6 \cdot 10^{19}$$

Se  $I$  è la corrente di saturazione attraverso un gas, e  $q$  il tasso totale di produzione di ioni nel gas,

$$q = \frac{I}{e}$$

La corrente di saturazione attraverso l'aria fu trovata essere  $1.2 \cdot 10^{-8}$  A, cioè 36 *u.e.s.*, per piatti paralleli distanti 4.5 *cm*, quando 0.45 *g* di radio di attività 1000 volte quella dell'uranio era distribuita su un'area di 33 *cm*<sup>2</sup> della piastra inferiore. Ciò corrisponde a una produzione di circa  $10^{11}$  ioni per secondo. Assumendo, a scopo illustrativo, che la ionizzazione tra le piastre era uniforme, il volume di aria attivata dai raggi era di circa 148 *cm*<sup>3</sup>, e il numero di ioni prodotti per *cm*<sup>3</sup> per secondo era di circa  $10^{-11}$  del totale. Per l'uranio la frazione è circa  $10^{-14}$ , e per il radio puro, di attività un milione di volte quella dell'uranio, di circa  $10^{-8}$ . Allora anche nel caso di radio puro, solo circa una molecola di gas è attivata per secondo su 100 milioni.

I metodi elettrici sono così sensibili che la produzione di uno ione per *cm*<sup>3</sup> per secondo può essere rivelata facilmente. Ciò corrisponde alla ionizzazione di circa una molecola sulle  $10^{19}$  presenti nel gas.

**40. Dimensione e natura degli ioni.** Una stima approssimata della massa di uno ione, confrontata con la massa della molecola del gas nel quale è prodotto, è possibile se si conoscono i valori del coefficiente  $K$  di interdizione degli ioni nei gas. Il valore di  $K$  per gli ioni positivi in anidride carbonica umida è stato indicato in 0.0245, mentre il valore di  $K$  per interdizione dell'anidride carbonica con l'aria è 0.14. Il valore di  $K$  per diversi gas è circa inversamente proporzionale alla radice quadrata del prodotto delle masse delle molecole dei due gas che interdicono; pertanto, lo ione positivo nell'anidride carbonica si comporta come se la sua massa fosse grande rispetto a quella della molecola. Risultati simili sono attesi per ioni negativi e positivi, e per altri gas oltre l'anidride carbonica.

Questo ha portato a vedere che lo ione consiste di un centro carico circondato da un ammasso di molecole che si muovono con esso, che sono tenute in posizione attorno al nucleo carico dalle forze elettriche. Una stima approssimativa mostra che questo ammasso consiste di circa 30 molecole del gas. Questa ipotesi è supportata dalla variazione in velocità, cioè dalla variazione della grandezza dello ione negativo, in presenza di vapore acqueo; lo ione negativo ha senza dubbio una massa maggiore nei gas umidi rispetto ai secchi. Allo stesso tempo è possibile che la dimensione apparentemente grande dello ione, determinata con il metodo di diffusione, possa in parte derivare dalla carica trasportata dallo ione. La presenza di una carica su un corpo in movimento potrebbe aumentare la frequenza di collisione con le molecole del gas e di conseguenza diminuire la velocità di diffusione. Lo ione da questo punto di vista non può essere di dimensione maggiore delle molecole dalla quale è prodotto.

Gli ioni positivi e negativi differiscono certamente in grandezza, e questa differenza diviene molto evidente per gas a bassa pressione. Alla pressione atmosferica, lo ione negativo, prodotto dall'azione della luce ultravioletta su un corpo carico negativamente, è della stessa grandezza dello ione prodotto dai raggi X, ma a basse pressioni J. J. Thomson ha mostrato che è identico al corpuscolo dell'elettrone, che ha una massa apparente di circa  $1/1000$  della massa dell'atomo di idrogeno. Un simile risultato è stato mostrato da Townsend valere per uno ione negativo prodotto dai raggi X a bassa pressione. Sembra che lo ione negativo a bassa pressione diffonda il suo ammasso collegato. Il risultato di Langevin, che la velocità dello ione negativo aumenta più rapidamente con il calare della pressione rispetto allo ione positivo, mostra che questo processo di rimozione dell'ammasso è assai considerevole alla pressione di 10 *mm* di mercurio.

Dobbiamo supporre che il processo di ionizzazione nei gas consiste nella rimozione di un corpuscolo negativo o elettrone dalla molecola del gas. Alla pressione atmosferica questo corpuscolo diviene immediatamente il centro di un'aggregazione delle molecole che si muovono con esso ed è lo ione negativo. Dopo la rimozione dello ione negativo la molecola contiene una carica positiva, e diviene probabilmente il centro di un agglomerato di nuove molecole.

Il termine elettrone e ione come usato in questo lavoro possono essere definiti nel modo seguente:

L'*elettrone* o *corpuscolo* è il corpo di più piccola massa finora noto alla scienza. Trasporta una carica negativa che vale  $3.4 \cdot 10^{-10}$  unità elettrostatiche. La sua presenza è stata rivelata solo quando è in rapido movimento, quando, per velocità sopra o vicino a  $10^{10}$  *cm/s*, possiede una massa apparente  $m$  data da  $e/m = 1.86 \cdot 10^7$  unità elettromagnetiche. Questa massa apparente cresce con la velocità quando ci si avvicina alla velocità della luce (si veda sez. 82).

Gli ioni prodotti nei gas a pressione ordinaria hanno una dimensione apparente, determinata dal loro tasso di diffusione, grande rispetto alla molecola del gas nel quale sono prodotti. Lo ione negativo consiste di un elettrone con un agglomerato di molecole ad esso attaccate e che si muovono con esso; lo ione positivo consiste di una molecola dalla quale è stato espulso un elettrone, con un agglomerato di molecole attaccate. A pressioni basse sotto l'azione di un campo elettrico l'elettrone non forma alcun agglomerato. Lo ione positivo è sempre di dimensioni atomiche, anche con gas a basse pressioni. Ogni ione trasporta una carica del valore di  $3.4 \cdot 10^{-10}$  unità elettrostatiche.

**41. Ioni prodotti per collisione.** La maggior parte della radiazione proveniente da corpi radioattivi consiste di un flusso di particelle cariche che si muovono con grande velocità. In questa radiazione, le particelle  $\alpha$ , che producono la maggior parte della ionizzazione in un gas, è formata da corpi carichi positivamente scagliati con velocità pari a circa un decimo della velocità della luce. I raggi  $\beta$  consistono di particelle cariche negativamente, che sono identiche ai raggi catodici prodotti in un tubo a vuoto e viaggiano con una velocità pari a circa la metà di quella della luce (cap. IV). Ognuna di queste particelle emesse, in virtù della loro grande energia cinetica, libera un grande numero di ioni per collisione con le molecole del gas lungo il loro cammino. Finora non è stata ottenuta alcuna evidenza sperimentale del numero di ioni prodotti da una singola particella, o del modo in cui la ionizzazione varia con la velocità, ma non vi sono dubbi che ogni corpo emesso produce molte migliaia di ioni lungo il suo cammino prima che la sua energia di movimento si esaurisca.

È già stato inoltre ricordato (sez. 29) che a basse pressioni gli ioni che si muovono sotto l'azione di un campo elettrico sono in grado di produrre nuovi ioni per collisioni con le molecole del gas. A basse pressioni lo ione negativo è identico all'elettrone libero nei tubi a vuoto, o emesso da una sostanza radioattiva.

Il libero cammino medio dello ione è inversamente proporzionale alla pressione del gas. Di conseguenza, se uno ione si muove in un campo elettrico, la velocità acquistata tra collisioni aumenta con il diminuire della pressione. Townsend ha mostrato che si producono occasionalmente nuovi ioni per collisione con lo ione negativo che si muove liberamente tra due punti tra i quali vi è una differenza di potenziale di  $10 V$ . Se la differenza è di circa  $20 V$ , si producono nuovi ioni ad ogni collisione<sup>30</sup>.

L'energia  $W$ , acquisita da uno ione di carica  $e$  che si muove liberamente tra due punti a differenza di potenziale  $V$ , è data da

$$W = Ve$$

Prendendo  $V = 20 V = \frac{20}{300} u.e.s.$ , ed  $e = 3.4 \cdot 10^{-10}$ , l'energia  $W$  richiesta nel caso di uno ione negativo per la produzione di ioni per collisione è data da

$$W = 2.3 \cdot 10^{-11} \text{ erg}$$

La velocità  $u$  acquistata dallo ione di massa  $m$  prima della collisione è data da

$$\frac{1}{2}mu^2 = Ve$$

e

$$u = \sqrt{\frac{2Ve}{m}}$$

Ora  $\frac{e}{m} = 1.86 \cdot 10^7 u.e.m$  per l'elettrone a basse velocità (sez. 82).

Prendendo  $V = 20 V$ , troviamo che

$$u = 2.7 \cdot 10^8 \frac{cm}{s}$$

Questa velocità è molto grande rispetto alla velocità di agitazione delle molecole del gas.

In un campo elettrico debole, gli ioni negativi producono ioni solo per collisione. Lo ione positivo, la cui massa è almeno 1000 volte superiore a quella dell'elettrone, non acquista una velocità sufficiente a generare ioni per collisione finché non si applica un campo elettrico quasi sufficiente a determinare una scintilla attraverso il gas.

Una stima dell'energia richiesta per la produzione di uno ione da parte dei raggi X è stata fatta da Rutherford e McClung. L'energia dei raggi era misurata dal loro effetto di riscaldamento, e determinata dal numero totale di ioni prodotti. Dall'ipotesi che *tutta* l'energia dei raggi sia spesa per produrre ioni, trovò che  $V = 175 V$  - un valore considerevolmente maggiore di quello osservato da Townsend dai dati di ionizzazione per collisione. La ionizzazione nei due casi, tuttavia, è prodotta in condizioni assai diverse, ed è impossibile stimare quanta energia dei raggi sia dissipata sotto forma di calore.

**42. Variazioni** sono osservate nella corrente di saturazione attraverso i gas, esposti alle radiazioni di corpi attivi, quando la pressione e natura del gas e la distanza tra gli elettrodi sono variati. Saranno considerati alcuni casi che presentano una particolare importanza nelle misure. Con materiali attivi non schermati la ionizzazione del gas è, per una grande estensione, dovuta ai raggi  $\alpha$ , che sono assorbiti nel loro passaggio attraverso pochi centimetri di aria. A causa di questo rapido assorbimento, la ionizzazione decresce rapidamente dalla superficie del corpo attivo, e ciò determina diversi fenomeni di conduttività rispetto alle caratteristiche osservate con i raggi Röntgen, dove la ionizzazione è nella maggioranza dei casi uniforme.

**43. Variazione della corrente con la distanza tra le piastre.** Si è trovato sperimentalmente<sup>31</sup> che l'intensità della ionizzazione, dovuta a una grande superficie piana di materia attiva, decade approssimativamente con una legge esponenziale con la distanza dalla piastra. Supponendo che il tasso di produzione degli ioni in ogni punto sia una misura dell'intensità  $I$  della radiazione, il valore di  $I$  in quel punto è dato da  $\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda x}$ , dove  $\lambda$  è una costante,  $x$  la distanza dalla piastra, e  $I_0$  l'intensità della radiazione sulla superficie della piastra.

<sup>30</sup>Alcune opinioni diverse sono state espresse sul valore di  $V$  richiesto per la produzione di ioni ad ogni collisione. Townsend lo considera di  $20 V$ ; Langevin di  $60 V$  e Stark di circa  $50 V$ .

<sup>31</sup>Rutherford, Phil. Mag. Gennaio 1899.

Mentre la legge esponenziale, in alcuni casi, rappresenta approssimativamente la variazione della ionizzazione con la distanza, in altre la divergenza da essa è ampia. La ionizzazione, dovuta a una superficie piana di polonio, per esempio, decade più rapidamente della legge esponenziale indicata. I raggi  $\alpha$  da una sostanza attiva come il radio sono altamente complessi; la legge di variazione della ionizzazione dovuta ad essi dipende dalla varietà delle condizioni. La distribuzione della ionizzazione è del tutto diversa a seconda che si impieghi uno strato di materia radioattiva spesso o molto spesso. Il problema è considerato in tutti i suoi aspetti alla fine del Cap. IV, ma per semplicità, si assume nei calcoli la validità della legge esponenziale.

Consideriamo due piastre parallele poste come in Figura 1, una delle quali è ricoperta con uno strato uniforme di materiale radioattivo. Se la distanza  $d$  tra le piastre è piccola rispetto alle dimensioni delle piastre, la ionizzazione vicino al loro centro sarà alquanto uniforme su ogni piano ad esse parallelo e che si trova tra di esse. Se  $q$  è il tasso di produzione degli ioni ad una distanza  $x$  e  $q_0$  quello alla superficie, allora  $q = q_0 e^{-\lambda x}$ . La corrente di saturazione  $i$  per area unitaria è data da

$$i = \int_0^d q e' dx = q_0 e' \int_0^d e^{-\lambda x} dx = \frac{q_0 e'}{\lambda} (1 - e^{-\lambda d})$$

dove  $e'$  è la carica su uno ione; pertanto, quando  $\lambda d$  è piccolo, cioè quando la ionizzazione tra le piastre è circa costante,

$$i = q_0 e' d$$

La corrente è allora proporzionale alla distanza tra le piastre. Quando  $\lambda d$  è grande, la corrente di saturazione  $i_0$  è uguale a  $\frac{q_0 e'}{\lambda}$ , ed è indipendente da ulteriori incrementi del valore di  $d$ . In un tale caso la radiazione è completamente assorbita nella produzione di ioni tra le piastre, e  $\frac{i}{i_0} = 1 - e^{-\lambda d}$ .

Per esempio, nel caso di uno strato sottile di ossido di uranio distribuito su una piastra grande, la ionizzazione è principalmente prodotta dai raggi la cui intensità è ridotta a metà nel passaggio attraverso  $4.3 \text{ mm}$  di aria, cioè  $\lambda = 1.6$ . La tabella seguente è un esempio della variazione di  $i$  con la distanza tra le piastre.

Distanza (mm)	Corrente di saturazione
2.5	32
5	55
7.5	72
10	85
12.5	96
15	100

L'incremento della corrente per uguali incrementi della distanza tra le piastre decresce rapidamente con la distanza attraversata dalla radiazione.

La distanza di  $15 \text{ mm}$  non era sufficiente per assorbire completamente tutta la radiazione, così che la corrente non raggiunse il suo valore limite.

Quando è presente più di un tipo di radiazione, la corrente di saturazione tra piastre parallele è data da

$$i = A (1 - e^{-\lambda d}) + A_1 (1 - e^{-\lambda_1 d}) + \dots$$

dove  $A$ ,  $A_1$  sono costanti e  $\lambda$ ,  $\lambda_1$  le costanti di assorbimento della radiazione nel gas.

Poiché le radiazioni sono diversamente assorbite nei differenti gas, la variazione di corrente con la distanza dipende dalla natura del gas tra le piastre.

**44. Variazione della corrente con la pressione.** Il tasso di produzione di ioni dovuto alle radiazioni da sostanze attive è direttamente proporzionale alla pressione del gas. Anche l'assorbimento della radiazione nel gas varia direttamente con la pressione. Il secondo risultato segue necessariamente se l'energia richiesta per produrre uno ione è indipendente dalla pressione.

Nei casi in cui la ionizzazione è uniforme tra due piastre parallele, la corrente varierà direttamente con la pressione; quando tuttavia la ionizzazione non è uniforme, si tiene conto dell'assorbimento della radiazione nel gas, e la corrente non diminuisce direttamente con la pressione finché la pressione è ridotta alla condizione in cui la ionizzazione è quasi uniforme. Consideriamo la variazione con la pressione della corrente di saturazione  $i$  tra due grandi piastre parallele, una delle quali è ricoperta con uno strato uniforme di materia attiva.

Sia  $\lambda_1$  la costante di assorbimento della radiazione nel gas per unità di pressione.

Per una pressione  $p$ , l'intensità  $I$  in ogni punto  $x$  è data da  $\frac{I}{I_0} = e^{-p\lambda_1 x}$ . La corrente di saturazione  $i$  è allora proporzionale a

$$\int_0^d p I dx = \int_0^d p I_0 e^{-p\lambda_1 x} dx = \frac{I_0}{\lambda_1} (1 - e^{-p\lambda_1 d})$$

Se  $r$  è il rapporto della corrente di saturazione per pressioni  $p_1$  e  $p_2$

$$r = \frac{1 - e^{-p_1 \lambda_1 d}}{1 - e^{-p_2 \lambda_1 d}}$$

Il rapporto è pertanto dipendente dalla distanza  $d$  tra le piastre e dall'assorbimento della radiazione da parte del gas.

La differenza nell'andamento delle curve pressione corrente è ben illustrata in Figura 8, dove le curve<sup>32</sup> riguardano l'idrogeno, l'aria e l'acido carbonico per piastre distanti tra 3 e 5  $cm$ .

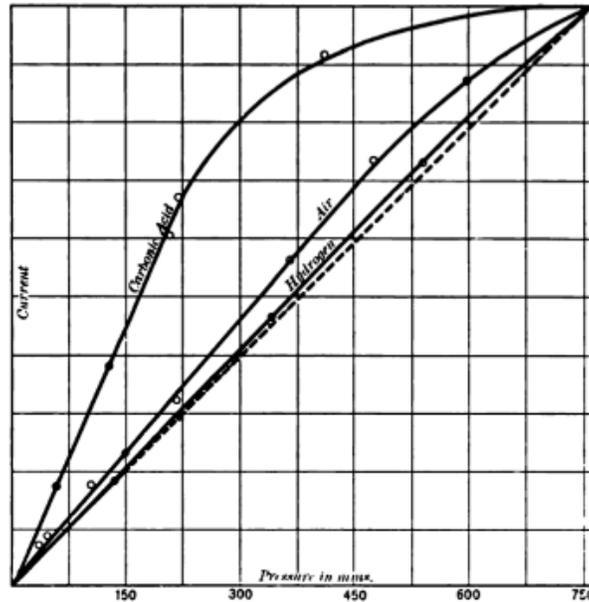


Fig. 8.

Per favorire il confronto, la corrente a pressione e temperatura atmosferica è assunta come unitaria. Il valore effettivo della corrente era maggiore nell'acido carbonico e minore nell'idrogeno. Nell'idrogeno, dove l'assorbimento è piccolo la corrente sull'intero intervallo è quasi proporzionale alla pressione. Nell'acido carbonico, dove l'assorbimento è grande, la corrente diminuisce dapprima lentamente con la pressione, ma è quasi proporzionale ad essa al di sotto del valore di 235  $mmHg$ . La curva per l'aria occupa una posizione intermedia.

Nei casi in cui la distanza tra le piastre è grande, la corrente di saturazione rimarrà costante con la diminuzione della pressione finché l'assorbimento è così ridotto che la radiazione raggiunge l'altra piastra.

Un interessante risultato deriva dal rapido assorbimento della radiazione da parte del gas. Se la corrente è osservata tra due piastre parallele fisse, distanti  $d_1$  e  $d_2$  rispettivamente da una grande superficie piana di materia attiva, la corrente inizialmente aumenta al diminuire della pressione, passa attraverso un massimo, e poi diminuisce. In un tale caso sperimentale la piastra inferiore attraverso la quale la radiazione passa è fatta o di garza o di un sottile foglio metallico per permettere alla radiazione di attraversarla facilmente.

La corrente di saturazione  $i$  è ovviamente proporzionale a

$$\int_{d_1}^{d_2} p I_0 e^{-p\lambda_1 d} = \frac{I_0}{\lambda_1} (e^{-p\lambda_1 d_1} - e^{-p\lambda_1 d_2})$$

Questa è una funzione della pressione, ed ha un massimo quando

$$\ln \frac{d_1}{d_2} = -p\lambda_1 (d_2 - d_1)$$

Per esempio, se la materia attiva è uranio,  $p\lambda_1 = 1.6$  per i raggi  $\alpha$  a pressione atmosferica. Se  $d_2 = 3$  e  $d_1 = 1$ , la corrente di saturazione raggiunge un massimo quando la pressione è ridotta a circa  $1/3$  di un'atmosfera. Questo risultato è stato verificato sperimentalmente.

**45. Conduttività di diversi gas sottoposto a radiazioni.** Per una data intensità di radiazione, il tasso di produzione di ioni in un gas varia per diversi gas e aumenta con la loro densità. Strutt<sup>33</sup> ha compiuto un esame completo della conduttività dei gas esposti a diversi tipi di raggi emessi da corpi radioattivi. Per evitare correzioni per ogni tipo di assorbimento della radiazione nei vari gas, la loro pressione era sempre ridotta fino ad ottenere una proporzionalità diretta, quando, come abbiamo visto in precedenza, la ionizzazione deve essere ovunque uniforme attraverso il gas. Per ogni tipo di raggio, la ionizzazione dell'aria è presa come unitaria. Le correnti attraverso i gas furono determinate a diverse pressioni, e furono ridotte ad una pressione comune assumendo che la ionizzazione fosse proporzionale alla pressione.

Con materiale attivo non schermato, la ionizzazione è quasi interamente dovuta ai raggi  $\alpha$ . Quando la sostanza attiva è ricoperta con uno strato di alluminio spesso 0.01  $cm$ , la ionizzazione è principalmente dovuta ai  $\beta$  o raggi catodici, e

<sup>32</sup>Rutherford, Phil. Mag. Gennaio 1899.

<sup>33</sup>Strutt, Phil. Trans. A, p. 507, 1901 a Proc. Roy. Soc. p. 208, 1903.

quando è ricoperta con 1 *cm* di piombo la ionizzazione è solamente dovuta ai  $\gamma$  o ai raggi penetranti. Esperimenti sui raggi  $\gamma$  del radio sono stati eseguiti osservando il tasso di scarica di uno speciale elettroscopio a foglie d'oro riempito con il gas da esaminare ed esposto all'azione dei raggi. La tabella seguente mostra la conduttività relativa dei gas esposti ai vari tipi di radiazione ionizzante.

Gas	Densità relativa	Conduttività relativa			
		Raggi $\alpha$	Raggi $\beta$	Raggi $\gamma$	Raggi Röntgen
Idrogeno	0.0693	0.226	0.157	0.169	0.114
Aria	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ossigeno	1.11	1.16	1.21	1.17	1.39
Biossido di Carbonio	1.53	1.54	1.57	1.53	1.60
Cianogeno	1.86	1.94	1.86	1.71	1.05
Biossido di zolfo	2.19	2.04	2.31	2.13	7.97
Cloroformio	4.32	4.44	4.89	4.88	31.9
Ioduro di Metile	5.05	3.51	5.18	4.80	72.0
Tetracloruro di Carbonio	5.31	5.34	5.83	5.67	45.3

Tranne l'idrogeno, si vede che la ionizzazione dei gas è circa proporzionale alla loro densità per i raggi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  del radio. I risultati ottenuti da Strutt per i raggi Röntgen sono assai diversi; per esempio, la conduttività relativa prodotta nello ioduro di metile era maggiore di 14 volte quella dovuta ai raggi del radio. Le conduttività relative dei gas esposti ai raggi X è stata recentemente esaminata da McClung<sup>34</sup> e Eve<sup>35</sup>, che hanno trovato che la conduttività dipende dal potere di penetrazione dei raggi X impiegati. I risultati da loro ottenuti saranno discussi nella sezione 107.

Questa differenza di conduttività nei gas è dovuta all'ineguale assorbimento della radiazione. Chi scrive ha mostrato<sup>36</sup> che il numero totale di ioni prodotti dai raggi  $\alpha$  per uranio, se completamente assorbiti dai diversi gas, non è molto diverso. Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Gas	Ionizzazione totale
Aria	100
Idrogeno	95
Ossigeno	106
Acido Carbonico	96
Gas di acido cloridrico	102
Ammoniaca	101

I valori, sebbene solo approssimati, sembrano mostrare che l'energia richiesta per la produzione di uno ione è probabilmente non molto diversa per i vari gas. Assumendo che tale energia per diversi gas sia circa la stessa, segue che le conduttività relative sono proporzionali all'assorbimento relativo delle radiazioni.

Un simile risultato è stato trovato da McLennan per i raggi catodici. Egli dimostrò che la ionizzazione era direttamente proporzionale all'assorbimento dei raggi nel gas, mostrando quindi che è richiesta la stessa energia per produrre uno ione in tutti i gas esaminati.

**46. Gradiente di Potenziale.** Il gradiente di potenziale normale tra due elettrodi carichi è sempre squilibrato quando il gas è ionizzato nello spazio tra di essi. Se il gas è uniformemente ionizzato tra due piastre parallele, Child e Zeleny hanno mostrato che vi è un'improvvisa caduta di potenziale vicino alla superficie di entrambe le piastre, e che il campo elettrico è sensibilmente uniforme negli spazi ad esse intermedi. L'anomalia del gradiente di potenziale dipende dalla differenza di potenziale applicata, ed è diversa alla superficie delle due piastre.

Nella maggior parte delle misure di radioattività il materiale è distribuito su una sola piastra. In un tale caso la ionizzazione è per una grande estensione confinata al volume dell'aria vicina alla piastra attiva. Il gradiente di potenziale in un tale caso è mostrato in Figura 9. La linea tratteggiata mostra la variazione del potenziale in ogni punto tra le piastre quando non vi è ionizzazione tra esse. La curva A per piccola ionizzazione, come quella prodotta dall'uranio, la curva B per ionizzazione intensa prodotta da una sostanza molto attiva. In entrambi i casi il gradiente di potenziale è minimo vicino alla piastra attiva, e massimo vicino alla piastra opposta. Per ionizzazione molto intensa è molto piccolo vicino alla superficie attiva. Il gradiente di potenziale varia poco con il tipo di carica, positiva o negativa, presente sulla piastra attiva.

<sup>34</sup>McClung, Phil. Mag. Settembre 1904.

<sup>35</sup>Eve, Phil. Mag. Dicembre 1904.

<sup>36</sup>Rutherford, Phil. Mag. p. 137, Gennaio 1899.

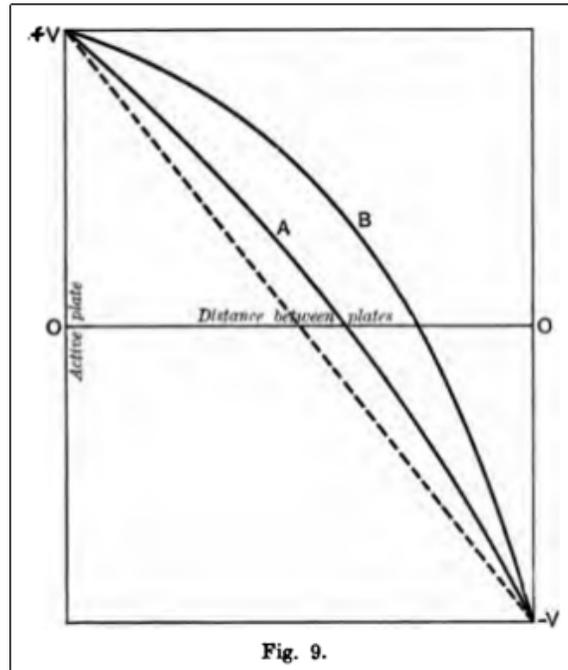


Fig. 9.

**47. Variazione della corrente con la tensione per la superficie di ionizzazione.** Alcuni risultati molto interessanti, che danno la variazione della corrente con la tensione, si osservano quando la ionizzazione è intensa e confinata allo spazio vicino alla superficie di una o due piastre parallele tra le quali si misura la corrente.

La teoria di questo fenomeno è stata elaborata in modo indipendente da Child<sup>37</sup> e Rutherford<sup>38</sup>. Sia  $V$  la differenza di potenziale tra due piastre parallele poste a distanza  $d$ . Supponiamo che la ionizzazione sia confinata in un sottile strato vicino alla superficie della piastra A (vedi Figura 1) che è carica positivamente. Quando si applica un campo elettrico, vi è una distribuzione di ioni positivi tra le piastre A e B.

Sia  $n_1$  il numero di ioni positivi per unità di volume ad una distanza  $x$  dalla piastra A,  $k_1$  la mobilità dello ione positivo, e  $e$  la carica di uno ione.

La corrente  $i_1$  per centimetro quadrato attraverso il gas è costante per tutti i valori di  $x$ , ed è data da

$$i_1 = K_1 n_1 e \frac{dV}{dx}$$

Dall'equazione di Poisson

$$\frac{d^2V}{dx^2} = 4\pi n_1 e$$

si ha

$$i_1 = \frac{K_1}{4\pi} \frac{dV}{dx} \frac{d^2V}{dx^2}$$

Integrando

$$\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 = \frac{8\pi i_1 x}{K_1} + A$$

dove  $A$  è una costante. Ora  $A$  è uguale al valore di  $\frac{dV}{dx}$  quando  $x = 0$ . Per una ionizzazione molto intensa, il valore di  $\frac{dV}{dx}$  può essere reso estremamente piccolo.

Ponendo  $A = 0$ , vediamo che

$$\frac{dV}{dx} = \pm \sqrt{\frac{8\pi i_1 x}{K_1}}$$

Questo fornisce il gradiente di potenziale tra le piastre per diversi valori di  $x$ .

Integrando tra i limiti 0 e  $d$ ,

$$V = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{8\pi i_1 x}{K_1}} d^{\frac{3}{2}}$$

$$i_1 = \frac{9V^2}{32\pi d^3} K_1$$

<sup>37</sup>Child, Phys. Rev. Vol. 12, 1901.

<sup>38</sup>Rutherford, Phil. Mag. p. 210, Agosto 1901; Phys. Rev. Vol. 13, 1901.

Se  $i_2$  è il valore della corrente con un campo elettrico invertito, e  $K_2$  la velocità dello ione negativo,

$$i_2 = \frac{9V^2}{32\pi d^3} K_2$$

e

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{K_1}{K_2}$$

La corrente nelle due direzioni è allora direttamente proporzionale alle velocità degli ioni positivi e negativi. La corrente varierà direttamente con il quadrato della differenza di potenziale applicata, e inversamente con il cubo della distanza tra le piastre.

La condizione teorica della ionizzazione superficiale non può essere soddisfatta dalla ionizzazione dovuta alle sostanze attive, poiché la ionizzazione si estende alcuni centimetri dalla piastra attiva. Se, tuttavia, la distanza tra le piastre è grande rispetto alla distanza sulla quale si estende la ionizzazione, i risultati saranno in parziale accordo con la teoria. Usando una preparazione attiva di radio, chi scrive ha compiuto alcuni esperimenti sulla variazione della corrente con la tensione tra le piastre parallele distanti tra loro circa  $10\text{ cm}$ <sup>39</sup>.

I risultati mostrarono

- (1) che la corrente attraverso il gas per piccoli voltaggi aumenta più rapidamente della differenza di potenziale applicata, ma non così rapidamente come il quadrato della differenza di potenziale.
- (2) La corrente attraverso il gas dipendeva dalla direzione del campo elettrico; la corrente era sempre più piccola quando la piastra attiva era carica positivamente a causa della minore mobilità dello ione positivo. La differenza tra  $i_1$  e  $i_2$  era maggiore quando il gas era secco, che è la condizione per la massima differenza di potenziale tra le velocità degli ioni.

Un interessante risultato deriva dalla teoria precedente. Per dati valori di  $V$  e  $d$ , la corrente non può superare un certo valore definito, tuttavia molta ionizzazione può essere aumentata. In un modo simile, quando si usa una preparazione attiva di radio come sorgente di ionizzazione, si è trovato che, per voltaggio e distanza tra le piastre dati, la corrente non aumenta oltre un certo valore anche se aumenta l'attività del materiale.

**48. Campo magnetico prodotto da uno ione in movimento.** Si mostrerà che i due tipi di radiazione più importanti emessi dalle sostanze radioattive sono particelle cariche, scagliate spontaneamente con grande velocità. I raggi facilmente assorbibili, noti come raggi  $\alpha$ , sono atomi di materia carichi positivamente; i raggi penetranti, noti come raggi  $\beta$ , trasportano una carica negativa e risultano identici ai raggi catodici prodotti dalla scarica elettrica in un tubo a vuoto.

I metodi adottati per determinare le caratteristiche di questi raggi sono molto simili a quelli usati da J. J. Thomson per mostrare che i raggi catodici erano composti da un fascio di particelle cariche negativamente emesse con grande velocità.

La prova che i raggi catodici fossero corpuscoli carichi con massa molto piccola rispetto a quella dell'atomo di idrogeno, segnò un periodo importante nella fisica: non solo ci aprì un terreno fertile di ricerca, ma modificò pure profondamente le nostre precedenti concezioni sulla struttura della materia.

Si presenterà un breve resoconto conforme agli effetti prodotti da un corpo carico in movimento, e alcuni dei metodi sperimentali utilizzati per determinare la massa e la velocità delle particelle del fascio catodico<sup>40</sup>.

Si consideri uno ione di raggio  $a$ , che trasporta una carica di elettricità  $e$ , e che si muove con velocità  $u$ , piccola rispetto alla velocità della luce. A causa del moto, si crea un campo magnetico attorno allo ione carico, che è trasportato con esso. Lo ione carico in moto costituisce un elemento di corrente di intensità  $eu$ , e il campo magnetico  $H$  in ogni punto distante  $r$  dalla sfera è dato da

$$H = \frac{eu \sin \theta}{r^2}$$

dove  $\theta$  è l'angolo che il raggio vettore forma con la direzione del moto. Le linee di forza magnetica sono cerchi attorno all'asse del moto. Quando lo ione si muove con una velocità piccola rispetto a quella della luce, le linee della forza elettrica sono quasi radiali, ma avvicinandosi alla velocità della luce, tendono a lasciare l'asse del moto e a curvare verso l'equatore. Quando la velocità del corpo è molto prossima a quella della luce, il campo elettromagnetico è concentrato su una grande estensione nel piano equatoriale.

La presenza di un campo magnetico attorno al corpo in movimento implica che l'energia magnetica è accumulata nel mezzo che lo circonda. La quantità di questa energia può essere molto calcolata semplicemente per basse velocità.

In un campo magnetico di intensità  $H$ , l'energia magnetica accumulata per unità di volume del mezzo per permeabilità unitaria è data da  $\frac{H^2}{8\pi}$ . Integrando il valore di questa espressione su una regione esterna alla sfera di raggio  $a$ , l'energia

<sup>39</sup>Rutherford, Phil. Mag. Agosto 1901.

<sup>40</sup>Un semplice ed eccellente esame degli effetti prodotti dal moto di uno ione carico e anche della teoria elettronica della materia fu fatto da Sir Oliver Losge nel 1908 in un articolo intitolato: "Electrons" (Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Parte 159, Vol. 32, 1903). Si veda anche J. J. Thomson Electricity and Matter (Scribner, New York, 1904).

magnetica totale dovuta al moto del corpo carico è data da

$$\begin{aligned} \int_a^\infty \frac{H^2}{8\pi} d(vol) &= \frac{e^2 u^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_a^\infty \frac{\sin^2 \theta}{r^4} r \sin \theta d\phi r d\theta dr \\ &= \frac{e^2 u^2}{4} \int_0^\pi \int_a^\infty \frac{(1 - \cos^2 \theta)}{r^2} \sin \theta d\theta dr \\ &= \frac{e^2 u^2}{3} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{e^2 u^2}{3a} \end{aligned}$$

L'energia magnetica, dovuta al moto, è analoga all'energia cinetica, dipende, infatti, dal quadrato della velocità del corpo. A causa della carica trasportata dallo ione, ad esso è associata un'energia cinetica addizionale. Se la velocità dello ione è cambiata, le forze elettromagnetiche tendono a impedire il cambiamento del moto, ed è necessario più lavoro durante la variazione rispetto al caso in cui lo ione rimane invariato. L'energia cinetica ordinaria associata ad esso è aumentata di  $\frac{e^2 u^2}{3a}$ . Si comporta quindi come se possedesse una massa  $m + m_1$  dove  $m_1$  è la massa elettrica, con valore  $\frac{2e^2}{3a}$ .

Abbiamo qui considerato solo la massa elettrica di uno ione carico in movimento con una piccola velocità rispetto a quella della luce. Quando la velocità si avvicina a quella della luce, l'energia magnetica non può più a lungo essere espressa dall'equazione già data. I valori generali della massa elettrica di un corpo carico in funzione della velocità fu ottenuto per la prima volta da J. J. Thomson<sup>41</sup> nel 1887. Un esame più completo fu compiuto nel 1899 da Heaviside<sup>42</sup>, mentre Searle<sup>43</sup> trattò il caso di un ellissoide carico. Recentemente, fu di nuovo affrontato da Abraham<sup>44</sup>. Sono state ottenute espressioni un poco diverse per la variazione della massa elettrica con la velocità, dipendenti dalle condizioni assunte per la distribuzione dell'elettricità sulla sfera. L'espressione trovata da Abraham, che è stata utilizzata da Kaufmann per mostrare che la massa dell'elettrone è in origine elettromagnetica, è presentata nella sezione 82.

Tutti i calcoli sono concordi nel mostrare che la massa elettrica è praticamente costante per basse velocità, ma aumenta avvicinandosi alla velocità della luce. Più ci si avvicina alla velocità della luce, maggiore è la forza resistente alla variazione del moto. Una forza infinita sarebbe necessaria per far raggiungere ad un elettrone la velocità della luce, cosicché, in accordo con la presente teoria, sarebbe impossibile per un elettrone viaggiare con velocità maggiore di quella della luce, cioè più veloce di una perturbazione elettromagnetica viaggiante nell'etere.

L'importanza di questa deduzione si trova nel fatto che una carica elettrica in moto, del tutto indipendente da ogni nucleo materiale, possiede una massa apparente in virtù del suo moto, e che questa massa è funzione della velocità. Vedremo, infatti, in seguito (sezione 82) che la massa apparente delle particelle che formano il flusso catodico può essere spiegata grazie alla loro carica, senza la necessità di assumere la presenza di un corpo materiale sul quale la carica è distribuita. Questo ha portato alla proposta che tutta la massa può essere in origine elettrica, e dovuta esclusivamente all'elettricità in movimento.

**49. Azione di un campo magnetico su uno ione in movimento.** Si consideri il caso di uno ione di massa  $m$  che trasporta una carica  $e$  e che si muove liberamente con una velocità  $u$ . Se  $u$  è piccola rispetto alla velocità della luce, lo ione in moto corrisponde ad un elemento di corrente di grandezza  $eu$ . Se lo ione si muove in un campo magnetico esterno di intensità  $H$ , è sottoposto ad una forza perpendicolare sia alla direzione del moto sia a quella della forza magnetica e uguale in intensità a  $Heu \sin \theta$ , dove  $\theta$  è l'angolo tra la direzione della forza magnetica e quella del moto. Poiché la forza dovuta al campo magnetico è sempre perpendicolare alla direzione del moto, non ha effetto sulla velocità della particella, ma può solo alterare la direzione del suo cammino.

Se  $\rho$  è il raggio di curvatura del cammino dello ione, la forza lungo la normale è uguale a  $\frac{mu^2}{\rho}$ , ed è equilibrata dalla forza  $Heu \sin \theta$ .

Se  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , cioè se lo ione si muove perpendicolarmente alla direzione del campo magnetico  $Heu = \frac{mu^2}{\rho}$  o  $H\rho = \frac{m}{e}u$ . Poiché  $u$  è costante, anche  $\rho$  è costante, cioè la particella descrive un'orbita circolare di raggio  $\rho$ . Il raggio dell'orbita circolare è allora direttamente proporzionale ad  $u$ , e inversamente ad  $H$ .

Se lo ione si muove con un angolo  $\theta$  rispetto alla direzione del campo magnetico, descrive una curva che è la composizione del moto di una particella di velocità  $u \sin \theta$  perpendicolare al campo e  $u \cos \theta$  nella direzione del campo. Il primo descrive un'orbita circolare di raggio  $\rho$ , dato da  $H\rho = \frac{m}{e}u \sin \theta$ ; il secondo non risente del campo magnetico e si muove di moto uniforme nella direzione del campo magnetico con una velocità  $u \cos \theta$ . Il moto della particella è di conseguenza elicoidale, tracciato su un cilindro di raggio  $\rho = \frac{mu \sin \theta}{eH}$ , il cui asse è nella direzione del campo magnetico. Pertanto, uno ione lanciato obliquamente alla direzione di un campo magnetico uniforme si muove sempre in modo elicoidale con asse parallelo alle linee di forza magnetiche<sup>45</sup>.

<sup>41</sup>J. J. Thomson, Phil. Mag. Aprile 1887.

<sup>42</sup>Heaviside, Collected Papers, Vol. II. p. 514.

<sup>43</sup>Searle, Phil. Mag. Ottobre 1897.

<sup>44</sup>Abraham, Phys. Zeit. 4, No. 1b, p. 57, 1902.

<sup>45</sup>Una completa descrizione del cammino di uno ione che si muove in varie condizioni è dato da J. J. Thomson, Conduction of Electricity in Gases (Camb. Univ. Press, 1903), pp. 79-90.

**50. Determinazione di  $\frac{e}{m}$  per il flusso catodico.** I raggi catodici, osservati la prima volta da Varley, furono studiati in dettaglio da Crookes. Questi raggi sono emessi dal catodo in un tubo a vuoto a bassa pressione. Essi viaggiano in linea retta, e sono facilmente deviati da un magnete e producono una forte luminosità in una varietà di sostanze poste sul loro cammino. I raggi sono deviati da un campo magnetico nella stessa direzione attesa per una particella carica negativamente emessa dal catodo. Per spiegare le peculiari proprietà di questi raggi Crookes suppose che fossero particelle cariche negativamente che si muovono con grande velocità e che costituiscono, come egli chiamò in modo appropriato, “un nuovo o quarto stato della materia”. La natura di questi raggi fu per venti anni oggetto di molte controversie, mentre alcuni sostenevano la loro caratteristica materiale, altri le consideravano come una forma speciale di un modo ondulatorio nell'etere.

Perrin e J. J. Thomson mostrarono che i raggi trasportano sempre una carica negativa, mentre Lenard fece l'importante scoperta che i raggi passavano attraverso fogli metallici sottili e altre sostanze opache alla luce ordinaria. Usando queste proprietà, inviò i raggi attraverso una sottile finestra e ne esaminò le proprietà all'esterno del tubo a vuoto in cui erano prodotti.

L'assorbimento dei raggi da parte della materia si mostrò quasi proporzionale alla densità su un intervallo molto ampio, e indipendente dalla costituzione chimica.

La natura di questi raggi fu in seguito dimostrata da J. J. Thomson<sup>46</sup> nel 1897. Se i raggi erano particelle cariche negativamente, dovevano deflettere passando attraverso un campo elettrico e magnetico. Un tale esperimento fu effettuato da Hertz, ma con risultati negativi. J. J. Thomson, tuttavia, trovò che i raggi erano deflessi da un campo elettrico nella direzione attesa per cariche negative, e mostrò che l'insuccesso di Hertz era dovuto al mascheramento del campo elettrico da parte di una forte ionizzazione prodotta nel gas dal flusso catodico. Questo effetto fu ridotto riducendo la pressione del gas nel tubo.

Il dispositivo sperimentale usato per la deflessione elettrica dei raggi è mostrato in Figura 10.

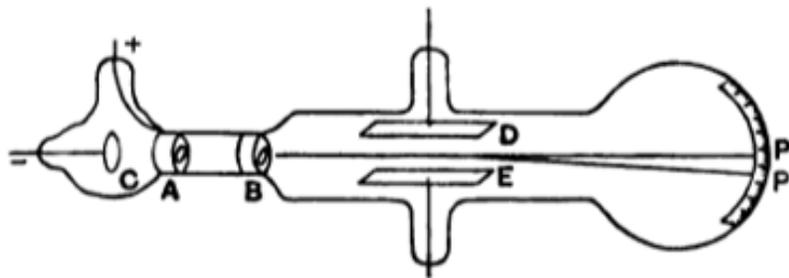


Fig. 10.

I raggi catodici sono generati al catodo C, e il fascio è focalizzato passando attraverso un disco perforato AB. I raggi passavano poi tra due piastre parallele isolate D ed E, distanti  $d$  centimetri, e poste ad una differenza di potenziale costante  $V$ . Il punto di incidenza del fascio di raggi era indicato da un tratto luminoso prodotto su uno schermo fluorescente posto in PP'.

La particella trasportante una carica negativa  $e$  nel passaggio attraverso le piastre cariche, è sottoposta all'azione di una forza  $Xe$  diretta verso la piastra positiva, dove  $X$ , l'intensità del campo elettrico, è data da  $\frac{V}{d}$ .

L'applicazione del campo elettrico produce, pertanto, uno spostamento del tratto luminoso verso la piastra positiva. Se ora si applica un campo magnetico uniforme alle piastre D ed E, perpendicolare al tratto dei raggi, e parallelo al piano delle piastre e in una direzione tale che le forze elettriche e magnetiche risultano tra loro opposte, il punto luminoso può essere riportato alla sua posizione indisturbata aggiustando l'intensità del campo magnetico. Se  $H$  è l'intensità del campo magnetico, la forza sulla particella dovuta al campo magnetico è  $Heu$ , e quando si raggiunge un equilibrio

$$Heu = Xe$$

o

$$(2.0.2) \quad u = \frac{X}{H}$$

Se ora agisce solo il campo magnetico  $H$ , la curvatura  $\rho$  del cammino dei raggi tra le piastre può essere dedotta dalla deflessione del punto luminoso. Ma abbiamo visto che

$$(2.0.3) \quad H\rho = \frac{mu}{e}$$

Dalle equazioni precedenti, si può determinare il valore di  $u$  e di  $\frac{e}{m}$  per la particella.

La velocità  $u$  non è costante, ma dipende dalla differenza di potenziale tra gli elettrodi, e questa a sua volta dipende dalla pressione e dal tipo di gas residuo nel tubo.

<sup>46</sup>J. J. Thomson, Phil. Mag. p. 293, 1897.

Alterando questi fattori, le particelle catodiche possono acquistare velocità varianti tra  $10^9$  e  $10^{10} \frac{cm}{s}$ . Questa velocità è enorme rispetto a quelle che si possono imprimere con mezzi solamente meccanici. D'altro canto, il valore di  $\frac{e}{m}$  per le particelle è alquanto costante per diverse velocità.

Come risultato di una serie di esperimenti il valore medio ottenuto è  $\frac{e}{m} = 7.7 \cdot 10^6$ . Il valore di  $\frac{e}{m}$  è indipendente dal metallo utilizzato come catodo. Un valore di  $\frac{e}{m}$  simile fu ottenuto da Lenard<sup>47</sup> e altri.

Kaufmann<sup>48</sup> e Simon<sup>49</sup> utilizzarono un metodo diverso per determinare il valore di  $\frac{e}{m}$ . Misurarono la differenza di potenziale  $V$  tra i terminali del tubo. Il lavoro fatto su una particella carica in movimento da un estremo all'altro del tubo è  $Ve$ , e questo deve essere uguale all'energia cinetica  $\frac{1}{2}mu^2$  acquisita durante il moto. Pertanto

$$(2.0.4) \quad \frac{e}{m} = \frac{u^2}{2V}$$

Combinando questa equazione con la precedente ottenuta con misure di deflessione magnetica, si possono determinare  $u$  e  $\frac{e}{m}$ .

Simon trovò con questo metodo

$$\frac{e}{m} = 1.865 \cdot 10^7$$

Vedremo in seguito (sezione 82) che un simile valore fu dedotto da Kaufmann per gli elettroni emessi dal radio.

Questi risultati, che si sono basati sull'effetto di un campo magnetico ed elettrico su uno ione in movimento, furono confermati da Weichert, che determinò con un metodo diretto il tempo impiegato dalla particella ad attraversare una distanza nota.

Le particelle che formano il flusso catodico furono chiamate "corpuscoli" da J. J. Thomson. Il nome "elettrone", impiegato la prima volta da Johnstone Stoney, è stato poi ad esse assegnato nell'uso comune<sup>50</sup>.

I metodi prima descritti non danno la massa degli elettroni, ma solo il rapporto tra la carica e la massa. Un confronto diretto è, tuttavia, possibile tra  $\frac{e}{m}$  per l'elettrone e il corrispondente valore per l'atomo di idrogeno supposto libero nell'elettrolisi dell'acqua. Si suppone che ogni atomo di idrogeno trasporti una carica  $e$ , ed è noto che sono richiesti 96000 coulomb di elettricità, o,  $10^4 u.e.m.$  per liberare un grammo di idrogeno. Se  $N$  è il numero di atomi in un grammo di idrogeno, allora  $Ne = 10^4$ . Ma se  $m$  è la massa di un atomo di idrogeno, allora  $Nm = 1$ . Dividendoli tra loro si ha  $\frac{e}{m} = 10^4$ . Abbiamo già visto che uno ione gassoso trasporta la stessa carica di un atomo di idrogeno, mentre prove indirette mostrano che gli elettroni trasportano la stessa carica di uno ione, e di conseguenza la stessa carica di un atomo di idrogeno. Si può, pertanto, concludere, che la massa apparente di un elettrone è solo  $\frac{1}{1000}$  della massa di un atomo di idrogeno. L'elettrone allora si comporta come il più piccolo corpo noto alla scienza.

Nel successivo esperimento J. J. Thomson mostrò che gli ioni negativi liberati a bassa pressione da un filamento incandescente di carbonio, e anche gli ioni liberati da una lastra di zinco esposta all'azione della luce ultravioletta, avevano lo stesso valore di  $\frac{e}{m}$  degli elettroni prodotti in un tubo a vuoto. Appariva quindi probabile che l'elettrone fosse un costituente di tutta la materia. Questa ipotesi ricevette un forte sostegno dalle misure di caratteristiche molto diverse. Zeeman nel 1897 trovò che le righe dello spettro da una sorgente di luce esposta in un forte campo magnetico erano spostate e raddoppiate. Un lavoro successivo mostrò che le righe in alcuni casi sono triple, in altre sestuple e, in qualche caso, la moltiplicazione è ancora maggiore. Questi risultati ottennero una spiegazione generale nella teoria della radiazione precedentemente proposta da Lorenz e Larmor. Si supponeva che la radiazione, emessa da una qualsiasi sorgente, derivasse dal moto orbitale o oscillatorio della parte carica costituente l'atomo. Poiché uno ione in movimento è sottoposto all'azione di un campo magnetico esterno, il moto dello ione carico è disturbato quando la sorgente luminosa è esposta tra i poli di un forte magnete. Ciò determina una piccola variazione nel periodo della luce emessa, e una linea brillante nello spettro è, di conseguenza, spostata per effetto del campo magnetico. Secondo la teoria, la piccola variazione nella lunghezza d'onda della luce emessa dipende dall'intensità del campo magnetico e dal rapporto  $\frac{e}{m}$  tra la carica trasportata dallo ione e la sua massa. Confrontando la teoria con i risultati sperimentali, si dedusse che lo ione in movimento trasportava una carica negativa, e che il valore di  $\frac{e}{m}$  era circa di  $10^7$ . Lo ione carico, responsabile della radiazione da un corpo luminoso, è allora identico all'elettrone libero in un tubo a vuoto.

Appare allora ragionevole supporre che gli atomi di tutti i corpi siano complessi e composti, almeno in parte, di elettroni, la cui massa apparente è molto piccola rispetto a quella dell'atomo di idrogeno. Le proprietà di tali cariche incorporee è stata esaminata dal punto di vista matematico tra gli altri da Larmor, che vide in questa ipotesi la base fondamentale di una teoria della materia. J. J. Thomson e Lord Kelvin hanno studiato matematicamente certe disposizioni di un numero di elettroni che sono stabili per piccole perturbazioni. Questo tema sarà discusso più in dettaglio nella sezione 270.

<sup>47</sup>Lenard, Annal. d. Phys. 64, p. 279, 1898.

<sup>48</sup>Kaufmann, Annal. d. Phys. 61, p. 544; 62, p. 596, 1897; 65, p. 481, 1898.

<sup>49</sup>Simon, Annal. d. Phys. 69, p. 589, 1899.

<sup>50</sup>Una discussione completa dei vari metodi impiegati per misurare la velocità e la massa degli elettroni e anche della teoria sulla quale esse sono basate è reperibile in J. J. Thomson, Conduction of Electricity through Gases.

**51. Raggi canale.** Se una scarica passa attraverso un tubo a vuoto dotato di un catodo perforato, entro certi limiti di pressione, si osserva un fascio luminoso che passa attraverso i fori ed emerge dalla parte del catodo più lontana dall'anodo. Questi raggi furono osservati la prima volta da Goldstein<sup>51</sup> e furono da lui chiamati i "Raggi Canale". Questi raggi viaggiano in linea retta e producono fosforescenza in varie sostanze.

Wien<sup>52</sup> mostrò che i raggi canale erano deflessi da intensi campi elettrici e magnetici, ma la deflessione era molto piccola rispetto a quella dei raggi catodici in simili condizioni. La deflessione era in direzione opposta ai raggi catodici, e ciò indica che i raggi canale consistono di ioni positivi. Wien determinò la loro velocità e il rapporto  $\frac{e}{m}$ , misurando la quantità della loro deflessione magnetica ed elettrica. Il valore di  $\frac{e}{m}$  si mostrò variabile, dipendendo dal gas nel tubo, ma il valore massimo osservato era  $10^4$ . Ciò mostra che lo ione positivo, in nessun caso, ha una massa minore di quella dell'atomo di idrogeno. Sembra probabile che i raggi canale consistano di ioni positivi, derivati o dal gas o dagli elettrodi, che viaggiano verso il catodo, e hanno sufficiente velocità per passare attraverso gli spazi del catodo e apparire oltre il gas.

È notevole che non sia stato osservato alcun caso in cui il portatore di una carica positiva ha una massa apparente minore di quella dell'atomo di idrogeno. L'elettricità positiva appare sempre associata con corpi di dimensioni atomiche. La corrispondente carica positiva rimane dietro l'atomo e viaggia con esso. Questa differenza tra elettricità positiva e negativa appare essere fondamentale, e nessuna spiegazione appare sinora imminente.

**52. Radiazione di energia.** Se un elettrone si muove di moto uniforme in linea retta con una velocità costante, il campo magnetico che viaggia con esso, rimane costante, e non vi è perdita di energia per radiazione. Se, tuttavia, il suo moto è accelerato o ritardato, il campo magnetico è alterato, e vi è una perdita di energia dell'elettrone sotto forma di radiazione elettromagnetica. Il tasso di perdita di energia da un elettrone accelerato fu calcolata la prima volta da Larmor<sup>53</sup> pari a  $\frac{2e^2}{3V} \times (\text{accelerazione})^2$ , dove  $e$  è la carica sull'elettrone in unità elettromagnetiche, e  $V$  la velocità della luce.

Ogni variazione nella velocità di una carica in movimento è allora sempre accompagnata da una radiazione di energia. Poiché l'elettrone, libero in un tubo a vuoto, aumenta di velocità passando attraverso un campo elettrico, l'energia deve essere irradiata da esso durante il suo passaggio dal catodo all'anodo. Si può, tuttavia, calcolare facilmente che, in casi ordinari, questa perdita di energia è piccola rispetto all'energia cinetica acquisita dall'elettrone passando nel campo elettrico.

Un elettrone che si muove su un'orbita circolare è un potente radiatore di energia, poiché è costantemente accelerato verso il centro. Un elettrone che si muove su un'orbita di raggio uguale al raggio di un atomo (circa  $10^{-8}$  cm) dovrebbe perdere la maggior parte della sua energia cinetica in una piccola frazione di secondo, anche se la sua velocità era inizialmente quasi uguale a quella della luce. Se, tuttavia, un certo numero di elettroni è disposto ad uguali intervalli angolari sulla circonferenza di un cerchio e si muove con velocità costante attorno all'anello, la radiazione di energia è molto minore di quella di un singolo elettrone, e diminuisce rapidamente con il crescere del numero di elettroni ruotanti. Questo risultato, ottenuto da J. J. Thomson, sarà discusso più in dettaglio in seguito quando sarà studiata la stabilità dei sistemi composti di elettroni ruotanti.

Poiché la radiazione di energia è proporzionale al quadrato dell'accelerazione, la proporzione dell'energia totale irradiata dipende dalla rapidità con cui un elettrone è messo in moto o fermato. Alcune delle particelle dei raggi catodici sono fermate bruscamente quando urtano un catodo metallico, e, di conseguenza, cedono una frazione della loro energia cinetica sotto forma di radiazione elettromagnetica. Stokes e Weichert suggerirono che questa radiazione costituisse i raggi X, che sono noti per avere origine alla superficie urtata dai raggi catodici. La teoria matematica è stata elaborata da J. J. Thomson<sup>54</sup>. Se il moto di un elettrone è arrestato improvvisamente, uno stretto impulso sferico nel quale le forze magnetica ed elettrica sono molto intense, viene emesso dal punto di impatto con la velocità della luce. Minore è il tempo di arresto, più intenso e stretto è l'impulso. Da questo punto di vista i raggi X non sono corpuscolari come i raggi catodici, che li producono, ma consistono di perturbazioni trasversali nell'etere, analoghi per certi aspetti alle onde luminose di corta lunghezza d'onda. I raggi sono allora composti da un numero di impulsi, che hanno caratteristica non periodica, e che si susseguono ad intervalli irregolari.

In base a questa teoria sulla natura dei raggi X, ci si deve attendere l'assenza di deflessione diretta, rifrazione, o polarizzazione, se lo spessore dell'impulso è piccolo rispetto al diametro di un atomo. Si spiega anche la non deflessione del cammino dei raggi soggetti a un campo elettrico o magnetico. L'intensità della forza elettrica e magnetica nell'impulso è così grande che può dar luogo alla rimozione di un elettrone da alcuni degli atomi del gas, sui quali passa l'impulso, e produce quindi la ionizzazione osservata.

I raggi catodici producono raggi X, e questi a loro volta producono una radiazione secondaria quando colpiscono un corpo solido. Questa radiazione secondaria è emessa in tutte le direzioni, e consiste in parte di una radiazione X e di elettroni emessi con notevole velocità. Questa radiazione secondaria produce una radiazione terziaria e così via.

<sup>51</sup>Goldstein, Berlin Sitzber. 39, p. 691, 1896; Annal. d. Phys. 64, p. 45, 1898.

<sup>52</sup>Wien, Annal. d. Phys. 65, p. 440, 1898.

<sup>53</sup>Larmor, Phil. Mag. 44, p. 593, 1897.

<sup>54</sup>J. J. Thomson, Phil. Mag. Febbraio 1897.

Barkla<sup>55</sup> ha mostrato che la radiazione secondaria emessa da un gas attraversato dai raggi consiste in parte di raggi X diffusi di quasi uguali potere di penetrazione sia dei raggi primari sia dei raggi facilmente assorbibili.

Parte dei raggi catodici è riflessa colpendo il catodo. Questi raggi diffusi sono in parte elettroni della stessa velocità del fascio primario, ma ne includono anche altri di velocità molto più bassa. La quantità di radiazione diffusa dipende dalla natura del catodo e dall'angolo di incidenza dei raggi.

Vedremo in seguito (cap. IV) che effetti simili sono prodotti quando i raggi da sostanze radioattive urtano corpi solidi.

In questo capitolo è stato dato un resoconto della teoria della ionizzazione dei gas estendendola a quanto è necessario per l'interpretazione delle misure di radioattività con il metodo elettrico. Si dovrebbe discutere inoltre lo sviluppo di questa teoria in dettaglio, per spiegare il passaggio dell'elettricità attraverso fiamme e vapori, la scarica dell'elettricità da corpi caldi, e i fenomeni molto complessi osservati nel passaggio dell'elettricità attraverso un tubo a vuoto.

Per ulteriori informazioni su questo importante argomento, il lettore può fare riferimento a J. J. Thomson *Conduction of Electricity through the Gases*, nel quale si tratta l'intero argomento in modo completo e ampio. Un semplice resoconto dell'effetto di cariche in movimento e la teoria elettronica della materia sono state presentate dallo stesso autore nelle Silliman Lectures dell'Università di Yale e pubblicate sotto il titolo *Electricity and Matter* (Scribner, New York, 1904).

---

<sup>55</sup>Barkla, Phil. Mag. giungo, 1908.

## Metodi di Misura

**53. Metodi di Misura.** Sono stati impiegati tre metodi generali per l'esame della radiazione da corpi radioattivi, dipendenti da

- (1) l'azione dei raggi su una lastra fotografica
- (2) L'azione ionizzante dei raggi sul gas circostante
- (3) La fluorescenza prodotta dai raggi su uno schermo di platinocianuro di bario, solfuro di zinco, o sostanze simili

Il terzo metodo è molto restrittivo nelle sue applicazioni, e si può impiegare solo per sostanze intensamente attive come il radio o il polonio.

Il metodo fotografico è stato ampiamente usato, specialmente nelle prime fasi, ma è stato gradualmente sostituito dal metodo elettrico, quando si rese sempre più necessaria una determinazione quantitativa della radiazione. In alcune direzioni, tuttavia, presenta vantaggi sul metodo elettrico. Per esempio, si è dimostrato un metodo molto valido di investigazione della curvatura del cammino dei raggi, quando sono deflessi da un campo magnetico o elettrico, ed ha permesso di determinare le costanti di questi raggi con considerevole precisione.

D'altro canto, come metodo generale di studio della radiazione, è aperto a molte obiezioni. In genere è necessario un giorno di esposizione per produrre un apprezzabile annerimento del film sensibile quando è esposto ad una sorgente debole di radiazione come l'uranio o il torio. Non può, di conseguenza, essere utilizzato per analizzare la radiazione di questi prodotti attivi che perdono rapidamente la loro attività. Inoltre, W. J. Russell ha mostrato che l'annerimento della lastra fotografica può derivare da molti agenti che non sono come i raggi dei corpi radioattivi. Questo annerimento della lastra è prodotto nelle più svariate condizioni e sono necessarie precauzioni assai particolari in caso di lunghe esposizioni a deboli sorgenti.

La principale obiezione al metodo fotografico, tuttavia, sta nel fatto che le radiazioni che produce l'effetto elettrico più intenso sono molto deboli fotograficamente. Per esempio, Soddy<sup>1</sup> ha mostrato che l'azione fotografica dell'uranio è dovuta quasi interamente ai raggi più penetranti, e che i raggi facilmente assorbibili producono in confronto un effetto molto piccolo. In generale, i raggi penetranti sono i più attivi fotograficamente, e, in certe condizioni, l'azione sulla lastra è quasi interamente dovuta ad essi.

La maggior parte dell'energia irradiata da corpi attivi è nella forma di raggi facilmente assorbibili che sono inattivi fotograficamente. Questi raggi sono difficili da studiare con il metodo fotografico, quando è necessario, in molti casi, uno strato di carta annerita per assorbire la luce fosforescente dalle sostanze attive, che taglia la maggior parte dei raggi da esaminare. Questi raggi facilmente assorbibili avranno un ruolo molto importante nei processi che avvengono nei corpi radioattivi più dei raggi penetranti che sono molto attivi fotograficamente.

Il metodo elettrico, d'altronde, offre un rapido e accurato metodo di esame quantitativo della radiazione. Può essere usato come mezzo di misura di tutti i tipi di radiazione emessa, esclusa la luce, ed è capace di accurate misure su un spettro estremamente ampio. Con opportune precauzioni può essere usato per misurare gli effetti prodotti dalle radiazioni di intensità estremamente piccola.

**54. Metodo elettrico.** I metodi elettrici impiegati nello studio della radioattività sono tutti basati sulla proprietà della radiazione di ionizzare il gas, cioè di produrre portatori di cariche positive e negative attraverso il volume del gas. La discussione dell'applicazione della teoria della ionizzazione dei gas per la misura della radioattività è stata presentata nel precedente capitolo. Si è mostrato che la condizione essenziale da soddisfare per misure comparative dell'intensità della radiazione è che il campo elettrico sia in tutti i casi sufficientemente intenso da ottenere la massima corrente o di saturazione nel gas.

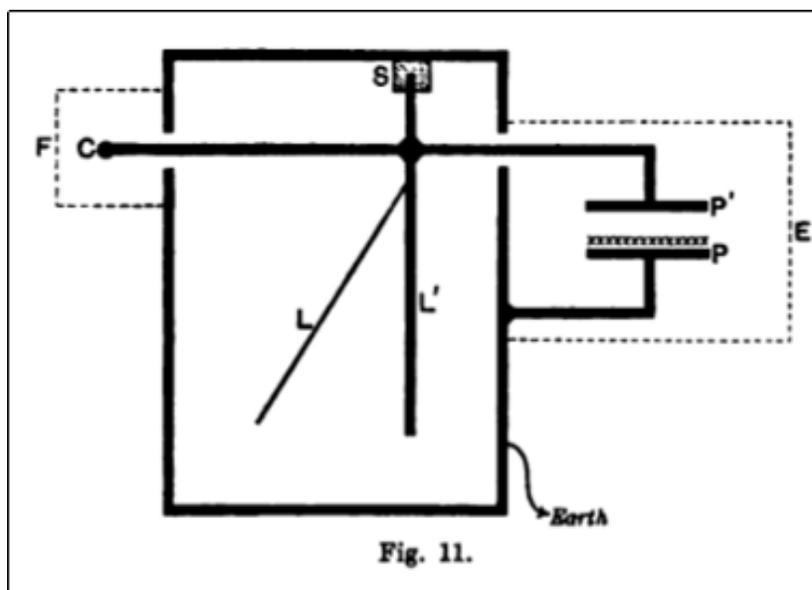
Il campo elettrico necessario per produrre saturazione varia con l'intensità della ionizzazione e, di conseguenza, con l'attività della preparazione da esaminare. Per preparazioni con un'attività non superiore a 500 volte quella dell'uranio, in particolari condizioni, è sufficiente un campo di  $100 \frac{V}{cm}$ . Per campioni di radio molto attivi, è spesso impossibile ottenere in modo conveniente una grande e sufficiente forza elettromotrice per ottenere anche una saturazione approssimata. In tali condizioni si possono effettuare misure comparative misurando la corrente diminuendo la pressione del gas, dove la saturazione è più facilmente ottenibile.

Il metodo impiegato nella misura di questa corrente di saturazione dipende largamente dall'intensità della corrente da misurare. Se un radio molto attivo è distribuito sulla parte bassa di due piastre isolate come in Figura 1, e viene

<sup>1</sup>Soddy, Trans. Chem. Soc. Vol. 81, p. 860, 1902.

applicato un campo elettrico saturante, la corrente può facilmente essere misurata da un galvanometro sensibile ad alta resistenza. Per esempio, un peso di 45 g di radiocloruro di attività 1000 volte quella dell'ossido di uranio, distribuito su una piastra di area  $33\text{ cm}^2$ , produsse una corrente massima di  $1.1 \cdot 10^{-6}\text{ A}$  nel caso di piastre separate di 4.5 cm. In questo caso la differenza di potenziale applicata per produrre saturazione era di circa 600 V. Poiché la maggior parte della ionizzazione è dovuta ai raggi che sono assorbiti passando attraverso qualche centimetro d'aria, la corrente non cresce di molto aumentando la distanza tra le due piastre. Nei casi in cui la corrente non è sufficientemente grande per deflessione diretta, può essere determinata collegando la piastra superiore isolata con un condensatore ben isolato. Dopo la carica in un tempo definito, circa uno o due minuti, il condensatore è scaricato attraverso il galvanometro, e la corrente può essere facilmente valutata.

**55.** Nella maggioranza dei casi, tuttavia, quando si tratta con sostanze meno attive come l'uranio o il torio, o con piccole quantità di materiale attivo, è necessario impiegare metodi per misurare correnti molto più piccole di quelle che si possono rivelare con un galvanometro ordinario. La strumentazione più opportuna per questo scopo è uno dei numerosi tipi di elettrometro quadrante o un elettroscopio di concezione particolare. Per molte osservazioni, specialmente dove l'attività delle due sostanze deve essere confrontata in condizioni costanti, un elettroscopio offre un metodo di misura certo e facile. Come esempio di un semplice apparato strumentale di questo tipo, descriveremo brevemente l'elettroscopio usato da M. e Mme Curie in molte delle loro prime osservazioni.



I collegamenti sono chiaramente visibili in Figura 11. Il materiale attivo è posto sulla parte superiore di una piastra circolare fissa  $P$ , collegata con il contenitore dello strumento e con la terra. La piastra superiore isolata  $P'$  è collegata con il sistema isolato a foglia d'oro  $LL'$ .  $S$  è un supporto isolante e  $L$  la foglia d'oro.

Il sistema è dapprima caricato a un opportuno potenziale per mezzo di una bacchetta  $C$ . La rapidità di movimento della foglia d'oro è osservata tramite un microscopio. Confrontando l'attività di due campioni, si osserva il tempo impiegato dalla foglia d'oro per passare su un certo numero di divisioni della scala del micrometro nella parte visibile. Poiché la capacità del sistema carico è costante, il tasso medio di movimento della foglia d'oro è direttamente proporzionale alla corrente di ionizzazione emessa dalla sostanza radioattiva. A meno di esaminare sostanze molto attive, la differenza di potenziale tra  $P$  e  $P'$  può essere opportunamente impostata per ottenere saturazione.

Quando necessario, si può fare una correzione per il tasso di perdita in assenza di sostanza attiva. Per evitare disturbi esterni, le piastre  $PP'$  e l'asta  $C$  sono circondate da cilindri metallici,  $E$  e  $F$ , messi a terra.

**56.** Una forma modificata dell'elettroscopio a foglia d'oro può essere utilizzato per determinare con precisione corrente straordinariamente piccola, e anche in casi in cui un elettrometro sensibile non è in grado di rivelare la corrente. Uno speciale tipo di elettroscopio è stato usato da Elster e Geitel, nei loro esperimenti sulla ionizzazione naturale dell'atmosfera. Un tipo molto conveniente di elettroscopio per la misura di corrente dovuta a minuscola ionizzazione del gas è mostrato in Figura 12.

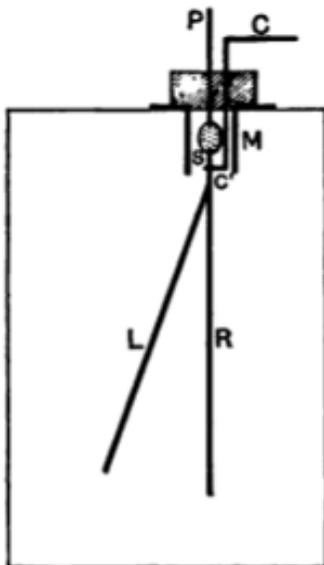


Fig. 12.

Questo tipo di strumento fu usato la prima volta da C. T. R. Wilson<sup>2</sup> nei suoi esperimenti sulla ionizzazione naturale dell'aria in contenitori chiusi. Si prende un contenitore cilindrico di ottone della capacità di circa 1 L. Il sistema a foglia d'oro *L* attaccato ad un'asta piatta *R*, è isolato all'interno del contenitore da una piccola goccia di zolfo o un pezzo di ambra *S*, sostenuto dall'asta *P*. In un'atmosfera secca una goccia di zolfo pulito o un pezzo di ambra sono isolanti quasi perfetti. Il sistema è caricato da un'asta ricurva e leggera *CC'* passante attraverso un tappo di vulcanite<sup>3</sup>. L'asta *C* è collegata a un terminale della batteria di piccoli accumulatori da 200 a 300 V. Se questi sono assenti, il sistema può essere caricato per mezzo di un'asta di ceralacca. L'asta carica *CC'* è poi rimossa dal contatto con il sistema a foglia d'oro. Le aste *P* e *C* e il cilindro sono poi messi a terra.

Il tasso di movimento del sistema a foglia d'oro è osservato con un microscopio tramite due fori nel cilindro, ricoperti con mica sottile. In casi in cui la ionizzazione naturale dovuta all'aria racchiusa nel cilindro richiede una misura accurata, è consigliabile includere l'asta di supporto e carica e la goccia di zolfo dentro un piccolo cilindro metallico *M* messo a terra, così che solo il sistema a foglia d'oro risulta esposto nel volume principale dell'aria.

In un apparato sperimentale di questo tipo la piccola perdita sulla goccia di zolfo può essere eliminata quasi del tutto tenendo l'asta *P* carica al potenziale medio del sistema a foglia d'oro durante l'osservazione. Questo metodo è stato usato con grande successo da C. T. R. Wilson. Tali miglioramenti, tuttavia, non sono in genere necessari, tranne nello studio della ionizzazione naturale dei gas a bassa pressione, quando la perdita di conduzione sulla goccia di zolfo è confrontabile con la scarica del gas ionizzato.

**57.** La capacità elettrica *C* del sistema a foglia d'oro di lunghezza 4 cm è di solito di circa 1 u.e.s. Se *V* è la diminuzione del potenziale del sistema in *t* secondi, la corrente *i* attraverso il gas è data da

$$i = \frac{CV}{t}$$

Con un buon elettroscopio di ottone di volume pari a 1 litro, la caduta di potenziale dovuta alla ionizzazione naturale dell'aria è stata ricavata essere circa 6 V/h. Poiché la capacità del sistema era circa 1 u.e.s.

$$i = \frac{1 \times 6}{3600 \times 300} = 5.6 \cdot 10^{-6} \text{ u.e.s} = 1.9 \cdot 10^{-15} \text{ A}$$

Con particolari precauzioni un tasso di scarica di 1/10 o anche 1/100 di questa quantità può essere misurato con precisione.

Il numero di ioni prodotti nel gas può essere calcolato se è nota la carica su uno ione. J. J. Thomson ha mostrato che la carica *e* su uno ione è uguale a  $3.4 \cdot 10^{-10}$  u.e.s. o  $1.13 \cdot 10^{-19}$  C.

Sia *q* il numero di ioni prodotti per secondo per  $\text{cm}^3$  attraverso il volume dell'elettroscopio, *S* il volume dell'elettroscopio misurato in  $\text{cm}^3$ .

Se la ionizzazione è uniforme, la corrente di saturazione *i* è data da  $i = qSe$ .

<sup>2</sup>Wilson, Proc. Roy. Soc. Vol. 68, p. 152, 1901.

<sup>3</sup>Se lo strumento deve essere a tenuta, il sistema a foglia d'oro può essere caricato per mezzo di un filo d'acciaio magnetizzato, che toccherà l'asta *R* avvicinandosi al magnete.

Per un elettroscopio con un volume di  $1000 \text{ cm}^3$ ,  $i$  era uguale a circa  $1.9 \cdot 10^{-15} \text{ A}$ . Sostituendo i valori dati

$$q = 17 \frac{\text{ioni}}{\text{cm}^3 \text{ s}}$$

Con opportune precauzioni un elettroscopio può facilmente misurare una corrente di ionizzazione corrispondente alla produzione di  $1 \frac{\text{ione}}{\text{cm}^3 \text{ s}}$ .

Il grande vantaggio di una strumentazione di questo tipo consiste nel fatto che la corrente misurata è dovuta alla ionizzazione dentro un contenitore e non è influenzata dalla ionizzazione dell'aria esterna o da disturbi elettrostatici<sup>4</sup>. Un tale apparato è molto conveniente nell'indagine delle radiazioni molto penetranti dai radio elementi, poiché questi raggi passano facilmente attraverso le pareti dell'elettroscopio. Quando l'elettroscopio è posto su una piastra di piombo spessa  $3 - 4 \text{ mm}$ , la ionizzazione nello elettroscopio, dovuta al corpo radioattivo posto sotto il piombo, è dovuta interamente ai raggi molto penetranti, poiché gli altri due tipi di raggi sono completamente assorbiti nella lastra di piombo. Se si taglia un'apertura circolare alla base dell'elettroscopio e la si ricopre con alluminio sottile di spessore sufficiente ad assorbire i raggi  $\alpha$ , si possono compiere facilmente e con precisione misure dell'intensità dei raggi  $\beta$  da una sostanza radioattiva posta sotto di essa.

**58.** Una forma modificata di elettroscopio, che promette di essere di grande utilità per le misure di corrente anche qualche minuto dopo quella osservata con lo strumento già descritto, è stato recentemente ideato da C. T. R. Wilson<sup>5</sup>. La sua costruzione è mostrata in Figura 13.

Il contenitore è una scatola di ottone rettangolare  $4 \times 4 \times 3 \text{ cm}$ . Un sottile sistema a foglie d'oro è attaccato ad un'asta  $R$  passante per una goccia di zolfo. Opposto al sistema a foglie d'oro è fissata una piastra isolata di ottone  $P$ , posta a circa  $1 \text{ mm}$  dalla parete della scatola. Il movimento del sistema a foglie d'oro è osservato attraverso due piccole finestre per mezzo di un microscopio dotato di una scala micrometrica. La lastra  $P$  è tenuta a un potenziale costante (di solito circa  $200 \text{ V}$ ). Il contenitore dell'elettrometro è posto in posizione inclinata come mostrato in figura, assegnando valori opportuni all'angolo di inclinazione e al potenziale della piastra per ottenere la sensibilità desiderata. Il sistema è inizialmente collegato al contenitore, e il microscopio sistemato in modo che le foglie d'oro siano viste nel centro della scala. Per un dato potenziale della piastra, la sensibilità dipende dall'angolo di inclinazione del contenitore. Vi è una inclinazione critica al di sotto della quale il sistema è instabile. La migliore posizione sta proprio sopra l'angolo critico. In un particolare esperimento Wilson trovò che con un angolo di inclinazione di  $30^\circ$  e con la piastra a  $207 \text{ V}$ , il sistema a foglie d'oro, se innalzato ad un volt superiore al contenitore, si muoveva di 200 divisioni della scala dell'oculare, dove 54 divisioni corrispondevano a un millimetro.

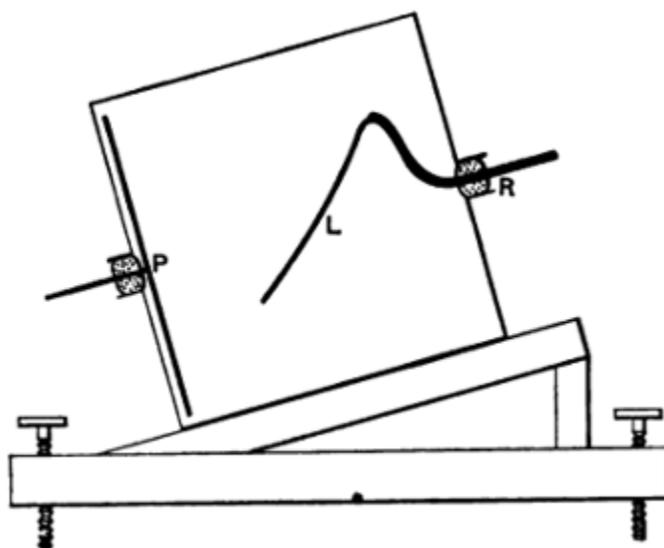


Fig. 13.

Nell'uso, l'asta  $R$  è collegata con il sistema esterno isolato di cui si misura l'aumento o la diminuzione di potenziale. A causa della piccola capacità del sistema e del grande movimento delle foglie d'oro per una piccola differenza di potenziale, l'elettroscopio è in grado di misurare correnti estremamente piccole. L'apparato è portatile. Se la piastra  $P$  è collegata al polo di una pila a secco le foglie d'oro sono stirate verso la piastra, e in questa posizione possono essere trasportate senza rischio di danni.

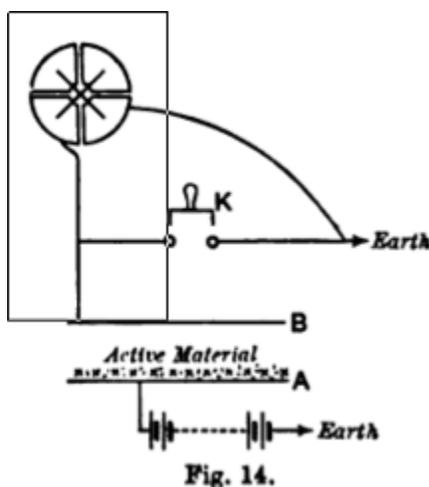
<sup>4</sup>A volte si osserva che il movimento del sistema a foglie d'oro, immediatamente dopo la carica, è irregolare. In molti casi, questo può risalire alla corrente d'aria nell'elettroscopio a causa di un riscaldamento asimmetrico da parte della sorgente luminosa usata per l'illuminazione.

<sup>5</sup>Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. Vol. 12, Part II, 1903.

**59. Elettrometri.** Sebbene l'elettroscopio possa essere usato vantaggiosamente in casi speciali, la sua applicazione è però limitata. Lo strumento in genere più conveniente per la misura della corrente di ionizzazione nei gas è uno dei numerosi tipi di elettrometro a quadranti. Con l'ausilio di capacità ausiliarie, l'elettrometro può essere usato per misurare correnti con precisione su un ampio spettro, e può essere impiegato praticamente per ogni tipo di misura in radioattività.

La teoria elementare dell'elettrometro a quadranti simmetrico presentata nei testi è molto imperfetta. Si deduce che la sensibilità dell'elettrometro - misurata dalla deflessione dell'ago per 1 V di differenza di potenziale tra i quadranti - varia direttamente con il potenziale dell'ago carico, supposto che il potenziale sia alto rispetto alla tensione tra i quadranti. Nella maggior parte degli elettrometri, tuttavia, la sensibilità raggiunge il massimo, per poi decrescere con l'aumentare del potenziale dell'ago. Per elettrometri nei quali l'ago si trova vicino ai quadranti, questa sensibilità massima è ottenuta per un potenziale basso dell'ago. Una teoria dell'elettrometro a quadranti, che tiene conto di questo effetto, è stata di recente proposta da G. W. Walker<sup>6</sup>. L'effetto appare essere dovuto alla presenza dello spazio d'aria che necessariamente esiste tra i quadranti limitrofi.

Supponiamo che si chieda di misurare con un elettrometro la corrente di ionizzazione tra due piastre metalliche orizzontali *A* e *B* (Figura 14) sull'inferiore delle quali è stato distribuito del materiale attivo. Se serve la corrente di saturazione, la piastra isolata *A* è collegata con un polo della batteria di forza elettromotrice sufficiente a produrre saturazione, mentre l'altro polo è messo a terra. La piastra isolata *B* è collegata con una coppia di quadranti dell'elettrometro, l'altra coppia messa a terra. Per mezzo di una opportuna chiave *K*, la piastra *B* e la coppia di quadranti collegati con essa possono essere o isolati o messi a terra.



Quando si deve eseguire una misura, si interrompe la connessione a terra. Se il polo positivo della batteria è connesso con *A*, la piastra *B* e le connessioni dell'elettrometro immediatamente si caricano positivamente, e il potenziale, se permesso, salirà regolarmente fino a divenire quasi uguale al potenziale di *A*. Non appena il potenziale dell'elettrometro inizia a salire, l'ago inizia a muoversi in modo uniforme. Si compiono osservazioni del moto angolare dell'ago o con il telescopio e la sua scala, o con il movimento di un punto luminoso sulla scala nel modo consueto. Se l'ago è impedito nel suo moto uniforme sulla scala, il suo spostamento, cioè il numero di divisioni della scala passate ogni secondo, può essere fatto come misura della corrente nel gas. Lo spostamento è semplicemente ottenuto osservando con un cronometro il tempo impiegato dal punto luminoso, dopo che il moto è divenuto regolare, per passare 100 divisioni della scala. Non appena si è compiuta l'osservazione, la piastra *B* è di nuovo connessa a terra, e l'ago dell'elettrometro torna alla sua posizione originaria.

Nella maggior parte degli esperimenti sulla radioattività, sono richieste solo misure comparative delle correnti di saturazione. Se queste misure si prolungano per settimane o mesi, come in alcuni casi, è necessario adottare qualche metodo di standardizzazione dell'elettrometro da un giorno all'altro, per correggere la variazione della sua sensibilità. Ciò è possibile in modo più semplice confrontando la corrente da misurare con quella dovuta al campione standard di ossido di uranio, che è posto in una posizione definita in un piccolo contenitore, sempre collegato all'elettrometro. L'ossido di uranio è una sorgente di radiazione veramente costante e la corrente di saturazione dovuta ad essa è la stessa nel corso dei giorni. Con questo metodo di confronto si possono fare accurate osservazioni sulla variazione dell'attività di una sostanza per un lungo intervallo di tempo, nonostante la sensibilità dell'elettrometro possa variare ampiamente tra misure successive.

**60. Costruzione dell'elettrometro.** Poiché l'elettrometro a quadranti ha guadagnato la reputazione di essere uno strumento difficile e insicuro per misure accurate di corrente, può essere significativo esporre alcuni dettagli riguardanti il miglior metodo di costruzione e isolamento. Nella maggior parte dei tipi più vecchi di elettrometri a quadrante il sistema ago era reso inutilmente pesante. In conseguenza di ciò, se è richiesta una sensibilità dell'ordine di 100 mm per ogni deflessione di 1 V, era necessario caricare la bottiglia di Leyda collegata all'ago con un potenziale abbastanza alto. Ciò allo stesso tempo introduce delle difficoltà, perché con un potenziale alto non è facile isolare la bottiglia di Leyda in modo

<sup>6</sup>Walker, Phil. Mag. agosto, 1903.

soddisfacente, o caricarla allo stesso potenziale di giorno in giorno. Questo inconveniente è in larga parte evitabile nel modello Bianco dell'elettrometro di Kelvin, che è fornito di un disco ripieno per mantenere il potenziale dell'ago ad un dato valore. Se si ha sufficiente difficoltà nell'isolare e costruire questo tipo di elettrometro, si dimostra un strumento molto utile di sensibilità moderata, e continuerà nel suo buon lavoro per ancora qualche anno.

Tipi più semplici di elettrometro di maggiore sensibilità possono tuttavia essere costruiti per dare risultati accurati. Il vecchio tipo di elettrometro a quadrante, presente in ogni laboratorio, si può facilmente modificare per divenire un utile e affidabile strumento. Si può predisporre un ago sottile di alluminio, di carta argentata o di un sottile strato di mica, ricoperto con foglie d'oro per renderlo più conduttivo. Il filo di alluminio e lo specchio attaccato dovrebbero essere resi il più possibile leggeri. L'ago dovrebbe essere sostenuto o da una sottile fibra di quarzo o una lunga sospensione a due fili di seta. Un filo di bronzo fosforoso di data lunghezza risulta pure alquanto soddisfacente. Un controllo magnetico non è molto adatto, quando è disturbato da bobine e dinamo che operano nelle vicinanze. Inoltre, il punto zero dell'ago non è così stabile come il quarzo o la sospensione bifilare.

Quando un elettrometro è usato per misurare una corrente attraverso il movimento dell'ago, è essenziale che lo stesso sia smorzato per garantire un movimento uniforme dello spot luminoso sulla scala. Ciò richiede una disposizione molto accurata. Se lo è troppo poco, l'ago ha un moto oscillatorio che si sovrappone al moto regolare; se è troppo grande, si muove troppo lentamente e impiega un certo tempo per raggiungere uno stato di moto uniforme. Con un ago leggero, molto piccolo, è necessario un extra smorzamento. Un leggero filo di platino con un singolo anello immerso in acido solforico basta di solito allo scopo.

Con un sistema di ago leggero e una sospensione fragile, è necessario soltanto caricare l'ago a un potenziale di qualche centinaia di volt per avere una sensibilità di parecchie migliaia di divisioni per un volt. Con tali bassi potenziali, la difficoltà di isolamento del condensatore, con cui l'ago è elettricamente a contatto, è molto ridotta. È conveniente usare un condensatore tale che il potenziale dell'ago non decada di pochi percento al giorno. La consueta piccola bottiglia di vetro parzialmente riempita con acido solforico, nella maggior parte dei casi, è difficile da isolare. È meglio sostituirla con un condensatore in gomma vulcanizzata come mostrato in Figura 15.

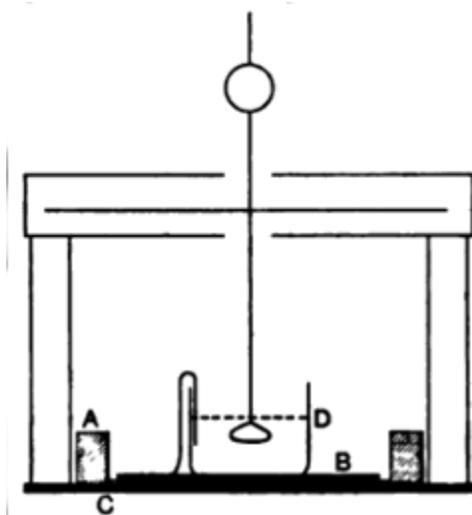


Fig. 15.

Una piastra circolare di gomma dello spessore di 1 cm è stesa fino ad avere nella zona centrale uno spessore non superiore a 0.5 mm. Nella nicchia circolare si adatta liberamente una piastra di ottone B. La piastra di gomma appoggia su un'altra piastra di ottone C posta a terra. Il condensatore così composto ha una notevole capacità e trattiene una carica per lungo tempo. Per collegarlo all'ago, un piccolo contenitore di vetro D, parzialmente riempito con acido solforico, è posto sulla piastra B e collegato all'ago per mezzo di un sottile filo di platino. Esso discende dall'ago nell'acido, e serve a smorzare l'ago. In una atmosfera secca, un condensatore di questo tipo non perde più del 20% della sua carica in una settimana. Se l'isolamento si deteriora, può facilmente essere migliorato smerigliando il bordo di gomma A o rimuovendo la sua superficie al tornio.

Se si dispone di una *f.e.m* stazionaria e sufficiente, è meglio conservare la batteria costantemente connessa con l'ago, ed evitare insieme l'uso del condensatore. Se si usa una batteria di piccoli accumulatori, il suo potenziale può essere mantenuto ad un valore costante, e l'elettrometro ha sempre una sensibilità costante.

**61.** Un elettrometro molto utile di grande sensibilità è stato ideato da Dolezalek<sup>7</sup>. È del tipo solito a quadranti con un ago molto leggero di carta argentata, a forma di fuso, che si trova molto vicino ai quadranti. Si utilizza una sospensione molto sottile di quarzo. A causa della leggerezza dell'ago e della sua vicinanza ai quadranti, agisce da smorzatore. Questo

<sup>7</sup>Dolezalek, Instrumentenkunde, p. 345, Dicembre 1901.

è un grande vantaggio, per le difficoltà che sempre sorgono quando il filo è immerso nell'acido solforico, a causa del sottile strato che si raccoglie dopo un certo tempo sulla superficie dell'acido. Questo strato impedisce il movimento del filo di platino immerso nell'acido, e deve essere rimosso ad intervalli regolari. Questo strumento può facilmente acquisire una sensibilità di parecchie migliaia di divisioni per volt quando l'ago è caricato a circa un centinaio di volt. La sensibilità dell'elettrometro passa per un massimo quando il potenziale dell'ago aumenta. È sempre preferibile caricare l'ago a circa il valore del potenziale critico. La capacità dell'elettrometro è in generale alta (circa 50 *u.e.s.*) ma ha una maggiore sensibilità. L'ago può o essere caricato toccandolo con un terminale della batteria, o posto a potenziale costante attraverso la sospensione di quarzo.

Dolezalek afferma che il filamento può essere reso sufficientemente conduttore immergendolo in una soluzione diluita di cloruro di calcio o di acido fosforico. Non ho trovato questo metodo soddisfacente in climi secchi perché in parecchi casi il filamento praticamente perde la sua conduttività dopo qualche giorno di esposizione all'aria secca.

Oltre a questa grande sensibilità, il vantaggio di questo strumento sta nella stabilità dello zero e nell'auto smorzamento.

Si può ottenere facilmente una sensibilità di 10000 *mm* di divisioni per volt, se si usa un filamento molto sottile. L'uso di tale alta sensibilità non può, tuttavia, essere raccomandata se non per speciali esperimenti. Il periodo di oscillazione dell'ago in queste condizioni è di parecchi minuti e la perdita naturale del contenitore impiegato, così come disturbi elettrostatici e di altro tipo, si fanno fin troppo manifesti. Se sono richieste misure di piccole correnti, è assai preferibile uno elettroscopio del tipo descritto nella sezione 56 rispetto ad un elettrometro molto sensibile. Le letture dell'elettroscopio in tale caso sono più accurate delle misure simili fatte con l'elettrometro.

Per la maggior parte delle misure in radioattività, un elettrometro con sensibilità di 100 divisioni per volt è molto adatto, e non si ottengono vantaggi usando un elettrometro di maggiore sensibilità. Se si devono misurare anche piccole effetti, la sensibilità può essere aumentata di parecchie migliaia di divisioni per volt.

**62. Regolazione e selezione.** Nella regolazione di un elettrometro, è importante disporre che l'ago sia simmetricamente collocato rispetto ai quadranti. Ciò è meglio verificato osservando se l'ago è deflesso caricandolo, con i quadranti messi a terra. Nella maggior parte degli elettrometri vi è un quadrante regolabile, la cui posizione può essere modificata fino a che l'ago non è spostato per elettrizzazione. Quando tale condizione è soddisfatta, la lettura dello zero dell'elettrometro rimane inalterata anche quando l'ago perde la sua carica, e la deflessione su entrambi i lati dello zero sarà la stessa per quantità uguali e opposte di elettricità.

I supporti dei quadranti richiedono un buon isolamento. Bacchette di gomma sono di solito più soddisfacenti del vetro. Nel valutare l'isolamento dei quadranti e i collegamenti attaccati, il sistema è caricato per dare una deflessione di circa 200 divisioni per scala. Se l'ago non deve spostarsi più di una o due divisioni dalla posizione centrale per un minuto, l'isolamento si può considerare pienamente soddisfacente. Quando un opportuno essiccatore è posto dentro la scatola aderente dell'elettrometro, l'isolamento dei quadranti rimarrà buono per mesi. Se l'isolamento della gomma si deteriora, lo si può ripristinare rimuovendo la superficie della gomma al tornio.

Operando con uno strumento sensibile come l'elettrometro di Dolezalek, è essenziale che l'elettrometro e l'apparato di test siano completamente racchiusi in uno schermo di fili a rete messo a terra, per evitare i disturbi elettrostatici.

Se un apparato deve essere testato a una certa distanza dall'elettrometro, i primi fili devono essere isolati nel cilindro metallico messo a terra. La dimensione dell'isolante usato in vari punti deve essere resa la più piccola possibile, per evitare disturbi dovuti alla loro elettrificazione. In ambienti umidi, paraffina, ambra o zolfo isolano meglio della gomma. L'obiezione alla paraffina come isolante per elettrometri sensibili sta nella difficoltà di disfarsi di ogni elettrizzazione sulla sua superficie. Appena la paraffina è stata caricata, la carica residua, dopo la deeletrificazione con una fiamma, continua a manifestarsi per un lungo periodo. Tutti gli isolanti devono essere privati dell'elettricità per mezzo di una lampada ad alcool o ancora meglio ponendo un poco di uranio vicino ad essa. Attenzione va posta per non toccare l'isolante dopo averlo reso neutro.

In lavori accurati è consigliabile evitare l'uso di getti di gas o fiamme Bunsen nelle vicinanze dell'elettrometro, poiché le fiamme dei gas ionizzano fortemente e tendono per un certo tempo a perdere la loro conducibilità. Se nella stanza sono presenti sostanze radioattive, è necessario racchiudere i fili che portano all'elettrometro in stretti tubi, connessi a terra. Se non si opera così, si troverà che l'ago non si muove con ritmo costante, ma che si avvicina rapidamente a una condizione di deflessione dove il tasso di perdita della carica dell'elettrometro e connessioni, dovuto alla ionizzazione dell'aria circostante, è bilanciato dalla corrente da misurare. Questa precauzione deve sempre essere presa quando le osservazioni sono fatte su raggi fortemente penetranti prodotti da sostanze attive. Questi raggi passano facilmente attraverso i comuni schermi, e ionizzano l'aria attorno all'elettrometro e ai cavi di connessione. Per questa ragione è impossibile eseguire misure accurate di piccole correnti in una stanza nella quale si usa una preparazione di materiale radioattivo. Nel corso del tempo le pareti della stanza divengono radioattive a causa della polvere e dell'azione delle emanazioni radioattive<sup>8</sup>.

**63. Elettrometro a tasto.** Per lavori con elettrometri di alta sensibilità, è necessario un tasto speciale per costituire e interrompere da distanza il collegamento dei quadranti con la terra per evitare disturbi elettrostatici nel momento in

<sup>8</sup>È necessario prestare attenzione a non rilasciare grandi quantità di emanazione del radio all'interno del laboratorio. Questa emanazione ha un decadimento lento ed è trasportata dalle correnti d'aria attraverso l'intera costruzione e lascia un deposito attivo di intensità molto bassa (si veda cap. XI). Eve (*Nature*, 16 Marzo 1905) ha sottolineato le difficoltà di eseguire raffinate misure radioattive in tali condizioni.

cui la corrente deve essere misurata. Il semplice tasto mostrato in Figura 16 si è dimostrato molto soddisfacente. Una piccola asta di ottone  $BM$ , alla quale è attaccata una cordicella, può essere mossa in su e giù verticalmente in un tubo di ottone  $A$ , che è rigidamente attaccato a un supporto metallico curvo collegato a terra. Quando la corda è rilasciata, questa asta fa contatto con il mercurio  $M$ , che è posto in un piccolo contenitore metallico appoggiato su un blocco di gomma  $P$ . L'elettrometro e il contenitore sono collegati con il mercurio. Quando la corda è ritirata, l'asta  $BM$  è rimossa dal mercurio e il collegamento a terra dell'elettrometro è interrotto. Al rilascio della corda, l'asta  $BM$  cade e l'elettrometro è ancora a terra. Per mezzo di questo dispositivo, che può essere gestito distante dall'elettrometro, la connessione a terra può essere attivata o interrotta a intervalli definiti senza un significativo disturbo dell'ago.

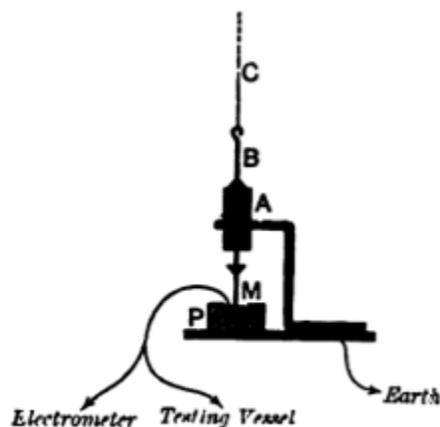


Fig. 16.

**64. Apparato di verifica.** Il dispositivo in Figura 17 è assai conveniente per molte misure riguardanti la radioattività. Due piastre metalliche isolate  $A$  e  $B$  sono poste dentro un contenitore metallico  $V$ , dotato di un accesso laterale. La piastra  $A$  è collegata con un terminale di una batteria di piccole celle, l'altro polo è a terra; la piastra  $B$  con l'elettrometro, e il contenitore  $V$  a terra. Le aree ombreggiate nella figura indicano la posizione degli isolanti di gomma. Il materiale attivo da testare è distribuito uniformemente su un solco superficiale (circa  $5\text{ cm}$  quadrati per  $2\text{ mm}$  di profondità) in una piastra di ottone  $A$ . Per evitare di interrompere il collegamento con la batteria ogni volta la piastra  $A$  è rimossa, il filo della batteria è costantemente connesso con il blocco di metallo  $N$  che sta sul supporto di gomma. Nel dispositivo non vi sono possibilità di una perdita di conduzione dalla piastra  $A$  alla  $B$ , poiché interviene il collegamento a terra di  $V$ .

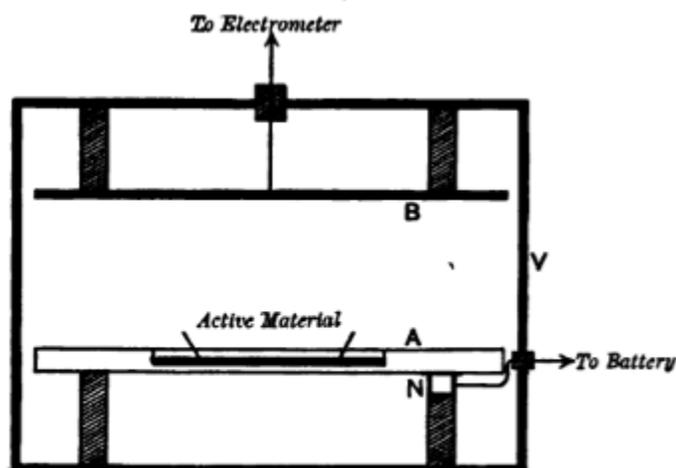
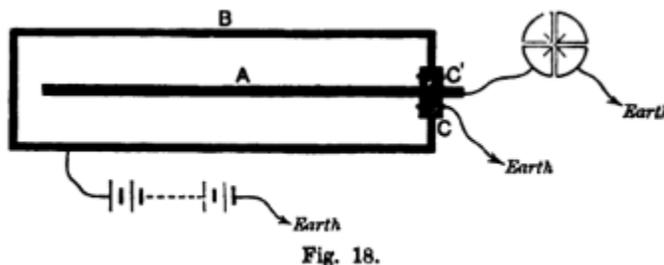


Fig. 17.

Un dispositivo di questo tipo è molto conveniente per testare l'assorbimento delle radiazioni da parte di schermi solidi, così come per fare studi comparativi dell'attività di diversi corpi. A meno di impiegare preparazioni molto attive di radio, è sufficiente una batteria di  $300\text{ V}$  per assicurare la saturazione quando le piastre non distano più di  $5\text{ cm}$ . Se si devono testare sostanze che producono emanazioni, l'effetto dell'emanazione può essere eliminato passando una corrente d'aria da una sacca di gas tra le piastre. In questo modo si rimuove l'emanazione più rapidamente di quanto si produce.

Se si pone un piatto tondo nella posizione di  $A$ , si osserva sempre un piccolo movimento dell'ago dell'elettrometro. Se non vi sono sostanze radioattive nelle vicinanze, questo effetto è dovuto alla piccola ionizzazione naturale dell'aria. È possibile correggere questa piccola perdita quando necessario.

**65.** Abbiamo spesso da misurare l'attività dell'emanazione di torio o radio, o l'attività prodotta da quelle emanazioni su aste e fili. Un dispositivo conveniente a tale scopo è mostrato in Figura 18. Il cilindro  $B$  è collegato con la batteria, e il conduttore centrale  $A$  con l'elettrometro. La bacchetta centrale è isolata dal cilindro esterno con un tappo di gomma, che è diviso in due parti da un anello metallico  $CC'$  messo a terra. Questo anello si comporta come un anello di guardia, e previene ogni perdita di conduzione tra  $B$  e  $A$ . La gomma è pertanto richiesta solo per isolare in modo soddisfacente piccoli aumenti di potenziale prodotti su  $A$  durante l'esperimento. In tutte le misure accurate di corrente nel campo della radioattività sarebbe sempre opportuno usare un anello di guardia per assicurare un buon isolamento. Ciò si attua facilmente quando la gomma ha il solo compito di isolare per una frazione di un volt, invece di parecchie centinaia di volt, come è il caso che si presenta in assenza dell'anello di guardia.



**66.** Per misure di radioattività con un elettrometro, è necessaria una sorgente stazionaria di forza elettromotrice di almeno  $300 V$ . La scelta migliore è una batteria di piccole celle costituita da barrette di piombo immerse in acido solforico diluito, o una batteria di piccoli accumulatori di costruzione comune. Piccoli accumulatori di capacità circa mezzo ampere per ora si possono ora ottenere a prezzi moderati, e sono più costanti e richiedono minore attenzione delle semplici celle di piombo.

Per misurare correnti su un ampio range, è richiesta una serie graduata di capacità. La capacità di un elettrometro e dell'apparato di verifica è di circa  $50 u.e.s.$  o  $0.000056 \mu farad$ . Si costruiscono condensatori suddivisi di mica nei quali la capacità varia da  $0.001$  a  $2 \mu farad$ . Con un tale condensatore, si richiede una extra capacità per compensare la differenza tra la capacità dell'elettrometro e quella più bassa del condensatore. Questa capacità del valore di circa  $200 u.e.s.$  si può facilmente ottenere usando piastre parallele o meglio cilindri concentrici. Con questa serie di capacità, si possono misurare correnti tra  $3 \cdot 10^{-14}$  e  $3 \cdot 10^{-8} A$ , un intervallo di oltre un milione. Si possono pure misurare correnti maggiori riducendo la sensibilità dell'elettrometro o se si dispone di capacità maggiori.

In una stanza dedicata alle misure di radioattività con un elettrometro, è desiderabile che non siano presenti sostanze radioattive al di fuori di quelle da analizzare. La stanza dovrebbe anche essere il più possibile priva di polvere. La presenza di una grande quantità di polvere nell'aria (vedi sezione 31) è un fattore di forte disturbo nelle misure di radioattività. È necessaria una grande *f.e.m.* per produrre saturazione a causa della diffusione degli ioni da parte delle particelle di polvere. La presenza di polvere in aria produce pure incertezza nella distribuzione di attività eccitate in un campo elettrico.

**67. Misure di corrente.** Per determinare la corrente nel circuito dell'elettrometro misurando il ritmo di movimento dell'ago, è necessario conoscere sia la capacità del circuito sia la sensibilità dell'elettrometro.

Sia  $C$  la capacità dell'elettrometro e delle sue connessioni in *u.e.s.*,  $d$  il numero di suddivisioni della scala passate al secondo,  $D$  la sensibilità dell'elettrometro misurata in divisioni della scala per  $1 V$  tra i quadranti.

La corrente  $i$  è data dal prodotto della capacità del sistema e dal ritmo di crescita del potenziale. Allora

$$i = \frac{Cd}{300D} u.e.s = \frac{Cd}{9 \cdot 10^{11} D} Ampere$$

Supponiamo, per esempio,

$$C = 50 \quad d = 5 \quad D = 1000$$

allora

$$i = 2.8 \cdot 10^{-13} A$$

Poiché l'elettrometro può facilmente misurare una corrente corrispondente al movimento di metà divisioni della scala per secondo, vediamo che un elettrometro può misurare una corrente di  $3 \cdot 10^{-14} A$ , che è notevolmente sotto il range del galvanometro più sensibile.

La capacità dell'elettrometro stesso non si deve considerare uguale a quella della coppia di quadranti e dell'ago quando si trova in posizione di riposo. La capacità reale è molto maggiore di questa, a causa del moto dell'ago carico. Supponiamo, per esempio, che l'ago sia caricato ad un alto potenziale negativo, e che conservi la posizione zero mediante un vincolo

esterno. Se è ceduta la quantità  $Q$  di elettricità positiva all'elettrometro e alle sue connessioni, l'intero sistema è innalzato a un potenziale  $V$ , tale che  $Q = CV$ , dove  $C$  è la capacità del sistema. Quando, invece, all'ago si concede il movimento, è attratto dalla coppia di quadranti carichi. Ciò corrisponde all'introduzione di un corpo carico negativamente tra i quadranti, e di conseguenza il potenziale del sistema è ridotto fino a  $V'$ . La capacità effettiva di  $C'$  del sistema quando l'ago si muove è allora maggiore di  $C$ , ed è data da

$$C'V' = CV$$

La capacità dell'elettrometro, pertanto, non è costante, ma dipende dal potenziale dell'ago, cioè dalla sensibilità dell'elettrometro.

Un risultato interessante di importanza pratica segue dalla variazione della capacità dell'elettrometro con il potenziale dell'ago. Se la capacità esterna associata all'elettrometro è piccola rispetto a quella dell'elettrometro stesso, il ritmo di movimento dell'ago per una corrente costante è, in alcuni casi, indipendente dalla sensibilità. Un elettrometro può essere usato per parecchi giorni o anche settimane per dare deflessioni quasi uguali per una corrente costante, senza ricaricare l'ago, sebbene il suo potenziale decresca costantemente durante l'intervallo. In un tale caso la diminuzione in sensibilità è quasi proporzionale alla diminuzione in capacità dell'elettrometro, così che la deflessione per una data corrente è alterata solo di poco. La teoria di questo effetto è stata data da J. J. Thomson<sup>9</sup>.

**68.** La capacità dell'elettrometro e delle sue connessioni non può essere misurata con un qualsiasi metodo usato per la determinazione di piccole capacità, poiché in tali casi l'ago non si muove, e la capacità misurata non è quella del sistema elettrometro nel suo uso effettivo. Il valore della capacità può, tuttavia, essere determinata con il metodo delle mescolanze.

Sia  $C$  la capacità dell'elettrometro e delle sue connessioni,  $C_1$  la capacità di un condensatore standard.

L'elettrometro e le sue connessioni sono caricate a un potenziale  $V_1$  da una batteria, e la deflessione  $d_1$  dell'ago è nota. Per mezzo di un tasto isolato, la capacità del condensatore standard è aggiunta in parallelo al sistema elettrometro. Sia  $V_2$  il potenziale del sistema, e  $d_2$  la nuova deflessione.

Allora

$$\begin{aligned} CV_1 &= (C + C_1) V_2 \\ \frac{C + C_1}{C} &= \frac{V_1}{V_2} = \frac{d_1}{d_2} \end{aligned}$$

e

$$C = C_1 \frac{d_2}{d_1 - d_2}$$

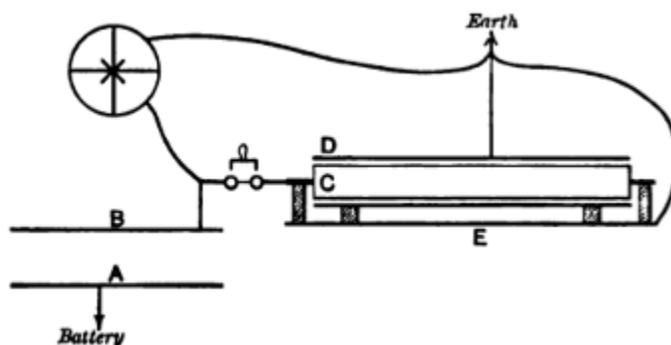


Fig. 19.

Una semplice capacità standard al riguardo si può costruire con due tubi di ottone concentrici di diametro misurato con estrema cura. Il cilindro esterno  $D$  (Figura 19) è montato su una base di legno, che è ricoperta con una strato di metallo o di un foglio di stagno messo a terra. Il tubo  $C$  è sorretto centralmente da una bacchetta di gomma ad ogni estremità. La capacità è data approssimativamente dalla formula

$$C = \frac{l}{2 \ln \frac{b}{a}}$$

dove  $b$  è il diametro interno di  $D$ ,  $a$  il diametro esterno di  $C$ . e  $l$  la lunghezza del tubo.

Si può usare il metodo seguente in alcuni casi in modo vantaggioso. Un recipiente di controllo è collegato con l'elettrometro e un campione di uranio è posto sulla piastra inferiore  $A$ . Siano  $d_2$  e  $d_1$  il numero di divisioni percorse al secondo dall'ago con e senza la capacità standard collegata.

Allora

$$\frac{C + C_1}{C} = \frac{d_1}{d_2}$$

<sup>9</sup>J.J Thomson, Phil. Mag. 46, pag. 537, 1898.

e

$$C = C_1 \frac{d_2}{d_1 - d_2}$$

Questo metodo ha il vantaggio che le capacità relative sono espresse in termini del moto dell'ago nelle condizioni effettive di misura.

**69. Metodo della deflessione stazionaria.** I metodi di misura descritti in precedenza dipendono dalla velocità del moto angolare di un sistema a foglie d'oro sospese o dell'ago di un elettrometro. Il galvanometro può essere impiegato solo per misure con sostanze molto attive. Un requisito, tuttavia, è stato a lungo provato per un metodo nel quale si può misurare la corrente di ionizzazione per mezzo di una deflessione stazionaria di un ago di elettrometro. Ciò in particolare nel caso in cui le misure vengono fatte con sostanze la cui attività si altera rapidamente nel corso di pochi minuti.

Ciò può essere garantito se il sistema elettrometro (una coppia di quadranti messi a terra) è connesso a terra attraverso un'opportuna alta resistenza. Una deflessione stazionaria dell'ago dell'elettrometro sarà ottenuta quando il tasso di rifornimento dell'elettricità al sistema elettrometro è bilanciato dalla perdita dovuta alla conduzione attraverso la resistenza. Se l'alta resistenza obbedisce alla legge di Ohm, la deflessione sarà proporzionale alla corrente di ionizzazione da misurare.

Un semplice calcolo mostra che la resistenza richiesta è molto grande. Supponiamo, per esempio, che una corrente da misurare corrispondente ad una velocità di movimento dell'ago di 5 divisioni al secondo, con una sensibilità di 1000 divisioni per volt, e con la capacità del sistema elettrometro pari a 50 *u.e.s.*. Questa corrente è uguale a  $2.8 \cdot 10^{-13}$  A. Se è richiesta una deflessione di 10 divisioni, che corrisponde ad un aumento di potenziale del sistema di  $\frac{1}{100}$  di volt, la resistenza sarà di 36000 *MOhm*. Per una deflessione di 100 divisioni, la resistenza sarà 10 volte maggiore. Il Dr. Bronson<sup>10</sup>, operando nel laboratorio di chi scrive, ha recentemente compiuto alcuni esperimenti per ideare un metodo pratico per misure con queste caratteristiche. È difficile ottenere resistenze sufficientemente alte e costanti rispondenti allo scopo. I tubi di xilene hanno una resistenza molto grande, mentre quelle al carbonio non sono sufficientemente costanti. La difficoltà fu infine superata usando ciò che possiamo chiamare una "resistenza ad aria". La disposizione sperimentale è mostrata in Figura 20.

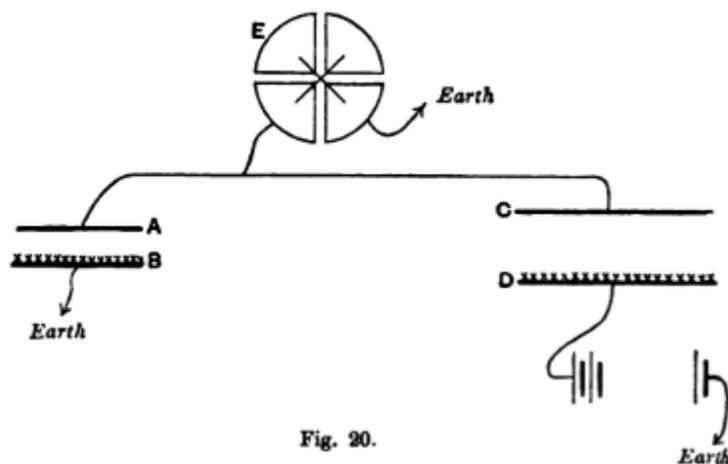


Fig. 20.

Il sistema elettrometro era collegato con la parte superiore di due piatte parallele isolate *AB*, e con la parte inferiore di quello su cui era distribuito uno strato di sostanza molto attiva. Un piatto di bismuto attivo, ricoperto con radio-tellurio, che è stato ottenuto da Sthamer di Amburgo, si mostrò alquanto utile allo scopo.

Il piatto inferiore *B* era a terra. La carica trasferita al piatto superiore del contenitore di verifica *CD* e al sistema elettrometro si disperde a causa della forte ionizzazione tra le piastre *AB*, ed era ottenuta una deflessione stazionaria quando il tasso di rifornimento era uguale a quello di scarica.

La resistenza dell'aria obbedisce alla legge di Ohm in un intervallo notevole, cioè la deflessione stazionaria era proporzionale alla corrente. È consigliabile, in tale disposizione, testare se la deflessione è proporzionale alla corrente di ionizzazione sull'intervallo richiesto per le misure. Ciò può essere fatto facilmente usando una quantità di contenitori metallici riempiti con una sostanza radioattiva costante come l'ossido di uranio. L'effetto di questo, se posto nel contenitore di verifica, può essere valutato separatamente e a gruppi, e in questo modo la scala può essere calibrata in modo accurato.

Le piastre *AB* furono poste all'interno di un contenitore chiuso per evitare correnti d'aria. La differenza di potenziale di contatto tra le piastre *AB*, che si evidenzia per una deflessione costante in assenza di sostanza radioattiva in *CD*, era in larga parte eliminata ricoprendo la superficie delle piastre *A* e *B* con un foglio molto sottile di alluminio.

Questo metodo si dimostrò molto accurato e conveniente per misure di rapida variazione nell'attività, e in possesso di molti vantaggi rispetto al consueto metodo di velocità nell'uso di un elettrometro. Un sottile strato di radio di moderata

<sup>10</sup>Bronson, Amer. Journ. Science, febbraio 1905.

attività potrebbe probabilmente servire al posto del radio-tellurio, ma l'emanazione e i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  emessi da esso potrebbero essere una possibile sorgente di disturbo delle misure. La deflessione dell'ago dell'elettrometro in questo dispositivo è indipendente dalla capacità del sistema elettrometro, e pertanto si possono fare misure comparative di corrente senza la necessità di determinare la capacità in ogni caso.

**70. Quarzo piezoelettrico.** In misure dell'intensità di corrente con l'elettrometro, è sempre necessario determinare la sensibilità dello strumento e la capacità dell'elettrometro e dell'apparecchiatura ad esso connessa. Per mezzo del quarzo piezoelettrico ideato dai fratelli MM. J. e P. Curie<sup>11</sup>, si possono fare misure della corrente con rapidità e precisione su un ampio spettro. Queste misure sono del tutto indipendenti dalla capacità dell'elettrometro e del circuito esterno.

La parte essenziale di questo strumento consiste di una piastra di quarzo che è tagliata in modo particolare. Quando è posta sotto tensione, vi è una liberazione di elettricità uguale in quantità ma di segno opposto sui suoi due lati. La piastra di quarzo  $AB$  (Figura 21) è appesa verticalmente e si aggiungono dei pesi nella sua parte inferiore. La piastra è tagliata in modo che l'asse ottico del cristallo sia orizzontale e perpendicolare al piano della carta.

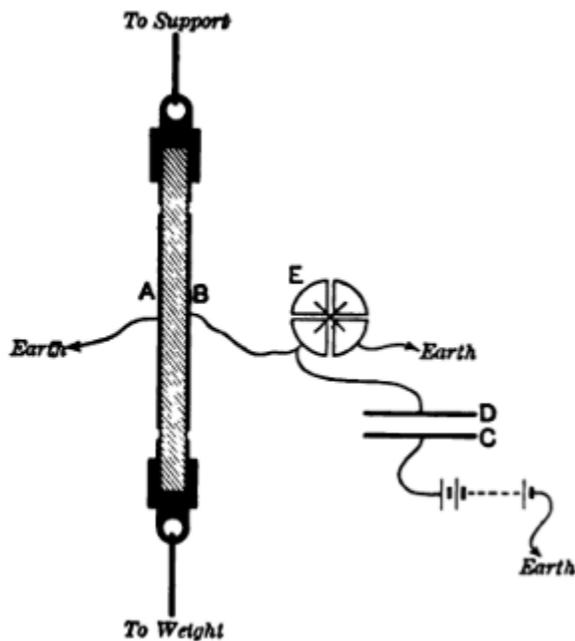


Fig. 21.

Le due facce  $A$  e  $B$  sono normali a una degli assi binari (o assi elettrici) del cristallo. La tensione deve essere applicata in una direzione normale agli assi ottico e elettrico. Le due facce  $A$  e  $B$  sono argentate, ma la parte principale della piastra è elettricamente isolata rimuovendo una stretta striscia di argentatura vicino alle sue parti superiore e inferiore. Un lato della piastra è connesso con l'elettrometro e con il conduttore, di cui si misura il tasso di diminuzione. La quantità di elettricità liberata su una faccia è espressa in modo accurato da

$$Q = 0.063 \frac{L}{b} F$$

dove  $L$  è la lunghezza della parte isolata del quarzo,  $b$  lo spessore di  $AB$  e  $F$  il peso attaccato in chilogrammi.  $Q$  è allora espresso in unità elettrostatiche.

Supponiamo, per esempio, che si debba misurare la corrente tra i piatti  $CD$  (Figura 21) dovuta a certe sostanze radioattive poste su  $C$ , per una data differenza di potenziale tra  $C$  e  $D$ . Ad un dato istante è interrotta la connessione tra i quadranti dell'elettrometro e la terra. Il peso è attaccato alla piastra di quarzo, ed è tenuto in mano per applicare la tensione con gradualità. Ciò determina un rilascio di elettricità di segno opposto a quello dato alla piastra  $D$ . L'ago dell'elettrometro è tenuto il più possibile nella posizione a riposo aggiustando la tensione manualmente. Applicata pienamente la tensione, il momento dell'ago inizia a muoversi in modo costante dallo zero. La corrente tra i piatti  $CD$  è allora data da  $\frac{Q}{t}$  dove  $t$  è il tempo di osservazione. Il valore di  $Q$  è noto dal peso attaccato.

Con questo metodo l'elettrometro è usato solo come rivelatore per mostrare che il sistema è tenuto a potenziale zero. Non è richiesta alcuna conoscenza della capacità del sistema isolato. Dopo un poco di pratica, le misure di corrente si possono fare in questo con rapidità e precisione.

<sup>11</sup>J. e P. Curie, C. R. 91, pp. 88 e 294, 1880. Vedere anche Friedel e J. Curie, C. R. 96, pp. 1262 e 1389, 1883, e Lord Kelvin, Phil. Mag. 36, pp. 331, 342, 384, 414, 453, 1893.

## Natura delle radiazioni

### 4.1. Parte I - Confronto tra le radiazioni

**71. I tre tipi di radiazione.** Tutte le sostanze radioattive possiedono in comune la capacità di agire su una lastra fotografica e di ionizzare il gas nella loro immediata vicinanza. L'intensità delle radiazioni può essere confrontata per mezzo della loro azione fotografica o elettrica; e, nel caso delle sostanze fortemente radioattive, per il loro potere di illuminare uno schermo fluorescente. Tali confronti, tuttavia, non gettano piena luce sulla questione se le radiazioni sono dello stesso tipo o di tipo diverso, perché è ben noto che tali tipi diversi di radiazione come i raggi ultravioletti a corta lunghezza d'onda, Röntgen e raggi catodici, possiedono tutti la proprietà di produrre ioni nel volume di un gas, illuminare uno schermo fluorescente, e agire su una lastra fotografica. Non si può impiegare alcun metodo ottico per esaminare tali radiazioni, siccome non mostrano alcuna traccia di riflessione, rifrazione o polarizzazione.

Due metodi generali possono essere usati per distinguere i tipi di radiazione emessi dallo stesso corpo, e di confrontare anche le radiazioni dalle diverse sostanze radioattive. Questi metodi sono i seguenti:

- (1) Valutabili deflessione in un campo magnetico
- (2) Confronto del loro assorbimento relativo da parte di solidi e gas.

Esaminati in questi modi, è stato trovato che vi sono tre diversi tipi di radiazione emessa dai corpi radioattivi, che per brevità e convenienza sono state chiamate da chi scrive raggi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

- (1) I raggi  $\alpha$  sono molto facilmente assorbiti da sottili fogli metallici e da alcuni centimetri di aria. Sono corpi carichi positivamente emessi con velocità di circa  $1/10$  di quella della luce. Essi sono deflessi da intensi campi elettrici e magnetici, ma la deviazione è piccola rispetto a quella, a parità di condizioni, dei raggi catodici prodotti in un tubo a vuoto.
- (2) I raggi  $\beta$  sono più penetranti dei raggi  $\alpha$ , e sono corpi carichi negativamente emessi con velocità dello stesso ordine dei raggi  $\alpha$ , e sono di fatto identici ai raggi catodici prodotti in un tubo a vuoto.
- (3) I raggi  $\gamma$  sono estremamente penetranti, e non deviabili da un campo magnetico. La loro reale natura non è definitivamente stabilita, ma sono analoghi per molti aspetti ai raggi Röntgen molto penetranti.

Le tre sostanze radioattive meglio note, uranio, torio e radio, emettono tutti questi tre tipi di raggi, ognuno in quantità approssimativamente proporzionale alla sua attività relativa misurata dai raggi  $\alpha$ . Il polonio è solo nel produrre solo gli  $\alpha$  o raggi facilmente assorbibili<sup>1</sup>.

**72. Deflessione dei raggi.** I raggi emessi dai corpi attivi presentano una stretta analogia con i raggi prodotti in un tubo a vuoto spinto quando è attraversato da una scarica elettrica. I raggi  $\alpha$  corrispondono ai raggi canale, scoperti da Goldstein, che sono stati mostrati da Wien e sono corpi carichi positivamente emessi a grande velocità (si veda la sezione 51). I raggi  $\beta$  sono gli stessi dei raggi catodici, mentre i  $\gamma$  assomigliano ai raggi Röntgen. In un tubo a vuoto, una grande quantità di energia elettrica è spesa nella produzione di raggi, ma, nei corpi radioattivi, i raggi sono emessi spontaneamente, e con un ritmo indipendente da ogni agente chimico o fisico. I raggi  $\alpha$  e  $\beta$  dai corpi attivi sono emessi con velocità ancora maggiore dei corrispondenti raggi nei tubi a vuoto, mentre i raggi  $\gamma$  hanno un potere di penetrazione di gran lunga maggiore dei raggi Röntgen.

L'effetto di un campo magnetico su un fascio di raggi da una sostanza radioattiva che emette i tre tipi di radiazione è molto ben illustrato in Figura 22<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Nell'esame dell'uranio chi scrive (*Phil. Mag.* p. 116, Gennaio 1899) trovò che i suoi raggi sono di due tipi, molto diversi nel potere di penetrazione, che sono chiamati  $\alpha$  e  $\beta$ . Inoltre, trovò che raggi simili erano emessi dal torio e dal radio. Dalla scoperta che raggi molto penetranti erano emessi dall'uranio e dal torio così come dal radio, il termine  $\gamma$  fu ad essi associato da chi scrive. La parola "raggio" è stata mantenuta in questo lavoro, sebbene è ora stabilito che i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  sono particelle emesse a grande velocità. Il termine è pertanto usato con lo stesso significato attribuitogli da Newton, che lo applicò nei *Principia* al flusso di corpuscoli che riteneva responsabili del fenomeno luminoso. In alcuni articoli recenti, i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  sono stati chiamati "emanazioni"  $\alpha$  e  $\beta$ . Questa nomenclatura non può creare confusione, poiché il termine "emanazione radioattiva" è già stato generalmente adottato in radioattività applicandolo alle sostanze materiali che gradualmente diffondono dai composti del torio e del radio, ed emette esso stesso radiazioni.

<sup>2</sup>Questo metodo di illustrazione è dovuto a Mme Curie, Tesi presentata alla Facoltà di Scienze di Parigi, 1903.

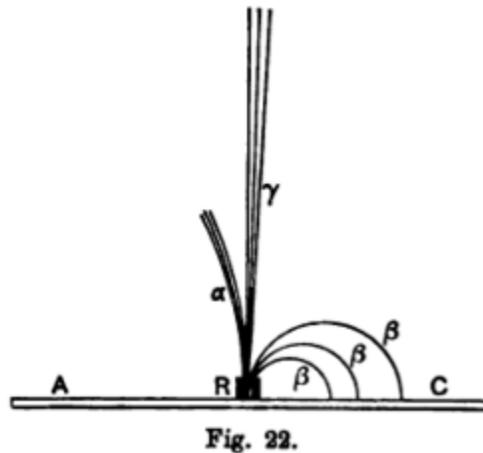


Fig. 22.

Del radio è posto nella parte inferiore di uno stretto contenitore cilindrico di piombo  $R$ . Uno stretto fascio di raggi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  fuoriesce dall'apertura. Se si applica un intenso campo magnetico uniforme perpendicolare al piano del foglio, i tre tipi di raggi sono separati tra loro. I raggi  $\gamma$  continuano in linea retta senza alcuna deviazione. I raggi  $\beta$  sono deflessi verso destra, descrivendo orbite circolari il cui raggio varia entro ampi limiti. Se la lastra fotografica  $AC$  è posta sotto il contenitore di radio, i raggi  $\beta$  producono una diffusa impressione fotografica sulla destra del contenitore  $R$ . I raggi  $\alpha$  sono curvati nella direzione opposta a quella dei  $\beta$ , e descrivono un arco di cerchio di grande raggio, ma sono rapidamente assorbiti dopo aver attraversato una distanza di pochi centimetri da  $R$ . Il valore della deviazione dei raggi  $\alpha$  confrontato con quello dei raggi  $\beta$  è molto esagerato in figura.

**73. Potere di ionizzazione e di penetrazione dei raggi.** Dei tre tipi di raggi, gli  $\alpha$  producono la maggior parte della ionizzazione nel gas e i  $\gamma$  la minore. Con un sottile strato di materiale attivo non schermato distribuito sulla parte inferiore di due piatti paralleli distanti  $5\text{ cm}$ , la quantità di ionizzazione dovuta ai raggi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  è dell'ordine relativo 10000, 100 e 1. Questi valori sono solo una approssimazione, e le differenze divengono meno marcate al crescere dello spessore dello strato radioattivo.

Il potere di penetrazione medio dei raggi è mostrato sotto. Nella prima colonna è dato lo spessore dell'alluminio, che dimezza ogni radiazione, e nella seconda il relativo potere di penetrazione dei raggi.

Radiazione	Spessore alluminio in $\text{cm}$ , che dimezza la radiazione	Potere di penetrazione relativo
raggi $\alpha$	$0.0005\text{ cm}$	1
raggi $\beta$	$0.05\text{ cm}$	100
raggi $\gamma$	$8\text{ cm}$	10000

Il potere di penetrazione relativo è allora approssimativamente inversamente proporzionale alla ionizzazione relativa. Questi valori, tuttavia, indicano solo l'ordine del potere di penetrazione relativo. Esso varia considerevolmente per i diversi corpi attivi.

I raggi  $\alpha$  dall'uranio e dal polonio sono i meno penetranti, e quelli dal torio i più. Le radiazioni  $\beta$  dal torio e dal radio sono molto complesse, e consistono di raggi alquanto diversi nel potere di penetrazione. Alcuni dei raggi  $\beta$  da queste sostanze sono molto meno e altri molto più penetranti di quelli dell'uranio, che emettono raggi quasi omogenei.

**74. Difficoltà nel confronto delle misure.** È difficile eseguire misure quantitative o anche qualitative dell'intensità relativa dei tre tipi di raggi da sostanze attive. I tre metodi generali impiegati dipendono dall'azione dei raggi nella ionizzazione del gas, su una lastra fotografica e nella produzione di fenomeni di fosforescenza o fluorescenza in alcune sostanze. In ognuno di questi metodi la frazione dei raggi che è assorbita e trasformata in un'altra forma di energia è diversa per ogni tipo di raggio. Anche quando un tipo di raggio specifico è sotto osservazione, le misure comparative sono rese difficili dalla complessità di quel tipo di radiazione. Per esempio, i raggi  $\beta$  del radio consistono di particelle cariche negativamente emesse con un grande spettro di velocità, e, di conseguenza, sono diversamente assorbite passando attraverso un dato spessore di materia. In ogni caso, solo una frazione dell'energia assorbita è trasformata nel particolare tipo di energia, ionica, chimica, o luminosa, che serve come un mezzo di misura.

I raggi che sono più attivi elettricamente sono i meno attivi fotograficamente. In condizioni ordinarie, la maggior parte dell'azione fotografica di uranio, torio e radio, è dovuta ai raggi  $\beta$  o catodici. I raggi  $\alpha$  dall'uranio e torio, a causa della loro debole azione, non sono stati finora rivelati fotograficamente. Con sostanze attive come radio e polonio, i raggi  $\alpha$  producono facilmente un'immagine fotografica. I raggi  $\gamma$  siano stati rivelati fotograficamente solo nel caso del radio. La non osservazione dell'azione fotografica di questi raggi dall'uranio e torio è probabilmente dovuta al fatto che l'effetto

cercato è molto piccolo e durante lunghe esposizioni è molto difficile evitare appannamenti delle lastre dovuti ad altre cause. Considerando la somiglianza delle radiazioni sotto altri aspetti, vi possono essere pochi dubbi che i raggi  $\gamma$  producano una certa azione fotografica, sebbene troppo piccola per essere osservata con certezza.

Queste differenze nelle proprietà fotografiche e ionizzanti delle radiazioni devono sempre essere tenute in conto confrontando i risultati ottenuti con i due metodi. L'apparente contraddizione dei risultati ottenuti da diversi osservatori usando questi due metodi è legata alle loro differenze nell'azione fotografica e ionizzante. Per esempio, con materiale attivo non schermato, la ionizzazione osservata con il metodo elettrico è dovuta quasi interamente ai raggi  $\alpha$ , mentre l'azione fotografica nelle stesse condizioni è dovuta quasi interamente ai raggi  $\beta$ .

È spesso conveniente conoscere quale spessore di materia è sufficiente ad assorbire uno specifico tipo di radiazione. Uno spessore di alluminio o mica di  $0.01\text{ cm}$  o un comune foglio di carta è sufficiente ad assorbire completamente tutti i raggi  $\alpha$ . Con un tale schermo sul materiale attivo, gli effetti sono dovuti solo ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$ , che lo attraversano con solo un piccolo assorbimento. La maggior parte dei raggi  $\beta$  sono assorbiti in  $5\text{ mm}$  di alluminio o  $2\text{ mm}$  di piombo. La radiazione che passa attraverso tali schermi è quasi completamente composta dai raggi  $\gamma$ . Come grezza regola di lavoro, si può assumere che uno spessore di materia richiesto per assorbire ogni tipo di raggi è inversamente proporzionale alla densità della sostanza, cioè l'assorbimento è proporzionale alla densità. Questa regola vale approssimativamente per sostanze leggere, ma in quelle pesanti come mercurio e piombo, le radiazioni sono circa due volte più assorbite di quanto la regola indichi.

#### 4.2. Parte II - I $\beta$ o Raggi Catodici

**75. Scoperta dei raggi  $\beta$ .** Una scoperta che dette un grande impulso allo studio delle radiazioni dai corpi attivi fu fatta nel 1899, quasi simultaneamente in Germania, Francia e Austria. Si osservò che preparazioni di radio emettevano raggi che erano deviati da un campo magnetico, e con caratteristiche assai simili ai raggi catodici prodotti in un tubo a vuoto. L'osservazione di Elster e Geitel che un campo magnetico alterava la conduttività prodotta in aria dai raggi del radio, portò Giesel<sup>3</sup> ad esaminare l'effetto di un campo magnetico sulle radiazioni. Nei suoi esperimenti, la preparazione radioattiva fu posta in un piccolo contenitore tra i poli di un elettromagnete. Il contenitore era disposto per produrre un fascio di raggi che era approssimativamente perpendicolare al campo. I raggi producevano un piccolo punto fluorescente sullo schermo. Eccitando l'elettromagnete, la zona fluorescente si allargava da un lato. Invertendo il campo, l'estensione della zona era nella direzione opposta. La deviazione dei raggi era nella stessa direzione e dello stesso ordine di grandezza di quella dei raggi catodici.

S. Meyer e Schweidler<sup>4</sup> ottennero risultati simili. Essi mostrarono, inoltre, la deviazione dei raggi per l'alterazione della conduttività dell'aria quando era applicato un campo magnetico. Becquerel<sup>5</sup>, poco dopo, mostrò la deflessione magnetica dei raggi dal radio usando il metodo fotografico. P. Curie<sup>6</sup>, mediante il metodo elettrico, mostrò che i raggi dal radio erano di due tipi, uno apparentemente non deviabile e facilmente assorbito (ora noti come raggi  $\alpha$ ), e l'altro penetrante e deviabile dal campo magnetico (ora noti come raggi  $\beta$ ). L'effetto di ionizzazione dovuto ai raggi  $\beta$  era solo una piccola frazione di quella dovuta ai raggi  $\alpha$ . Successivamente, Becquerel, con il metodo fotografico, mostrò che l'uranio emetteva alcuni raggi deviabili. Era stato mostrato in precedenza<sup>7</sup> che i raggi dall'uranio erano  $\alpha$  e  $\beta$ . I raggi deflessi nell'esperimento di Becquerel erano interamente  $\beta$ , poiché i raggi  $\alpha$  dall'uranio non producono un effetto fotografico significativo. Rutherford e Grier<sup>8</sup>, usando il metodo elettrico, mostrarono che i composti del torio, come quelli dell'uranio, emettevano, oltre ai raggi  $\alpha$ , alcuni  $\beta$  penetranti, deviabili in un campo magnetico. Come nel caso del radio, la ionizzazione dovuta ai raggi  $\alpha$  di uranio e torio è grande rispetto a quella dovuta ai raggi  $\beta$ .

**76. Esame della deviazione magnetica con il metodo fotografico.** Becquerel ha fatto uno studio molto completo, con il metodo fotografico, dei raggi  $\beta$  dal radio, e ha mostrato che si comportano sotto tutti gli aspetti come i raggi catodici, che sono noti essere particelle negativamente cariche dotate di grande velocità. Il moto di uno ione carico sottoposto all'azione di un campo magnetico è stato discusso nella sezione 49. Si è mostrato che se una particella di massa  $m$  e carica  $e$  è emessa con velocità  $u$ , ad un angolo  $\alpha$  con la direzione di un campo uniforme di intensità  $H$ , esso descrive una spirale attorno alle linee di forza del campo magnetico. Questa spirale si avvolge attorno ad un cilindro di raggio  $R$ , con l'asse parallelo al campo, dove  $R$  è dato da

$$R = \frac{mu}{He} \sin \alpha$$

Quando  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , cioè quando i raggi sono emessi perpendicolarmente al campo, le particelle descrivono cerchi di raggio

$$R = \frac{mu}{He}$$

<sup>3</sup>Giesel, Annal. d. Phys. 69, p. 834, 1899.

<sup>4</sup>Meyer e Schweidler, Phys. Zeit. 1, pp. 90, 118, 1899.

<sup>5</sup>Becquerel, C. R. 129, pp. 997, 1205. 1899.

<sup>6</sup>Curie, C. R. 130, p. 73, 1900.

<sup>7</sup>Rutherford, Phil. Mag. gennaio 1899.

<sup>8</sup>Rutherford e Grier, Phil. Mag. settembre 1902.

I piani di questi cerchi sono normali al campo. pertanto, per una particolare velocità  $u$ , il valore di  $R$  varia inversamente all'intensità del campo. In un campo uniforme i raggi emessi normalmente al campo descrivono cerchi, e le loro direzioni di emissione sono tangenti all'origine.

Questa conclusione è stata verificata sperimentalmente da Becquerel per i raggi  $\beta$  del radio, con un dispositivo simile a quello mostrato in Figura 23.

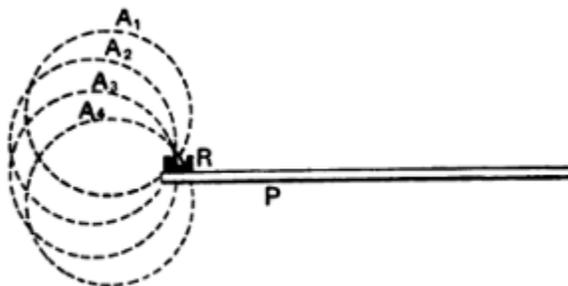


Fig. 23.

Una lastra fotografica  $P$ , con il film verso il basso, è avvolta in una carta nera e posta orizzontalmente in un campo magnetico orizzontale e uniforme di un elettromagnete. Il campo magnetico è supposto uniforme e, nella figura, è perpendicolare al piano del foglio. La lastra era ricoperta con uno scudo di piombo, e su un lato di essa, nel centro del campo magnetico, è posto un piccolo contenitore di piombo  $R$  contenente la sostanza radioattiva.

Eccitando il magnete, così che i raggi sono curvati verso la parte sinistra della figura, si osserva la formazione di un'immagine fotografica prodotta direttamente sotto la sorgente dei raggi, che sono stati curvati dal campo magnetico. I raggi perpendicolari al campo descrivono cerchi, che colpiscono la lastra immediatamente sotto la sorgente. Alcuni di questi,  $A_1, A_2, A_3$ , sono mostrati in figura. I raggi, normali alla lastra, la colpiscono quasi perpendicolarmente, mentre quelli quasi paralleli la colpiscono ad incidenza radente. I raggi, inclinati nella direzione del campo, descrivono spirali e producono effetti su un asse parallelo al campo passante per la sorgente. A causa di ciò, ogni schermo opaco posto sul cammino dei raggi ha la sua ombra prodotta vicino al bordo della lastra fotografica.

**77. Complessità dei raggi.** I raggi deviabili provenienti dal radio sono complessi, sono cioè composti di un flusso di particelle emesse con un grande intervallo di velocità. In un campo magnetico ogni raggio descrive un cammino, il cui raggio di curvatura è direttamente proporzionale alla velocità di emissione. La complessità della radiazione è stata mostrata molto chiaramente da Becquerel<sup>9</sup> nel modo seguente.

Una lastra fotografica non ricoperta, con il film sulla parte anteriore, era posta orizzontalmente in un campo magnetico orizzontale e uniforme di un elettromagnete. Una piccola scatola di piombo aperta, contenente la sostanza radioattiva, era posta nel centro del campo, sulla lastra fotografica. La luce, dovuta alla fosforescenza della sostanza radioattiva, non poteva raggiungere, quindi, la lastra. L'intero apparato era posto in una stanza buia. L'immagine sulla lastra assunse la forma di una grande, diffusa, ma continua banda di forma ellittica, prodotta su un lato della piastra.

Una tale immagine è attendibile se i raggi sono emessi in tutte le direzioni, anche se le loro velocità sono le stesse, e si può facilmente mostrare teoricamente che il cammino dei raggi è confinato entro un'ellisse il cui asse minore, che è perpendicolare al campo, è uguale a  $2R$ , e il cui asse maggiore è uguale a  $\pi R$ . Se, tuttavia, la sostanza attiva è posta nella parte inferiore di un profondo cilindro di piombo di piccolo diametro, i raggi hanno praticamente tutti la stessa direzione di emissione, e in questo caso ogni parte della lastra è impressionata dai raggi di una definita curvatura.

In questo caso ancora, si osserva una diffusa immagine sulla lastra, dando, così si dice, uno spettro continuo dei raggi e mostrante che la radiazione è composta di raggi con curvature alquanto diverse. La Figura 24 mostra una fotografia di questo tipo ottenuta da Becquerel, con strisce di carta, alluminio e platino poste sulla lastra.

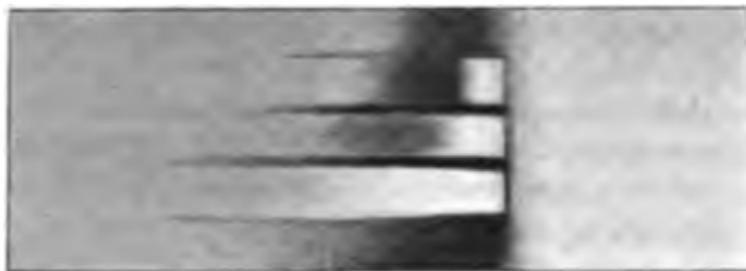


Fig. 24.

<sup>9</sup>Becquerel, C. R. 130, pp. 206, 372, 810, 979. 1900.

Se si pongono sulla lastra schermi di vario spessore, si osserva che essa non è sensibilmente impressionata fino ad una certa distanza dalla sostanza attiva, e che tale distanza aumenta con lo spessore dello schermo. Questa distanza è ovviamente uguale al doppio del raggio di curvatura del cammino del raggio, che è in grado di produrre una immagine sullo schermo.

Questi esperimenti mostrano molto chiaramente che i raggi più deviabili sono quelli più facilmente assorbiti dalla materia. Con osservazioni di questo tipo Becquerel ha determinato approssimativamente il limite inferiore del valore di  $HR$  per raggi che sono trasmessi attraverso materiali di diverso spessore.

I risultati sono riportati nella tabella seguente:

Sostanza	Spessore in $mm$	Limite inferiore di $HR$ per raggi trasmessi
Carta nera	0.065	650
Alluminio	0.010	350
“	0.100	1000
“	0.200	1480
Mica	0.025	520
Vetro	0.155	1130
Platino	0.030	1310
Rame	0.085	1740
Piombo	0.130	2610

Se  $\frac{e}{m}$  è una costante per tutti i raggi, il valore di  $HR$  è proporzionale alla velocità dei raggi, e segue da questa tabella che la velocità dei raggi che producono un effetto sulla lastra attraverso  $13\text{ mm}$  di piombo è circa 7 volte quello dei raggi che producono un'immagine attraverso  $0.01\text{ mm}$  di alluminio. Si mostrerà, tuttavia, nella sezione 82, che  $\frac{e}{m}$  non è costante per tutte le velocità, ma decresce con l'aumentare della velocità dei raggi. La differenza in velocità tra i raggi è di conseguenza non così grande come indicano i calcoli. Da un esame dei raggi dell'uranio, Becquerel trovò che la radiazione non è così complessa come quella del radio, ma consiste interamente di raggi per i quali il valore  $HR$  è circa 2000.

**78. Esame dei raggi  $\beta$  con il metodo elettrico.** La presenza di raggi facilmente deviabili emessi da una sostanza attiva può essere mostrata con il metodo fotografico, ma è necessario, in aggiunta, mostrare che i raggi penetranti che producono la ionizzazione nel gas sono gli stessi di quelli che provocano l'effetto fotografico. Questo può essere convenientemente testato con un dispositivo simile a quello mostrato in Figura 25.

La materia radioattiva  $A$  è posta su un blocco di piombo  $B$  tra due piatti paralleli di piombo  $BB'$ . I raggi passano tra i piatti paralleli  $PP'$  del contenitore di controllo. Il campo magnetico è applicato perpendicolarmente al piano del foglio. Il rettangolo tratteggiato  $EEEE$  rappresenta la posizione delle parti. Se si deve esaminare un composto di radio o torio, serve un flusso di aria per prevenire la diffusione delle emanazioni radioattive nel contenitore. Quando un composto di uranio, torio o radio è posto in  $A$ , la ionizzazione nel contenitore è dovuta principalmente ai raggi  $\alpha$  e  $\beta$ . I raggi  $\alpha$  sono eliminati aggiungendo uno strato di alluminio spesso  $0.1\text{ cm}$  al di sopra del materiale attivo. Quando lo strato attivo non supera lo spessore di qualche millimetro, la ionizzazione dovuta ai raggi  $\gamma$  è piccola rispetto a quella prodotta dai raggi  $\beta$ , e può essere trascurata. Applicando un campo magnetico perpendicolare alla direzione principale dei raggi, la ionizzazione nel contenitore dovuta ai raggi decresce costantemente con l'aumentare dell'intensità del campo, e in un campo intenso si riduce a una frazione molto piccola del suo valore originale. In questo caso i raggi sono curvati in modo tale che nessuno di essi entra nel contenitore di misura.

Un esame di questo tipo ha mostrato che i raggi  $\beta$  di uranio, torio e radio sono tutti raggi deviabili da un campo magnetico. I raggi dal polonio consistono interamente di raggi  $\alpha$ , la cui deviazione può essere rivelata solo con un campo magnetico molto intenso.

Quando si rimuove lo schermo che ricopre il materiale attivo, in un intenso campo magnetico, la ionizzazione nel contenitore è principalmente dovuta ai raggi  $\alpha$ . A causa della piccola deviazione dei raggi  $\alpha$  in condizioni sperimentali ordinarie, un maggiore incremento del campo magnetico non altera in modo apprezzabile la corrente dovuta ad essi.

L'azione del campo magnetico su un sostanza molto attiva come il radio è facilmente osservabile con il metodo elettrico, essendo grande la corrente di ionizzazione dovuta ai raggi deviabili. Con sostanze di piccola attività come uranio e torio, la corrente di ionizzazione dovuta ai raggi deviabili è molto piccola, ed è necessario un elettrometro sensibile o un elettroscopio per determinare la variazione, in un campo magnetico, delle piccole correnti prodotte. Questo è specialmente il caso dell'ossido di torio, che emette solo circa  $1/5$  della quantità di raggi deviabili emessi dallo stesso peso di ossido di uranio.

**79. Esperimenti con uno schermo fluorescente.** I raggi  $\beta$  da un campione di bromuro di radio puro di pochi milligrammi produce un'intensa fluorescenza nel platino cianuro di bario e altre sostanze che possono essere rese luminose sotto l'azione dei raggi catodici. Usando un centigrammo di bromuro di radio, la luminosità su uno schermo, posto sopra di esso, è sufficientemente intensa da poter essere osservata anche con la luce del giorno. Con un tale schermo in una stanza buia si possono illustrare molte altre proprietà dei raggi  $\beta$  e mostrare con chiarezza la loro natura complessa. Una

piccola quantità di radio è posta nella parte bassa di un piccolo e stretto tubo di piombo aperto da un lato. Questo è posto tra i poli di un elettromagnete, e lo schermo è collocato al di sotto. Senza campo magnetico, si osserva una debole luminosità dello schermo dovuta ai raggi  $\gamma$  fortemente penetranti che passano attraverso il piombo. Quando opera un campo magnetico, lo schermo è fortemente illuminato da un lato su un'area di forma ellittica (sezione 77). Invertendo il campo magnetico, la direzione della deviazione è pure invertita. L'ampia estensione della zona illuminata mostra la natura complessa dei raggi  $\beta$ . Ponendo un oggetto metallico in vari punti sopra lo schermo, la traiettoria dei raggi può facilmente essere tracciata annotando la posizione della forma dell'ombra sullo schermo. Osservando la densità dell'ombra, si può vedere che i raggi più facilmente deviati sono i meno penetranti.

*Confronto tra i raggi  $\beta$  e i raggi catodici.*

**80. Metodi di confronto.** Per provare l'identità dei raggi  $\beta$  da corpi attivi con i raggi catodici prodotti nei tubi a vuoto, è necessario mostrare

- (1) che i raggi trasportano con sé una carica negativa;
- (2) che sono deviati da un campo elettrico e anche da un campo magnetico;
- (3) che il rapporto  $e/m$  è lo stesso dei raggi catodici.

**Carica elettrica trasportata dai raggi  $\beta$ .** Gli esperimenti di Perrin e J. J. Thomson hanno mostrato che i raggi catodici trasportano una carica negativa. Inoltre, Lenard ha mostrato che i raggi trasportano pure una carica dopo aver attraversato sottili strati di materia. Quando i raggi sono assorbiti, essi trasferiscono la loro carica al corpo che li assorbe. La quantità totale di carica trasportata dai raggi  $\beta$  da una preparazione molto attiva di radio è, in generale, piccola rispetto a quella trasportata dall'insieme dei raggi catodici in un tubo a vuoto, e può essere rivelata solo con metodi sofisticati.

Supponiamo che uno strato molto attivo di radio sia distribuito su una lastra di metallo parallela collegata con un elettrometro. Se i raggi sono carichi negativamente, la lastra superiore dovrebbe ricevere una carica negativa crescente nel tempo. A causa, tuttavia, della grande ionizzazione prodotta dai raggi tra le piastre, ogni carica ceduta ad una di esse è quasi istantaneamente dissipata. In molti casi, la piastra si carica a un potenziale negativo o positivo definito dipendente dal metallo, ma ciò è dovuto alla differenza di potenziale di contatto tra le piastre, ed è prodotto o dai raggi carichi o privi di carica. La ionizzazione del gas si riduce fortemente ponendo sul materiale attivo uno schermo metallico che assorbe i raggi  $\alpha$ , ma permette il passaggio dei  $\beta$  con un piccolo assorbimento.

La rapida perdita di carica della lastra superiore si può ridurre di molto, o diminuendo la pressione del gas circostante o circondando la lastra con opportuni isolanti. Nei loro esperimenti per determinare la quantità di carica trasportata dai raggi del radio, M. e Mme Curie<sup>10</sup> usarono il secondo metodo.

Un disco di metallo *MM* (Figura 26) è collegato ad un elettrometro con il cavo *T*. Il disco e il filo sono completamente circondati da materiale isolante *ii*. Il tutto è circondato da un involuppo metallico *EEEE* messo a terra. Nella parte inferiore del disco, l'isolante e la copertura metallica sono molto sottili. Questo lato è esposto ai raggi del radio *R* posto in un incavo in una piastra di piombo *AA*.

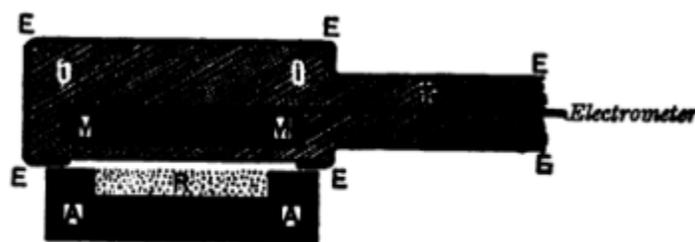


Fig. 26.

I raggi del radio passano attraverso il rivestimento metallico e l'isolante con piccolo assorbimento, ma sono completamente assorbiti nel disco *MM*. Si è osservato che il disco riceveva una carica negativa che aumentava in modo uniforme con il tempo, mostrando che i raggi trasportano una carica negativa. La corrente osservata era molto piccola. Con una preparazione attiva di radio<sup>11</sup>, formante uno strato di  $2.5\text{ cm}^2$  per uno spessore di  $2\text{ mm}$ , si osservava una corrente dell'ordine di  $10^{-11}\text{ A}$  dopo che i raggi avevano attraversato uno strato di alluminio di  $0.1\text{ mm}$  e uno strato di gomma di  $3\text{ mm}$ . La corrente era la stessa con dischi di piombo, rame e zinco e anche quando la gomma veniva sostituita con la paraffina.

Curie osservò pure in un altro esperimento con caratteristiche simili che lo stesso radio acquistava una carica positiva. Ciò deriva naturalmente dal fatto che i raggi trasportano una carica negativa. Se i soli raggi  $\beta$  trasportano una carica, una pallina di radio, perfettamente isolata e circondata da un mezzo non conducente, dovrebbe col tempo acquistare un potenziale positivo. Poiché, tuttavia, i raggi  $\alpha$  portano con sé una carica opposta in segno a quella dei raggi  $\beta$ , il rapporto tra la carica trasportata dai due tipi di raggi può essere determinato, prima che sia stabilito se il radio acquisterà

<sup>10</sup>M. e Mme Curie, C. R. 130. p. 647, 1900.

<sup>11</sup>L'attività della preparazione del radio non era dichiarata nell'articolo.

una carica positiva o negativa. Se, tuttavia, il radio è posto in un contenitore metallico isolato di spessore sufficiente ad assorbire tutti i raggi  $\alpha$ , ma tale da permettere alla maggior parte dei raggi  $\beta$  di sfuggire, il contenitore acquisterà una carica positiva in un vuoto.

Un interessante risultato sperimentale riguardante questo punto è stato descritto da Dorn<sup>12</sup>. Una piccola quantità di radio fu posta in un tubo di vetro graduato e lasciato per parecchi mesi. Aprendo il tubo con una lima, si osservò una scintilla elettrica luminosa al momento della rottura, mostrando che vi era una grande differenza di potenziale tra l'interno del tubo e la terra.

In questo caso i raggi  $\alpha$  erano assorbiti dalle pareti del tubo, ma una grande parte dei raggi  $\beta$  sfuggiva. L'interno del tubo si caricò, nel tempo, a un potenziale positivo; si doveva raggiungere uno stato stazionario quando il tasso di fuga dell'elettricità negativa era bilanciato dalla perdita di elettricità positiva attraverso le pareti del tubo. La superficie esterna del vetro dovrebbe avere praticamente sempre un potenziale nullo, a causa della ionizzazione dell'aria circostante.

Strutt<sup>13</sup> ha recentemente descritto un semplice e notevole esperimento per illustrare con maggiore chiarezza che una preparazione di radio acquista una carica positiva, se è racchiuso in uno spesso involucro in grado di assorbire tutte le particelle  $\alpha$ , ma abbastanza sottile da permettere il passaggio della maggior parte delle  $\beta$ . Il dispositivo sperimentale è chiaramente mostrato in Figura 27.

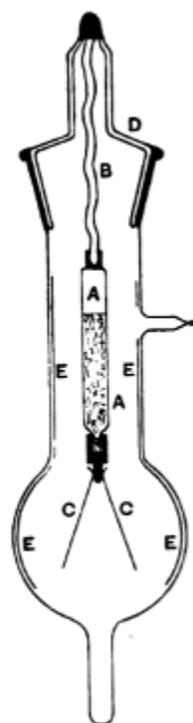


Fig. 27.

Un tubo sigillato *AA* contenente radio fu agganciato al termine di una coppia di sottili foglie d'oro in collegamento metallico con il radio, ed era isolato dentro un tubo più grande per mezzo di una bacchetta di quarzo *B*. La superficie interna del tubo era rivestita con stagnola *EE* messa a terra. La superficie di vetro di *AA* era resa conduttrice da un sottile rivestimento di acido fosforico. L'aria nel tubo più esterno era eliminata il più possibile per mezzo di una pompa al mercurio, per ridurre la ionizzazione nel gas, e di conseguenza la perdita di ogni carica guadagnata dalle foglie d'oro. Dopo un intervallo di 20 ore, le foglie d'oro divergevano completamente, indicando che avevano acquistato una grande carica positiva. In questo esperimento Strutt usò  $1/2 g$  di bario radifero di attività pari a solo 100 volte quella dell'uranio.

Se il tubo viene riempito con  $30 mg$  di bromuro di radio puro, le foglie divergono interamente in solo un minuto. Se si fa in modo che la foglia d'oro, ad un certo angolo di divergenza, venga a contatto con un pezzo metallico messo a terra, l'apparato può operare in modo automatico. La foglia diverge, tocca il metallo per poi collassare, e questo periodico movimento della foglia continuerà con un dato ritmo, anche se non indefinitamente, finché il radio non si esaurisce. Questo "orologio al radio" opererà con un ritmo sensibilmente uniforme per molti anni, ma, per le considerazioni che faremo alla sezione 268, vi è motivo di credere che il numero di particelle  $\beta$  emesse diminuirà esponenzialmente con il tempo, dimezzandosi dopo circa 1200 anni. Il periodo di movimento della foglia dovrebbe gradualmente crescere con il tempo, per divenire alla fine troppo piccolo per essere osservato.

L'azione dell'orologio al radio è l'effetto più vicino al moto perpetuo apparente finora osservato.

<sup>12</sup>Dorn, Phys. Zeit. 4, No. 18, p. 507, 1903.

<sup>13</sup>Strutt, Phil. Mag. novembre, 1903.

Una determinazione della quantità della carica trasportata dai raggi  $\beta$  del radio è stata compiuta da Wien<sup>14</sup>. Una piccola quantità di radio, posta in un contenitore graduato di platino, era appesa con un filo isolato all'interno di un cilindro di vetro, mantenuto a bassa pressione. Vi era, se necessario, un collegamento tra il contenitore di platino e un elettrodo graduato all'esterno del cilindro di vetro, per far pendere il tubo. Wien trovò che in un buon vuoto il contenitore di platino si caricava fino a circa 100 V. Il tasso di riduzione dell'elettricità negativa dal contenitore di platino con 4 mg di bromuro di radio corrispondevano a  $2.91 \cdot 10^{-12}$  A. Se la carica su ogni particella è pari a  $1.1 \cdot 10^{-20}$  u.e.s., ciò corrisponde ad una perdita di  $2.66 \cdot 10^7$  particelle al secondo. Da un grammo di bromuro di radio il corrispondente valore sarà  $6.6 \cdot 10^9$  per secondo. Poiché alcuni dei raggi  $\beta$  sono assorbiti nel loro passaggio attraverso le pareti del contenitore e dello stesso radio, il valore effettivo emesso per secondo da un grammo di bromuro di radio deve essere maggiore del valore sopra indicato. Questo è stato trovato dall'autore. Il metodo impiegato riduce l'assorbimento dei raggi  $\beta$  al minimo, e il numero totale emesso per secondo da 1 g di bromuro di radio in equilibrio radioattivo fu trovato essere  $4.1 \cdot 10^{10}$ , circa sei volte il valore trovato da Wien. Un resoconto dettagliato del metodo non può qui essere dato, ma verrà presentato nella sezione 253.

**81. Determinazione di  $e/m$ .** Abbiamo visto (sezione 50) che, nel loro passaggio attraverso i piatti di un condensatore, i raggi catodici sono deviati verso il piatto positivo. Poco dopo la scoperta della deviazione magnetica dei raggi  $\beta$  dal radio, Dorn<sup>15</sup> e Becquerel<sup>16</sup> mostrarono che erano deviati pure da un campo elettrico.

Osservando separatamente il valore della deviazione elettrica e magnetica, Becquerel fu in grado di determinare il rapporto  $e/m$  e la velocità delle particelle emesse. Due piastre rettangolari di rame alte 3.45 cm e distanti 1 cm, furono poste in un piano verticale isolato su un blocco di paraffina. Un piatto era caricato ad un alto potenziale mediante una macchina elettrostatica e l'altro era a terra. La sostanza attiva era posta in uno stretto solco ritagliato in una piastra di piombo parallela a quelle di rame e posta nel mezzo di esse. La lastra fotografica, avvolta in carta nera, era posta orizzontalmente sotto la piastra contenente la sostanza attiva. Il grande e diffuso fascio di raggi così ottenuto era deviato dal campo elettrico, ma la deviazione ammontava a solo pochi millimetri ed era difficile da misurare. Il metodo infine adottato fu quello di porre verticalmente sotto la sostanza attiva un sottile schermo di mica, che tagliava il campo in due parti uguali. Allora, in assenza di un campo elettrico, si produceva sulla lastra una stretta ombra rettangolare.

Quando si applicava un campo elettrico, i raggi venivano deviati e una parte del pennello di raggi era fermato dallo schermo di mica. Si stagliava allora un'ombra sulla lastra che mostrava la direzione della deviazione e corrispondeva ai raggi meno deviabili che producevano un'immagine attraverso la carta nera.

Se una particella di massa  $m$ , carica  $e$ , e velocità  $u$ , è emessa perpendicolarmente al campo elettrico di intensità  $X$ , l'accelerazione  $a$  è nella direzione del campo, ed è data da

$$a = \frac{Xe}{m}$$

Poiché la particella si muove con una accelerazione costante parallela al campo, il cammino della particella è lo stesso di quello di un corpo emesso orizzontalmente da un certa altezza con una velocità costante e soggetto alla gravità. Il cammino della particella è allora una parabola, il cui asse è parallelo al campo e il cui vertice è nel punto in cui la particella entra nel campo elettrico. La deviazione lineare  $d_1$  del raggio parallelo al campo dopo aver attraversato una distanza  $l$  è data da

$$d_1 = \frac{1}{2} \frac{Xe}{m} \frac{l^2}{u^2}$$

Togliendo il campo elettrico, la particella viaggia nella direzione della tangente al cammino in quel punto. Se  $\theta$  è la deviazione angolare del cammino in quel punto

$$\tan \theta = \frac{eXl}{mu^2}$$

La lastra fotografica era ad una distanza  $h$  al di sotto dell'estremità del campo. Le particelle colpivano la lastra ad una distanza  $d_2$  dal percorso originario dato da

$$d_2 = h \tan \theta + d_1 = \frac{Xle}{mu^2} \left( \frac{l}{2} + h \right)$$

Nel dispositivo sperimentale i valori erano

$$\begin{aligned} d_2 &= 4 \text{ cm} \\ X &= 1.02 \cdot 10^{12} \\ l &= 3.45 \text{ cm} \\ h &= 1.2 \text{ cm} \end{aligned}$$

<sup>14</sup>Wien, Phys. Zeit. 4, No 23, p. 624, 1903.

<sup>15</sup>Dorn, C. R. 130, p. 1129, 1900.

<sup>16</sup>Becquerel, C.R. 130, p. 809, 1900.

Se il raggio  $R$  di curvatura del cammino dello stesso raggio viene osservato in un campo magnetico di intensità  $H$  perpendicolare ai raggi,

$$\frac{e}{m} = \frac{V}{HR}$$

Combinando queste due equazioni si trova

$$u = \frac{Xl\left(\frac{l}{2} + h\right)}{HRd_2}$$

Una difficoltà sorse nell'identificare la parte del complesso fascio di raggi per la quale fu determinata la deviazione elettrica e magnetica. Becquerel stimò che il valore di  $HR$  per i raggi deflessi dal campo elettrico era circa 1600 *unità c.g.s.* Pertanto

$$u = 1.6 \cdot 10^{10} \frac{cm}{s}$$

e

$$\frac{e}{m} = 10^7$$

Questi raggi hanno, pertanto, una velocità pari alla metà di quella della luce e una massa apparente circa uguale a quella dei raggi catodici, cioè circa  $1/1000$  della massa dell'atomo di idrogeno. Il raggio  $\beta$  è pertanto analogo in tutti gli aspetti al raggio catodico, tranne per la velocità. In un tubo a vuoto i raggi catodici generalmente hanno una velocità di circa  $2 \cdot 10^9$  cm/s. In speciali tubi con campi intensi la velocità può essere aumentata a circa  $10^{10}$  cm/s. Queste particelle  $\beta$ , allora, si comportano come unità isolate di elettricità negativa, identiche agli elettroni liberi prodotti da una scarica elettrica in un tubo a vuoto. Gli elettroni emessi dal radio hanno velocità variabili da circa  $0.2V$  ad almeno  $0.96V$ , dove  $V$  è la velocità della luce, e hanno una velocità media notevolmente maggiore di quella degli elettroni prodotti in un tubo a vuoto. Questi elettroni in movimento sono in grado di passare attraverso spessori molto maggiori di materia prima di essere assorbiti rispetto agli elettroni più lenti prodotti in un tubo a vuoto, ma la differenza è solamente di livello e non di tipo. Poiché gli elettroni sono continuamente e spontaneamente emessi dal radio con enormi velocità, essi devono acquistare la loro energia cinetica dalla materia stessa. È difficile evitare la conclusione che questa velocità non sia stata impressa istantaneamente agli elettroni. Un tale incremento improvviso di velocità dovrebbe comportare una immensa e istantanea concentrazione di energia su una piccola particella, ed è più probabile che l'elettrone prima della sua espulsione sia stato in un rapido moto orbitale od oscillatorio nell'atomo, e, che, da questo sia stato espulso istantaneamente. Secondo questo punto di vista, l'energia dell'elettrone non è creata istantaneamente, ma è solo evidenziata dalla sua emissione dal sistema al quale appartiene.

**82. Variazione di  $\frac{e}{m}$  con la velocità dell'elettrone.** Il fatto che il radio emetta con velocità variabili tra  $\frac{1}{5}$  e  $\frac{9}{10}$  della velocità della luce è stato utilizzato da Kaufmann<sup>17</sup> per esaminare l'eventuale variazione del rapporto  $\frac{e}{m}$  degli elettroni con la velocità. Abbiamo visto (sezione 48) che, in accordo con la teoria elettromagnetica, un carica elettrica in moto si comporta come se avesse una massa apparente. Per piccole velocità, questa massa elettrica addizionale è uguale a  $\frac{2e^2}{3a}$ , dove  $a$  è il raggio del corpo, ma aumenta rapidamente avvicinandosi rapidamente alla velocità della luce. È molto importante stabilire se la massa dell'elettrone è dovuta in parte alla massa meccanica e in parte a quella elettrica, o se si può spiegare in virtù dell'elettricità in movimento indipendentemente dal concetto usuale di massa.

Sono state sviluppate diverse formule per esprimere la variazione della massa con la velocità da parte di J. J. Thomson, Heaviside e Searle. Per interpretare questi risultati Kaufmann ha usato una formula sviluppata da M. Abraham<sup>18</sup>.

Sia  $m_0$  la massa dell'elettrone per basse velocità;  $m$  la massa apparente dell'elettrone ad ogni velocità;  $u$  la velocità dell'elettrone;  $V$  la velocità della luce.

Sia  $\beta = \frac{u}{V}$ ; allora si può mostrare che

$$(4.2.1) \quad \frac{m}{m_0} = \frac{3}{4} \psi(\beta)$$

dove

$$(4.2.2) \quad \psi(\beta) = \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1 + \beta^2}{2\beta} \log \frac{1 + \beta}{1 - \beta} - 1 \right]$$

Il metodo sperimentale impiegato per determinare  $e/m$  e  $u$  è simile al metodo degli spettri incrociati. Del radio fortemente attivo era posto nella parte alta di un box di ottone. I raggi provenienti dal radio passavano attraverso due piastre di ottone isolate e distanti  $1.2$  mm. Questi raggi cadevano su un diaframma di platino, contenente un piccolo tubo del diametro di curva  $0.2$  mm, che permetteva il passaggio di uno stretto fascio di raggi. Questi allora colpivano una lastra fotografica avvolta in un sottile strato di alluminio.

Nelle esperienze il diaframma era posto a circa  $2$  cm dal materiale attivo e alla stessa distanza dalla lastra fotografica. Quando l'intero apparato era posto nel vuoto, si applicava una differenza di potenziale da  $2000$  a  $5000$  V tra le piastre

<sup>17</sup>Kaufmann, Phys. Zeit. 4, No. 1 b, p.54, 1902.

<sup>18</sup>Abraham, Phys. Zeit. 4, No 1 b, p. 57, 1902.

senza produrre scintille. I raggi erano deviati nel loro passaggio attraverso il campo elettrico e producevano quello che è chiamato uno spettro elettrico sulla lastra.

Se si sovrapponeva un campo magnetico parallelo al campo elettrico per mezzo di un elettromagnete, si otteneva uno spettro magnetico perpendicolare allo spettro elettrico. La combinazione dei due spettri determinava una linea curva sulla lastra. La doppia traccia ottenuta sulla lastra fotografica con l'inversione del campo magnetico è mostrata in Figura 28.



Fig. 28.

Trascurando alcune piccole correzioni, si può facilmente mostrare che se  $y$  e  $z$  sono rispettivamente le deviazioni elettrica e magnetica,

$$(4.2.3) \quad \beta = k_1 \frac{z}{y}$$

$$(4.2.4) \quad \frac{e}{m} = k \frac{z^2}{y}$$

Da queste due equazioni, combinate con la 4.2.1, otteniamo

$$(4.2.5) \quad \frac{y}{z^2 \psi \left( k_1 \frac{z}{y} \right)} = k_2$$

dove  $k$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  sono costanti.

Quest'ultima equazione fornisce la curva che si dovrebbe ottenere sulla lastra secondo la teoria elettromagnetica. Questa è confrontata sperimentalmente con la curva effettivamente ottenuta.

In questo modo Kaufmann<sup>19</sup> trovò che il valore di  $e/m$  diminuiva con la velocità, mostrando che, assumendo costante la carica, la massa dell'elettrone aumentava con la velocità.

I seguenti valori forniscono alcuni risultati preliminari ottenuti con questo metodo.

Velocità dell'elettrone	$\frac{e}{m}$
$2.36 \cdot 10^{10} \frac{cm}{s}$	$1.31 \cdot 10^7$
2.48	$1.17 \cdot 10^7$
2.59	$0.97 \cdot 10^7$
2.72	$0.77 \cdot 10^7$
2.85	$0.63 \cdot 10^7$

Per i raggi catodici S. Simon<sup>20</sup> ottenne un valore per  $e/m$  di  $1.86 \cdot 10^7$  per un velocità media di  $7 \cdot 10^9 \frac{cm}{s}$ .

In un recente articolo con radio molto attivo, furono ottenute fotografie più soddisfacenti, che permisero misure accurate. L'equazione data della curva fu trovata in soddisfacente accordo con l'esperimento.

La tabella sopra, dedotta dai risultati dati da Kaufmann, mostra l'accordo tra i valori teorici e sperimentali, essendo  $u$  la velocità dell'elettrone e  $V$  quella della luce.

L'errore percentuale medio tra il valore calcolato e quello osservato è allora non più dell'1%. È da sottolineare come la velocità dell'elettrone si avvicini quasi a quella della luce prima che il valore di  $\frac{e}{m}$  diventi grande. Questo è mostrato nella seguente tabella che dà i valori calcolati di  $\frac{m}{m_e}$  per diverse velocità dell'elettrone.

<sup>19</sup>Kaufmann, Nachrichten d. Ges. d. Wiss. zu Gött. novembre 8, 1901.

<sup>20</sup>Annal. d.Phys. p. 589, 1899.

Valore di $\frac{u}{V}$	Valore osservato di $\frac{m}{m_e}$	Differenza % dai valori teorici
Piccolo	1	
0.732	1.34	-1.5%
0.752	1.37	-0.9
0.777	1.42	-0.6
0.801	1.47	+0.5
0.830	1.545	+0.5
0.860	1.65	0
0.883	1.73	+2.8
0.933	2.05	-7.8 ?
0.949	2.145	-1.2
0.963	2.42	+0.4

Valore di $\frac{u}{V}$	piccolo	0.1	0.5	0.9	0.99	0.999	0.9999	0.999999
Valore calcolato $\frac{m}{m_0}$	1.00	1.015	1.12	1.81	3.28	4.96	6.68	10.1

Pertanto, per velocità che variano da 0 a  $1/10$  della velocità della luce, la massa dell'elettrone è praticamente costante. L'aumento della massa diviene significativo a circa metà della velocità della luce, e aumenta costantemente con l'avvicinarsi alla velocità della luce. Teoricamente la massa diviene infinita alla velocità della luce, ma anche quando la velocità dell'elettrone differisce solo di una parte su un milione, la sua massa è solo 10 volte il valore per basse velocità.

I risultati sopra sono pertanto in accordo con l'idea che la massa dell'elettrone è del tutto elettrica all'inizio e può essere spiegata semplicemente dall'elettricità in movimento. Il valore di  $e/m_0$ , per basse velocità, dedotto dai risultati era  $1.84 \cdot 10^7$ , che è in accordo molto buono con il valore ottenuto da Simon per i raggi catodici, cioè  $1.86 \cdot 10^7$ .

Se si suppone che l'elettricità trasportata dall'elettrone sia uniformemente distribuita su una sfera di raggio  $a$ , per basse velocità rispetto a quella della luce, la massa apparente  $m_0 = \frac{2}{3} \frac{e^2}{a}$ . Pertanto

$$a = \frac{2}{3} \frac{e}{m_0} \cdot e$$

Prendendo  $e = 1.13 \cdot 10^{-20}$ , si ha  $a = 1.4 \cdot 10^{-12}$  cm.

Pertanto il diametro di un elettrone è piccolo rispetto al diametro di un atomo.

**83. Distribuzione della velocità tra le particelle  $\beta$ .** Alcuni interessanti esperimenti sono stati recentemente eseguiti da Paschen<sup>21</sup> per determinare il numero relativo di particelle  $\beta$  che sono emesse dal radio a diverse velocità. Il dispositivo sperimentale è mostrato in Figura 29.

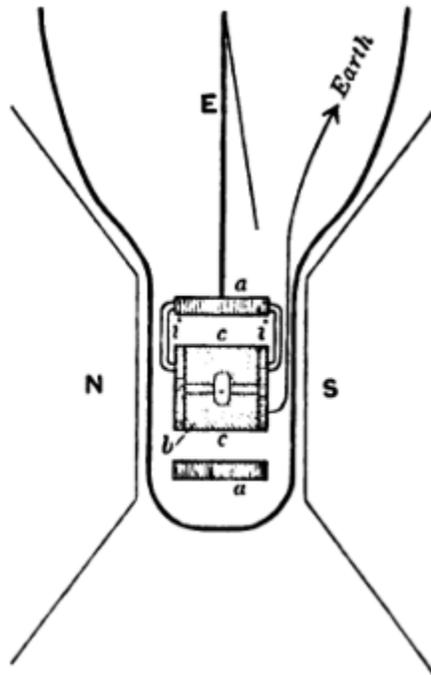


Fig. 29.

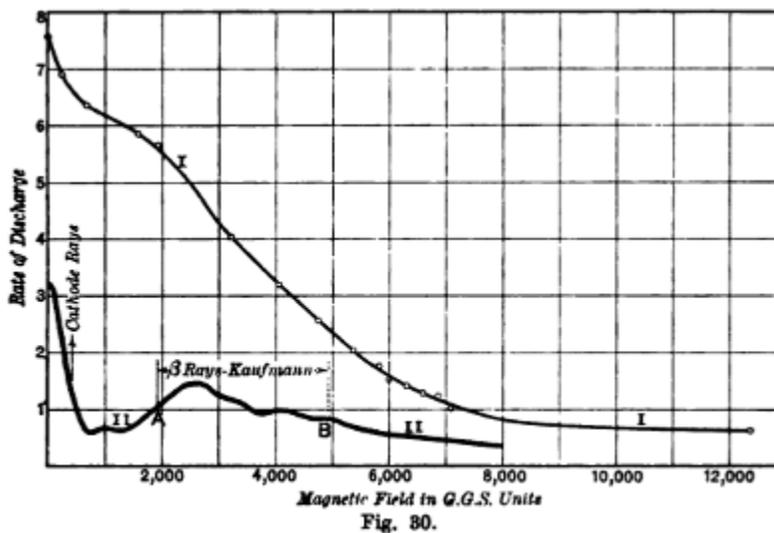
<sup>21</sup>Paschen, Annal. d. Phys. 14, p. 389, 1904.

Un piccolo e sottile tubo di vetro argentato  $b$ , contenente  $15\text{ mg}$  di bromuro di radio, fu posto sull'asse di alcune palette di piombo disposto attorno ad un cilindro di diametro  $2\text{ cm}$  e lunghezza  $2.2\text{ cm}$ . In assenza di campo magnetico, le particelle  $\beta$  dal radio passavano attraverso le aperture ed erano assorbite in un cilindro esterno concentrico  $aa$  di piombo del diametro interno di  $3.7\text{ cm}$  e di spessore  $5.5\text{ mm}$ . Questo cilindro esterno era rigidamente collegato al cilindro interno  $cc$  da un'asta di quarzo  $ii$ , che serviva pure da isolante. Il cilindro  $c$  e il radio erano collegati a terra. Un elettroscopio a foglia d'oro  $E$  era collegato ad  $a$ , e l'intera apparecchiatura era racchiusa in un contenitore di vetro nel quale si era creato il vuoto tramite una pompa a mercurio. Il contenitore di vetro era posto in un campo uniforme di un grande elettromagnete, cosicchè l'asse del cilindro di piombo fosse parallelo alle linee di forza.

Il cilindro esterno acquista una carica negativa assorbendo le particelle. Questa carica negativa, che è indicata dal movimento delle foglie d'oro, tende a dissiparsi per la piccola ionizzazione prodotta nel gas residuo dal passaggio dei raggi  $\beta$ . Tale effetto può essere eliminato osservando il ritmo di movimento delle foglie d'oro quando sono caricate in modo alternato con potenziale positivo e negativo. La media dei due ritmi è proporzionale al numero di particelle  $\beta$  che cedono la loro carica al cilindro di piombo. Questo è il caso, poichè, quando la carica è positiva, la ionizzazione del gas facilita il ritmo del movimento e, quando è negativa, lo riduce di una uguale quantità.

Applicando un campo magnetico, ognuna delle particelle descrive un cammino curvilineo, il cui raggio di curvatura dipende dalla velocità della particella. Per campi deboli, solo le particelle di velocità inferiori saranno sufficientemente deviate e non colpiranno il cilindro esterno, ma, al crescere dell'intensità del campo, il numero aumenterà finché tutte le particelle non raggiungeranno tale cilindro. La diminuzione della carica ceduta al cilindro più esterno con l'aumentare dell'intensità del campo magnetico è mostrata in Figura 30, curva I.

Le ordinate rappresentano in unità arbitrarie la carica ceduta al cilindro di piombo ogni secondo, e ciò serve come misura del numero di particelle  $\beta$  che raggiungono il cilindro. Conoscendo le dimensioni dell'apparato, e assumendo il valore  $e/m$  trovato da Kaufmann, la velocità delle particelle che non raggiunge il cilindro di piombo può essere dedotta dall'intensità del campo magnetico. La curva II della Figura 30 è il differenziale primo della curva I, e le ordinate rappresentano il numero relativo di particelle  $\beta$  che sono emesse a qualsiasi velocità.



Dai dati forniti da Kaufmann (sezione 82) Paschen dedusse che il gruppo dei raggi esaminati per primi, che avevano velocità tra  $2.12 \cdot 10^{10}$  e  $2.90 \cdot 10^{10}\text{ cm/s}$  corrispondevano al gruppo dei raggi che erano completamente deflessi dal cilindro di piombo tra il campo magnetico di intensità tra  $1875$  e  $4931\text{ c.g.s.}$ . Poichè il radio emette particelle  $\beta$  che richiedono un campo di intensità superiore alle  $7000$  unità per essere deflesse, Paschen concluse che le particelle  $\beta$  erano espulse dal radio con velocità maggiori delle più alte registrate da Kaufmann.

Paschen considerò che la piccola carica osservata anche con i campi più intensi era principalmente dovuta ai raggi  $\gamma$ . L'effetto è piccolo e non è probabilmente dovuto ad una carica reale trasportata dai raggi  $\gamma$  ma a un effetto secondario prodotto da essi. Questo tema sarà discusso in dettaglio nella sezione 112.

Vi è un gruppo di  $\beta$  a basse velocità emesse dal radio (vedi Figura 30) che ha circa la stessa velocità degli elettroni liberi in un tubo a vuoto. A causa della loro piccola velocità, si produce probabilmente una grande quantità di ionizzazione dovuta ai raggi  $\beta$  a breve distanza dal radio, e si mostrerà nella sezione 103 che la ionizzazione prodotta da un elettrone per unità di lunghezza del cammino decresce costantemente al crescere della sua velocità al di sopra di un valore limite. Questa osservazione è confermata dagli esperimenti sull'assorbimento dei raggi  $\beta$  nel passaggio attraverso la materia.

Negli esperimenti di Paschen, il tubo di vetro contenente il radio aveva uno spessore di  $5\text{ mm}$ , cosicchè una considerevole proporzione delle particelle  $\beta$  di bassa velocità erano bloccate dallo stesso. Questo è emerso da alcuni ultimi esperimenti di Seitz che descriveremo nella sezione 85.

**84. Assorbimento dei raggi  $\beta$  nella materia.** Le particelle  $\beta$  producono ioni al loro passaggio nel gas e la loro energia cinetica risulta di conseguenza diminuita. Un simile effetto si manifesta anche quando i raggi  $\beta$  passano attraverso mezzi solidi e liquidi, e il meccanismo di assorbimento è probabilmente simile in tutti i casi. Alcune delle particelle nel loro passaggio attraverso la materia sono completamente fermate, mentre altre subiscono una riduzione della velocità. Inoltre, vi è una considerevole diffusione dei raggi nell'attraversare la materia. La quantità di tale diffusione dipende dalla densità della sostanza e anche dall'angolo di incidenza dei raggi. Questa diffusione sarà discussa nella sezione 111.

Vi sono due metodi generali per determinare l'assorbimento dei raggi  $\beta$ . Nel primo, si osserva la variazione della corrente di ionizzazione nel contenitore di controllo quando la sostanza attiva è ricoperta da schermi di diversi materiali e spessori. Questa ionizzazione nel contenitore dipende da due quantità, il numero di particelle  $\beta$  che passa attraverso la materia e dal numero di ioni prodotti per unità di cammino. In assenza di ogni informazione definita rispetto alla variazione della ionizzazione degli elettroni e della loro velocità, non è possibile trarre alcuna conclusione da tali esperienze.

L'uso di bromuro di radio puro ha consentito di determinare il numero reale degli elettroni che sono assorbiti nel loro passaggio attraverso uno spessore definito di materia, misurando la carica negativa trasportata dai raggi emessi. Esperimenti di questo tipo sono stati compiuti da Seitz e saranno considerati in seguito.

Questi due metodi di determinazione dell'assorbimento dei raggi  $\beta$  sono del tutto distinti in linea di principio, e non ci si deve aspettare che i valori dei coefficienti di assorbimento ottenuti nei due casi siano gli stessi. L'intera questione dell'assorbimento degli elettroni nella materia è assai complessa, e la difficoltà è ulteriormente accresciuta dalla complessità dei raggi  $\beta$  emessi dalle sostanze radioattive. Molti dei risultati ottenuti con diversi metodi, anche se pervengono alle stesse conclusioni generali, sono quantitativamente in grande disaccordo. Prima di ottenere una più completa comprensione è necessaria una migliore conoscenza del meccanismo di assorbimento, e sarà necessario determinare la variazione della ionizzazione con la velocità dell'elettrone su un ampio range di valori. Alcuni lavori sono già stati fatti in questa direzione ma non tra limiti sufficientemente ampi.

*Metodo di ionizzazione.* Consideriamo dapprima i risultati ottenuti sull'assorbimento dei raggi  $\beta$  misurando la variazione della corrente di ionizzazione, quando si pongono schermi di diverso spessore sulla sostanza attiva. Se è ricoperta con un foglio di alluminio dello spessore di  $1\text{ mm}$ , la corrente nel contenitore di misura come quello in Figura 17, è dovuta quasi interamente ai raggi  $\beta$ . Utilizzando un composto di uranio, si è trovato che la corrente di saturazione decresce con lo spessore del materiale attraversato in buon accordo con una legge esponenziale. Prendendo la corrente di saturazione come una misura dell'intensità dei raggi, l'intensità  $I$  dopo il passaggio attraverso uno spessore  $d$  di materia è data da

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda d}$$

dove  $\lambda$  è la costante di assorbimento dei raggi e  $I_0$  è l'intensità iniziale. Per raggi dell'uranio, la corrente si riduce della metà dopo il passaggio attraverso  $5\text{ mm}$  di alluminio.

Esaminando un composto di torio o di radio nello stesso modo, si è trovato che la corrente non decresce con regolarità in accordo con l'equazione sopra. Risultati di questo tipo per i raggi dal radio sono stati dati da Meyer e Schweidler<sup>22</sup>. La quantità di assorbimento dei raggi per un dato spessore di materia decresce con lo spessore attraversato. Ciò è esattamente opposto a quanto osservato per i raggi  $\alpha$ . Questa variazione nell'assorbimento è dovuta al fatto che i raggi  $\beta$  hanno un potere di penetrazione molto variabile. I raggi dall'uranio hanno caratteristiche piuttosto omogenee, cioè consistono di raggi emessi con circa la stessa velocità. I raggi dal radio e torio sono complessi, cioè consistono di raggi emessi con un ampio spettro di velocità e di conseguenza con un ampio spettro di potere di penetrazione. L'esame elettrico dei raggi deviabili porta pertanto allo stesso risultato ottenuto con il metodo elettrico.

Risultati sull'assorbimento dei raggi catodici sono stati ottenuti da Lenard<sup>23</sup>, il quale ha mostrato che l'assorbimento dei raggi catodici è quasi proporzionale alla densità della materia assorbente, ed è indipendente dal suo stato chimico. Se i raggi deviabili da corpi attivi sono simili ai raggi catodici, ci si deve aspettare una legge di assorbimento simile. Strutt<sup>24</sup>, lavorando con i raggi del radio, ha determinato la legge di assorbimento, e l'ha trovata essere approssimativamente proporzionale alla densità della materia su un ampio spettro di densità variabile da 0.041 per il diossido di zolfo a 21.5 per il platino. Nel caso della mica e del cartone, i valori di  $\lambda$  divisi per la densità erano rispettivamente 3.94 e 3.84, mentre il valore per il platino era 7.34. Per dedurre il coefficiente di assorbimento, assunse che la radiazione si riducesse secondo una legge esponenziale con la distanza attraversata. Data la complessità dei raggi del radio, vide che questo vale solo approssimativamente.

Poiché i raggi  $\beta$  dall'uranio sono abbastanza omogenei, e hanno la stessa penetrazione, sono più validi per una tale determinazione dei complessi raggi del radio. Ho di conseguenza eseguito alcuni esperimenti con i raggi dell'uranio per determinare la dipendenza dell'assorbimento dalla densità. I risultati ottenuti sono presentati nella seguente tabella, dove  $\lambda$  è il coefficiente di assorbimento.

<sup>22</sup>Meyer e Schweidler, Phys. Zeit. pp. 90, 113, 209, 1900.

<sup>23</sup>Lenard, Annal. d. Phys. 56, p. 275, 1895.

<sup>24</sup>Strutt, Nature, p. 589, 1900.

Sostanza	$\lambda$	Densità	$\frac{\lambda}{\text{Densità}}$
Vetro	14.0	2.45	5.7
Mica	14.2	2.78	5.1
Gomma	6.5	1.14	5.7
Legno	2.16	0.40	5.4
Cartone	3.7	0.70	5.3
Ferro	44	7.8	5.6
Alluminio	14.0	2.60	5.4
Rame	60	8.6	7.0
Argento	75	10.5	7.1
Piombo	122	11.5	10.8
Stagno	96	7.3	13.2

Si osserverà che il rapporto tra la costante di assorbimento e la densità è quasi lo stesso per sostanze diverse come vetro, mica, gomma, legno, ferro e alluminio. Gli scarti dalla legge sono grandi, tuttavia, per gli altri metalli esaminati, cioè rame, argento, piombo e stagno. Nello stagno il valore di  $\lambda$  diviso per la densità è 2.5 volte il valore per ferro e alluminio. Queste differenze mostrano che una legge per l'assorbimento dei raggi  $\beta$  dipendente solo dalla densità non vale per tutte le sostanze. Con un'eccezione nel caso dello stagno, il valore di  $\lambda$  diviso per la densità per i metalli aumenta nello stesso ordine del loro peso atomico.

L'assorbimento dei raggi  $\beta$  da parte della materia diminuisce molto rapidamente con l'aumento della velocità. Per esempio, l'assorbimento dei raggi catodici nell'esperimento di Lenard è circa 500 volte maggiore che i raggi  $\beta$  dell'uranio. Becquerel ha trovato che la velocità dei raggi  $\beta$  dell'uranio è circa  $1.6 \cdot 10^{10} \frac{cm}{s}$ . La velocità dei raggi catodici usati nell'esperienza di Lenard era certamente non meno di  $1/10$  di questa, così che, per una diminuzione inferiore a 10 volte, l'assorbimento è aumentato di 500 volte.

**85. Numero di elettroni fermati dalla materia.** Esporremo ora gli esperimenti fatti da Seitz<sup>25</sup> per determinare il numero relativo di elettroni che sono fermati nel loro passaggio attraverso diversi spessori di materia. Il dispositivo sperimentale è mostrato in Figura 31.

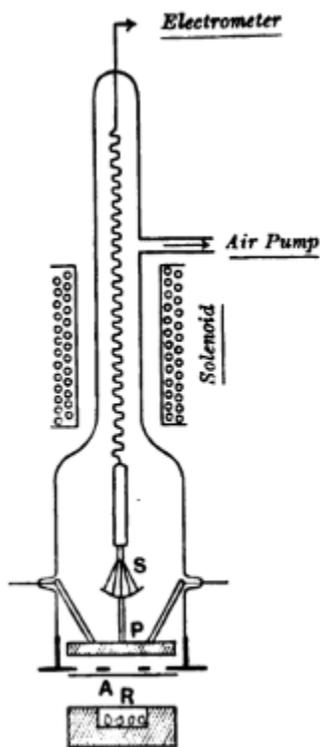


Fig. 31.

Il radio era posto al di fuori di un vaso di vetro contenente un piatto isolato in ottone  $P$ , la cui connessione mediante un filo portante all'elettrometro poteva essere attivata o interrotta con un semplice dispositivo elettromagnetico. I raggi  $\beta$  dal radio  $R$ , dopo il passaggio attraverso un'apertura in un piatto di ottone  $A$ , ricoperto con un sottile foglio di alluminio,

<sup>25</sup>Seitz, Phys. Zeit. 5, No. 14, p. 395, 1904.

erano assorbiti nel piatto  $P$ . Il contenitore di vetro era sotto vuoto, e la carica trasferita a  $P$  dai raggi  $\beta$  era misurata con un elettrometro.

In un buon vuoto, il valore della corrente osservata è una misura del numero di particelle  $\beta$  assorbite dal piatto superiore<sup>26</sup>. La tabella seguente mostra i risultati ottenuti frapponendo diversi spessori di stagno sopra il radio. La seconda tabella dà il rapporto  $\frac{I}{I_0}$  dove  $I_0$  è il tasso di scarica osservato prima dell'introduzione dello schermo assorbente. Il valore medio della costante di assorbimento  $\lambda$  fu dedotto dall'equazione  $\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda d}$  dove  $d$  è lo spessore del materiale attraversato.

I valori inclusi tra parentesi non hanno la stessa precisione degli altri. Vi è allora una grande differenza nel potere di penetrazione delle particelle  $\beta$  emesse dal radio, e alcune di esse sono molto più facilmente assorbite.

Spessore Stagno in $mm$	$\frac{I}{I_0}$	$\lambda$
0.00834	0.869	175
0.0166	0.802	132.5
0.0421	0.653	101.5
0.0818	0.466	93.5
0.124	0.359	82.5
0.166	0.289	74.9
0.205	0.230	71.5
0.270	0.170	65.4
0.518	0.065	53
0.789	0.031	44
1.585	0.0059	32
2.16	0.0043	25

Quando si pone uno schermo di piombo di  $3\text{ mm}$  sopra il radio - uno spessore sufficiente ad assorbire tutti i raggi  $\beta$  facilmente deviabili - una piccola carica negativa era ancora presente sulla piastra, corrispondente al 29% del massimo. Questo è un valore molto più piccolo di quello osservato da Paschen (vedi Figura 30). Questa differenza può, in parte, essere dovuta al fatto che, negli esperimenti di Paschen, una gran parte di elettroni lenti era assorbita nel tubo di vetro contenente il radio spesso  $5\text{ mm}$ .

Seitz ha determinato anche lo spessore relativo, confrontato con lo stagno, di diverse sostanze che riducono la carica negativa ceduta a  $P$  di una quantità definita. Alcuni valori sono presentati sotto, ed espressi usando il valore dello stagno come unitario.

Sostanza	Spessore (Stagno = 1)	Sostanza	Spessore (Stagno = 1)
Piombo	0.745	Acciaio	1.29
Oro	0.83	Alluminio	1.56
Platino	0.84	Acqua	1.66
Argento	1	Paraffina	1.69

Lo spessore necessario per fermare una data quantità di raggi  $\beta$  diminuisce pertanto con la densità, ma non così velocemente come il crescere della densità. Questi risultati sono difficili da riconciliare con la legge densità-assorbimento trovata da Lenard per i raggi catodici, o con i risultati del metodo di ionizzazione già considerato. Un ulteriore esame sperimentale dell'intera questione è quanto mai desiderabile.

**86. Variazione della quantità di radiazione con lo spessore dello strato di materiale radiante.** Le radiazioni sono emesse uniformemente da tutte le porzioni della massa attiva, ma la ionizzazione del gas misurata è dovuta soltanto alle radiazioni che interagiscono con l'aria. La profondità dalla quale le radiazioni possono raggiungere la superficie dipende dall'assorbimento della radiazione da parte della stessa materia attiva.

Sia  $\lambda$  la costante di assorbimento della radiazione omogenea da parte del materiale attivo. Si può facilmente mostrare che l'intensità  $I$  dei raggi emessi da uno strato di materia attiva, di spessore  $d$ , è data da

$$\frac{I}{I_0} = 1 - e^{-\lambda d}$$

dove  $I_0$  è l'intensità alla superficie attraverso uno strato molto spesso.

Questa equazione è stata confermata sperimentalmente osservando la corrente prodotta dai raggi  $\beta$  per diversi spessori di ossido di uranio. In questo caso  $I = \frac{1}{2}I_0$  per uno spessore di ossido di uranio corrispondente a  $11\text{ g/cm}^2$ . Ciò fornisce un valore di  $\lambda$  diviso per la densità di 6.3. Esso è un poco maggiore di quello osservato per l'assorbimento degli stessi raggi

<sup>26</sup>Si suppone che i risultati siano stati corretti, se necessario, per l'azione di scarica del gas ionizzato, sebbene di ciò non vi sia alcuna menzione nell'articolo di Seitz.

in alluminio. Un tale risultato mostra chiaramente che la sostanza che produce i raggi  $\beta$  non li assorbe molto di più di quanto faccia la materia ordinaria della stessa densità.

Il valore di  $\lambda$  varierà, non solo per diverse sostanze attive, ma anche per diversi composti della stessa sostanza.

#### Parte IV - I Raggi $\alpha$

**87. I raggi  $\alpha$ .** La deviazione magnetica dei raggi  $\beta$  fu scoperta verso la fine del 1899, nella prima fase della storia della radioattività, ma tre anni dopo fu individuata la reale caratteristica dei raggi  $\alpha$ . Nella fase iniziale fu dato grande risalto ai raggi  $\beta$ , proprio per il loro grande potere di penetrazione e per la marcata azione di rendere fosforescenti molte sostanze. I raggi  $\alpha$  erano, al confronto, molto poco studiati, e la loro importanza non fu in genere riconosciuta. Si mostrò, tuttavia, che i raggi  $\alpha$  svolgevano un ruolo molto più importante nei processi radioattivi dei raggi  $\beta$ , e che la maggior parte dell'energia emessa sotto forma di radiazioni ionizzanti era ad essi dovuta.

**88. La natura dei raggi  $\alpha$ .** La natura dei raggi  $\alpha$  fu difficile da determinare, perché un campo magnetico in grado di generare una forte deviazione dei raggi  $\beta$  non produceva effetti visibili sui raggi  $\alpha$ . Fu suggerito da parecchi osservatori che essi fossero, in realtà, raggi secondari derivanti dai raggi  $\beta$  o dai raggi catodici nella materia attiva dalla quale erano prodotti. Un tale punto di vista, tuttavia, non era in grado di spiegare la radioattività del polonio, che emetteva solo raggi  $\alpha$ . I più recenti lavori hanno mostrato che la materia, che emette i raggi  $\beta$  dall'uranio, dovrebbe essere chimicamente separata dall'uranio, mentre l'intensità dei raggi  $\alpha$  era inalterata. Questi e altri risultati mostrano che i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  sono prodotti in modo del tutto indipendente. L'idea che essi sono un tipo facilmente assorbibile di raggi Röntgen non è in grado di spiegare una proprietà caratteristica dei raggi  $\alpha$ , cioè che l'assorbimento dei raggi in un dato spessore di materia, determinato con il metodo elettrico, aumenta con lo spessore della materia attraversata. Non sembra probabile che un tale effetto possa essere prodotto da una radiazioni simile ai raggi X, ma il risultato di particelle emesse che smettono di ionizzare il gas quando la loro velocità è ridotta al di sotto di un certo valore. Da osservazioni della ionizzazione relativa prodotta nei gas dai raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , Strutt<sup>27</sup> propose nel 1901 che i raggi  $\alpha$  consistessero di corpi carichi positivamente emessi a grande velocità. Sir William Crookes<sup>28</sup>, nel 1902, avanzò la stessa ipotesi. Dallo studio dei raggi  $\alpha$  del polonio M.me Curie<sup>29</sup> nel 1900 avanzò la possibilità che questi raggi fossero corpuscoli, emessi con grande velocità, che perdevano la loro energia passando attraverso la materia.

Chi scrive giunse in modo indipendente alla stessa idea per una quantità di prove indirette che ricevevano una spiegazione solo in base all'ipotesi che i raggi fossero corpi materiali emessi a grande velocità. Esperimenti preliminari con il radio di attività 1000 mostrarono che era molto difficile determinare la deviazione magnetica dei raggi  $\alpha$ . Quando i raggi passavano attraverso fessure sufficientemente strette in grado di poter rivelare una piccola deviazione dei raggi, l'effetto di ionizzazione dei raggi emessi era troppo piccolo per essere misurato con certezza. Così non fu finché non si ottenne radio di attività 19000 che rese possibile rivelare la deviazione di questi raggi in un intenso campo magnetico. La piccolezza di tale deviazione può essere valutata dal fatto che i raggi  $\alpha$ , emessi perpendicolarmente a un campo magnetico di 10000 *unità c.g.s.*, descrive l'arco di cerchio di raggio pari a circa 39 *cm*, mentre a parità di condizioni i raggi catodici prodotti in un tubo a vuoto descrivono un cerchio di raggio pari a circa 0.01 *cm*. Non sorprende pertanto che i raggi  $\alpha$  furono per un certo tempo pensati come non deviabili in un campo magnetico.

**89. Deviazione magnetica dei raggi  $\alpha$ .** Il metodo generale impiegato<sup>30</sup> per rivelare la deviazione magnetica dei raggi  $\alpha$  fu quello di consentire ai raggi di passare attraverso strette aperture e di osservare se il tasso di scarica di un elettroscopio, dovuta ai raggi emessi, era alterato dall'applicazione di un forte campo magnetico. La Figura 32 mostra il dispositivo sperimentale. I raggi provenienti da un sottile strato di radio di attività 19000, passava attraverso un serie di strette fenditure *G*, in parallelo, e poi attraverso un sottile strato di alluminio, spesso 0.00034 *cm*, all'interno di un contenitore di misura.

<sup>27</sup>Strutt, Phil. Trans. A, 507, 1901.

<sup>28</sup>Crookes, Proc. Roy. Soc. 1902. Chem. News, 85, p. 109, 1902.

<sup>29</sup>Mme Curie, C. R. 130, p. 76, 1900.

<sup>30</sup>Rutherford, Phil. Mag. Febbraio 1903. Phys. Zeit. 4, p. 235, 1902.

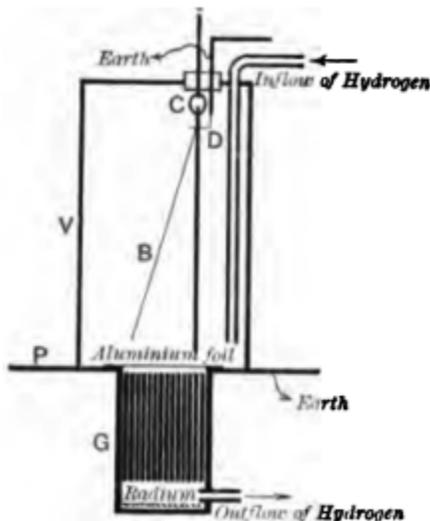


Fig. 82.

La ionizzazione prodotta dai raggi era misurata dal ritmo di movimento delle foglie di un elettroscopio  $B$ . Il sistema a foglie d'oro era isolato all'interno del contenitore con una goccia di zolfo  $C$ , e caricato per mezzo di un filo mobile  $D$ , che era in seguito messo a terra. Il ritmo di movimento delle foglie d'oro era osservato attraverso piccole finestre di mica nel contenitore mediante un microscopio fornito di un oculare con micrometro.

Per aumentare la ionizzazione nel contenitore, i raggi passati attraverso 20 o 25 fenditure di uguale larghezza, poste una di fianco all'altra. Queste erano ottenute tagliando scanalature ad intervalli regolari nelle piastre nelle quali erano inserite le piastre di ottone. L'ampiezza di queste fenditure variava in diversi esperimenti tra 0.042 e 1 cm. Il campo magnetico era perpendicolare al piano del foglio, e parallelo a quello delle fenditure. I raggi venivano quindi deflessi in una direzione perpendicolare al piano delle fenditure e una deviazione anche molto piccola era sufficiente a far urtare ai raggi uno dei lati della piastra dove venivano assorbiti.

Il contenitore di misura e il sistema di piastre erano ricoperti con una lastra di piombo  $P$  cosicchè i raggi entravano nel contenitore  $V$  solo attraverso il foglio di alluminio. In questo esperimento è necessario avere un flusso discendente continuo di gas passante tra le piastre per prevenire la diffusione dell'emanazione del radio verso l'alto nel contenitore. La presenza di una piccola quantità di questa emanazione, che è sempre emessa dal radio, produrrebbe grande ionizzazione, mascherando completamente l'effetto da osservare. A questo scopo, una corrente continua di idrogeno elettrolitico secco di circa  $2 \frac{cm^3}{s}$  passava nel contenitore; fluiva attraverso i pori del foglio di alluminio, e passava tra le piastre portando via l'emanazione dallo strumento. L'uso di un flusso di idrogeno invece di aria semplifica molto l'esperimento, poiché *aumenta* la corrente di ionizzazione dovuta ai raggi  $\alpha$  e nello stesso tempo *riduce* fortemente quella dovuta ai raggi  $\beta$  e ai raggi  $\gamma$ . Ciò è dovuto al fatto che i raggi  $\alpha$  sono molto più facilmente assorbibili in aria che in idrogeno, mentre il tasso di produzione degli ioni dovuti ai  $\beta$  e ai  $\gamma$  è molto minore nell'idrogeno che nell'aria. L'intensità dei raggi  $\alpha$  dopo il passaggio tra le piastre è, di conseguenza, maggiore di quando si usa l'idrogeno; e poiché i raggi passano attraverso uno spessore sufficiente di idrogeno nel contenitore da essere in larga parte assorbiti, la quantità totale di ionizzazione prodotta è maggiore con l'idrogeno che con l'aria.

Il seguente è un esempio di una osservazione di deviazione nel campo magnetico:

- Poli dell'elettromagnete  $1.90 \times 2.50$  cm;
- Intensità del campo tra i due poli 8370 unità;
- Apparato di 25 piastre parallele di lunghezza 3.70 cm, larghezza 0.70 cm, con uno spazio d'aria medio tra le piastre di 0.042 cm;
- Distanza del radio sotto le piastre 1.4 cm.

	Tasso di scarica dell'elettroscopio in $\frac{V}{min}$
(1) senza campo magnetico	8.33
(2) Con campo magnetico	1.72
(3) Radio ricoperto con un sottile strato di mica per assorbire tutti i raggi $\alpha$	0.93
(4) Radio ricoperto con mica e campo magnetico applicato	0.92

La lastra di mica, spessa  $0.01\text{ cm}$ , aveva uno spessore sufficiente ad assorbire completamente tutti i raggi  $\alpha$ , mentre consentiva il passaggio ai raggi  $\beta$ ,  $e\gamma$  di passare senza un apprezzabile assorbimento. La differenza tra (1) e (3),  $7.40 \frac{V}{\text{min}}$ , dà il tasso di scarica dovuto ai soli raggi  $\alpha$ ; la differenza tra (2) e (3),  $0.79 \frac{V}{\text{min}}$ , quello dovuto ai raggi  $\alpha$  non deviati dal campo magnetico impiegato.

La quantità di raggi  $\alpha$  non deviati dal campo è allora circa l'11% del totale. La piccola differenza tra (3) e (4) misura la piccola ionizzazione dovuta ai raggi  $\beta$ , perché essi dovrebbero essere completamente deviati dal campo magnetico; (4) comprende l'effetto dei raggi  $\gamma$  insieme alla perdita naturale dell'elettroscopio nell'idrogeno.

In questo esperimento vi era un bel po' di campo magnetico deviante che agiva sui raggi prima che raggiugessero le armature dell'elettromagnete. La diminuzione del tasso di scarica dovuta ai raggi  $\alpha$  è proporzionale all'intensità del campo tra le armature. Con un campo magnetico più intenso, tutti i raggi  $\alpha$  erano deviati, mostrando che essi erano costituiti *interamente* da particelle cariche emesse.

Per determinare la *direzione* della deviazione dei raggi, essi furono fatti passare attraverso fenditure di  $1\text{ mm}$  di larghezza, ognuna delle quali era ricoperta per metà con una striscia di ottone. La diminuzione del ritmo di scarica nel contenitore per un dato campo magnetico in un tale caso dipende dalla *direzione* del campo. In questo modo si trovò che i raggi erano deviati nel *verso opposto* ai raggi catodici. Poiché questi ultimi sono particelle cariche negativamente, i raggi  $\alpha$  devono essere particelle cariche *positivamente*.

Questi risultati furono poco dopo confermati da Becquerel<sup>31</sup>, con il metodo fotografico, che è molto più adatto a determinare il tipo di percorso dei raggi sottoposti all'azione di un campo magnetico. Il radio era posto in una scanalatura praticata in un piccolo blocco di piombo. Sotto questa sorgente, a una distanza di circa  $1\text{ cm}$ , era posto uno schermo metallico, formato da due piastre, separate da una stretta apertura parallela alla scanalatura. Sotto questo era posta una lastra fotografica. L'intero apparato strumentale era posto in un forte campo magnetico parallelo alla scanalatura. L'intensità del campo magnetico era sufficiente a deviare completamente i raggi  $\beta$  lontano dalla piastra. Quando la piastra era parallela all'apertura, vi si produceva un'immagine, dovuta ai soli raggi  $\alpha$ , che erano sempre più diffusi al crescere della distanza dall'apertura. Questa distanza non doveva superare  $1$  o  $2\text{ cm}$  per tenere conto dell'assorbimento dei raggi nell'aria. Se, durante, l'esposizione, il campo magnetico è invertito per un uguale intervallo di tempo, sviluppando la lastra si osservavano due immagini dei raggi  $\alpha$  deflessi in direzioni opposte. Questa deviazione, in un intenso campo uniforme, è piccola anche se del tutto osservabile ed è opposta in verso alla deviazione osservata per i raggi  $\beta$  o raggi catodici dallo stesso materiale.

M. Becquerel<sup>32</sup>, con lo stesso metodo, trovò che i raggi  $\alpha$  del polonio erano deviati nella stessa direzione dei raggi  $\alpha$  del radio; e quindi che essi erano corpi positivi emessi. In entrambi i casi, le immagini fotografiche erano alquanto nitide e non mostravano la stessa diffusione che sempre appare nelle fotografie dei raggi  $\beta$ .

**90. Deviazione elettrostatica dei raggi  $\alpha$ .** Se i raggi sono corpi carichi positivamente, essi saranno deviati passando attraverso un forte campo magnetico. Ciò fu confermato da chi scrive, ma la deviazione elettrica è ancora più difficile da rivelare della deviazione magnetica, poiché l'intensità del campo elettrico deve necessariamente essere minore di quella richiesta per produrre una scintilla in presenza del radio. La strumentazione era simile a quella impiegata per la deviazione magnetica (Figura 32) tranne la sostituzione delle parti laterali in ottone che tenevano in posizione le lastre con gomma. Piastre alterne erano collegate tra loro e caricate ad un potenziale elevato mediante una batteria di piccoli accumulatori. La scarica nell'elettroscopio, dovuta ai raggi  $\alpha$ , risultò diminuita dopo l'applicazione del campo elettrico. Con piastre separate di  $0.055\text{ cm}$  e alte  $4.5\text{ cm}$ , la diminuzione era solo del 7% con un tensione di  $600\text{ V}$  tra le fenditure. Con una particolare disposizione delle piastre, con fenditure distanti solo  $0.01\text{ cm}$ , la scarica era ridotta del 45% con un campo elettrico corrispondente a  $10000 \frac{V}{\text{cm}}$ .

**91. Determinazione della costante dei raggi.** Se è nota la deviazione dei raggi sia per un campo magnetico che per un campo elettrico, è possibile determinare i valori della velocità dei raggi, e il rapporto  $e/m$  tra la carica della particella e la sua massa mediante il metodo usato da J. J. Thomson per i raggi catodici, che è descritto nella sezione 50. Dalle equazioni di un corpo carico in movimento, il raggio di curvatura  $\rho$  del cammino dei raggi in un campo magnetico di intensità  $H$  perpendicolare al cammino stesso è dato da

$$H\rho = \frac{m}{e}V$$

Se la particella, dopo il passaggio attraverso un campo magnetico uniforme a una distanza  $l_1$ , è deviata di una piccola distanza  $d_1$  dalla sua direzione iniziale,

$$(4.2.6) \quad \begin{aligned} 2\rho d_1 &= l_1^2 \\ d_1 &= \frac{l_1^2}{2} \frac{e}{m} \frac{H}{V} \end{aligned}$$

<sup>31</sup>Becquerel, C. R. 186, p. 199, 1903.

<sup>32</sup>Becquerel, C. R. 136, p. 431, 1903.

Se i raggi passano attraverso un campo elettrico uniforme di intensità  $X$  e lunghezza  $l_2$  con una deviazione  $d_2$ ,

$$(4.2.7) \quad d_2 = \frac{1}{2} \frac{X e l_2^2}{m V^2}$$

poiché  $\frac{X e}{m}$  è l'accelerazione della particella, perpendicolare alla sua direzione, e  $\frac{l_2}{V}$  è il tempo richiesto per passare attraverso il campo elettrico.

Dalle equazioni precedenti

$$V = \frac{d_1 l_2^2 X}{d_2 l_1^2 H}$$

e

$$\frac{e}{m} = \frac{2 d_1 V}{l_1^2 H}$$

I valori di  $V$  e di  $e/m$  sono, pertanto, completamente determinati dai risultati combinati della deviazione elettrica e magnetica. Si trovò che

$$\begin{aligned} V &= 2.5 \cdot 10^9 \frac{cm}{s} \\ \frac{e}{m} &= 6 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

Data la difficoltà di ottenere una grande deviazione elettrostatica, i valori sono soltanto approssimati.

I risultati sulla deviazione magnetica ed elettrica dei raggi  $\alpha$  del radio sono stati confermati da Des Coudres<sup>33</sup> con il metodo fotografico. Venne usato sale puro di bromuro di radio come sorgente di radiazione. L'intero apparato era racchiuso in un contenitore che era mantenuto sotto vuoto. In questo modo, non solo era in grado di determinare l'azione fotografica dei raggi a distanze molto maggiori dalla sorgente, ma consentiva anche l'applicazione di un intenso campo elettrico senza la scarica di una scintilla. Trovò valori delle costanti dati da

$$\begin{aligned} V &= 1.65 \cdot 10^9 \frac{cm}{s} \\ \frac{e}{m} &= 6.4 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

Questi valori sono in accordo molto buono con i valori trovati con il metodo elettrico. I raggi  $\alpha$  dal radio sono complessi, e probabilmente sono un flusso di corpi carichi positivamente emessi entro un dato range di velocità. La quantità della deviazione delle particelle in un campo magnetico differirà allora in base alle velocità delle particelle. I risultati fotografici di Becquerel sembrano indicare che la velocità dei raggi del radio può solo variare entro limiti più stretti, poiché la traiettoria dei raggi in un campo magnetico è molto precisa e non così diffusa come in esperimenti simili con i raggi  $\beta$ . L'evidenza, tuttavia, discussa nella sezione seguente, mostra che le velocità delle particelle  $\alpha$  da uno spesso strato di radio varia su un ampio range.

**92.** Becquerel<sup>34</sup> ha esaminato la quantità della deviazione magnetica dei raggi  $\alpha$  a diverse distanze dalla sorgente dei raggi in un modo molto semplice. Un fascio verticale dei raggi, dopo il suo passaggio attraverso una stretta fenditura, cadeva su una lastra fotografica, che era inclinata di un piccolo angolo rispetto alla verticale e aveva il suo bordo inferiore perpendicolare alla fenditura. La traiettoria dei raggi è mostrata da una sottile linea tracciata sulla lastra. Se si applica un intenso campo magnetico parallelo alla fenditura, la traiettoria dei raggi è spostata verso destra o sinistra secondo la direzione del campo. Se il campo magnetico viene mantenuto nei due versi per uguali intervalli di tempo, si sviluppano sulla lastra due sottili linee divergenti. La distanza tra queste linee in ogni punto è una misura del doppio della deviazione media in quel punto, corrispondente al valore del campo magnetico. Misurando la distanza tra le traiettorie in vari punti, Becquerel trovò che i raggi di curvatura del cammino dei raggi *umentava* con la distanza dalla fenditura. Il prodotto  $H\rho$  dell'intensità del campo e i raggio di curvatura del cammino dei raggi è mostrato nella seguente tabella.

Distanza in mm dalla fenditura	$H\rho$
1	$2.91 \cdot 10^5$
3	$2.99 \cdot 10^5$
5	$3.06 \cdot 10^5$
7	$3.15 \cdot 10^5$
8	$3.27 \cdot 10^5$
9	$3.41 \cdot 10^5$

<sup>33</sup>Des Coudres, Phys. Zeit. 4, No. 17, p. 488, 1908.

<sup>34</sup>Becquerel, C. R. 136, p. 1517, 1903.

Chi scrive ha mostrato che il valore *massimo* di  $H\rho$  per la completa deviazione dei raggi  $\alpha$  era 390000. I risultati sono pertanto in buon accordo. Poiché  $H\rho = \frac{m}{e}V$  questi risultati mostrano che i valori di  $V$  o di  $\frac{e}{m}$  per le particelle emesse variano a diverse distanze dalla sorgente. Becquerel considerò che i raggi fossero omogenei, e, per spiegare i risultati, propose che la carica sulle particelle emesse potesse gradualmente decrescere con la distanza attraversata, cosicché il raggio di curvatura del cammino crescesse costantemente con la distanza dalla sorgente. Sembra, tuttavia, più probabile che i raggi consistano di particelle emesse con velocità diverse, e che quelle più lente sono più rapidamente assorbite nel gas. In conseguenza di ciò, solo le particelle più veloci sono presenti a una certa distanza dalla sorgente.

Questa conclusione è emersa da recenti esperimenti di Bragg e Kleeman<sup>35</sup> sulla natura dell'assorbimento di particelle  $\alpha$  da parte della materia, che sono discussi in maggior dettaglio nelle sezioni 103 e 104. Essi trovarono che le particelle  $\alpha$  provenienti da uno spesso strato di radio sono complesse, e hanno un ampio range di potere di penetrazione e presumibilmente di velocità. Ciò è dovuto al fatto che le particelle  $\alpha$  emesse dal radio provengono da diverse profondità. Poiché la loro velocità è ridotta nel passaggio attraverso la materia, un fascio di raggi  $\alpha$  consisterà di particelle che differiscono notevolmente in velocità. Quelle che sono in grado di uscire dal radio saranno assorbite in uno strato di aria molto sottile, mentre quelle che provengono dalla superficie passeranno attraverso parecchi centimetri di aria prima di perdere il potere ionizzante del gas. Poiché le particelle  $\alpha$  hanno diverse velocità, saranno deviate in modo diverso dal campo magnetico, le più lente descriveranno un cammino più incurvato di quelle più veloci. Di conseguenza, la parte più esterna della traccia del fascio di raggi sulla lastra fotografica, come ottenuto da Becquerel, sarà il luogo dei punti dove l'effetto fotografico delle particelle  $\alpha$  avrà fine. Si è trovato che le particelle  $\alpha$  ionizzano di più il gas proprio prima che si esaurisca il loro potere di ionizzazione. La perdita del potere di ionizzazione delle particelle  $\alpha$  sembra essere del tutto improvvisa, e, per le particelle con la stessa velocità, avvenire sempre dopo l'attraversamento di una definita distanza in aria. Assumendo che l'azione fotografica così come quella ionizzante è più intensa proprio prima che le particelle si arrestino, e cessi repentinamente, Bragg è stato capace di avere un accordo numerico con le misure registrate da Becquerel. Svincolati dalla speciale ipotesi richiesta per un tale confronto qualitativo tra teoria ed esperimento, vi possono essere alcuni piccoli dubbi sul fatto che l'aumento del valore di  $H\rho$  con la distanza possa essere spiegato in modo soddisfacente come una conseguenza del carattere complesso del fascio di raggi<sup>36</sup>.

Becquerel affermò che la deviazione, in un dato campo magnetico, era la stessa per i raggi  $\alpha$  del polonio e del radio. Questo mostra che il valore  $\frac{m}{e}V$  è lo stesso per i raggi  $\alpha$  di entrambi gli elementi. Poiché i raggi  $\alpha$  del polonio sono più facilmente assorbiti di quelli del radio, ciò dovrebbe indicare che il valore di  $\frac{m}{e}$  è maggiore per le particelle  $\alpha$  del polonio che del radio. Ulteriori prove sperimentali sono necessarie su questo punto importante.

**93. Carica trasportata dai raggi  $\alpha$ .** Abbiamo visto che la carica negativa trasportata dalle particelle  $\beta$  è stata facilmente misurata. Poiché vi è ragione di credere (sezione 229) che quattro particelle  $\alpha$  siano espulse dal radio per ogni particella  $\beta$ , ci si deve attendere che la carica positiva trasportata dalle particelle  $\alpha$  possa essere determinata con ancora maggiore facilità. Tutti gli esperimenti iniziali, tuttavia, tesi a rivelare questa carica, danno risultati negativi; e, prima dell'ottenimento di risultati positivi, sarà necessario eliminare alcuni effetti secondari, che mascherano completamente gli effetti da osservare.

A causa di questa importante questione, sarà presentato un breve sunto dei metodi di misura adottati assieme alle speciali difficoltà sperimentali incontrate.

In primo luogo, bisogna ricordare che solo una piccola frazione dei raggi  $\alpha$ , emessi da uno strato di bromuro di radio in polvere, sfuggono nel gas circostante. Tenendo conto del caso in cui i raggi  $\alpha$  sono fermati nel loro passaggio attraverso la materia, sfuggono solo quelli che sono espulsi da uno strato superficiale, mentre il resto è assorbito dal radio stesso. D'altro canto, sfugge una maggiore proporzione di raggi  $\beta$ , a causa del loro maggiore potere di penetrazione. In secondo luogo, la particella  $\alpha$  è un ionizzatore più efficiente del gas della particella  $\beta$ , e, di conseguenza, se si deve determinare la carica trasportata dai raggi  $\alpha$  con metodi simili a quelli impiegati per i raggi  $\beta$  (vedi la sezione 80), la pressione del gas circostante il conduttore da caricare deve essere molto bassa per eliminare, il più possibile, la perdita di carica derivante dalla ionizzazione del gas residuo da parte dei raggi  $\alpha$ <sup>37</sup>.

Il dispositivo sperimentale usato da chi scrive è mostrato in Figura 33.

<sup>35</sup>Brag, Phil. Mag. Dicembre. 1904; Bragg e Kleeman, Phil. Mag, Dicembre 1904.

<sup>36</sup>Ulteriori risultati sperimentali riguardanti questa importante questione sono presentati nell'Appendice di questo libro.

<sup>37</sup>Bakerian Lecture, Phil. Trans. A, p. 169, 1904.

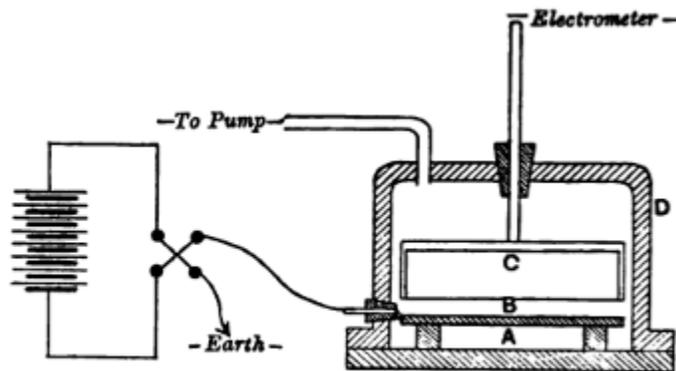


Fig. 88.

Un sottile strato di radio fu ottenuto su un piatto *A* per evaporazione di una soluzione di radio contenente un peso noto di bromuro di radio. Alcune ore dopo l'evaporazione, l'attività del radio, misurata dai raggi  $\alpha$ , è circa il 25% del suo valore massimo, e i raggi  $\beta$  sono quasi del tutto assenti. L'attività misurata dai raggi  $\alpha$  e  $\beta$  è poi lentamente recuperata, e ritorna al suo valore originario dopo un intervallo di circa un mese (vedere Cap. XI). Gli esperimenti furono eseguiti sulla piastra attiva quando la sua attività era al minimo, per evitare complicazioni dovute alla presenza di raggi  $\beta$ . La pellicola di radio era così sottile che solo una piccola frazione dei raggi  $\alpha$  risultava assorbita.

La piastra *A* era isolata in un contenitore metallico *D*, ed era collegata a un polo della batteria, mentre l'altro polo era a terra. L'elettrodo superiore, che era isolato e collegato ad un elettrometro Dolezalek, era formato da un recipiente rettangolare di rame *BC*, aveva la parte inferiore ricoperta con un sottile foglio di alluminio. I raggi  $\alpha$  passavano attraverso il foglio, ma erano fermati dai bordi di rame del recipiente. Un tale dispositivo era in grado di ridurre la ionizzazione secondaria prodotta sulla superficie della piastra superiore. Il contenitore esterno *D* poteva essere collegato con *A*, con *B* o con la terra. Per mezzo di una pompa al mercurio, il contenitore era posto sotto vuoto ad una pressione molto bassa. Se i raggi trasportano una carica positiva, la corrente tra le due piastre misurata dall'elettrometro dovrebbe essere maggiore quando *A* è carico positivamente. Tuttavia, non fu osservata alcuna differenza certa tra le correnti nelle due direzioni, anche in caso di un vuoto particolarmente spinto. In alcune disposizioni, si trovò che la corrente era anche maggiore quando la piastra inferiore era negativa. Venne ottenuto pure un risultato sperimentale inaspettato. La corrente tra le piastre parallele all'inizio diminuiva con la pressione, ma presto raggiungeva un valore limite che non era alterato dalla condizione di vuoto spinto. Per esempio, in un esperimento, la corrente tra le due piastre parallele, poste a circa 3 mm, era inizialmente di  $6.5 \cdot 10^{-9}$  A e diminuiva poi direttamente con la pressione. La corrente raggiungeva un valore limite di circa  $6 \cdot 10^{-12}$  A, o circa 1/1000 del valore a pressione atmosferica. La dimensione di questa corrente limite non era molto alterata se si sostituiva l'idrogeno all'aria.

Esperimenti simili sono stati eseguiti da Strutt<sup>38</sup> e J. J. Thomson<sup>39</sup> usando una lastra di bismuto attivo rivestita con radio-tellurio (polonio) come il metodo di Marckwald. Questa sostanza emette solo raggi  $\alpha$  ed è specialmente adatta per esperimenti di questo tipo. Strutt impiegò il metodo da lui usato per mostrare la carica portata dai raggi  $\beta$  (Figura 27). Trovò, tuttavia, che, anche nel vuoto più basso possibile, l'elettroscopio perdeva rapidamente la sua carica e con la stessa intensità se caricato sia positivamente che negativamente. Questo è in accordo con i risultati trovati da chi scrive con il radio.

Negli esperimenti di Thomson, l'elettroscopio era attaccato ad un disco metallico posto a 3 cm dalla placca di radio tellurio. Si produceva un vuoto molto spinto con il metodo di Dewar assorbendo il gas residuo in carbone di noce di cocco immerso in aria liquida. Quando l'elettroscopio era carico negativamente, si osservava una perdita di intensità estremamente bassa, ma quando era carico positivamente la perdita era di circa 100 volte maggiore. Ciò mostrò che il polonio produceva grandi quantità di elettricità negativa, ma non di positiva rivelabile. Ponendo l'apparato in un forte campo magnetico, le particelle negative non potevano raggiungere l'elettroscopio e la perdita positiva era bloccata.

Questi risultati indicano che queste particelle negative non sono emesse con velocità sufficiente per contrastare la repulsione esercitata dal corpo elettrizzato, e sono curvate da un campo magnetico. Vi è allora un piccolo dubbio sul fatto che un fascio di particelle negative (elettroni) è emesso da una superficie attiva ad una velocità molto bassa. Elettroni di velocità così bassa sono pure emessi dall'uranio e dal radio. È probabile che questi elettroni siano un tipo di radiazione secondaria, che si origina sulle superfici sulle quali cadono i raggi  $\alpha$ . Le particelle dovrebbero essere assai facilmente assorbite nel gas e la loro presenza dovrebbe essere difficile da rivelare tranne in un vuoto spinto. J. J. Thomson per primo non ottenne alcuna evidenza che le particelle  $\alpha$  del polonio fossero cariche; ma negli ultimi esperimenti, dove le placche erano tra loro ravvicinate, gli elettroni indicavano che i raggi  $\alpha$  portavano una carica positiva.

Per vedere se la carica positiva dovuta ai raggi  $\alpha$  del radio può essere rivelata quando agli ioni lenti è impedito di sfuggire da un campo magnetico, ho posto il dispositivo di Figura 33 tra i poli di un grande elettromagnete, in modo

<sup>38</sup>Strutt, Phil. Mag. Agosto 1904.

<sup>39</sup>J. J. Thomson, Proc. Camb. Phil. Soc. 18, I. p. 39, 1905. Nature, 15Dicembre 1904.

che il campo magnetico fosse parallelo al piano dei piatti<sup>40</sup>. Fu osservata una variazione molto significativa sull'intensità delle correnti sia per cariche positive che negative. In un buon vuoto, il piatto superiore riceveva una carica positiva, indipendentemente dalla carica di quella inferiore o dalla sua messa a terra. Oltre un certo valore del campo magnetico, non si apprezza più un significativo incremento dell'intensità della corrente.

La tabella seguente illustra i risultati ottenuti quando i piatti distavano 3 *mm* ed erano entrambi rivestiti con un foglio di alluminio.

Potenziale piatto inferiore ( <i>Volt</i> )	Corrente in unità arbitraria		
	Senza campo magnetico	Con campo magnetico	
0	—	+0.36	
+2	2.0	+0.46	39
-2	2.5	+0.33	
+4	2.8	+0.47	41
-4	3.5	+0.35	
+8	3.1	+0.56	43
-8	4.0	+0.31	
+84	3.5	+0.77	50
-84	5.2	+0.24	

Sia  $n$  il numero di particelle  $\alpha$  di carica  $e$ , che sono assorbite nel piatto superiore. Sia  $i_0$  la corrente dovuta alla debole ionizzazione del gas residuo.

Se si applica solo un piccolo potenziale al piatto inferiore, questa corrente dovrà essere uguale in intensità ma di segno opposto quando il potenziale è invertito. Sia  $i_1$  la carica per secondo comunicata all'elettrodo superiore quando il piatto inferiore è carico positivamente e  $i_2$  il valore quando è carico negativamente. Allora

$$i_1 = i_0 + ne$$

$$i_2 = i_0 - ne$$

sommando otteniamo

$$ne = \frac{i_1 + i_2}{2}$$

Nella terza colonna della tabella si vede che  $\frac{i_1 + i_2}{2}$  è uguale a 0.39, 0.41, 0.43 per 2, 4, 8 *volt* rispettivamente. I valori sono allora in un accordo abbastanza buono. Risultati simili sono ottenuti quando un piatto di ottone sostituì l'elettrodo superiore mostrato in figura. Considerando che il valore di  $ne$  è indipendente dall'intensità del campo magnetico oltre un certo piccolo valore, e il buon accordo dei risultati ottenuti variando la tensione, penso senza dubbio che la carica positiva ceduta all'elettrodo superiore fosse portata dalle particelle  $\alpha$ . Questa carica positiva non era piccola, e utilizzando una deposizione di 0.48 *mg* di bromuro di radio distribuita su un foglio sottile di area circa 20 *cm*<sup>2</sup>, la carica ceduta corrispondeva a una corrente di  $8.8 \cdot 10^{-12}$  *A*, e, con l'elettrometro Dolezalek, era necessario aggiungere una capacità di 0.0024  $\mu F$  al sistema elettrometro.

In questi esperimenti, il film di bromuro di radio era così sottile che solo una percentuale molto piccola delle particelle  $\alpha$  era fermata dal radio stesso. Assumendo che ogni particella  $\alpha$  porti la stessa carica di uno ione, cioè  $1.1 \cdot 10^{-19}$  *C*, e ricordando che la metà delle particelle  $\alpha$  è assorbita nel piatto inferiore, si può dedurre il numero totale  $N$  di particelle  $\alpha$  emesse per secondo da un grammo di bromuro di radio (alla sua minima attività). In due esperimenti separati dove la quantità di radio usata era 0.194 e 0.484 *mg* rispettivamente, i valori di  $N$  erano in stretto accordo e uguali a  $3.6 \cdot 10^{10}$ . Mostriamo più tardi che nel radio vi sono altri tre prodotti in equilibrio radioattivo, ognuno dei quali emette lo stesso numero di particelle  $\alpha$  del radio stesso. Se così è, il numero totale di particelle  $\alpha$  emesse per secondo da 1 *g* di bromuro di radio *in equilibrio radioattivo* è  $4N$  o  $1.44 \cdot 10^{11}$ . Assumendo che la composizione del bromuro di radio sia  $RaBr_2$ , il numero per secondo per grammo di radio è  $2.5 \cdot 10^{10}$ . Questo numero sarà trovato essere in buon accordo con quello dedotto dai dati indiretti (Cap. XIII). Il valore di  $N$  è di grande importanza nella determinazione della grandezza delle varie quantità nei calcoli radioattivi.

**94. Massa ed energia delle particelle  $\alpha$ .** È stato sottolineato che i raggi  $\alpha$  del radio e del polonio sono analoghi ai raggi canale di Goldstein, poiché entrambi portano una carica positiva e sono difficili da deflettere in un campo magnetico. Gli esperimenti di Wien hanno mostrato che la velocità di emissione dei raggi canale varia con il gas nel tubo e con l'intensità del campo elettrico applicato, ma è in generale circa  $\frac{1}{10}$  della velocità della particella  $\alpha$  del radio. Anche il valore di  $\frac{e}{m}$  è variabile, dipendendo dal gas nel tubo.

Si è mostrato che per i raggi  $\alpha$  del radio  $V = 2.5 \cdot 10^9$  e  $\frac{e}{m} = 6 \cdot 10^3$ .

Il valore di  $\frac{e}{m}$  per l'atomo di idrogeno, liberato nell'elettrolisi dell'acqua, è  $10^4$ . Assumendo che la carica portata dalla particella  $\alpha$  sia la stessa di quella dell'atomo di idrogeno, la massa della particella  $\alpha$  è circa doppia di quella dell'atomo di

<sup>40</sup>Rutherford, Nature, 2 Marzo 1905. J. J. Thomson, Nature, 9 marzo 1905.

idrogeno. Prendendo in considerazione l'incertezza connessa al valore sperimentale di  $\frac{e}{m}$  per la particella  $\alpha$ , se la stessa consiste di un tipo noto di materia, questo risultato indica che consiste o di elio o idrogeno emesso. Una ulteriore evidenza su questo importante aspetto è data nella sezione 268.

I raggi  $\alpha$  da tutte le sostanze radioattive e i loro prodotti, come le emanazioni radioattive e la materia eccitata che produce attività, possiedono le stesse proprietà generali e con un potere di penetrazione molto poco diverso. È, pertanto, probabile che in tutti i casi i raggi  $\alpha$  da diverse sostanze radioattive siano composti da corpi carichi positivamente emessi con grande velocità. Poiché i raggi dal radio sono composti in parte di raggi  $\alpha$  provenienti dall'emanazione che in esso si accumula, e dall'attività eccitata da essi prodotta, i raggi  $\alpha$  da ognuno di questi prodotti può consistere di corpi carichi positivamente; allo scopo si è mostrato che tutti i raggi  $\alpha$  dal radio sono deviati in un intenso campo magnetico.

L'energia cinetica di ogni particella emessa è enorme, confrontata con la sua massa. L'energia cinetica di ogni particella  $\alpha$  è

$$\frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}\frac{m}{e}V^2e = 5.9 \cdot 10^{-6} \text{ erg}$$

Assumendo la velocità di una palla di fucile come  $10^6 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ , si vede che, a parità di massa, l'energia di moto dei raggi  $\alpha$  è  $6 \cdot 10^8$  volte maggiore di quella della palla di fucile. In questa emissione di corpi atomici a grande velocità probabilmente risiede la causa principale degli effetti di riscaldamento prodotti dal radio (Cap. XII).

**95. Disintegrazione atomica.** La radioattività degli elementi radioattivi è una proprietà atomica e non molecolare. Il tasso di emissione delle radiazioni dipende solo dalla quantità dell'elemento presente e non dalla sua combinazione con altre sostanze inattive. Inoltre, si mostrerà in seguito che il tasso di emissione non è modificato da ampie variazioni di temperatura, o dall'applicazione di qualsiasi forza chimica o fisica nota. Poiché il potere di irraggiamento è una proprietà dei radio atomi, e le radiazioni sono composte per la maggior parte di masse con cariche positive o negative emesse con grande velocità, è necessario supporre che gli atomi dei radio elementi subiscano disintegrazioni, nel corso delle quali parti degli atomi sfuggono dal sistema atomico. Sembra molto probabile che le particelle  $\alpha$  e  $\beta$  possano improvvisamente acquisire la loro enorme velocità di emissione attraverso l'azione di forze che esistono all'interno o all'esterno dell'atomo. Per esempio, la particella  $\alpha$  dovrebbe stare, per muoversi partendo da ferma, tra due punti la cui differenza di potenziale è pari a 5.2 milioni di volt per acquisire l'energia cinetica con la quale è emessa. Sembra, pertanto, probabile che queste particelle non siano poste improvvisamente in moto, ma che sfuggano dal sistema atomico nel quale si trovano già in un rapido moto oscillatorio o orbitale. In questo modo, l'energia non è comunicata alle particelle proiettile, ma esiste in principio negli atomi dai quali sono emesse. L'idea che l'atomo è una struttura complessa formata da parti cariche in rapido moto oscillatorio o orbitale è stata sviluppata da J. J. Thomson, Larmor e Lorentz. Poiché la particella  $\alpha$  è di dimensioni atomiche, è naturale supporre che gli atomi degli elementi radioattivi consistono non solo di elettroni in movimento, ma anche di particelle cariche positive la cui massa è circa la stessa di quello dell'atomo di idrogeno o di elio.

Si mostrerà in seguito che solo una piccola frazione degli atomi del radio deve andare in pezzi ogni secondo per rendere conto delle radiazioni anche di un elemento enormemente attivo come il radio. La questione delle possibili cause che portano a questa disintegrazione atomica e delle conseguenze che ne derivano sarà discussa nel cap. XIII.

**96. Esperimenti con uno schermo di solfuro di zinco.** Uno schermo esagonale di Sidot di solfuro di zinco cristallino fosforescente diviene fortemente luminoso sotto l'azione dei raggi  $\alpha$  del radio e del polonio. Se la superficie dello schermo è esaminata con un vetro ingrandente, la luce dallo schermo non è uniformemente distribuita ma consiste di un numero di punti luminosi scintillanti. Nello stesso punto non si susseguono due lampi luminosi, ma essi sono diffusi sulla superficie, spostandosi rapidamente senza un moto di traslazione. Questa significativa azione dei raggi del radio e polonio su uno schermo di solfuro di zinco fu scoperta da Sir William Crookes<sup>41</sup>, e in modo indipendente da Elster e Geitel<sup>42</sup>, i quali la osservarono con i raggi provenienti da un filo che era stato caricato negativamente o all'aria aperta o in un vaso contenente l'emanazione del torio.

Per mostrare le scintillazioni del radio sullo schermo, Sir William Crookes ideò un semplice apparato che chiamò "Spintariscopio". Un piccolo pezzo di metallo, immerso in una soluzione di radio, è posto a parecchi millimetri di distanza da un piccolo schermo di solfuro di zinco. Questo schermo è fissato ad un estremo di un corto tubo di ottone ed è osservato attraverso una lente fissata all'altro estremo del tubo. Vista in questo modo, la superficie dello schermo appare con uno sfondo nero, con punti luminosi che si spostano con grande rapidità. Il numero dei punti per unità di area si riduce rapidamente con la distanza dal radio, e, a parecchi centimetri, si presentano solo occasionalmente. L'esperimento è estremamente bello, e stimola nell'osservatore l'idea che il radio emette un fascio di proiettili, il cui impatto sullo schermo è evidenziato da un flash luminoso.

I punti scintillanti sullo schermo sono il risultato dell'impatto di una particella  $\alpha$  sulla superficie. Se il radio è ricoperto con uno strato di stagnola di spessore sufficiente ad assorbire tutti i raggi  $\alpha$ , le scintillazioni cessano. Si osserva sullo schermo anche una fosforescenza dovuta ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$ , ma questa luminosità non è indicata da scintillazioni di apprezzabile entità. Sir William Crookes mostrò che il numero di scintillazioni era circa lo stesso nel vuoto come in aria a pressione atmosferica. Se lo schermo è mantenuto a temperatura costante, ma il radio è raffreddato alla temperatura

<sup>41</sup>Crookes, Proc. Roy. Soc. 81, p. 405, 1903.

<sup>42</sup>Elster e Geitel, Phys. Zeit. No. 15, p. 437, 1903.

dell'aria liquida, non si osserva un'apprezzabile variazione nel numero delle scintillazioni. Se, tuttavia, lo schermo veniva gradualmente raffreddato alla temperatura dell'aria liquida, le scintillazioni diminuivano fino a cessare. Ciò è dovuto al fatto che lo schermo perde una grande parte del suo potere fosforescente a temperature così basse.

Non vi sono solo scintillazioni prodotte da radio, attinio e polonio, ma anche dalle emanazioni e da altri prodotti radioattivi che emettono raggi  $\alpha$ . Inoltre, F. H. Glew<sup>43</sup> ha trovato che si possono osservare anche dal metallo contenente uranio, torio e da diverse varietà di pechblenda. Per mostrare le scintillazioni prodotte dalla pechblenda, a forma piatta, si poneva sopra di essa uno schermo trasparente, la cui superficie inferiore era ricoperta con solfuro di zinco. Glew progettò uno spintariscopio modificato e di forma molto semplice. Uno schermo trasparente, ricoperto da una parte con un sottile strato di solfuro di zinco, è posto a contatto con il materiale attivo e le scintillazioni sono osservate con una lente.

Poiché non vi è assorbimento nell'aria, la luminosità è massima. Si può, in questo modo, studiare direttamente la trasparenza relativa di diverse sostanze poste tra il materiale attivo e lo schermo.

La produzione di scintillazioni appare essere una proprietà generale dei raggi  $\alpha$  emessi da tutte le sostanze radioattive. Le scintillazioni sono meglio visibili con uno schermo di solfuro di zinco; ma sono osservabili anche con willemite (silicato di zinco), diamante in polvere e platino cianuro di potassio (Glew, loc. cit.). Se uno schermo di platino cianuro di bario è esposto ai raggi  $\alpha$  del radio, le scintillazioni sono difficili da osservare, e la luminosità è molto più persistente di quella dello schermo di solfuro di zinco nelle stesse condizioni. La durata della fosforescenza in questo caso è giustificata probabilmente dall'assenza di scintillazioni visibili.

Non vi è dubbio che le scintillazioni derivino dal continuo bombardamento delle particelle  $\alpha$  sullo schermo sensibile. Ognuna di queste particelle si muove con enorme velocità e possiede una notevole energia di moto. Tenendo conto della facilità con cui sono fermate, la maggior parte di questa energia è trasferita alla superficie dello schermo, e una parte di essa è trasformata in qualche modo in luce. Il solfuro di zinco è molto sensibile agli urti meccanici. Si osserva la luminosità se si traccia un segno con un coltellino attraverso lo schermo, o se una corrente d'aria è diretta su di esso. La perturbazione prodotta dall'impatto della particella  $\alpha$  si estende a una distanza molto grande se confrontata con le dimensioni della particella stessa, cosicché gli spot luminosi prodotti hanno un'area osservabile. Recentemente Becquerel<sup>44</sup> ha compiuto un esame delle scintillazioni prodotte da diverse sostanze e ha concluso che esse sono dovute ai solchi nel cristallo che forma lo schermo, prodotte dall'azione dei raggi  $\alpha$ . Le scintillazioni si possono produrre anche meccanicamente comprimendo un cristallo. Tommasina<sup>45</sup> trovò che uno schermo di solfuro di zinco, rimosso dall'azione dei raggi del radio per parecchi giorni, mostrava ancora scintillazione quando una barretta di zinco elettrificata era avvicinata ad esso.

Il numero di scintillazioni prodotte nel solfuro di zinco dipende dalla presenza di un piccola quantità di impurità nel suo stato cristallino. Si può mostrare che anche con gli schermi più sensibili, il numero di scintillazioni è probabilmente solo una piccola frazione del numero totale di particelle  $\alpha$  che lo colpiscono. Potrebbe sembrare che i cristalli siano in qualche modo alterati dal bombardamento delle particelle  $\alpha$  e che alcuni cristalli occasionalmente si rompano con l'emissione luminosa<sup>46</sup>.

Sebbene le scintillazioni dovute ad una particella di bromuro di radio siano molto numerose, non lo sono così tanto da essere contate. Vicino al radio, la luminosità è molto intensa, ma usando un potente microscopio la luminosità può consistere solo di scintillazioni. Poiché il numero di scintillazioni probabilmente non ha alcuna stretta relazione col numero di particelle  $\alpha$  emesse, una misurazione del numero di scintillazioni non dovrebbe avere un particolare significato fisico. La relazione tra il numero di particelle  $\alpha$  e il numero di scintillazioni dovrebbe probabilmente essere variabile, dipendendo fortemente dall'esatta composizione chimica della sostanza sensibile e anche dal suo stato cristallino.

**97. Assorbimento dei raggi  $\alpha$  nella materia.** I raggi  $\alpha$  provenienti da diverse sostanze radioattive si possono distinguere tra loro per la quantità relativa dell'assorbimento da parte dei gas o di sottili schermi di sostanze solide. Quando sono esaminati nelle stesse condizioni, i raggi  $\alpha$  da sostanze radioattive si possono classificare secondo un ordine ben definito rispetto alla quantità di assorbimento in un dato spessore di materia.

Per testare la quantità di assorbimento dei raggi  $\alpha$  per diversi spessori di materiali, fu impiegato un dispositivo simile a quello mostrato in Figura 17.

<sup>43</sup>Glew, Arch. Röntgen Ray, Giugno 1904.

<sup>44</sup>Becquerel, C.R. 137, 27 ottobre 1903.

<sup>45</sup>Tommasina, C.R. 137, 9 novembre 1903.

<sup>46</sup>Un'interessante nuova luce su tale questione è offerta dagli esperimenti descritti nell'Appendice A di questo libro.

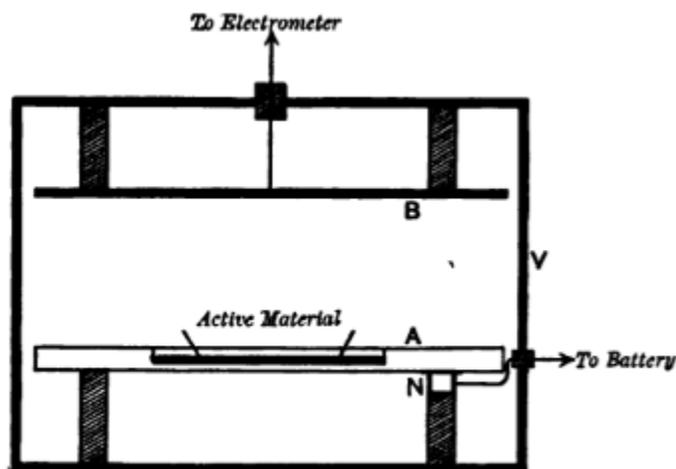


Fig. 17.

Un sottile strato di materiale attivo fu distribuito uniformemente su una superficie di circa  $30 \text{ cm}^2$ , e si è osservata la corrente di saturazione tra due piastre distanti  $3.5 \text{ cm}$ . Con un sottile strato<sup>47</sup> di materiale attivo, la ionizzazione tra le piastre è dovuta quasi interamente ai raggi  $\alpha$ . La ionizzazione dovuta ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  è in genere inferiore all'1% del totale.

La tabella seguente mostra la variazione della corrente di saturazione tra le piastre dovuta ai raggi  $\alpha$  del radio e del polonio, con l'interposizione di successivi fogli di alluminio, ognuno di  $0.00034 \text{ cm}$  di spessore. Per eliminare la ionizzazione dovuta ai raggi  $\beta$  del radio, il cloruro di radio utilizzato era sciolto in acqua e vaporizzato. Ciò rendeva il composto attivo, per il tempo necessario, quasi privo di emissione  $\beta$ .

Polonio			Radio		
Strati di alluminio	Corrente	Rapporto per la diminuzione di ogni strato	Strati di alluminio	Corrente	Rapporto per la diminuzione di ogni strato
0	100	0.41	0	100	0.48
1	41		1	48	
2	12.6	0.31	2	23	0.48
3	2.1	0.17	3	13.6	0.60
4	0.14	0.067	4	6.4	0.47
5	0		5	2.5	0.39
			6	0.9	0.36
			7	0	

La corrente iniziale con 1 strato di alluminio sul materiale attivo è presa come 100. Si osserverà che la corrente dovuta ai raggi del radio decresce quasi della metà del suo valore per ogni spessore addizionale finché la corrente si riduce a circa il 6% del massimo. Decade poi più rapidamente a zero. Allora, per il radio, su un ampio range, la corrente decresce approssimativamente secondo una legge esponenziale con lo spessore dello schermo. o

$$\frac{i}{i_0} = e^{-\lambda d}$$

dove  $i$  è la corrente per uno spessore  $d$ , e  $i_0$  la corrente iniziale.

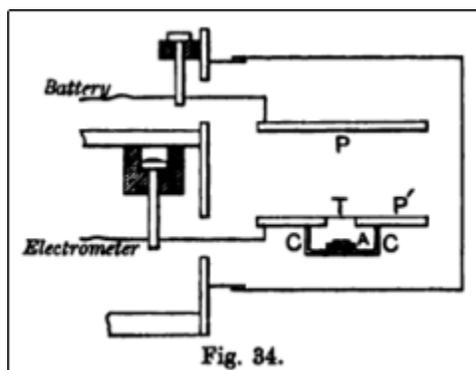
Nel caso del polonio, la diminuzione è molto più rapida di quanto indicato dalla legge esponenziale. Dal primo strato, la corrente è ridotta al rapporto 0.41. La somma dei tre strati abbassa la corrente ad un rapporto di 0.17. Per la maggior parte delle sostanze attive, la corrente diminuisce appena più velocemente della legge esponenziale, specialmente quando la radiazione è quasi tutta assorbita.

**98.** L'aumento di assorbimento dei raggi  $\alpha$  del polonio con lo spessore del materiale attraversato è stato mostrato molto chiaramente in alcuni esperimenti fatti da Madame Curie. Il dispositivo impiegato è mostrato in Figura 34.

La corrente di saturazione fu misurata tra due piastre parallele  $PP'$  distanziate di  $3 \text{ cm}$ . Il polonio  $A$  era posto nel contenitore metallico  $CC$ , e i raggi da esso, dopo essere passati attraverso un'apertura nella piastra inferiore  $P'$ , ricoperta con una lastra sottile  $T$ , ionizzava il gas tra le piastre. Per una certa distanza  $AT$ , di  $4 \text{ cm}$ , o più, non fu osservata alcuna corrente tra  $P$  e  $P'$ . Quando la distanza  $AT$  veniva diminuita, la corrente aumentava in un modo molto improvviso, così che per una piccola variazione della distanza  $AT$  vi era un grande incremento di corrente. Con un'ulteriore diminuzione

<sup>47</sup>Per ottenere uno strato sottile, il composto da testare è polverizzato e poi è distribuito in un piccolo spessore uniformemente sull'area, cosicché la piastra ne risulta solo parzialmente ricoperta.

della distanza, la corrente aumentava in un modo piuttosto regolare. I risultati sono mostrati nella tabella seguente, dove lo schermo  $T$  consisteva rispettivamente di uno o due strati di alluminio. La corrente dovuta alla radiazione, senza lo schermo di alluminio, è in ogni caso presa uguale a 100.



Distanza AT in cm	3.5	2.5	1.9	1.45	0.5
Per 100 raggi trasmessi da uno strato	0	0	5	10	25
Per 100 raggi trasmessi da due strati	0	0	0	0	0.7

Lo schermo metallico, pertanto, taglia una parte della radiazione tanto maggiore quanto maggiore è lo spazio in aria attraversato. Gli effetti sono anche più marcati se le piastre  $PP'$  sono a contatto. Risultati simili, ma non così netti, si trovano sostituendo il radio con il polonio.

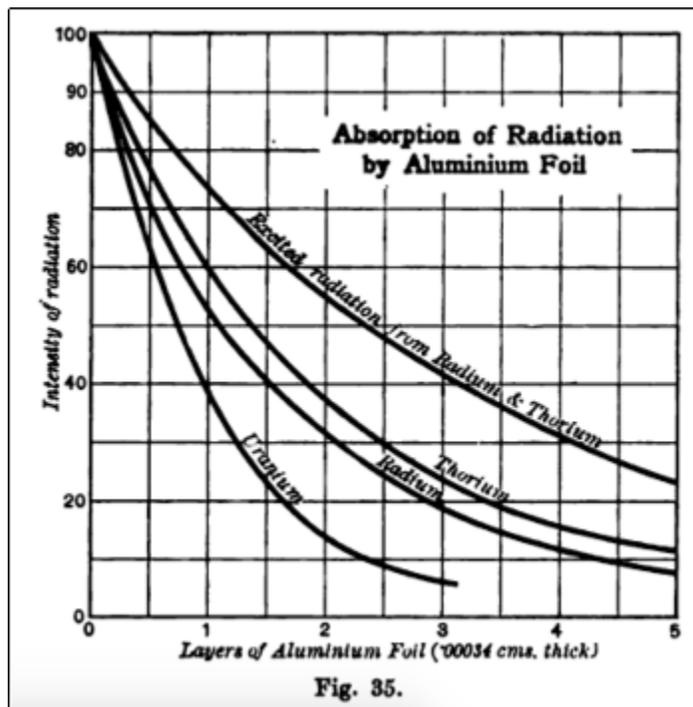
Da questi esperimenti segue che la ionizzazione per unità di volume, dovuta a una grande piastra uniformemente ricoperta con materiale radioattivo, cade rapidamente con la distanza dalla piastra. Ad una distanza di 10 *cm* i raggi  $\alpha$  di uranio, torio, o radio sono completamente assorbiti nel gas, e la piccola ionizzazione poi osservata nel gas è dovuta alla maggiore penetrazione dei raggi  $\alpha$  e  $\gamma$ . La quantità relativa della ionizzazione osservata a una distanza dalla sorgente aumenterà con lo spessore dello strato del materiale attivo, ma raggiungerà un massimo per uno strato di un certo spessore. La proporzione maggiore della ionizzazione, dovuta a materiale attivo non schermato, è, pertanto, confinata interamente in uno strato di aria che lo circonda di non più di 10 *cm* di profondità.

**99.** I raggi  $\alpha$  dai diversi componenti dello stesso elemento attivo, sebbene di diversa quantità, hanno circa lo stesso potere di penetrazione medio. Esperimenti su questo punto sono stati fatti da che scrive<sup>48</sup> e da Owens<sup>49</sup>. Per confrontare, pertanto, i relativi poteri di penetrazione dei raggi  $\alpha$  dei diversi radio-elementi, è necessario determinare solo il potere di penetrazione di un componente di ciascuno di essi. Rutherford e Miss Brooks<sup>50</sup> hanno determinato la quantità di assorbimento dei raggi  $\alpha$  provenienti da diverse sostanze attive nel loro passaggio attraverso strati successivi di fogli di alluminio dello spessore di 0.00034 *cm*. Le curve di assorbimento sono mostrate in Figura 35.

<sup>48</sup>Rutherford, Phil. Mag. Gennaio 1899.

<sup>49</sup>Owens, Phil. Mag. Ottobre 1899.

<sup>50</sup>Rutherford e Miss Brooks, Phil. Mag. Luglio 1900.



Per un confronto generale, si pose pari a 100 la corrente iniziale con il componente attivo scoperto. Venne usato uno strato molto sottile di sostanza attiva, e, nel caso del torio e del radio, l'emanazione prodotta era rimossa da una lenta corrente d'aria attraverso il contenitore di misura. Una differenza di potenziale di 300 V era applicata tra le piastre, ed era sufficiente a fornire il massimo della corrente in ogni caso.

Curve per i minerali di organite e torite erano quasi le stesse di quelle del torio.

Per confronto, sono mostrate le curve di assorbimento delle radiazioni eccitate del torio e del radio, così come la curva per i radio-elementi di uranio, torio, radio e polonio. Le radiazioni  $\alpha$  possono essere disposte nel seguente ordine, in funzione del loro potere di penetrazione, iniziando con le più penetranti.

Torio      radiazione eccitata  
Radio  
Torio  
Radio  
Polonio  
Uranio

Lo stesso ordine è osservato per tutte le sostanze assorbenti esaminate, come l'alluminio, il metallo olandese, la carta stagnola, la carta e l'aria oltre ad altri gas. Le differenze nell'assorbimento dei raggi  $\alpha$  provenienti da corpi attivi sono considerevoli, e devono essere attribuiti o alla differenza di massa o di velocità delle particelle  $\alpha$  o alla variazione di entrambe.

Poiché i raggi  $\alpha$  differiscono in massa o in velocità, ne segue che non possono essere attribuiti a singole impurità radioattive comuni a tutti i corpi radioattivi.

**100. Assorbimento dei raggi  $\alpha$  nei gas.** I raggi  $\alpha$  da diverse sostanze radioattive sono rapidamente assorbiti nel loro passaggio attraverso pochi centimetri d'aria alla pressione e temperatura atmosferica. Come conseguenza di ciò, la ionizzazione in aria, dovuta ai raggi  $\alpha$ , è maggiore vicino alla superficie del corpo radiante e diminuisce molto rapidamente con la distanza (si veda la sezione 98).

Un semplice metodo per determinare l'assorbimento nei gas è mostrato nella Figura 38. La corrente massima è misurata tra due piastre parallele *A* e *B* tenute ad una distanza *fissa* di 2 cm, e poi spostate per mezzo di una vite a diverse distanze dalla superficie radioattiva. La radiazione da questa superficie attiva, passava attraverso un'apertura circolare nella piastra *A* ricoperta con un sottile foglio di alluminio, ed era poi bloccata dalla piastra superiore. Per osservazioni su altri gas oltre all'aria, e per esaminare gli effetti a diverse pressioni, l'apparato è racchiuso in un cilindro ermetico.

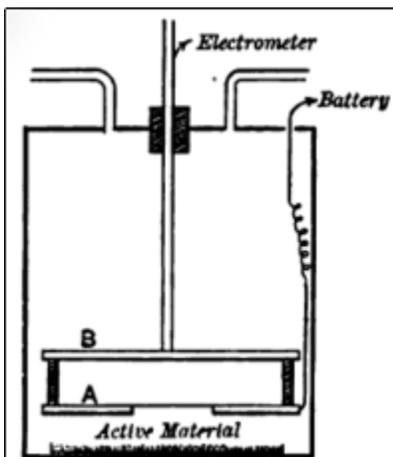


Fig. 36.

Se il raggio della sostanza attiva è grande rispetto alla distanza dalla piastra  $A$ , l'intensità della radiazione è approssimativamente uniforme sopra l'apertura nella piastra  $A$ , e diminuisce con la distanza  $x$  attraversata in accordo con la legge esponenziale.

Pertanto

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda x}$$

dove  $\lambda$  è la "costante di assorbimento" della radiazione per il gas considerato<sup>51</sup>. Siano

$x$  = distanza della piastra inferiore dal materiale attivo

$l$  = distanza tra le due piastre fissate

L'energia della radiazione alla piastra inferiore è allora  $I_0 e^{-\lambda x}$ , e alla piastra superiore  $I_0 e^{-\lambda(l+x)}$ . Il numero totale degli ioni prodotti tra le piastre parallele  $A$  e  $B$  è pertanto proporzionale a

$$e^{-\lambda x} - e^{-\lambda(l+x)} = e^{-\lambda x} (1 - e^{-\lambda l})$$

Poiché il fattore  $1 - e^{-\lambda l}$  è una costante, la corrente di saturazione tra  $A$  e  $B$  varia come  $e^{-\lambda x}$ , cioè, diminuisce in accordo con la legge esponenziale con la distanza attraversata.

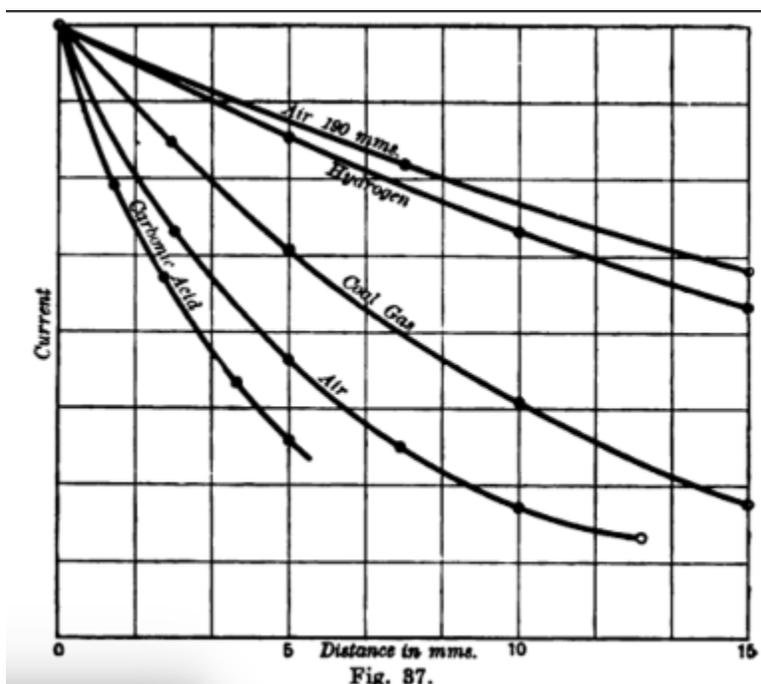


Fig. 37.

<sup>51</sup>Poiché la ionizzazione in ogni punto sopra la piastra è l'effetto risultante delle particelle  $\alpha$  provenienti da tutti i punti del grande strato radioattivo,  $\lambda$  non è lo stesso del coefficiente di assorbimento di raggi  $\alpha$  da una sorgente puntiforme. Sarà, tuttavia, proporzionale ad esso. Per questo motivo  $\lambda$  è detta la "costante di assorbimento".

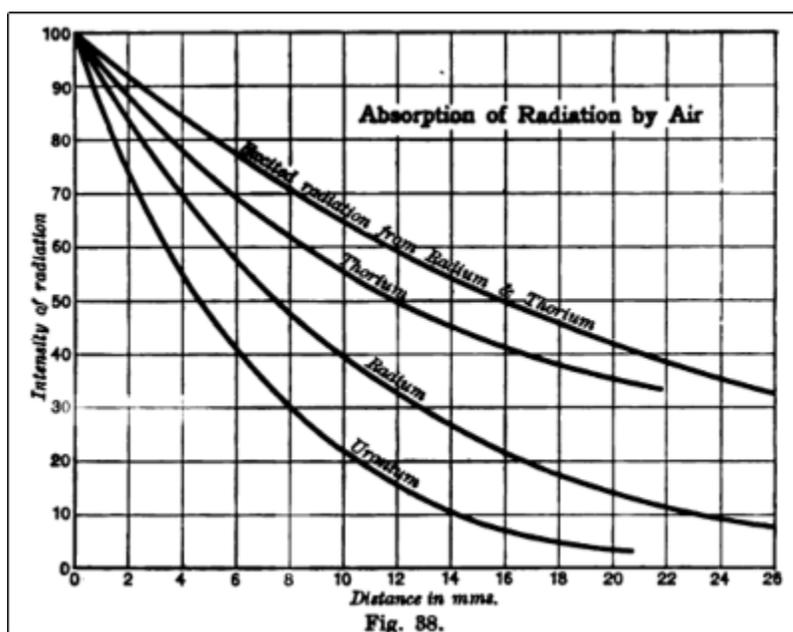
La variazione della corrente tra  $A$  e  $B$  con la distanza da un sottile strato di ossido di uranio è mostrata in Figura 37 per diversi gas. Le misure iniziali vennero fatte a una distanza di circa  $3.5\text{ mm}$  dalla sorgente attiva. I valori effettivi di questa corrente iniziale erano differenti per i diversi gas, ma, per il confronto, il valore è in ogni caso preso come unitario.

Si vedrà che la corrente diminuisce con la distanza approssimativamente in progressione geometrica, un risultato che è in accordo con la semplice teoria prima esposta. La distanza attraverso la quale i raggi passano prima di essere assorbiti è presentata sotto per i diversi gas.

Gas	Distanza in $mm$ per assorbire metà radiazione
acido carbonico	3
Aria	4.3
Gas di carbone	7.5
Idrogeno	16

I risultati per l'idrogeno sono solo approssimati, quando l'assorbimento è piccolo sulla distanza esaminata.

L'assorbimento è minimo nell'idrogeno e massimo nell'acido carbonico, e segue lo stesso ordine della densità dei gas. Nel caso dell'aria e dell'acido carbonico, l'assorbimento è proporzionale alla densità, ma questa regola è ampiamente invalidata nel caso dell'idrogeno. I risultati per l'assorbimento relativo in aria dei raggi  $\alpha$  dai diversi corpi attivi sono mostrati in Figura 38.



L'osservazione iniziale venne eseguita a circa  $2\text{ mm}$  dalla superficie attiva, e la corrente iniziale è in ogni caso assunta pari a 100. La corrente, come nel caso dell'uranio, diminuisce all'inizio circa in progressione geometrica con la distanza. Lo spessore dell'aria, attraversato dalla radiazione prima che la sua intensità si riduca della metà, è data qui sotto.

	Distanza in $mm$
Uranio	4.3
Radio	7.5
Torio	10
Radiazione eccitata da Torio e Radio	16.5

Il grado di assorbimento in aria della radiazione dalle sostanze attive è lo stesso di quello per i metalli e le sostanze solide esaminate.

**101. Connessione tra assorbimento e densità.** Poiché in tutti i casi la radiazione inizialmente diminuisce all'incirca secondo la legge esponenziale con la distanza attraversata, l'intensità  $I$  dopo il passaggio attraverso uno spessore  $x$  è data da  $I = I_0 e^{-\lambda x}$  dove  $\lambda$  è la costante di assorbimento e  $I_0$  l'intensità iniziale.

La tabella seguente mostra il valore di  $\lambda$  per diverse radiazioni per l'aria e l'alluminio.

Radiazione	$\lambda$ per alluminio	$\lambda$ per aria
Radiazione eccitata	830	0.42
Torio	1250	0.69
Radio	1600	0.90
Uranio	2750	1.6

Prendendo la densità dell'aria a  $20^\circ C$  e  $760\text{ mm}$  come 0.00120, considerando l'acqua come l'unità, la tabella seguente mostra il valore di  $\lambda$  diviso per la densità per diverse radiazioni.

Radiazione	Alluminio	Aria
Radiazione eccitata	320	350
Torio	480	550
Radio	620	740
Uranio	1060	1300

Confrontando alluminio e aria, l'assorbimento è all'incirca proporzionale alla densità per tutte le radiazioni. La divergenza, tuttavia, tra i valori densità-assorbimento è grande quando vengono confrontati due metalli come stagno e alluminio. Il valore di  $\lambda$  per lo stagno non è molto maggiore di quello dell'alluminio, sebbene la densità sia quasi tre volte maggiore.

Se l'assorbimento è proporzionale alla densità, l'assorbimento in un gas dovrebbe variare direttamente con la pressione, e questo è stato verificato. Alcuni risultati su questo aspetto sono stati presentati da chi scrive (citato) per i raggi dell'uranio con pressioni tra  $\frac{1}{4}$  e 1 atmosfera. Owens (citato) esaminò l'assorbimento della radiazione  $\alpha$  in aria dal torio con pressioni tra 0.5 e 3 atmosfere e trovò che l'assorbimento variava direttamente con la pressione.

La variazione dell'assorbimento con la densità per le particelle positive emesse è pertanto molto simile alla legge per quelle negative e per i raggi catodici. L'assorbimento, in entrambi i casi, dipende principalmente dalla densità, ma non in tutti i casi è direttamente proporzionale ad essa. Poiché l'assorbimento dei raggi  $\alpha$  nei gas è probabilmente dovuto soprattutto alla perdita di energia dei raggi per la produzione di ioni nel gas, sembra probabile che l'assorbimento nei metalli sia dovuto ad una causa simile.

**102. Relazione tra ionizzazione e assorbimento nei gas.** Si è mostrato (sezione 45) che se i raggi  $\alpha$  sono completamente assorbiti in un gas, la ionizzazione *totale* prodotta è circa la stessa per tutti i gas esaminati. Poiché i raggi sono diversamente assorbiti nei diversi gas, vi dovrà essere una diretta connessione tra la ionizzazione relativa e l'assorbimento relativo. Questo vale se i risultati di Strutt (sezione 45) sono confrontati con le relative costanti di assorbimento (sezione 100).

Gas	Assorbimento relativo	Ionizzazione relativa
Aria	1	1
Idrogeno	0.27	0.226
Biossido di Carbonio	1.43	1.53

Considerando la difficoltà di ottenere accurate determinazioni dell'assorbimento, la ionizzazione relativa in un gas è direttamente proporzionale all'assorbimento relativo entro i limiti dell'errore sperimentale. Questo risultato mostra che l'energia assorbita nella produzione di uno ione è circa la stessa nell'aria, nell'idrogeno e nel biossido di carbonio.

**103. Meccanismo dell'assorbimento dei raggi  $\alpha$  nella materia.** Gli esperimenti, già descritti, mostrano che la ionizzazione del gas, dovuta ai raggi  $\alpha$  da una grande superficie piana di materiale radioattivo, diminuisce nella maggior parte dei casi approssimativamente in accordo ad una legge esponenziale, finché la maggior parte dei raggi sono assorbiti, dopodiché la ionizzazione decresce ad un ritmo più rapido. Nel caso del polonio, la ionizzazione diminuisce più rapidamente di quanto atteso dalla semplice legge esponenziale.

La ionizzazione prodotta nel gas è dovuta alla collisione delle particelle in moto rapido con le molecole del gas sul loro cammino. A causa della sua grande massa, la particella  $\alpha$  è uno ionizzatore molto più efficiente della particella  $\beta$  con la stessa velocità. Si può dedurre dai risultati degli esperimenti che ogni particella  $\alpha$  emessa è in grado di produrre 100000 ioni nel passaggio attraverso pochi centimetri di gas prima che la sua velocità sia ridotta al valore di soglia, sotto la quale non ionizza più il gas lungo il suo cammino.

È richiesta energia per ionizzare il gas, e questa energia può essere ottenuta solo a spese dell'energia cinetica della particella  $\alpha$  emessa. Pertanto, ci si deve attendere che la particella  $\alpha$  perda gradualmente la sua velocità e l'energia di moto nel suo passaggio attraverso il gas.

Poiché il tasso di assorbimento dei raggi  $\alpha$  nei gas è dedotto dalle misure della ionizzazione del gas a diverse distanze dalla sorgente della radiazione, si richiede una conoscenza della legge di variazione del potere di ionizzazione della particella  $\alpha$  emessa in funzione della sua velocità per interpretare i risultati. I dati sperimentali sono, tuttavia, troppo incompleti

per essere applicati direttamente ad una soluzione della questione. Townsend<sup>52</sup> ha mostrato che un elettrone in movimento produce ioni nel gas dopo aver superato una data soglia di velocità. Il numero di ioni prodotti per centimetro di cammino attraverso il gas raggiunge poi un massimo per poi diminuire anche per velocità maggiori. Per esempio, Townsend trovò che il numero di ioni prodotti da un elettrone che si muove in un campo elettrico era piccolo inizialmente per campi deboli, ma aumentava con l'intensità del campo elettrico fino a un massimo corrispondente alla produzione di 20 ioni per  $cm$  di cammino in aria ad una pressione di  $1\ mm$  di mercurio. Durack<sup>53</sup> trovò che gli elettroni, generati in un tubo a vuoto, con una velocità di circa  $5 \cdot 10^6 \frac{cm}{s}$  producevano una coppia di ioni ogni  $5\ cm$  di cammino alla pressione di  $1\ mm$ . In un articolo successivo, Durack mostrò che gli elettroni del radio, che sono emessi con una velocità maggiore della metà della velocità della luce, una coppia di ioni era prodotta ogni  $10\ cm$  di cammino. L'elettrone ad alta velocità del radio è, pertanto, uno scarso ionizzatore e produce solo circa  $\frac{1}{100}$  della ionizzazione per unità di cammino osservata da Townsend per gli elettroni più lenti.

104. Nel caso della particella  $\alpha$ , non è stata fatta alcuna misura diretta sulla variazione della ionizzazione con la velocità della particella, così che la legge dell'assorbimento dei raggi non può essere dedotta direttamente. Un approccio indiretto alla questione è, tuttavia, stato affrontato recentemente da Bragg e Kleeman<sup>54</sup> che hanno formulato una semplice teoria per rendere conto dei risultati sperimentali da loro ottenuti sull'assorbimento dei raggi  $\alpha$ . Le particelle  $\alpha$  emesse da ogni semplice tipo di sostanza radioattiva sono ritenute avere la stessa velocità e passare attraverso una definita distanza  $a$  in aria a pressione e temperatura atmosferica prima di essere assorbite. Come prima approssimazione la ionizzazione per cammino unitario è supposta essere la stessa sull'intera lunghezza attraversata prima dell'assorbimento, e di concludersi rapidamente ad una definita distanza dalla sorgente di radiazione. Ciò è in accordo con il fatto osservato che la ionizzazione tra piastre parallele aumenta molto rapidamente quando sono poste più vicine di una data distanza dalla sorgente. Il range  $a$  dipende dall'energia iniziale di moto della particella  $\alpha$  e sarà, pertanto, diverso per diversi tipi di sostanze radioattive. Se si impiega uno strato spesso di materia radioattiva, solo le particelle  $\alpha$  dalla superficie hanno un range  $a$ . Quelle che raggiungono la superficie da una profondità  $d$  avranno un range diminuito di una quantità  $\rho d$ , dove  $\rho$  è la densità della sostanza radioattiva rispetto all'aria. Questa è semplicemente un'espressione del fatto che l'assorbimento dei raggi  $\alpha$  è proporzionale allo spessore e alla densità della materia attraversata. I raggi da uno strato spesso di materia attiva saranno, pertanto, complessi, e consisteranno di particelle con diverse velocità, i cui range avranno tutti i valori tra 0 e  $a$ .

Supponiamo che un fascio stretto di raggi  $\alpha$  sia emesso da uno strato spesso di materiale radioattivo e confinato mediante una lastra metallica di arresto come in Figura 39.

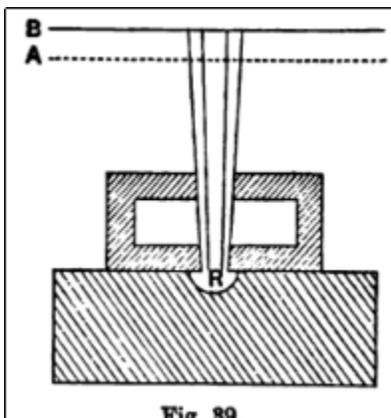


Fig. 39.

Il fascio di raggi passa in un contenitore di ionizzazione  $AB$  attraverso una sottile striscia di garza  $A$ . La quantità di ionizzazione sarà determinata tra  $A$  e  $B$  per diverse distanze  $h$  dalla sorgente dei raggi  $R$  dalla piastra  $A$ .

Tutte le particelle provenienti da una profondità  $x$  del materiale data da  $h = a - \rho x$  entreranno nel contenitore. Il numero di ioni prodotti ad una profondità  $dh$  del contenitore è uguale a  $nxdh$ , cioè a  $n \frac{(a-h)}{\rho} dh$ , dove  $n$  è una costante.

Se la profondità del contenitore è  $b$ , il numero totale di ioni prodotti nel contenitore è

$$\int_h^{h+b} \frac{a-h}{\rho} dh = \frac{nb}{\rho} \left( a-h - \frac{b}{2} \right)$$

Ciò presuppone che il fascio di particelle passi completamente attraverso il contenitore. In caso contrario, l'espressione diviene

$$\int_a^h n \frac{a-h}{\rho} dh = \frac{n(a-h)^2}{2\rho}$$

<sup>52</sup>Townsend, Phil. Mag. Febbraio 1901.

<sup>53</sup>Durack, Phil. Mag. Luglio 1902, Maggio 1902.

<sup>54</sup>Bragg e Bragg e Kleeman, Phil. Mag. Dicembre 10904.

Se si misura la ionizzazione nel contenitore  $AB$  e si traccia una curva mostrante la sua relazione con  $h$ , essa dovrebbe formare nel caso precedente una retta con pendenza  $\frac{nb}{\rho}$  e nell'ultimo una parabola.

Allora se si impiega un sottile strato di materiale radioattivo e un contenitore poco profondo, la ionizzazione sarà rappresentata da una curva come  $APM$  nella Figura 40, dove le ordinate rappresentano le distanze dalla sorgente e le ascisse la corrente di ionizzazione tra le piastre  $AB$ .

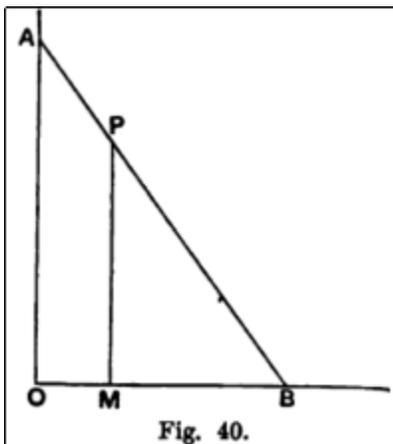


Fig. 40.

In questo caso,  $PM$  è il range delle particelle  $\alpha$  da uno strato inferiore della materia radioattiva. La corrente dovrebbe essere costante per tutte le distanze minori di  $PM$ .

Per uno strato spesso la curva dovrebbe essere una retta come  $APB$ .

Curve come quelle sopra mostrate si dovrebbero ottenere solo quando si impiegano coni definiti di raggi e dove il contenitore è corto e include l'intero cono dei raggi. In un tale caso non si ha la necessità di tener conto della legge dell'inverso del quadrato.

Negli esperimenti precedentemente illustrati (sezioni 99 e 100), la ionizzazione fu misurata tra piastre parallele distanti parecchi centimetri per una grande superficie del materiale radioattivo. Un tale dispositivo era necessario al tempo in cui erano fatti gli esperimenti, quando si disponeva solo di poco materiale radioattivo. Effetti elettrici misurabili non erano ottenuti con coni stretti di raggi e contenitori corti, ma questo svantaggio è ora rimosso con l'avvento di sorgenti di puro bromuro di radio.

Gli interessanti esperimenti descritti da Bragg e Kleeman mostrano che le curve teoriche sono approssimativamente ottenute. La principale difficoltà sperimentata in questa analisi dei risultati sperimentali era dovuta al fatto che il radio è una sostanza complessa e contiene quattro prodotti radioattivi ognuno dei quali produce raggi  $\alpha$  che hanno diversi range. Il carattere generale dei risultati ottenuti dal radio sono graficamente mostrati nella figura 41, curve  $A, B, C, D$ .

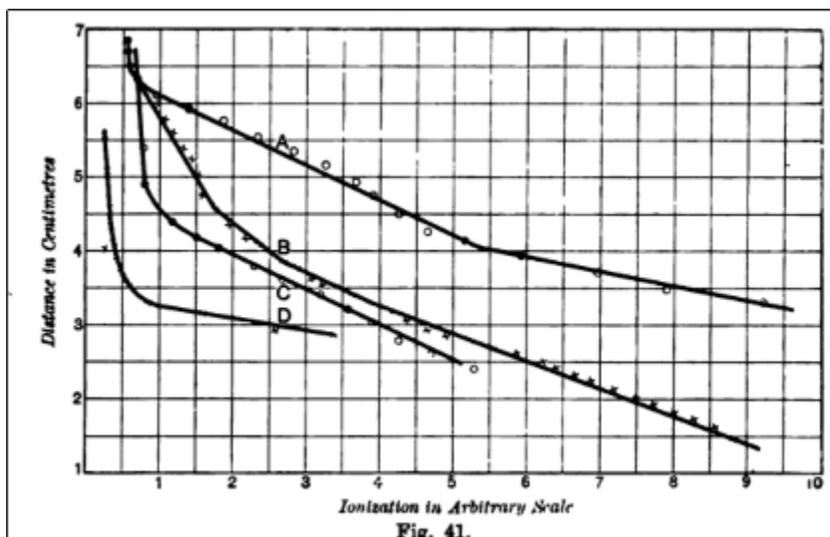


Fig. 41.

Le ordinate rappresentano la distanza tra il radio e la garza del contenitore di misura; le ascisse la corrente nel contenitore in unità arbitrarie. Furono usati cinque milligrammi di bromuro di radio, e la profondità del contenitore per ionizzazione era di circa  $5\text{ mm}$ . La curva  $A$  è per un cono di raggi di angolo  $20^\circ$ . La corrente iniziale ad una distanza di  $7\text{ cm}$  è dovuta ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  e alla perdita naturale. Questa curva è inizialmente parabolica, e poi è formata da due rette. La curva  $B$  è per un cono più piccolo, e mostra il carattere rettilineo della curva entro una breve distanza dal

radio. La curva  $C$  fu ottenuta nelle stesse condizioni della curva  $A$ , ma con uno strato d'oro posto sul radio. L'effetto è quello di ridurre tutte le ordinate della curva  $A$  della stessa quantità. Questo ci si deve attendere dalla semplice teoria già considerata. La curva  $D$  fu ottenuta quando il radio era riscaldato allo scopo di liberare l'emanazione e i suoi prodotti. Le particelle  $\alpha$  di range maggiore sono del tutto assenti e la curva ha una caratteristica più semplice.

La caratteristica complessa delle curve del radio emerge più chiaramente da un attento esame di una parte della curva a distanze tra 2 e 5  $cm$ . I risultati sono mostrati in Figura 42, che è approssimativamente formata da quattro segmenti di retta di diverse pendenze indicate da  $PQ, QR, RS, ST$ .

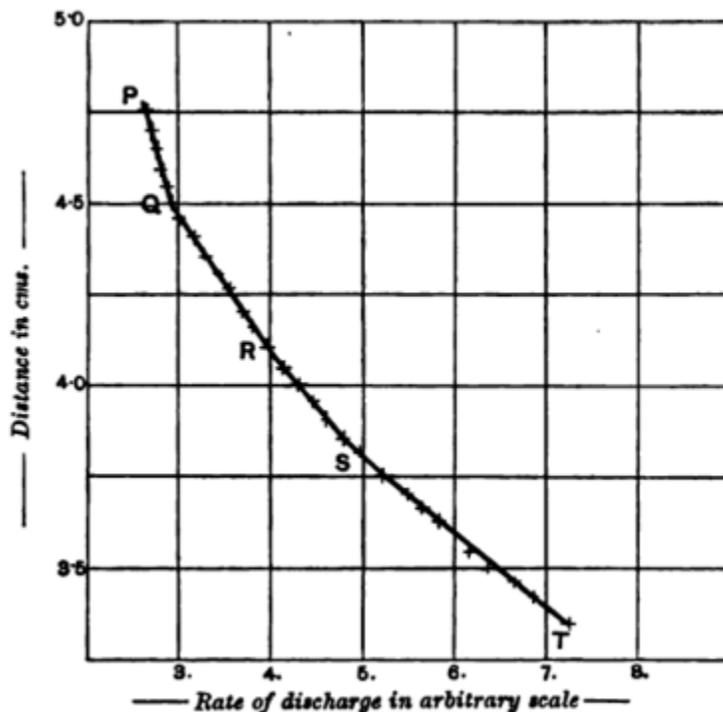


Fig. 42.

Un tale risultato è atteso, e si mostrerà in seguito che esistono nel radio quattro distinti prodotti con raggi  $\alpha$  quando si trova in equilibrio radioattivo. Ognuno di questi prodotti emette un ugual numero di particelle  $\alpha$  per secondo, ma il range di ognuno è diverso. Se  $a_1$  è il range di un fascio,  $a_2$  di un altro, la ionizzazione nel contenitore  $AB$ , quando i due fasci vi penetrano, dovrebbe essere

$$\frac{nb}{\rho} \left( a_1 - h - \frac{b}{2} \right) + \frac{nb}{\rho} \left( a_2 - h - \frac{b}{2} \right)$$

cioè

$$\frac{nb}{\rho} (a_1 + a_2 - 2h - b)$$

Pertanto, la pendenza della curva sarà in questo caso  $\frac{2nb}{\rho}$ , mentre se entra un solo fascio, sarà  $\frac{nb}{\rho}$ . Quando lo raggiungono in tre, la pendenza sarà  $\frac{3nb}{\rho}$  e per quattro  $\frac{4nb}{\rho}$ . Questi risultati si realizzano abbastanza correttamente in pratica. La curva della Figura 42 consiste di quattro parti, le cui pendenze sono in proporzione 16, 34, 45, 65, cioè molto vicino al rapporto 1, 2, 3, 4.

Gli esperimenti furono pure fatti con strati sottili di bromuro di radio, quando, come abbiamo visto (Figura 40), ci si attendeva una curva di forma diversa. Un esempio dei risultati è mostrato nella Figura 43, curve I, II e III. La curva I è ottenuta dal bromuro di radio che è stato riscaldato per eliminare l'emanazione e le curve II e III dalla stessa sostanza parecchi giorni dopo, quando l'emanazione si stava ancora accumulando. La parte  $PQ$ , che è assente nella prima curva, è probabilmente dovuta alla attività "eccitata" prodotta dall'emanazione. Da un esame attento delle successive variazioni nelle curve dopo che il radio è stato riscaldato per eliminare l'emanazione, è possibile notare il range dei raggi  $\alpha$  da ognuno dei diversi prodotti, e questo è stato fatto con una certa ampiezza da Bragg e Kleeman.

Si vedrà in seguito che i risultati qui ottenuti supportano una nuova teoria delle variazioni radioattive che si può ricavare dai dati con caratteristiche del tutto diverse.

La pendenza inversa della curva in Figura 43 dovuta al radio indica che le particelle  $\alpha$  diventano ionizzatori più efficienti al diminuire della loro velocità. Questo è in accordo con le osservazioni sui raggi  $\beta$ . In alcuni casi Bragg ha pure osservato che le particelle  $\alpha$  sono ionizzatori più efficienti prima di perdere il loro potere ionizzante del gas.

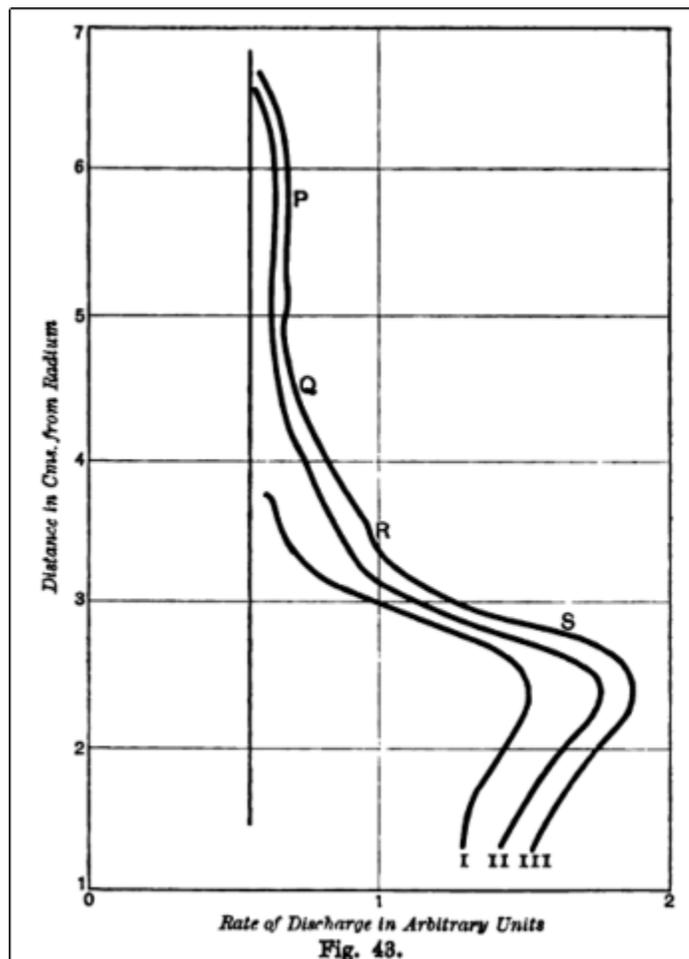


Fig. 43.

Si può concludere, pertanto, da questi esperimenti che le particelle  $\alpha$  da una semplice sostanza radioattiva attraversano una definita distanza in aria, ad una definita pressione e temperatura e che la ionizzazione termina abbastanza rapidamente. Se i raggi attraversano un foglio di metallo, il range effettivo di ionizzazione è diminuito di una distanza corrispondente a  $\rho d$ , dove  $\rho$  è la densità del materiale confrontato con l'aria e  $d$  il suo spessore. I raggi  $\alpha$  da uno spesso strato di una semplice sostanza radioattiva consistono di particelle  $\alpha$  di diverse velocità, che hanno range in aria che stanno tra 0 e il range massimo. La ionizzazione delle particelle per unità di cammino è maggiore vicino alla fine del suo range e diminuisce alquanto avvicinandosi alla sorgente radiante. Una sorgente complessa di raggi come il radio emette quattro tipi di raggi, ognuno dei quali ha un diverso ma distinto range.

Da questa teoria è possibile calcolare approssimativamente la diminuzione di corrente osservata quando i fogli metallici sono posti su una grande area di sostanza radioattiva. Questo è un metodo che è stato impiegato per ottenere le curve delle Figure 35 e 38.

Supponiamo di impiegare uno strato molto sottile di materia radioattiva semplice (per esempio una piastra di bismuto ricoperta con radio-tellurio o una piastra metallica resa attiva per esposizione alla presenza delle emanazione del torio o del radio) e che il contenitore della ionizzazione sia sufficientemente profondo da assorbire completamente i raggi  $\alpha$ .

Sia  $d$  lo spessore della lastra metallica,  $\rho$  la sua densità rispetto all'aria. Consideriamo un punto  $P$  vicino al lato superiore della piastra. Il range delle particelle che provengono da un punto, quando il cammino forma un angolo  $\theta$  con la normale in  $P$ , è  $a - \rho d \sec \theta$ , dove  $a$  è il range in aria. I raggi provenienti dai punti tali che il cammino forma un angolo con la normale maggiore del  $\cos^{-1} \left( \frac{\rho d}{a} \right)$  sarà allora assorbito nella piastra. Integrando sull'area circolare sottesa dal punto  $P$ , è facile mostrare che la ionizzazione totale nel contenitore è proporzionale a

$$\int_0^{\cos^{-1} \left( \frac{\rho d}{a} \right)} 2\pi \sin \theta \cos \theta (a - \rho d \sec \theta) d\theta = \pi \frac{(a - \rho d)^2}{a}$$

Le curve che mostrano la relazione tra la corrente e la distanza del metallo attraversato sarà, pertanto, parabolica rispetto a  $d$ . Questo è approssimativamente il caso per una sostanza semplice come il radio-tellurio. La curva per uno strato spesso di radio sarà difficile da calcolare a causa della complessità dei raggi, ma sappiamo dagli esperimenti che è approssimativamente esponenziale. Un resoconto delle più recenti indagini fatte per determinare il range di velocità entro il quale le particelle  $\alpha$  sono in grado di ionizzare il gas è riportato nell'Appendice A. I risultati qui dati supportano fortemente la teoria dell'assorbimento dei raggi  $\alpha$  discussa sopra.

### Parte V - I $\gamma$ o raggi molto penetranti

**105.** Oltre ai raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , le tre sostanze attive, uranio, torio e radio, emettono tutte una radiazione con una penetrazione caratteristica straordinaria. Questi raggi  $\gamma$  sono considerevolmente più penetranti dei raggi X prodotti in un tubo con un vuoto "spinto". La loro presenza può facilmente essere osservata da una sostanza attiva come il radio, ma è difficile da rivelare per l'uranio e il torio a meno di usare una grande quantità di materiale attivo.

Villard<sup>55</sup>, usando il metodo fotografico, attirò per primo l'attenzione sul fatto che il radio emetteva questi raggi molto penetranti, e trovò che essi non erano deviati da un campo magnetico. Questo risultato fu confermato da Becquerel<sup>56</sup>.

Usando pochi milligrammi di bromuro di radio, i raggi  $\alpha$  possono essere rivelati in una camera oscura attraverso la luminosità che eccitano nel minerale willemite o su uno schermo di platinocianuro di bario. I raggi  $\alpha$  e  $\beta$  sono completamente assorbiti ponendo uno spessore di 1 *cm* di piombo sopra il radio, e i raggi che poi passano attraverso il piombo sono composti dai soli raggi  $\gamma$ . Il potere di penetrazione molto grande di questi raggi è facilmente osservato notando la piccola diminuzione della luminosità dello schermo quando piastre di metallo spesse parecchi centimetri sono poste tra il radio e lo schermo. Questi raggi producono pure ionizzazione nei gas e sono molto analizzati con il metodo elettrico. La presenza dei raggi  $\gamma$  emessi da 30 *mg* di bromuro di radio può essere osservata in un elettroscopio dopo essere passati attraverso 30 *cm* di ferro.

**106. Assorbimento dei raggi  $\gamma$ .** Da un esame della sostanza attiva con il metodo elettrico, chi scrive<sup>57</sup> trovò che sia l'uranio che il torio emettevano raggi  $\gamma$  in quantità all'incirca proporzionale alla loro attività. Fu utilizzato un elettroscopio del tipo mostrato in Figura 12. Questo era posto su un largo piatto di piombo spesso 0.65 *cm* di sostanza attiva collocata sotto un contenitore chiuso.

Si osservò dapprima la scarica dovuta alla ionizzazione naturale dell'aria nell'elettroscopio e in seguito quella aggiuntiva dovuta alla sostanza attiva che doveva essere prodotta dai raggi che erano passati attraverso il piatto di piombo e le pareti dell'elettroscopio. La tabella seguente mostra che la scarica dovuta a questi raggi diminuisce approssimativamente secondo la legge esponenziale con lo spessore di piombo attraversato.

Spessore piombo 0.62 <i>cm</i>	Tasso di scarica
0.62 <i>cm</i>	100
+ 0.64 <i>cm</i>	67
+ 2.86 <i>cm</i>	23
+ 5.08 <i>cm</i>	8

Usando 100 *g* di uranio e torio, la scarica dovuta ai raggi attraverso 1 *cm* di piombo era del tutto apprezzabile, e facilmente misurabile. I risultati mostrarono che la quantità di raggi  $\gamma$  era circa la stessa per uguali pesi di torio e ossido di uranio. Il potere di penetrazione era pure circa lo stesso per i raggi del radio.

Chi scrive mostrò che l'assorbimento dei raggi  $\gamma$  dal radio era approssimativamente proporzionale alla densità della sostanza attraversata. Un esame più dettagliato dell'assorbimento di questi raggi in varie sostanze è stato recentemente fatto da McClelland<sup>58</sup>. La curva (Figura 44) mostra la diminuzione della corrente di ionizzazione in un contenitore dovuta ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  con strati successivi di piombo. Si vede che i raggi  $\beta$  sono quasi completamente arrestati da 4 *mm* di piombo; la ionizzazione è allora interamente dovuta ai raggi  $\gamma$ .

<sup>55</sup>Villard, C. R. 130, pp. 1010, 1178, 1900.

<sup>56</sup>Becquerel, C. R. 130, p. 1154, 1900.

<sup>57</sup>Rutherford, Phys. Zeit. 3, p. 517, 1902.

<sup>58</sup>McClelland, Phil. Mag. Luglio 1904.

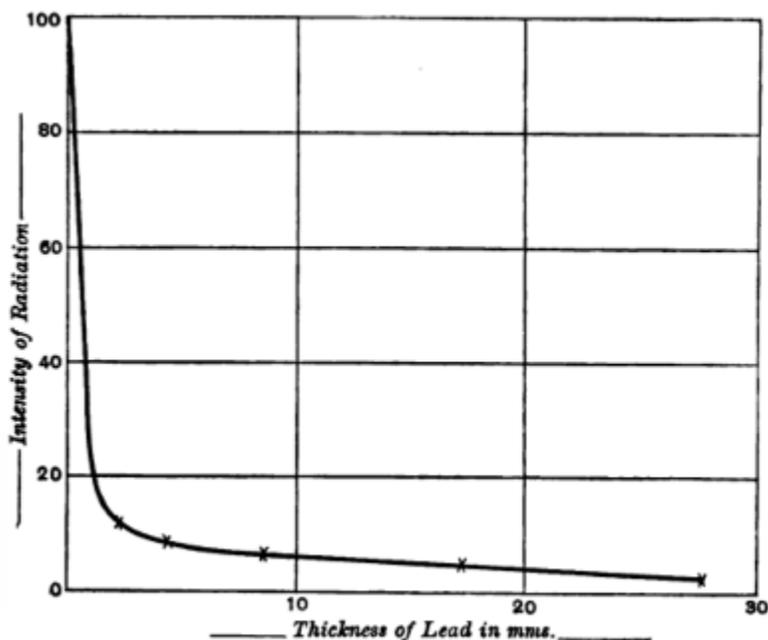


Fig. 44.

Per eliminare ogni dubbio sul fatto che tutti i raggi  $\beta$  sono assorbiti, il radio era ricoperto con piombo spesso 8 *mm* e furono eseguite esperienze del coefficiente di assorbimento  $\lambda$  per spessori addizionali. Il valore medio di  $\lambda$ , fu calcolato dalla solita equazione  $\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda d}$ , dove  $d$  è lo spessore del materiale attraversato. La tabella seguente mostra il valore di  $\lambda$ , (I) per i primi 2.5 *mm* di materia attraversata (dopo esser passata inizialmente attraverso 8 *mm* di piombo), (II) per lo spessore da 2.5 a 5 *mm*, (III) da 5 a 10 *mm*, (IV) da 10 a 15 *mm*.

TABELLA A

Sostanza	I	II	III	IV
Platino	1.167			
Mercurio	0.726	0.661	0.538	0.493
Piombo	0.641	0.563	0.480	0.440
Zinco	0.282	0.266	0.248	0.266
Alluminio	0.104	0.104	0.104	0.104
Vetro	0.087	0.087	0.087	0.087
Acqua	0.034	0.034	0.034	0.034

Nella tabella sopra, l'assorbimento in alluminio, vetro e acqua sono troppo piccoli per determinare con precisione la variazione di  $\lambda$  con la distanza attraversata. Si osserva che, per sostanze più dense, il coefficiente di assorbimento diminuisce con la distanza attraversata dai raggi. Ciò indica che i raggi sono eterogenei. La variazione di  $\lambda$  è più marcata nelle sostanze pesanti.

La tabella B dà i valori di  $\lambda$  divisi per la densità per i numeri sopra. Se l'assorbimento fosse direttamente proporzionale alla densità, il quoziente dovrebbe essere lo stesso in tutti i casi.

TABELLA B  
 $\lambda$  diviso per la densità

Sostanza	I	II	III	IV
Platino	0.054			
Mercurio	0.053	0.048	0.039	0.036
Piombo	0.056	0.049	0.042	0.037
Zinco	0.039	0.037	0.034	0.033
Alluminio	0.038	0.038	0.038	0.038
Vetro	0.034	0.034	0.034	0.034
Acqua	0.034	0.034	0.034	0.034

I numeri nella colonna I variano considerevolmente, ma l'accordo diviene migliore nelle colonne successive, fino alla colonna IV l'assorbimento è molto vicino alla proporzionalità con la densità.

Si vede che l'assorbimento di tutti i tre tipi di raggi dalle sostanze radioattive è approssimativamente proporzionale alla densità delle sostanze attraversate - una relazione osservata la prima volta da Lenard per i raggi catodici. Questa legge dell'assorbimento vale per entrambe le particelle cariche, positive e negative, emesse dalle sostanze radioattive, e anche

per gli impulsi elettromagnetici che si ritengono costituire i raggi  $\gamma$ ; sebbene l'assorbimento dei raggi  $\alpha$ , per esempio, sia 10000 volte maggiore di quello dei raggi  $\gamma$ . Abbiamo visto nella sezione 84 che i valori della costante di assorbimento  $\lambda$  per il piombo è 122 per i raggi  $\beta$  dall'uranio. Il valore per i raggi  $\gamma$  dal radio varia tra 0.64 e 0.44, mostrando che i raggi  $\gamma$  sono penetranti più di 200 volte dei raggi  $\beta$ .

**107. La natura dei raggi.** Oltre al loro grande potere di penetrazione, i raggi  $\gamma$  differiscono dagli  $\alpha$  e  $\beta$  per non essere deflessi in modo significativo da un campo elettrico o magnetico. In un intenso campo magnetico, si può mostrare, usando il metodo fotografico, che vi è una improvvisa discontinuità tra i raggi  $\beta$  e  $\alpha$ , dove i primi sono curvati completamente più dei secondi. Ciò indica che, rispetto all'azione di un campo magnetico, non vi è una graduale transizione delle proprietà magnetiche tra i raggi  $\beta$  e  $\alpha$ . Paschen<sup>59</sup> ha esaminato i raggi  $\gamma$  in un campo magnetico molto intenso, e, dall'assenza di una loro deflessione, ha calcolato che, se fossero particelle o ioni carichi, e fossero emessi con una velocità vicina a quella della luce, la loro massa apparente dovrebbe essere almeno 45 volte quella dell'atomo di idrogeno.

Ci rimane ora da considerare se i raggi  $\gamma$  hanno caratteristiche corpuscolari o sono impulsi elettromagnetici del tutto simili ai raggi Röntgen. Essi assomigliano ai raggi Röntgen per il loro grande potere di penetrazione e per la mancanza di deflessione in un campo magnetico. I primi esperimenti sembravano indicare una importante differenza tra l'azione dei raggi  $\gamma$  e degli X. È noto che i raggi X producono molta più ionizzazione in gas come l'idrogeno solforato e acido cloridrico, rispetto all'aria, sebbene le differenze nella densità non siano molto grandi. Per esempio, esposto ai raggi X, l'idrogeno solforato ha sei volte la conduttività dell'aria, mentre con i raggi  $\gamma$  la conduttività supera solo di poco quella dell'aria. I risultati ottenuti da Strutt, in questo contesto, sono già stati proposti nella sezione 45. Si è mostrato che la conduttività relativa dei gas esposti ai raggi  $\gamma$  (e anche ai raggi  $\alpha$  e  $\beta$ ) è, nella maggioranza dei casi, quasi proporzionale alle loro densità relative; ma, con i raggi X, la conduttività relativa per alcuni gas e vapori è molto maggiore di quella dei raggi  $\gamma$ . Si deve ricordare, tuttavia, che i risultati ottenuti da Strutt riguardavano raggi X "molliti", il cui potere di penetrazione era molto minore di quello dei raggi  $\gamma$ . Per vedere se la conduttività relativa dei gas prodotta dai raggi X dipendeva dal loro potere di penetrazione, A. S. Eve<sup>60</sup> fece una serie di esperimenti con un tubo di raggi X "duri" che dettero un insolito tipo di penetrazione dei raggi.

I risultati delle misure sono mostrati nella tabella seguente, dove è espressa la conduttività per ogni tipo di raggi relativa all'aria presa come unitaria. I risultati ottenuti per i raggi X "molliti" da Strutt e da Eve per i raggi  $\gamma$  sono aggiunti come termine di confronto.

Si vede che i raggi duri mostrano un più stretto accordo di quelli molliti con la legge della densità trovata per i raggi  $\gamma$ . I valori più alti precedentemente ottenuti per i vapori di cloroformio e tetracloruro di carbonio sono fortemente ridotti e sono quasi gli stessi per i raggi  $\gamma$ . D'altro canto, il vapore di ioduro di metile è un'eccezione, e mostra pure un'alta conduttività. I raggi  $\gamma$  erano, tuttavia, quaranta volte penetranti come i raggi X duri ed è probabile che il valore dello ioduro di metile debba essere ridotto con i raggi X più penetranti.

Gas	Conduttività relative dei gas			
	Densità relativa	Raggi X "molliti"	Raggi X "duri"	Raggi $\gamma$
Idrogeno	0.07	0.11	0.42	0.19
Aria	1.0	1.0	1.0	1.0
Idrogeno solforato	1.2	6	0.9	1.23
Cloroformio	4.3	32	4.6	4.8
Ioduro di Metile	5.0	72	13.5	5.6
Tetracloruro di Carbonio	5.3	45	4.9	5.2

I raggi X duri producevano molta più radiazione secondaria dei raggi  $\gamma$ , ma questo effetto è probabilmente pure una funzione del potere di penetrazione dei raggi primari. Si vedrà in seguito (sezione 112) che i raggi  $\gamma$  danno origine ad una radiazione secondaria di raggi del tipo dei  $\beta$ . Questo è stato osservato pure per i raggi X.

Considerando le evidenze sperimentali nella loro completezza, vi è un'indubitabile somiglianza tra le proprietà degli X e dei  $\gamma$ . Si può pensare che i raggi  $\gamma$  sono come dei raggi X molto penetranti, e ciò è sostenuto anche da considerazioni teoriche. Abbiamo visto (sezione 52) che i raggi X sono considerati come impulsi elettromagnetici, simili per alcuni aspetti alle onde corte di luce, che compaiono per l'improvviso arresto delle particelle dei raggi catodici. Al contrario, ci si aspetta pure che i raggi X siano prodotti all'improvvisa partenza, così come all'improvviso arresto degli elettroni. Poiché la maggior parte delle particelle  $\beta$  dal radio sono emesse dall'atomo di radio con velocità molto maggiori di quelle delle particelle del catodo in un tubo a vuoto, i raggi X si presenteranno con una caratteristica di grande penetrazione. Ma l'argomento più forte a sostegno di questo punto di vista è derivato dall'esame dell'origine e della connessione dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  dalle sostanze radioattive. Si mostrerà in seguito che l'attività dei raggi  $\alpha$  osservata nel radio deriva da parecchi prodotti di disintegrazione, accumulati nel radio, mentre i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  derivano solo da questo prodotto chiamato radio C. Si trova

<sup>59</sup>Paschen, Phys. Zeit. 5, No 18, p. 568, 1904.

<sup>60</sup>A. S. Eve, Phil. Mag. Novembre 1904.

che l'attività misurata dai raggi  $\gamma$  è sempre proporzionale all'attività misurata dai raggi  $\beta$ , sebbene dalla separazione dei prodotti l'attività di questi ultimi possa subire grandi variazioni.

Pertanto, l'intensità dei raggi  $\gamma$  è sempre proporzionale al tasso di emissione delle particelle  $\beta$ , e questo risultato indica che vi è una stretta connessione tra i raggi  $\gamma$  e  $\beta$ . Un tale risultato è atteso se la particella  $\beta$  è la genitrice del raggio  $\gamma$ , e l'espulsione di ogni elettrone dal radio produrrà un breve impulso sferico viaggiante dal punto della perturbazione con la velocità della luce.

**108.** Vi è un'altra possibile ipotesi riguardo la natura di questi raggi. È stato mostrato (sezioni 48 e 82) che la massa apparente di un elettrone aumenta avvicinandosi alla velocità della luce; secondo la teoria dovrebbe essere molto grande quando la velocità dell'elettrone è estremamente vicina alla velocità della luce. In un tale caso, un elettrone in movimento sarebbe difficilmente deviabile da un campo elettrico o magnetico.

L'ipotesi che i raggi  $\gamma$  siano elettroni che trasportano una carica negativa e che si muovono con una velocità prossima a quella della luce è stata sostenuta da Paschen<sup>61</sup>. Egli concluse dagli esperimenti che i raggi  $\gamma$  come i raggi  $\beta$  trasportano una carica negativa. Abbiamo visto (sezione 85) che anche Seitz osservò che una piccola carica era comunicata ai corpi colpiti dai raggi  $\gamma$ , ma il valore di questa carica era molto più piccolo di quello osservato da Paschen. Non penso che si possa dare molto peso alle osservazioni relative alla piccola carica comunicata ai corpi colpiti dai raggi  $\gamma$ , perché mostrerò in seguito che una forte radiazione secondaria, formata in parte di elettroni, compare durante il passaggio dei raggi  $\gamma$  attraverso la materia. Non è improbabile che la piccola carica osservata non sia un risultato diretto della carica trasportata dai raggi  $\gamma$ , ma che sia un effetto indiretto dovuto alle radiazioni secondarie emessa dalla superficie dei corpi. Non vi è dubbio che un contenitore spesso di piombo, completamente circondante una quantità di radio, acquisti una piccola carica positiva, ma questo risultato potrebbe seguire sia che i raggi  $\gamma$  trasportino o meno una carica, poiché la radiazione secondaria dalla superficie del piombo è formata da particelle emesse che trasportano una carica negativa.

Secondo questa teoria corpuscolare dei raggi  $\gamma$ , ogni elettrone deve avere una grande massa apparente, o altrimenti dovrebbe essere deflesso in modo apprezzabile da un intenso campo magnetico. L'energia di moto dell'elettrone deve, di conseguenza, essere molto grande, e, se il numero di elettroni che costituiscono i raggi  $\gamma$  è dello stesso ordine di grandezza del numero di particelle  $\beta$ , ci si dovrebbe attendere un grande effetto di riscaldamento quando i raggi  $\gamma$  sono stoppati dalla materia. Paschen<sup>62</sup> eseguì alcuni esperimenti sull'emissione di calore del radio dovuta ai raggi  $\gamma$ ; concluse che i raggi  $\gamma$  erano responsabili di più della metà dell'emissione totale del calore del radio e trasportavano energia con un tasso di oltre 100 grammi calorie per ora per grammo di radio. Questo risultato non fu confermato più tardi da esperimenti di Rutherford e Barnes<sup>63</sup>, i quali trovarono che l'effetto di riscaldamento dei raggi  $\gamma$  era solo di pochi valori percentuali dell'emissione totale di calore del radio. Questi risultati saranno considerati in seguito nel capitolo XII.

Il peso dell'evidenza, sia sperimentale sia teorica, attualmente sostiene il punto di vista che i raggi  $\gamma$  sono della stessa natura dei raggi X ma con una capacità di penetrazione maggiore. La teoria che i raggi X consistono di impulsi non periodici nell'etere, prodotti quando il moto degli elettroni è arrestato, ha trovato maggior favore, sebbene sia difficile produrre verifiche sperimentali per decidere in modo definitivo la questione. L'evidenza maggiore a sostegno della natura ondulatoria dei raggi X è derivata dagli esperimenti di Barkla<sup>64</sup>, che trovò che la quantità di radiazione secondaria prodotta dai raggi X nell'urto di una superficie metallica dipendeva dall'orientazione del bulbo X. I raggi allora mostravano evidenze di una unilateralità o polarizzazione che è attesa solo se i raggi consistono di un moto ondulatorio nell'etere.

## Raggi Secondari

**109. Produzione di raggi secondari.** È noto da lungo tempo che i raggi Röntgen, quando colpiscono un ostacolo solido, producono raggi secondari di minore potere di penetrazione di quelli incidenti. Ciò fu mostrato per primo da Perrin ed è stato studiato in dettaglio da Sagnac, Langevin, Townsend e altri. Pertanto, non è sorprendente che fenomeni simili possano essere osservati per la radiazione dalle sostanze radioattive. Per mezzo del metodo fotografico, Becquerel<sup>65</sup> ha fatto uno studio approfondito delle radiazioni secondarie prodotte dalle sostanze radioattive. Nelle sue prime osservazioni, notò che radiografie di oggetti metallici erano sempre circondate da un contorno diffuso. Questo effetto è dovuto ai raggi secondari prodotti dai raggi incidenti alla superficie dello schermo.

I raggi secondari prodotti dai raggi  $\alpha$  erano molto deboli. Erano meglio visibili per il polonio, che emette solo raggi  $\alpha$ , così che i risultati non sono complicati dall'azione dei raggi  $\beta$ . Intensi raggi secondari sono prodotti nel punto di impatto dei  $\beta$  o dei raggi catodici. Becquerel trovò che la grandezza di questa azione dipendeva fortemente dalla velocità dei raggi. Quelli con velocità più basse producono azioni secondarie intense, mentre quelli più penetranti danno, in confronto, effetti secondari limitati. A causa della presenza di questa radiazione secondaria, l'immagine fotografica su uno schermo è forata con buchi non chiari e distinti. In ogni caso vi è una doppia immagine fotografica, dovuta ai raggi primari e a quelli secondari da essi prodotti.

<sup>61</sup>Paschen, Annal. d. Physik, 14, p. 114, 1904; 14, 2, p. 389, 1904. Phys. Zeit. 5, No. 18, p. 563, 1904.

<sup>62</sup>Paschen, Phys. Zeit. 5, No. 18, p. 563, 1904.

<sup>63</sup>Rutherford e Barnes, Phil. Mag. Maggio 1905. Nature, p. 151, 15 Dicembre 1904.

<sup>64</sup>Barkla, Nature, 17 marzo 1904.

<sup>65</sup>Becquerel, C. R. 132, pp. 371, 734, 1286. 1901.

Questi raggi secondari sono deviabili da un campo magnetico, e a loro volta producono raggi terziari e così via. I raggi secondari sono in tutti i casi facilmente deviati e assorbiti più dei raggi primari, dai quali derivano. I raggi  $\gamma$  veramente penetranti producono raggi secondari, che causano una intensa azione sulla lastra fotografica. Quando si poneva del radio in una cavità all'interno di un profondo blocco di piombo, di forma rettangolare, oltre all'immagine dovuta ai raggi diretti attraverso il piombo, Becquerel osservò che vi era anche una forte immagine dovuta ai raggi secondari emessi dalla superficie del piombo. L'azione di questi raggi secondari sulla lastra è così forte che l'effetto sulla stessa è, in molti casi, accresciuto dall'aggiunta di uno schermo metallico tra il materiale attivo e la piastra.

L'azione fotografica comparativa dei raggi primari e secondari non può essere presa come misura relativa dell'intensità della loro radiazione. Per esempio, solo una piccola parte dell'energia dei raggi  $\beta$  è in generale assorbita nelle pellicole sensibili. Poiché i raggi secondari sono più facilmente assorbiti dei raggi primari, una proporzione molto maggiore della loro energia è spesa nel produrre l'azione fotografica che nel caso dei raggi primari. Non è pertanto sorprendente che i raggi secondari prodotti dai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  possano in alcuni casi produrre un'immagine fotografica confrontabile con, se non più grande, dell'effetto dei raggi incidenti.

A causa di questi raggi secondari, le radiografie prodotte dai raggi  $\beta$  del radio in generale mostrano un contorno diffuso attorno all'ombra dell'oggetto. Per questo motivo le radiografie di questo tipo mancano della definizione che caratterizza le fotografie dei raggi X.

**110. Radiazione secondaria prodotta dai raggi  $\alpha$ .** Marie Curie<sup>66</sup> ha mostrato mediante il metodo elettrico che i raggi  $\alpha$  del polonio producono raggi secondari. Il metodo adottato consisteva nel confrontare la corrente di ionizzazione tra due piatti paralleli, quando due schermi di diverso materiale, posti sopra il polonio, venivano scambiati.

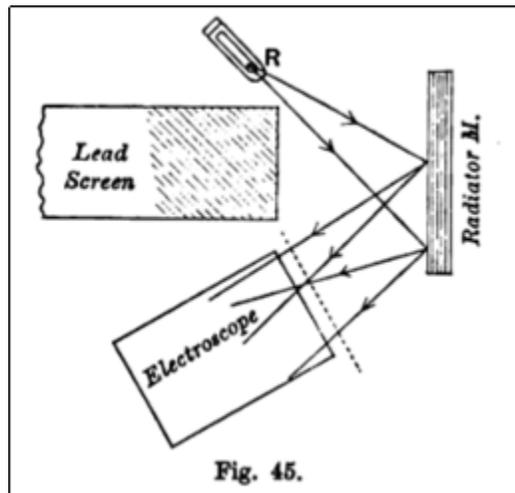
Questi risultati mostrano che i raggi  $\alpha$  del polonio sono modificati nel passaggio attraverso la materia, e che la quantità di raggi secondari prodotta varia con schermi di diverso materiale. Mme Curie, usando lo stesso metodo, non fu in grado di osservare un tale effetto per i raggi  $\beta$  del radio. La produzione di raggi secondari da parte dei raggi  $\beta$  del radio è, tuttavia, facilmente mostrata dal metodo fotografico. Abbiamo già visto (sezione 93) che elettroni con velocità molto basse accompagnano i raggi  $\alpha$  del radio o del radio-tellurio distribuito su una piastra metallica. Questi elettroni sono probabilmente liberati quando i raggi  $\alpha$  sfuggono da o urtano la materia, e il numero emesso dipende dal tipo di materiale usato per lo schermo. Le differenze mostrate nella tabella sotto quando gli schermi erano scambiati sono semplicemente spiegate in questo modo.

Schermo impiegato	Spessore in <i>mm</i>	Corrente osservata
Alluminio	0.01	17.9
Cartone	0.005	
Cartone	0.005	6.7
Alluminio	0.01	
Alluminio	0.01	150
Stagno	0.005	
Stagno	0.005	126
Alluminio	0.01	
Stagno	0.005	13.9
Cartone	0.005	
Cartone	0.005	4.4
Stagno	0.005	

**111. Raggi secondari prodotti dai raggi  $\beta$  e  $\gamma$ .** Un esame della quantità e del carattere della radiazione secondaria emessa da diverse sostanze, esposte ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  del radio, è stato recentemente fatto da A. S. Eve<sup>67</sup>. Il metodo sperimentale generale impiegato è mostrato in Figura 45.

<sup>66</sup>Mme Curie, Tesi presentata alla Facoltà di Scienze, Parigi 1903, p. 85.

<sup>67</sup>A. S. Eve, Phil. Mag. Dicembre, 1904.



L'elettroscopio (Figura 45) era posto dietro uno schermo di piombo dello spessore di  $4.5\text{ cm}$ , che bloccava tutti i raggi  $\beta$  e assorbiva la proporzione maggiore dei raggi  $\gamma$  dal tubo del radio posto in R. Portando vicino un piatto di materiale M, i raggi primari cadevano su di esso e alcuni raggi secondari, emessi in tutte le direzioni, passavano nell'elettroscopio, che era ricoperto con un foglio di alluminio spesso  $0.5\text{ mm}$ . Prima che il piatto M fosse posizionato, il tasso di scarica dell'elettroscopio era dovuto alla perdita naturale e ai raggi  $\gamma$  da R, e alla radiazione secondaria dall'aria. Mettendo il radiatore M in posizione, il tasso di scarica aumentava molto e la differenza tra il ritmo di movimento della foglia d'oro nei due casi era preso come misura della quantità di radiazione secondaria da M. L'assorbimento dei raggi secondari era misurato ponendo una piastra di alluminio spessa  $0.85\text{ mm}$  prima della faccia dell'elettroscopio.

Si è trovato che i raggi secondari erano abbastanza omogenei, e la diminuzione di intensità era in accordo con la legge esponenziale in funzione della distanza attraversata. Il valore della costante di assorbimento  $\lambda$  era determinato dalla solita equazione  $\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda d}$ , dove  $d$  era lo spessore dello schermo. La tabella seguente mostra i risultati ottenuti quando piastre spesse di differenti sostanze delle stesse dimensioni erano poste in una data posizione in M. La radiazione secondaria dai fluidi era ottenuta con una piccola modifica del dispositivo sperimentale.

Si usavano  $30\text{ mg}$  di bromuro di radio, e i risultati sono espressi in termini del numero di divisioni di scala superate al secondo dalla foglia d'oro.

Si osservò che la quantità di radiazione secondaria seguiva nella maggior parte dei casi lo stesso andamento della densità, ed era maggiore per il mercurio. Il valore del rapporto  $\frac{\text{radiazione secondaria}}{\text{densità}}$  non è una costante, ma varia considerevolmente, essendo maggiore per sostanze leggere. La costante di assorbimento dei raggi secondari da diversi irraggiatori non è molto diversa, ad eccezione delle sostanze come il granito, il mattone e il cemento, che producono raggi secondari di potere di penetrazione quasi doppio delle altre.

Irraggiatore	Densità	Radiazione secondaria	$\frac{\text{radiazione secondaria}}{\text{densità}} \lambda_{Al} = 0.85 \text{ cm}$	
Mercurio	13.6	147	10.8	
Piombo	11.4	141	12.4	18.5
Rame	8.8	79	9.0	20
Ottone	8.4	81	9.6	21
Ferro (battuto)	7.8	75	9.6	20
Stagno	7.4	73	9.9	20.3
Zinco	7.0	79	11.3	
Granito	2.7	54	20.0	12.4
Ardesia	2.6	53	20.4	12.1
Alluminio	2.6	42	16.1	24
Vetro	2.5	44	17.6	24
Cemento	2.4	47	19.6	13.5
Mattone	2.2	49	22.3	13.0
Ebanite	1.1	32	29.1	26
Acqua	1.0	24	24.0	21
Ghiaccio	0.92	26	28.2	
Paraffina solida	0.9	17	18.8	21
Paraffina liquida	0.85	16	18.8	
Mogano	0.56	21.4	38.2	23
Carta	0.4 ?	21.0	52	22
Asse di fabbrica	0.4 ?	19.4	48	20.5
Cartapesta	—	21.9		
Tiglio americano	0.36	20.7	57	22
Pino	0.35	21.8	62	21
Schermo raggi X	—	75.2	—	23.6

La radiazione secondaria non solo proviene dalla superficie irradiante ma da una considerevole profondità. La quantità di raggi secondari aumenta con lo spessore dell'irraggiatore, e, nel caso del vetro e dell'alluminio, raggiunge un massimo per piastre di circa  $3 \text{ mm}$  di spessore.

Nella tabella sopra, la radiazione secondaria deriva insieme dai raggi  $\beta$  e  $\gamma$ . Quando i raggi  $\beta$  erano eliminati con uno strato di piombo di  $6.3 \text{ mm}$  di spessore, posto tra il radio e l'irraggiatore, l'effetto sull'elettroscopio era ridotto di almeno il 20% del suo valore iniziale, mostrando che i raggi  $\beta$  fornivano più dell'80% della radiazione secondaria. La tabella seguente mostra la quantità relativa di raggi secondari da diverse sostanze esposte insieme ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  e ai soli raggi  $\gamma$ . La quantità dal piombo in ogni caso è presa come standard uguale a 100. La quantità di radiazione secondaria trovata da Townsend dai raggi X molli è aggiunta come termine di paragone.

Irraggiatore	Raggi $\beta$ e $\gamma$	Raggi $\gamma$	Röntgen
Piombo	100	100	100
Rame	57	61	291
Ottone	58	59	263
Zinco	57	—	282
Alluminio	30	30	25
Vetro	31	35	31
Paraffina	12	20	125

Si osserverà che le quantità relative sono circa le stesse per i soli raggi  $\gamma$  sia per i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  insieme. D'altro canto, la quantità di radiazione secondaria prodotta dai raggi X è molto diversa, dando, per esempio, per il piombo molto meno dell'ottone o del rame. I raggi secondari dai soli raggi  $\gamma$  sono di poco meno penetranti dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  insieme, ma sono molto più penetranti della radiazione secondaria dai raggi X esaminata da Townsend.

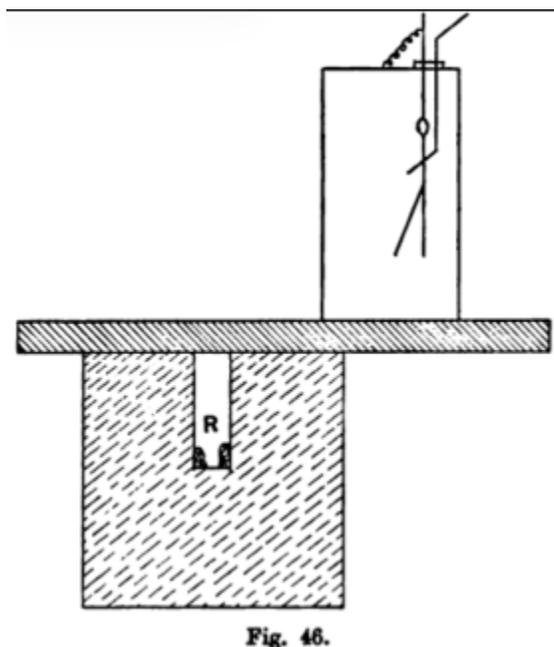
La quantità di radiazione secondaria prodotta dai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  è per lo più indipendente dallo stato della superficie dell'irraggiatore. Si ottiene circa la stessa quantità dal ferro come dalla limatura di ferro; dalla paraffina liquida così come quella solida; e dal ghiaccio come dall'acqua<sup>68</sup>.

<sup>68</sup>In un recente articolo (*Phil. Mag.* febbraio 1905), McClelland ha, nella parte principale, confermato i risultati sperimentali ottenuti da Eve. Usò un elettrometro invece di un elettroscopio. Trovò, inoltre, che la quantità di radiazione secondaria dipende dall'angolo di incidenza dei raggi primari, ed è maggiore per un angolo di  $45^\circ$ . In una lettera a *Nature* (23 febbraio, p. 390, 1905), affermò che esperimenti più recenti avevano mostrato che la quantità di radiazione secondaria da diverse sostanze è una funzione del loro peso atomico piuttosto che della loro densità. In tutti i casi esaminati, la quantità di radiazione secondaria aumenta con il peso atomico, ma non è proporzionale ad esso.

Becquerel ha mostrato che i raggi secondari prodotti dai raggi  $\beta$  sono deflessi da un magnete e consistono di particelle cariche negativamente (elettroni). È stato sottolineato nella sezione 52 che i raggi catodici sono diffusamente riflessi dal metallo sul quale incidono. Questi raggi secondari consistono in parte di elettroni che si muovono con circa la stessa velocità dei primari, e in parte di elettroni con una velocità molto inferiore. I raggi secondari prodotti dai raggi  $\beta$  del radio hanno un minor potere di penetrazione medio dei raggi primari e, di conseguenza, minore velocità dei raggi primari. Si deve ricordare che i raggi  $\beta$  dal radio sono molto complessi, e consistono di elettroni emessi con una distribuzione di velocità considerevole. I raggi secondari sono, in media, certamente più penetranti dei più facilmente assorbibili raggi  $\beta$  emessi dal radio, e probabilmente si muovono con una velocità pari a circa la metà di quella della luce.

È anche incerto se i raggi secondari siano prodotti dall'azione dei raggi primari sulla materia, o se consistano di una porzione dei raggi primari la cui direzione di moto è stata deflessa nel loro passaggio attraverso la materia, così che emergono con velocità ridotta dalla superficie.

**112. Deflessione magnetica dei raggi secondari derivanti dai raggi  $\gamma$ .** Si è visto che i raggi secondari prodotti dai soli raggi  $\gamma$  hanno caratteristiche molto simili a quelli originati dai raggi  $\beta$ . Questo risultato fu ulteriormente confermato da Eve, il quale mostrò che i raggi secondari prodotti dai raggi  $\gamma$  sono facilmente deflessi da un campo magnetico. Il dispositivo sperimentale è mostrato in Figura 46.



Un piccolo elettroscopio era montato su un lato di una piattaforma di piombo dello spessore di 1.2 cm, che si appoggiava su un cilindro di piombo alto 10 cm e del diametro di 10 cm. Il radio era posto nella parte inferiore di uno scavo. Applicando un campo magnetico intenso, perpendicolare al piano del foglio, in modo da deflettere i raggi secondari dalla piattaforma in direzione dell'elettroscopio, il ritmo di scarica era molto aumentato. Invertendo il campo, l'effetto diminuiva di molto. Poiché i raggi  $\gamma$  non sono deflessi da un campo magnetico, questo risultato mostra che la radiazione secondaria ha caratteristiche completamente diverse da quella primaria, e consiste di elettroni emessi con una velocità (dedotta dal potere di penetrazione) pari a circa la metà di quella della luce. Abbiamo già evidenziato che l'emissione di elettroni da una sostanza attraversata dai raggi rende conto della carica osservata da Paschen, senza la necessità di assumere che i raggi  $\gamma$  trasportino una carica elettrica negativa.

La radiazione secondaria prodotta dai raggi Röntgen, come quella dovuta ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$ , consiste in parte di elettroni emessi con velocità notevole. Questi tre tipi di raggi sembrano avere una uguale efficienza nel determinare l'espulsione di elettroni dalla sostanza attraversata. Abbiamo visto che i raggi X e  $\gamma$  sono, con tutta probabilità, impulsi elettromagnetici prodotti dall'improvvisa partenza o arresto di elettroni, ed il processo appare essere reversibile. Poiché i raggi  $\beta$  passano attraverso un dato spessore di materia prima che la loro energia di moto si annulli, la teoria ci indica la produzione di un tipo di raggi X molli nella materia assorbente.

### Parte sesta

**118. Confronto tra la ionizzazione prodotta dai raggi  $\alpha$  e  $\beta$ .** Con un materiale attivo non schermato, la ionizzazione prodotta tra due piatti paralleli, posti come in Figura 17, è principalmente dovuta ai raggi  $\alpha$ . Tenendo conto del piccolo potere di penetrazione dei raggi  $\alpha$ , la corrente dovuta ad essi raggiunge in pratica un massimo con un piccolo

spessore di materiale radioattivo. Furono osservate<sup>69</sup> le seguenti correnti di saturazione per diversi spessori dell'ossido di uranio tra piatti paralleli sufficientemente separati per tutti i raggi  $\alpha$  assorbiti nel gas tra di essi.

Peso dell'ossido di uranio in grammi per $cm^2$	Corrente di saturazione in ampere per $cm^2$
0.0038	$1.7 \cdot 10^{-13}$
0.0096	$3.2 \cdot 10^{-13}$
0.0189	$4.0 \cdot 10^{-13}$
0.0350	$4.4 \cdot 10^{-13}$
0.0955	$4.7 \cdot 10^{-13}$

La corrente raggiungeva circa la metà del suo valore massimo per un peso di ossido di  $0.0055 \frac{g}{cm^2}$ . Se i raggi  $\alpha$  sono bloccati da uno schermo metallico, la ionizzazione è allora principalmente dovuta ai raggi  $\beta$ , poiché la ionizzazione prodotta dai raggi  $\gamma$  è al confronto piccola. Per i raggi  $\beta$  dall'ossido di uranio è stato già mostrato (sezione 86) che la corrente raggiunge la metà del suo massimo valore per uno spessore di  $0.11 \frac{g}{cm^2}$ .

Meyer e Schweidler<sup>70</sup> hanno trovato che la radiazione da una soluzione acquosa di nitrato di uranio è pressoché proporzionale alla quantità di uranio presente nella soluzione.

Tenendo conto della differenza nel potere di penetrazione dei raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , il rapporto tra le correnti di ionizzazione da essi prodotta dipende dalla spessore dello strato radioattivo in esame. I seguenti valori comparativi della corrente dovuta ai raggi  $\alpha$  e  $\beta$  furono ottenuti con strati molto sottili di materia attiva<sup>71</sup>. Una massa di  $\frac{1}{10} g$  di polvere fine di ossido di uranio, ossido di torio o cloruro di radio di attività 2000, era distribuita nel modo più uniforme possibile su un'area di  $80 cm^2$ . La corrente di saturazione era osservata tra piatti paralleli distanti  $5.7 cm$ . Questa distanza era sufficiente ad assorbire la maggior parte dei raggi  $\alpha$  emessi dalle sostanze attive. Uno strato di alluminio dello spessore di  $0.009 cm$  assorbiva tutti i raggi  $\alpha$ .

	Corrente dovuta ai raggi $\gamma$	Corrente dovuta ai raggi $\beta$	Rapporto tra correnti $\frac{\beta}{\alpha}$
Uranio	1	1	0.0074
Torio	1	0.27	0.0020
Radio	2000	1350	0.0033

Nella tabella la corrente di saturazione dovuta ai raggi  $\alpha$  e  $\beta$  dell'uranio è, in ogni caso, assunta come unità. La terza colonna fornisce il rapporto delle correnti osservate a parità di peso. I risultati sono solo approssimati, perché la ionizzazione dovuta ad un dato peso dipende dal suo grado di frantumazione. In tutti i casi, la corrente dovuta ai raggi  $\beta$  è piccola rispetto a quella dovuta ai raggi  $\alpha$ , essendo maggiore per l'uranio e minore per il torio. All'aumentare dello spesso dello strato, il rapporto delle correnti  $\frac{\beta}{\alpha}$  aumenta regolarmente fino a un valore costante.

**114. Confronto dell'energia irradiata dai raggi  $\alpha$  e  $\beta$ .** Finora non è stato possibile misurare direttamente l'energia dei raggi  $\alpha$  e  $\beta$ . Un confronto fra le energie irradiate nei due tipi di raggi può, tuttavia, essere fatto indirettamente con due metodi distinti.

Se si assume che la stessa quantità di energia sia richiesta per produrre uno ione o un raggio  $\alpha$  o  $\beta$ , e che la stessa proporzione dell'energia totale sia usata per produrre ioni, si può fare una stima approssimata del rapporto delle energie irradiate dai raggi  $\alpha$  e  $\beta$  misurando il rapporto tra il numero totale di ioni da essi prodotti. Se  $\lambda$  è il coefficiente di assorbimento dei raggi  $\beta$  in aria, il tasso di produzione di ioni per unità di volume ad una distanza  $x$  dalla sorgente è  $q_0 e^{-\lambda x}$  dove  $q_0$  è il tasso di ionizzazione alla sorgente.

Il numero totale di ioni prodotti da un completo assorbimento dei raggi è

$$\int_0^{\infty} q_0 e^{-\lambda x} dx = \frac{q_0}{\lambda}$$

$\lambda$  è difficile da misurare sperimentalmente per l'aria, ma una stima approssimata del suo valore può essere fatta notando che l'assorbimento dei raggi  $\beta$  è approssimativamente proporzionale alla densità di ogni data sostanza.

Per i raggi  $\beta$  dall'uranio il valore di  $\lambda$  per l'alluminio è circa 14, e  $\lambda$  diviso per la densità è 5.4. Prendendo la densità dell'aria come 0.0012, troviamo per l'aria

$$\lambda = 0.00665$$

Il numero totale di ioni prodotti in aria è allora  $154q_0$  quando i raggi sono completamente assorbiti.

<sup>69</sup>Rutherford e MacClung, Phil. Trans. A. p. 25, 1901.

<sup>70</sup>Meyer e Schweidler, Wien Ber. 113, Luglio, 1904.

<sup>71</sup>Rutherford e Grier, Phil. Mag. Settembre, 1902.

Dalla tabella sopra la ionizzazione dovuta ai raggi  $\beta$  è 0.0074 di quelli prodotti dai raggi  $\alpha$ , quando i raggi  $\beta$  passano attraverso una distanza di 5.7 cm d'aria.

Abbiamo, quindi, approssimativamente

$$\frac{N^\circ \text{ totale ioni prodotti dai raggi } \beta}{N^\circ \text{ totale ioni prodotti dai raggi } \alpha} = \frac{0.0074}{5.7} \times 154 = 0.20$$

Pertanto, circa  $\frac{1}{6}$  dell'energia totale irraggiata in aria da uno strato sottile di uranio è trasportata dai raggi  $\beta$  o dagli elettroni. Il rapporto per il torio è circa  $\frac{1}{22}$  e per il radio circa  $\frac{1}{14}$ , assumendo che i raggi abbiano circa lo stesso valore medio di  $\lambda$ .

Questo calcolo tiene conto solo dell'energia che è irraggiata nel gas circostante; ma considerando la facilità con cui i raggi  $\alpha$  sono assorbiti, anche con uno strato sottile, la proporzione maggiore della radiazione è *assorbita dalla sostanza radioattiva stessa*. Questo avviene quando la radiazione  $\alpha$  del torio o del radio è ridotta a metà del valore dopo il passaggio attraverso uno spessore di circa 0.0005 cm di alluminio. Prendendo in considerazione la grande densità delle sostanze radioattive, è probabile che la maggior parte della radiazione che sfugge nell'aria sia dovuta a un sottile strato di polvere dello spessore di non più di 0.0001 cm.

Si può fare, tuttavia, una stima del tasso relativo di emissione dell'energia per i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  da uno spesso strato di materiale nel modo seguente: supponiamo per semplicità che uno spesso strato di sostanza radioattiva sia distribuito uniformemente su una grande superficie piana. Non vi è dubbio che le radiazioni sono emesse uniformemente da ogni porzione della massa; di conseguenza, la radiazione, che produce l'azione ionizzante nel gas sullo strato radioattivo, è la somma totale di tutte le radiazioni che raggiungono la superficie dello strato.

Sia  $\lambda_1$  il coefficiente medio di assorbimento dei raggi  $\alpha$  nella stessa sostanza radioattiva e  $\sigma$  la gravità specifica della sostanza. Sia  $E_1$  l'energia totale irradiata per secondo per unità di massa della sostanza quando si trascura l'assorbimento dei raggi nella sostanza stessa. L'energia per secondo irraggiata dalla parte superiore della superficie da uno spessore  $dx$  di uno strato di area unitaria ad una distanza  $x$  dalla superficie è data da

$$\frac{1}{2} E_1 \sigma e^{-\lambda_1 x} dx$$

L'energia totale  $W_1$  per unità di area irraggiata alla superficie per secondo da uno spessore  $d$  è data da

$$W_1 = \frac{1}{2} \int_0^d E_1 \sigma e^{-\lambda_1 x} dx = \frac{E_1 \sigma}{2\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 d}) = \frac{E_1 \sigma}{2\lambda_1}$$

se  $\lambda_1 d$  è grande.

In un modo simile si può mostrare che l'energia  $W_2$  dei raggi  $\beta$  che raggiunge la superficie è data da  $W_2 = \frac{E_2 \sigma}{2\lambda_2}$  dove  $E_2$  e  $\lambda_2$  sono i valori per i raggi  $\beta$  corrispondenti a  $E_1$  e  $\lambda_1$  per i raggi  $\alpha$ . Pertanto, segue che

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\lambda_1 W_1}{\lambda_2 W_2}$$

$\lambda_1$  e  $\lambda_2$  sono difficili da determinare direttamente per le stesse sostanze radioattive, ma è probabile che il rapporto  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$  non sia molto diverso dal rapporto tra i coefficienti di assorbimento per altre sostanze simili all'alluminio. Questo segue dal risultato generale che l'assorbimento di entrambi i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  è proporzionale alla densità della sostanza; è già stato mostrato nel caso dei raggi  $\beta$  dall'uranio che l'assorbimento dei raggi nel materiale radioattivo è circa lo stesso per i non radioattivi della stessa densità.

Con uno spesso strato di ossido di uranio distribuito su un'area di 22 cm<sup>2</sup>, si trovò che la corrente di saturazione tra piatti paralleli distanti 6.1 cm, dovuta ai raggi  $\alpha$ , era 12.7 volte maggiore della corrente dovuta ai raggi  $\beta$ . Poiché i raggi  $\alpha$  erano interamente assorbiti tra i piatti e la ionizzazione totale prodotta dai raggi  $\beta$  è 154 volte il valore alla superficie dei piatti,

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{N^\circ \text{ totale ioni prodotti dai raggi } \alpha}{N^\circ \text{ totale ioni prodotti dai raggi } \beta} = \frac{12.7 \times 6.1}{154} \cong 0.5$$

Il valore di  $\lambda_1$  per l'alluminio è 2740 e di  $\lambda_2$  per lo stesso metallo è 14, pertanto

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\lambda_1 W_1}{\lambda_2 W_2} \cong 100$$

Questo mostra che l'energia irradiata da uno spesso strato di materiale dai raggi  $\beta$  è solo circa l'1% dell'energia irradiata sotto forma di raggi  $\alpha$ .

Questa stima è confermata dai calcoli basati su dati indipendenti. Siano  $m_1, m_2$  le masse rispettivamente delle particelle  $\alpha$  e  $\beta$  e  $v_1$  e  $v_2$  le loro velocità.

$$\frac{\text{Energia di una particella } \alpha}{\text{Energia di una particella } \beta} = \frac{m_1 v_1^2}{m_2 v_2^2} = \frac{\frac{m_1}{e} v_1^2}{\frac{m_2}{e} v_2^2}$$

È stato mostrato che per i raggi  $\alpha$  del radio

$$v_1 = 2.5 \cdot 10^9$$

$$\frac{e}{m_1} = 6 \cdot 10^3$$

La velocità dei raggi  $\beta$  del radio varia entro ampi limiti. Prendendo un valore medio

$$v_2 = 1.5 \cdot 10^{10}$$

$$\frac{e}{m_2} = 1.8 \cdot 10^7$$

segue che l'energia della particella  $\alpha$  dal radio è quasi 83 volte l'energia della particella  $\beta$ . Se numeri uguali di particelle  $\alpha$  e  $\beta$  sono emessi al secondo, l'energia totale irradiata sotto forma di raggi  $\alpha$  è circa 83 volte la quantità sotto forma di raggi  $\beta$ .

La prova sarà data in seguito (sezione 253) per mostrare che il numero di particelle  $\alpha$  emesse è probabilmente quattro volte il numero di particelle  $\beta$ ; così che una maggiore proporzione dell'energia è emessa sotto forma di raggi  $\alpha$ . Questi risultati, pertanto, portano alla conclusione che, dal punto di vista dell'energia emessa, i raggi  $\alpha$  sono molto più importanti dei raggi  $\beta$ . Questa conclusione è supportata da un'altra prova che è discussa nei capitoli XII e XIII, dove si mostrerà che i raggi  $\alpha$  svolgono un ruolo più importante nei cambiamenti che avvengono nei corpi radioattivi, e che i raggi  $\beta$  appaiono solo nelle ultime fasi dei processi radioattivi. Dai dati basati sull'assorbimento e la ionizzazione relativi dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  in aria, si può mostrare che i raggi  $\gamma$  trasportano circa la stessa quantità di energia dei raggi  $\beta$ . Queste conclusioni sono confermate dalla misura diretta dell'effetto di riscaldamento del radio, che è discusso in dettaglio nel capitolo XII.

## Proprietà delle radiazioni

**115.** Oltre al loro potere di agire sulle lastre fotografiche e di ionizzare i gas, le radiazioni dai corpi attivi sono in grado di produrre segnature chimiche e azioni fisiche in varie sostanze. La maggior parte di questi effetti sono dovuti o ai raggi  $\alpha$  o  $\beta$ . I raggi  $\gamma$  producono in confronto piccoli effetti. Poiché i raggi  $\beta$  sono simili in tutti gli aspetti ai raggi catodici di alta velocità, ci si aspetta che essi producano effetti con caratteristiche simili a quelli prodotti dai raggi catodici in un tubo a vuoto.

*Azione fosforescente.* Becquerel<sup>1</sup> ha studiato l'azione dei raggi del radio nel produrre fosforescenza in vari corpi. La sostanza che deve essere testata era posta sopra il radio sotto forma di polvere su una lastra molto sottile di mica. L'esame fu fatto per solfuri di calcio e stronzio, rubino, diamante, varietà di barite, che diventano fosforescenti sotto i raggi luminosi, e non fosforescenti sotto i raggi del radio. D'altro canto, quelli che divenivano luminosi con i raggi ultravioletti erano pure luminosi sotto l'azione dei raggi del radio. Questi mostrano differenze distintive dai raggi X. Per esempio, un diamante che era molto luminoso con i raggi del radio non era influenzato dai raggi X. Il bisolfato di uranio e potassio è più luminoso della blenda esagonale sotto raggi X, ma il contrario si ha con i raggi del radio; sotto l'influsso di questi raggi, il solfuro di calcio produce un luminosità blu ma era fortemente influenzato dai raggi X.

La tabella seguente mostra la fosforescenza relativa eccitata in vari corpi.

Sostanza	Intensità senza schermo	Attraverso uno schermo di carta annerita
Blenda esagonale	13.36	0.04
Platino cianuro di bario	1.99	0.05
Diamante	1.14	0.01
Bisolfato di Uranio e Potassio	1.00	0.31
Fluoruro di Calcio	0.30	0.02

Nell'ultima colonna l'intensità senza lo schermo è in ogni caso assunta come unità. La forte diminuzione di intensità dopo che i raggi sono passati attraverso carta annerita mostra che la maggior parte della fosforescenza sviluppata senza lo schermo è, nella maggioranza dei casi, dovuta ai raggi  $\alpha$ .

Bary<sup>2</sup> ha compiuto un esame molto completo della classe di sostanze che diviene luminosa con i raggi del radio. Trovò che la grande maggioranza delle sostanze appartiene ai metalli e alle terre alcaline. Tutte queste sostanze erano anche fosforescenti sotto l'azione dei raggi X.

Il solfuro di zinco cristallino (blenda di Sidot) diviene fosforescente sotto l'influenza dei raggi del radio e altre sostanze molto attive. Questi fu osservato da Curie e Debierne nei loro studi dell'emanazione del radio e dell'attività eccitata da essa prodotta. È stato anche ampiamente usato da Giesel come un metodo ottico per rivelare la presenza delle emanazioni da sostanze molto attive. È un metodo particolarmente sensibile per rivelare la presenza di raggi  $\alpha$ , quando mostra la proprietà di "scintillare" già discussa nella sezione 96. Per mostrare la luminosità dovuta ai raggi  $\alpha$ , lo schermo dovrebbe essere tenuto vicino alla sostanza attiva, in modo che i raggi siano assorbiti nel loro passaggio attraverso pochi centimetri d'aria. Anche il solfuro di zinco è luminoso sotto l'azione dei raggi  $\beta$ , ma la fosforescenza è molto più persistente quando prodotta dai raggi  $\alpha$ .

Effetti luminosi molto belli sono prodotti da grandi cristalli di platino-cianuro esposti ai raggi del radio. Quelli contenenti litio danno un colore rosa brillante. I sali di calcio e bario diventano fluorescenti con una luce verde scura, e i composti del sodio con un giallo limone. Il minerale willemite (silicato di zinco) è stato trovato recentemente da Kunz essere un più sensibile rivelatore della presenza di radiazioni del platino-cianuro di bario. Essa diviene fluorescente mostrando un bellissimo colore verdastro, e un pezzo di minerale esposto all'azione dei raggi appare completamente traslucido. I cristalli di platino-cianuro di bario e di litio sono specialmente adatti a mostrare l'azione dei raggi  $\gamma$  e, sotto questo aspetto, sono superiori alla willemite.

Un effetto veramente straordinario è mostrato dalla kunzite - una nuova varietà di spodumene scoperta da Kunz<sup>3</sup>. Questa è una gemma trasparente come un cristallo, spesso di dimensioni molto grandi, che brilla di un meraviglioso colore

<sup>1</sup>Becquerel, C. R. 129, p. 912, 1899.

<sup>2</sup>Bary, C. R. 130, p. 776, 1900.

<sup>3</sup>Kunz e Baskerville, Amer. Journ. Science XVI, p. 335, 1903.

rossastro sotto l'azione dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$ , ma non appare essere sensibile ai raggi  $\alpha$ . La luminosità si estende attraverso il cristallo, ma non è così marcata come nei platino-cianuri o nella willemite. La sparteite<sup>4</sup>, una forma di calcite contenente pochi percento di manganese, è stata trovata da Ambrecht divenire fluorescente con una luce arancio scuro sotto l'influsso dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$ . Il colore appare dipendere dall'intensità dei raggi, ed è più scuro vicino al radio che posto a una certa distanza.

Se kunzite e sparteite sono esposti all'azione dei raggi catodici in un tubo a vuoto, il colore è diverso da quello prodotto dai raggi del radio. Nel primo caso appaiono giallo scuro, nel secondo rosso scuro.

Le diverse azioni dei raggi del radio su queste sostanze fluorescenti possono essere illustrate molto semplicemente e gradevolmente con il seguente esperimento.

Un piccolo tubo a U è riempito con frammenti di una sostanza fluorescente disposta in strati. Il tubo a U è immerso in aria liquida e l'emanazione da circa 30 mg di bromuro di radio è condensata nel tubo. Chiudendo il tubo e rimuovendolo dall'aria liquida, l'emanazione si distribuisce uniformemente nel tubo. Le gradazioni dei colori prodotti nelle diverse sostanze sono chiaramente visibili.

Si è osservato che tutti i cristalli aumentano la loro luminosità per parecchie ore, a causa dell'attività eccitata prodotta dall'emanazione. Questo effetto è specialmente osservato nella kunzite che inizialmente risponde fortemente poiché i raggi  $\beta$  e  $\gamma$ , che producono la fluorescenza, non sono emessi dall'emanazione stessa ma da uno dei suoi prodotti successivi. L'intensità dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  è, di conseguenza, piccola inizialmente per poi crescere fino a un massimo dopo parecchie ore; la luminosità osservata varia in modo corrispondente.

Sir William Crookes<sup>5</sup> ha compiuto un esame dell'effetto dell'esposizione continua di un diamante ai raggi del radio. Un diamante di un pallido color giallo, era collocato all'interno di un tubo con bromuro di radio. Dopo un'esposizione di 78 giorni, il diamante era scurito assumendo un colore verde bluastrò; quando lo si scaldava a 50° in una miscela di cloruro di potassio per dieci giorni, il diamante perdeva il suo spento colore superficiale e diveniva brillante e trasparente, e la sua tinta era cambiata in un pallido verde bluastrò. I raggi avevano, pertanto, una doppia azione sul diamante; i raggi  $\beta$  meno penetranti producevano un imbrunimento superficiale dovuto alla trasformazione della superficie in grafite, mentre i raggi  $\beta$  più penetranti e i raggi  $\gamma$  producevano un cambiamento di colore nella restante parte della sua massa. Il diamante diveniva fosforescente durante l'intera esposizione ai raggi. Crookes osservò pure che il diamante manteneva una sufficiente attività tale da impressionare una lastra fotografica 35 giorni dopo la sua rimozione, sebbene, durante il periodo di 10 giorni, veniva riscaldato in un miscela sufficientemente potente da rimuovere lo strato esterno di grafite. Questa attività residua poteva possibilmente essere dovuta a un prodotto a lenta trasformazione dell'emanazione che è depositata sulla superficie del corpo (vedi Capitolo XI).

Marckwald osservò che i raggi  $\alpha$  dal radio-tellurio producevano una evidente fosforescenza in alcuni tipi di diamante. Un resoconto dei vari effetti luminosi prodotti su diverse gemme per esposizione ai raggi del radio e dell'attinio è stato fornito da Kunz e Baskerville<sup>6</sup>.

Sia il solfuro di zinco sia il platino-cianuro diminuiscono in luminosità dopo l'esposizione per un certo tempo all'azione dei raggi. Per rigenerare uno schermo del secondo, è necessaria l'esposizione alla luce solare. Un fenomeno simile è stato osservato da Villard per uno schermo esposto ai raggi Röntgen. Giesel fece uno schermo di platino-cianuro di bario radioattivo. Lo schermo, inizialmente molto luminoso, diveniva gradualmente di colore marrone, e allo stesso tempo il cristallo diveniva diecrico. In questa condizione la luminosità era molto minore, sebbene la sostanza attiva avesse aumentato la propria attività dopo la preparazione. Molte delle sostanze che sono luminose sotto i raggi da sostanze attive perdono la loro proprietà per un grosso intervallo alle basse temperature<sup>7</sup>.

**116. Luminosità dei composti del radio.** Tutti i composti del radio sono spontaneamente luminosi. Questa luminosità è particolarmente brillante nei sali alogeni, e persiste per un lungo intervallo di tempo. In aria umida i sali perdono gran parte della loro luminosità, ma la recuperano in condizioni secche. Con radio-cloruro molto attivo, i Curie hanno osservato che la luce cambia di colore e di intensità con il tempo. La luminosità originale è recuperata se il sale è disciolto ed essiccato. Molte preparazioni inattive di bario radifero sono fortemente luminose. L'autore ha visto una preparazione impura di radio-bromuro che emetteva una luce sufficiente a leggere in una stanza scura. La luminosità del radio persiste entro un ampio intervallo di temperature ed è brillante sia alla temperatura dell'aria liquida sia a temperature ordinarie. Si osserva una debole luminosità in una soluzione di radio e se i cristalli si formano nella soluzione, possono essere chiaramente distinti all'interno del liquido per la loro luminosità.

**117. Spettro della luce fosforescente di radio e attinio.** I composti del radio, con una grande miscela di bario, sono di solito fortemente luminosi. Questa luminosità diminuisce con l'aumentare della purezza, e il radio-bromuro puro è solo molto debolmente auto luminoso. Un esame spettroscopico della debole fosforescenza del bromuro di radio puro è

<sup>4</sup>Si veda Nature, p. 523, 31 marzo, 1904.

<sup>5</sup>Crookes, Proc. Roy. Soc. 74, p. 47, 1904.

<sup>6</sup>Kunz e Baskerville, Science XVIII, p. 769, 18 dicembre 1908.

<sup>7</sup>Beilby in una recente comunicazione alla Royal Society (9 e 23 febbraio 1905) ha esaminato in dettaglio la produzione della fosforescenza per i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  del radio e ha proposto una teoria per tener conto delle diverse azioni osservate.

stato fatto da Sir William e Lady Huggins<sup>8</sup>. Osservando la luce con una visione spettroscopica diretta, vi erano deboli indicazioni di una variazione di luminosità in diversi punti dello spettro. Per ottenere una fotografia dello spettro in un tempo ragionevole, essi fecero uso di uno spettroscopio al quarzo di concezione particolare che era stato precedentemente impiegato in un esame spettroscopico di deboli corpi celesti. Dopo un'esposizione di tre giorni con una fessura di  $\frac{1}{450}$  di pollice di ampiezza, fu ottenuto un negativo che mostrava la presenza di linee brillanti. L'ingrandimento dello spettro è mostrato in Figura 46A. Le linee dello spettro erano in accordo non solo per la posizione ma anche per l'intensità relativa con la banda dello spettro dell'azoto. La banda spettrale dell'azoto e anche lo spettro da scintilla<sup>9</sup> del radio sono mostrati nella stessa figura.



Un poco di tempo dopo Sir William Crookes e il prof. Dewar mostrarono che questo spettro dell'azoto non si otteneva se il radio era contenuto in un tubo con un vuoto spinto. Appare, pertanto, che lo spettro è dovuto all'azione dei raggi del radio o nell'azoto racchiuso o nell'azoto nell'atmosfera che circonda il radio.

È assai significativo che la luce fosforescente, come quella del bromuro di radio, mostri uno spettro a righe brillanti dell'azoto. Ci dice che il radio a temperatura ordinaria è in grado di emettere radiazioni che sono prodotte solo dalla scarica elettrica in speciali condizioni.

Sir William e Lady Huggins furono portati ad esaminare lo spettro della luce fosforescente naturale del radio con la speranza che si potessero ottenere alcune indicazioni sui processi che avvengono in tal modo nell'atomo di uranio. Poiché la radiazione principale dal radio consiste di atomi carichi positivamente emessi con grande velocità, le radiazioni devono essere dovute sia ai corpuscoli espulsi e al sistema da cui esse sfuggono.

Giesel<sup>10</sup> osservò che lo spettro della luce fosforescente dell'attinio consiste di tre righe brillanti. Misure della lunghezza d'onda furono eseguite da Hartmann<sup>11</sup>. La luminosità era molto debole ed era necessaria una lunga esposizione. Le righe osservate si trovavano nel rosso, blu e verde. La lunghezza d'onda e la velocità sono mostrate qui sotto.

Riga	Intensità	$\lambda$
1	10	$4885.4 \pm 0.1 \text{ \AA}$
2	6	$5300 \pm 6 \text{ \AA}$
3	1	$5909 \pm 10 \text{ \AA}$

La riga 4885 era molto allargata; le altre due righe erano così deboli che era difficile determinare la loro lunghezza d'onda con precisione. Hartmann suggerisce che queste righe si possono trovare nello spettro delle nuove stelle. Le righe osservate non hanno alcun legame con il radio o le sue emanazioni<sup>12</sup>.

<sup>8</sup>Huggins, Proc. Roy. Soc. 72, pp. 196 e 409, 1903.

<sup>9</sup>Lo spettro da scintilla del bromuro di radio mostrava le righe H e K del calcio e appena anche alcune intense righe del bario. Le righe caratteristiche del radio di lunghezza d'onda 3814.59, 3649.7, 4340.6 e 2798.6, come mostrate da Demarcay e altri sono chiaramente mostrate nella figura. L'intensa linea di lunghezza d'onda di circa 2814 è dovuta al radio.

<sup>10</sup>Giesel, Ber. d. D. Chem. Ges. 37, p. 1696, 1904.

<sup>11</sup>Hartmann, Phys. Zeit. 5, No. 18, p. 570, 1904.

<sup>12</sup>Wiedemann e Schmidt, Wied. Annal. 59, p. 604, 1895.

**118. Termoluminescenza.** E. Wiedemann e Schmidt<sup>13</sup> hanno mostrato che certi corpi dopo l'esposizione ai raggi catodici o alla scintilla elettrica divengono luminosi quando sono riscaldati ad una temperatura molto al di sotto di quella richiesta per provocare l'incandescenza. Questa proprietà di termo-luminescenza è più fortemente mostrata in certi casi dove due sali, uno dei quali è molto in eccesso rispetto all'altro, sono precipitati insieme. Ci si deve aspettare che tali corpi possano pure acquisire la proprietà quando sono esposti ai raggi  $\beta$  o catodici del radio. Questo è il caso trovato da Wiedemann<sup>14</sup>. Becquerel mostrò che la fluorite, esposta ai raggi del radio, era luminosa se riscaldata. I tubi di vetro nei quali il radio è posto sono rapidamente anneriti. Scaldando il tubo, si osserva una luminosità intensa, e scompare la colorazione per una grande entità. La peculiarità di molti di questi corpi sta nel fatto che la proprietà di divenire luminosi se riscaldati è mantenuta per un lungo intervallo di tempo dopo che il corpo è rimosso dall'influenza della causa eccitante. Appare probabile che i raggi causino cambiamenti chimici in questi corpi, che sono permanenti fintanto che sono riscaldati. Una parte dell'energia chimica è poi rilasciata sotto forma di luce visibile.

*Azioni Fisiche.*

**119. Alcuni effetti elettrici.** I raggi del radio hanno lo stesso effetto dei raggi ultravioletti e Röntgen nell'aumentare la facilità con cui una scintilla passa tra gli elettrodi. Elster e Geitel<sup>15</sup> mostrarono che se due elettrodi sono separati da una distanza tale che la scintilla si rifiuta proprio di passare, non appena si mette vicino un campione di radio la scintilla passa. Questo effetto è più evidente con corte scintille da una piccola bobina. I Curie hanno osservato che il radio completamente avvolto da uno schermo di piombo spesso 1 cm produceva un'azione simile. L'effetto in questo caso è dovuto ai soli raggi  $\gamma$ . Questa azione dei raggi può essere illustrata molto semplicemente collegando in parallelo due spinterometri con la bobina. Lo spinterometro di un circuito è disposto in modo che la scarica non possa passare attraverso di esso, ma passi attraverso l'altro. Quando si pone del radio vicino allo spinterometro silente, subito passa la scintilla e cessa nell'altro<sup>16</sup>.

Hemptinne<sup>17</sup> trovò che la scarica senza elettrodi in un tubo a vuoto iniziava ad una pressione maggiore quando si poneva vicino al tubo una preparazione di radio. In un esperimento la scarica senza i raggi iniziava a 51 mm ma con i raggi del radio a 68 mm. Il colore della scarica risultava alterato.

Himstedt<sup>18</sup> trovò che la resistenza del selenio era diminuita dall'azione dei raggi del radio nello stesso modo della luce ordinaria.

F. Henning<sup>19</sup> esaminò la resistenza elettrica di una soluzione di cloruro di bario contenente radio di attività 1000, ma non poté osservare significative differenze tra di esso e una soluzione pura di cloruro di radio. Questo esperimento mostra che l'azione dei raggi dal radio non producono un apprezzabile cambiamento nella conduttività della soluzione di bario.

Kohlrausch e Henning<sup>20</sup> hanno recentemente eseguito un dettagliato esame della conduttività di soluzioni di bromuro di radio puro, e hanno ottenuto risultati molto simili a quelli delle corrispondenti soluzioni di bario. Kohlrausch<sup>21</sup> trovò che la conduttività dell'acqua esposta alle radiazioni dal radio aumentava più rapidamente dell'acqua non esposta. Questo aumento di conduttività può essere dovuto a un aumento della conduttività dell'acqua stessa, o a un tasso aumentato della soluzione del vetro contenitore.

Campioni di materiale molto attivo sono stati impiegati per ottenere il potenziale in ogni punto dell'atmosfera. La ionizzazione dovuta alla sostanza attiva è così intensa che il corpo al quale si attacca rapidamente aumenta il potenziale dell'aria che circonda la sostanza attiva. Sotto questo aspetto è più conveniente e rapido nella sua azione dell'ordinario contagocce, ma a causa del disturbo del campo elettrico prodotto dalla forte ionizzazione, è probabilmente un metodo non così accurato come quello del contagocce.

**120. Effetto sui dielettrici solidi e liquidi.** P. Curie<sup>22</sup> fece l'osservazione molto importante che i dielettrici liquidi divengono conduttori parziali sotto l'influsso dei raggi del radio. In questi esperimenti il radio, contenuto in un tubo di vetro, fu posto in un sottile cilindro di rame. Questo era circondato da un cilindro concentrico di rame, e il liquido da esaminare riempiva lo spazio intermedio. Si applicava un forte campo elettrico, e la corrente attraverso il liquido era misurata per mezzo di un elettrometro.

I seguenti valori illustrano i risultati ottenuti:

<sup>13</sup>Wiedemann e Schmidt, Wied. Annal. 59, p. 604, 1895.

<sup>14</sup>Wiedemann, Phys. Zeit, 2, p. 269, 1901.

<sup>15</sup>Elster e Geitel, Annal. d. Phys. 69, p. 673, 1899.

<sup>16</sup>Willons e Peck (Phil. Mag. marzo 1905) trovò che in certe condizioni, specialmente per lunghe scintille, i raggi del radio ostacolavano il passaggio della scintilla.

<sup>17</sup>Himstedt, Phys. Zeit. p. 476, 1900.

<sup>18</sup>Himstedt, Phys. Zeit. p. 476, 1900.

<sup>19</sup>Henning, Annal. d. Phys. p. 562, 1902.

<sup>20</sup>Kohlrausch e Henning, Verh. Deutsch, Phys. Ges. 6, p. 144, 1904.

<sup>21</sup>Kohlrausch, Verh. Deutsch. Phys. Ges. 5, p. 261, 1904.

<sup>22</sup>P. Curie, C. R. 184, p. 420, 1902.

Sostanze	Conduttività in $Mohm/cm^2$
Bisolfuro di carbonio	$20 \cdot 10^{-14}$
Etere di petrolio	$15 \cdot 10^{-14}$
Amilina	$14 \cdot 10^{-14}$
Cloruro di carbonio	$8 \cdot 10^{-14}$
Benzene	$4 \cdot 10^{-14}$
Aria liquida	$1.3 \cdot 10^{-14}$
Olio di vaselina	$1.6 \cdot 10^{-14}$

Aria liquida, olio di vaselina, etere di petrolio, amilina, sono normalmente isolanti quasi perfetti. La conduttività di amilina e etere dovuta ai raggi a  $-17^\circ C$  era solo  $\frac{1}{10}$  del suo valore a  $0^\circ C$ . Vi è, pertanto, una evidente azione della temperatura sulla conduttività. Per materiali molto attivi la corrente era proporzionale alla tensione. Con materiale di solo  $\frac{1}{500}$  dell'attività, si trovò che la legge di Ohm non era più valida.

Si ottennero i seguenti valori:

Volt	Corrente
50	109
100	185
200	255
400	335

Per un aumento di tensione di 8 volte, la corrente aumenta solo 3 volte. La corrente nel liquido tende, pertanto, a divenire "satura" quando è la corrente di ionizzazione attraverso un gas. Questi risultati hanno una grande rilevanza sulla teoria della ionizzazione, e mostrano che la radiazione probabilmente produce ioni nel liquido così come nel gas. Fu pure trovato che i raggi X aumentavano la conduttività di circa la stessa quantità di quelli dal radio.

Becquerel<sup>23</sup> ha recentemente mostrato che la paraffina solida esposta ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  del radio acquista la proprietà di condurre elettricità. Dopo la rimozione del radio la conduttività diminuisce con il tempo in accordo con la stessa legge per il gas ionizzato. Questi risultati mostrano che un dielettrico solido, liquido o gassoso è ionizzato dai raggi dal radio.

**121. Effetto della temperatura sulle radiazioni.** Becquerel<sup>24</sup>, con il metodo elettrico, determinò l'attività dell'uranio alla temperatura dell'aria liquida, e trovò che vi era solo una differenza dell'1% rispetto all'attività alla temperatura ordinaria. Nei suoi esperimenti, i raggi  $\alpha$  dall'uranio erano assorbiti prima di raggiungere il contenitore di misura, e la corrente elettrica misurata era dovuta ai soli raggi  $\beta$ . P. Curie<sup>25</sup> trovò che la luminosità del radio e il suo potere di eccitare fluorescenza nei corpi erano ancora presenti alla temperatura dell'aria liquida. Osservazioni con il metodo elettrico mostrarono che l'attività del radio rimaneva inalterata alla temperatura dell'aria liquida. Se un composto del radio è riscaldato in un contenitore aperto, si è trovato che l'attività, misurata dai raggi  $\alpha$ , diminuisce a circa il 25% del suo valore iniziale. Questo non è, tuttavia, dovuto a una variazione nella radioattività, ma al rilascio dell'emanazione radioattiva, che è accumulata nel radio. Nessuna alterazione è osservata se il radio è riscaldato in un vaso chiuso da cui non può sfuggire alcun prodotto radioattivo.

**122. Moto del radio in un campo elettrico.** Joly<sup>26</sup> trovò che un disco, un lato del quale era ricoperto con alcuni milligrammi di bromuro di radio, mostrava, quando veniva avvicinato da un corpo carico elettricamente, moti molto diversi da quelli osservati nel caso di una sostanza inattiva. Il corpo carico, sia positivamente che negativamente, respinge il corpo sospeso se lo si avvicina alla parte ricoperta dal radio, ma viene attratto se avvicinato all'altro lato.

Questo effetto è molto semplicemente mostrato costruendo un piccolo apparato simile a un radiometro. Due coperture di vetro sono attaccate alla parte terminale di una fibra di vetro lunga circa 6 cm, con la superficie nello stesso piano. L'apparato è libero di ruotare attorno a un perno. Le due palette sono rivestite su facce alterne con bromuro di radio, e l'intero apparato è racchiuso in un contenitore in vetro. Se una bacchetta carica di ebanite o di ceralacca è portata vicino al ricevitore, viene comunicata una rotazione alla paletta che aumenta quando la pressione dell'aria è ridotta a 5 o 6 mm di mercurio. Ponendo l'apparato tra piatti paralleli collegati con un terminale alla macchina di Winshurt, viene comunicata una rotazione continua sempre in una direzione tale che il radio che ricopre la superficie è respinto dal corpo carico.

Questo comportamento fu ulteriormente esaminato attaccando i segnalatori alla lama di vetro di una bilancia di Coulomb. Una sfera metallica, che può essere o meno carica, venne fissata di fronte alla parte ricoperta con il radio. Si osservava sempre una repulsione tranne quando la carica era molto intensa e il segnalatore vicino alla sfera. Se, tuttavia, i due segnalatori erano collegati al filo luminoso e una simile sfera era esattamente opposta all'altra, si osservava una attrazione se una sfera era carica, ma una repulsione se entrambe erano cariche. Questi effetti furono osservati se i segnalatori erano di alluminio o di vetro.

<sup>23</sup>Becquerel, C. R. 136, p. 1173, 1903.

<sup>24</sup>Becquerel, C. R. 136, p. 1173, 1903.

<sup>25</sup>P. Curie, Société de Physique, 2 marzo 1900.

<sup>26</sup>Joly, Phil. Mag. marzo 1904.

Joly trovò che l'effetto non poteva essere spiegato con un'azione diretta dovuta al moto degli ioni in un campo elettrico. Il rinculo, dovuto alla repulsione di una particella  $\alpha$  da una parte della paletta, è troppo piccolo per rendere conto del moto osservato.

Questo effetto può, io penso, essere spiegato semplicemente tenendo in considerazione la differenza nella conduttività del gas sui due lati della paletta ricoperto con radio. Se una piccola paletta, ricoperta uniformemente con radio su entrambi i lati, e montata su un supporto isolante, è avvicinata a un corpo carico mantenuto a un potenziale costante, agisce come un contagocce e acquista rapidamente un potenziale medio che esisteva già prima in quel punto. La forza meccanica agente sulla paletta sarà, di conseguenza, piccola. Se, tuttavia, la paletta è rivestita solo con radio sulla parte vicina al corpo carico, la ionizzazione e, di conseguenza, la conduttività del gas è molto maggiore tra la paletta e il corpo carico rispetto al lato opposto. Supponiamo, per semplicità, il corpo caricato ad un potenziale positivo. A causa della grande conduttività del gas dalla parte che si affaccia sul corpo carico, esso acquisterà rapidamente una carica positiva, e il potenziale della paletta raggiungerà il suo valore più alto di quello che esisteva in quel posto prima dell'introduzione della paletta. Ciò risulterà in una repulsione della paletta. Questo tiene anche conto dell'attrazione osservata nell'esperimento con la bilancia di Coulomb già descritto. Supponiamo che una sfera sia caricata positivamente e l'altra sia messa a terra, e le due palette siano collegate in modo metallico. La paletta più vicina al corpo carico si caricherà positivamente, ma questa carica si dissiperà rapidamente a causa della ionizzazione del gas vicino alla paletta opposta, e, nella maggior parte delle condizioni, questa perdita di carica sarà così rapida che il potenziale della paletta non potrà raggiungere il valore che dovrebbe esistere in quel punto del campo, se la paletta fosse rimossa. Vi sarà, di conseguenza, una forza attrattiva agente sulla paletta verso la sfera.

La repulsione osservata da Joly è allora solo un risultato indiretto della ionizzazione nel gas prodotta dal radio e dovrebbe mostrare dove una simile distribuzione ineguale della ionizzazione è prodotta da ogni altra sorgente.

Poiché il radio libera calore ad un tasso abbastanza rapido, un radiometro nel quale le palette fossero ricoperte su un solo lato con radio invece di nerofumo, dovrebbe ruotare a basse pressioni del gas, anche in assenza di sorgenti luminose vicine. Questo dovrebbe essere, evidentemente, il caso, poiché la faccia ricoperta con radio dovrebbe raggiungere una temperatura leggermente più alta dell'altra. Questo esperimento è stato provato, ma l'effetto sembra troppo piccolo per produrre la rotazione delle palette.

#### *Azioni Chimiche.*

**123.** Raggi da preparazioni attive di radio mutano ossigeno in ozono<sup>27</sup>. La sua presenza può essere rivelata dall'odore o dall'azione su carta di ioduro di potassio. Questo effetto è dovuto ai raggi  $\alpha$  e  $\beta$  dal radio, e non ai raggi luminosi da esso. Poiché si richiede energia per produrre ozono dall'ossigeno, questa deve derivare dall'energia della radiazione.

I Curie trovarono che i composti del radio colorano rapidamente il vetro. Per materiale moderatamente attivo il colore è violetto, per materiali più attivi è giallo. Un'azione continuata per lungo tempo annerisce il vetro, anche se è privo di piombo tra i suoi componenti. Questa colorazione gradualmente si estende attraverso il vetro ed è dipendente dal tipo di vetro usato.

Giesel<sup>28</sup> trovò che poteva ottenere maggiore colorazione in salgemma e nella fluorite mediante i raggi del radio, così come mediante esposizione all'azione dei raggi catodici in un tubo a vuoto. La colorazione, tuttavia, si estendeva molto più in profondità di quella prodotta dai raggi catodici. Ciò è atteso, poiché i raggi del radio hanno una velocità maggiore e, di conseguenza, maggior potere di penetrazione dei raggi catodici prodotti in un normale tubo a vuoto. Goldstein osservò che la colorazione è molto più intensa e rapida quando i sali sono mescolati o riscaldati al calor rosso. Solfato di potassio disciolto, sotto l'azione di una preparazione di radio particolarmente attiva, si colorava rapidamente di un intenso verde bluastrò che gradualmente cambiava in verde scuro. Salomonsen e Dreyer<sup>29</sup> trovarono che piatti di quarzo si coloravano se esposti ai raggi del radio. Quando si esaminavano minutamente, i piatti tagliati perpendicolarmente all'asse ottico mostravano la presenza di linee e striature, parallele agli assi binari. Parti adiacenti del sistema striato differivano considerevolmente in intensità di colorazione e rivelavano chiaramente l'eterogeneità della struttura del cristallo.

La causa di queste colorazioni dovute ai raggi catodici e del radio è stata oggetto di molte discussioni. Elster e Geitel<sup>30</sup> osservarono che un campione di solfato di potassio, colorato di verde dai raggi del radio, mostrava una intensa azione fotoelettrica, cioè perdeva rapidamente una carica negativa quando era esposto all'azione dei raggi ultravioletti. Tutte le sostanze colorate dai raggi catodici mostrano una forte azione fotoelettrica, e, poiché il sodio e il potassio metallici mostrano pure questa stessa azione in modo molto significativo, Elster e Geitel hanno suggerito che le colorazioni fossero causate da una soluzione solida del metallo nel sale.

Sebbene la colorazione dovuta al radio si estenda più in profondità di quella dovuta ai raggi catodici, se esposto alla luce, il colore si affievolisce con le stesse modalità in entrambi i casi.

<sup>27</sup>S. e P. Curie, C. R. 129, p. 828, 1899.

<sup>28</sup>Giesel, Verhandlg. d. D. Phys. Ges. 5 gennaio 1900.

<sup>29</sup>Salomonsen e Dreyer, C. R. 139, p. 533, 1904.

<sup>30</sup>Elster e Geitel, Phys. Zeit. p. 113, No. 3, 1902.

Becquerel<sup>31</sup> trovò che il fosforo bianco si mutava in una varietà di rosso per l'azione dei raggi del radio. Questa azione era dovuta principalmente ai raggi  $\beta$ . La radiazione secondaria prodotta dai raggi primari produceva pure un effetto marcato. I raggi del radio, come la luce visibile, causavano pure un precipitato di cloruro di mercurio in presenza di acido ossalico.

Hardy e Miss Wilcock<sup>32</sup> trovarono che una soluzione di iodofornio in clorofornio assumeva il color porpora dopo l'esposizione per 5 minuti ai raggi da 5 mg di bromuro di radio. Questa azione è dovuta alla liberazione di iodio. Testando l'effetto di schermi di diverso spessore, sopra il radio, si trovò che questa azione era principalmente dovuta ai raggi *beta* del radio. I raggi Röntgen producono una colorazione simile.

Hardy<sup>33</sup> osservò pure un'azione dei raggi del radio sulla globulina coagulata. Furono utilizzate due soluzioni di globulina di siero di bue, una resa elettropositiva con l'aggiunta di acido acetico, e l'altra negativa aggiungendo ammoniaca. Quando la globulina era esposta vicino al radio in una goccia pure, l'opalescenza della soluzione elettropositiva diminuiva rapidamente, mostrando che la soluzione diveniva più completa. La soluzione elettronegativa si mutava rapidamente in una gelatina e diveniva opaca. Queste azioni si verificarono essere dovute ai soli raggi  $\alpha$  del radio.

Questa è un'ulteriore evidenza a favore dell'ipotesi che i raggi  $\alpha$  sono corpi carichi positivamente di dimensioni atomiche, e un simile effetto di coagulazione è prodotto dagli ioni metallici degli elettroliti liquidi, ed è stato mostrato da W.C.D. Whetham<sup>34</sup> essere dovuto alle cariche elettriche trasportate dagli ioni.

**124. Gas che si sviluppano dal radio.** Curie e Debierne<sup>35</sup> osservarono che le preparazioni di radio poste in un tubo a vuoto riducono continuamente il vuoto. Il gas sviluppato era sempre accompagnato dalla emanazione, ma non fu osservata alcuna nuova linea nel suo spettro. Giesel<sup>36</sup> ha osservato un'evoluzione simile del gas da soluzioni di bromuro di radio. Giesel inviò alcuni materiali attivi a Runge e Bödlander, di modo che potessero analizzare il gas spettroscopicamente. Da 1 g di una preparazione di radio al 5% ottenne 3.5 cm<sup>3</sup> di gas in 16 giorni. Questo gas era principalmente idrogeno con il 12% di ossigeno. In successivi esperimenti Ramsay e Soddy<sup>37</sup> trovarono che 50 mg di bromuro di radio producevano gas al ritmo di 0.5 cm<sup>3</sup> al giorno. Questo è un tasso di evoluzione circa doppio di quello osservato da Runge e Bödlander. Analizzando i gas circa il 28.9% era ossigeno e il rimanente idrogeno. Il lieve eccesso di idrogeno superiore a quello conseguito nella decomposizione dell'acqua, lo considerarono dovuto all'azione dell'ossigeno sul lubrificante del rubinetto di arresto. L'emanazione radioattiva dal radio ha una forte azione ossidante e produce rapidamente anidride carbonica, se è presente materia contenente carbonio. La produzione di gas è probabilmente dovuta all'azione delle radiazioni nella scomposizione dell'acqua. La quantità di energia richiesta per produrre il tasso di decomposizione osservato da Ramsay e Soddy - circa 10 cm<sup>3</sup> al giorno per 1 g di bromuro di radio - corrisponde a circa 30 grammi calorie al giorno. Questa quantità di energia è circa il 2% dell'energia totale emessa sotto forma di calore.

Ramsay e Soddy (citati) hanno pure osservato la presenza di elio nei gas prodotti dalla soluzione di bromuro di radio. Questo importante risultato è considerato in dettaglio nella sezione 267.

#### *Azione Fisiologica.*

**125.** Walkhoff per primo osservò che i raggi del radio producono ustioni simili a quelle prodotte dai raggi Röntgen. Esperimenti in questa direzione sono stati compiuti da Giesel, Curie e Becquerel, e altri, con risultati molto simili. Vi è inizialmente una dolorosa irritazione, seguita da una infiammazione, che dura dai 10 ai 20 giorni. Questo effetto è prodotto da tutte le preparazioni di radio, e sembra essere dovuta principalmente ai raggi  $\alpha$  e  $\beta$ .

Si deve prestare attenzione nel maneggiare il radio a causa della dolorosa infiammazione prodotto dai raggi. Se un dito è posto per alcuni minuti alla base di una capsula contenente un preparato di radio, la pelle si infiamma per 15 giorni e poi si stacca. La sensazione di dolore non scompare prima di due mesi.

Danysz<sup>38</sup> trovò che questa azione riguarda in particolare la pelle, e non si estende al tessuto sottostante. I bruchi tessitori sottoposti all'azione dei raggi perdono la loro capacità di movimento in parecchi giorni per poi morire.

I raggi del radio hanno mostrato benefici in alcuni casi di cancro. L'effetto è apparentemente simile a quello prodotto dai raggi Röntgen, ma l'uso del radio ha il grande vantaggio che la sorgente radiante può essere racchiusa in un tubo sottile e introdotta nel particolare punto in cui si richiede l'azione dei raggi. Essi possono anche ostacolare o fermare lo sviluppo dei microbi<sup>39</sup>.

Non è qui il luogo per dare conto dei numerosi esperimenti eseguiti dai fisici e dai fisiologi sull'azione dei raggi del radio e di altre sostanze radioattive su diversi organismi, come bruchi, topi e cavie. In alcuni casi, gli esperimenti sono stati portati a termine ponendo gli organismi in un'atmosfera impregnata con emanazioni del radio. L'effetto dell'esposizione

<sup>31</sup>Becquerel, C. R. 133, p. 709, 1901.

<sup>32</sup>Hardy e Miss Wilcock, Proc. Roy. Soc. 72, p. 200, 1903.

<sup>33</sup>Hardy, Proc. Physiolog. Soc. 16 maggio, 1903.

<sup>34</sup>Whetham, Phil. Mag. novembre 1899; Theory of Solution, Camb. 1902, p. 396.

<sup>35</sup>Curie e Debierne, C. R. 132, p. 768, 1901.

<sup>36</sup>Giesel, Ber. D. d. Chem. Ges. 35, p. 3605, 1902.

<sup>37</sup>Ramsay e Soddy, Proc. Roy. Soc. 72, p. 204, 1903.

<sup>38</sup>Danysz, C. R. 136, p. 461, 1903.

<sup>39</sup>Aschkinass e Caspari, Arch. d. Ges. Physiologie, 86, p. 603, 1901.

in tali condizioni per parecchi giorni o settimane si è rivelato in genere nocivo e in molti casi mortale. La letteratura in questo nuovo settore di studio è già ampia ed è in rapida crescita.

Un'altra interessante azione dei raggi del radio è stata osservata da Giesel. Toccando una preparazione di radio ad occhi chiusi in una stanza buia, si osservava una sensazione di luce diffusa. Questo effetto è stato esaminato da Himstedt e Nagel<sup>40</sup>, i quali hanno mostrato che esso è dovuto alla fluorescenza prodotta dai raggi negli occhi stessi. I ciechi sono in grado di percepire questa luminosità solo se la retina è intatta. Hardy e Anderson<sup>41</sup> hanno esaminato in dettaglio questo effetto. La sensazione di luce è prodotta sia dai raggi  $\gamma$  che  $\beta$ . La palpebra assorbe praticamente tutti i raggi  $\beta$ , cosicché la luminosità osservata ad occhi chiusi è dovuta ai soli raggi  $\gamma$ . Il cristallino e la retina sono altamente fosforescenti sotto l'azione dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$ . Hardy e Anderson considerano che la luminosità osservata in una camera buia ad occhi aperti (la luce fosforescente del radio viene bloccata da un foglio di carta nera) è dovuta alla fosforescenza prodotta nelle palpebre. I raggi  $\gamma$ , per la maggior parte, producono la sensazione di luce quando colpiscono la retina.

Tommasina affermò che l'aria espirata dall'uomo conteneva una maggiore quantità di ioni dell'aria atmosferica, e, di conseguenza, causava un tasso maggiore di scarica in un elettroscopio. L'esperimento fu ripetuto da Elster e Geitel ma con risultati negativi. D'altro canto, essi trovarono che il respiro del Dr Geisel, di Braunschweig, che operavano continuamente nella separazione chimica dei corpi radioattivi, causava una rapida perdita di carica in un elettroscopio. Questo ritmo aumentato di scarica era probabilmente dovuto in larga parte all'emanazione del radio, di cui il suo sistema si era impregnato inalando l'aria carica di emanazione del laboratorio.

---

<sup>40</sup>Himstedt e Nagel, *Drude's Annal.* 4, p. 537, 1901.

<sup>41</sup>Hardy e Anderson, *Proc. Roy. Soc.* 72, p. 393, 1903.

## Produzione continua di materia radioattiva

**126.** Presentiamo ora un resoconto di alcuni esperimenti che hanno gettato molta luce, non solo sulla natura dei processi che servono a mantenere la radioattività dei corpi radioattivi, ma anche sulla sorgente dell'energia continuamente emessa da questi corpi. In questo capitolo, per semplicità, considereremo solo la radioattività dell'uranio e del torio, e si vedrà in seguito che le variazioni che hanno luogo in queste due sostanze sono tipiche di quelle che avvengono in tutte le sostanze radioattive.

Abbiamo visto (sezione 23) che vi è qualche dubbio sul fatto che la radioattività del torio sia dovuta all'elemento stesso o a un costituente radioattivo non noto ad esso associato. Questa incertezza, tuttavia, non presenta serie difficoltà quando discutiamo della radioattività del torio, perché le conclusioni sono, per la maggior parte, indipendenti dal fatto che il torio sia o meno un costituente radioattivo primario. Per semplicità, tuttavia, assumeremo per ora che la radioattività è dovuta al torio stesso. Se future ricerche mostreranno in modo definitivo il contrario, i processi radioattivi considerati si riferiranno a questo nuovo elemento.

**127. Uranio X.** L'esperimento di Madame Curie mostra che la radioattività di uranio e radio è un fenomeno atomico. L'attività dei composti dell'uranio dipende solo dalla quantità di elemento presente, e non dalla combinazione chimica con altre sostanze e non è dipendente da ampie variazioni di temperatura. Potrebbe allora sembrare probabile, poiché l'attività dell'uranio è una proprietà specifica dell'elemento, che l'attività non sia separata dai suoi agenti chimici.

Nel 1900, tuttavia, Sir William Crookes<sup>1</sup> mostrò che, con un singolo procedimento chimico, l'uranio poteva essere ottenuto fotograficamente inattivo mentre l'intera attività doveva essere concentrata in un piccolo residuo libero dall'uranio. Questo residuo, al quale dette il nome di *UrX*, era molte centinaia di volte fotograficamente più attivo, a parità di peso, dell'uranio dal quale era stato separato. Il metodo impiegato per questa separazione consisteva nel precipitare una soluzione di uranio con carbonato di ammonio. Sciogliendo il precipitato in un surplus di reagente, rimaneva indietro un precipitato luminoso. Questo era filtrato e costituiva l'*UrX*. La sostanza attiva *UrX* era probabilmente presente in quantità molto piccole, mescolata con impurità derivate dall'uranio. Non erano osservate nuove righe nello spettro. Una parziale separazione dell'attività dell'uranio era pure conseguenza di un altro metodo. Il nitrato di uranio cristallino era disciolto in etere, quando fu trovato che l'uranio si divideva tra l'etere e l'acqua presente in due frazioni disuguali. La piccola parte disciolta in acqua conteneva praticamente tutta l'attività se esaminata con il metodo fotografico, mentre l'altra frazione era quasi inattiva. Questi risultati, presi di per sé, portavano con forza alla conclusione che l'attività dell'uranio non era dovuta all'elemento stesso, ma ad una certa altra sostanza, ad esso associata, che aveva proprietà chimiche distinte.

Il risultato di un simile comportamento fu osservato da Becquerel<sup>2</sup>. Trovò che il bario poteva essere reso fotograficamente molto attivo aggiungendo cloruro di bario alla soluzione di uranio e precipitando il bario come solfato. Con una serie successiva di precipitazioni l'uranio era reso fotograficamente quasi inattivo, mentre il bario diveniva fortemente attivo.

L'uranio inattivo e il bario attivo erano preparati separatamente; ma, esaminandoli un anno dopo, trovò *che l'uranio aveva completamente riguadagnato la propria attività, mentre quella del bario era completamente scomparsa*. La perdita di attività dell'uranio era pertanto solo di carattere temporaneo.

Nell'esperimento citato, l'attività dell'uranio era esaminata con il metodo fotografico. L'azione fotografica prodotta dall'uranio è dovuta quasi interamente ai raggi  $\beta$ . I raggi  $\alpha$ , in confronto, hanno un piccolo effetto. La radiazione dall'*UrX* consiste interamente di raggi  $\beta$ , ed è, di conseguenza, fotograficamente molto attiva. Se l'attività dell'uranio veniva misurata elettricamente senza schermi sopra di esso, la corrente osservata era in larga parte dovuta ai raggi  $\alpha$ , ed erano osservate piccole variazioni dopo la rimozione dell'*UrX*, poiché solo il componente responsabile dei raggi  $\beta$  era stato rimosso. Questo importante punto è discusso con maggiore dettaglio nella sezione 205.

**128. Torio X..** Rutherford e Soddy<sup>3</sup>, lavorando con composti del torio, trovarono che un costituente intensamente attivo poteva esserne separato con un solo procedimento chimico. Se si aggiungeva l'ammoniaca a una soluzione di torio, esso precipitava, ma una grande quantità dell'attività rimaneva nel filtrato, che è chimicamente libero dal torio. Questo filtrato veniva evaporato a secco e i sali di ammonio portati via per bruciamento. Si otteneva un piccolo residuo che, a parità di peso, era in alcuni casi parecchie migliaia di volte più attivo del torio dal quale era ottenuto, mentre l'attività

<sup>1</sup>Crookes, Proc. Roy. Soc. 66, p. 409. 1900.

<sup>2</sup>Becquerel, C. R. 131, 1900; 133, p. 977, 1901.

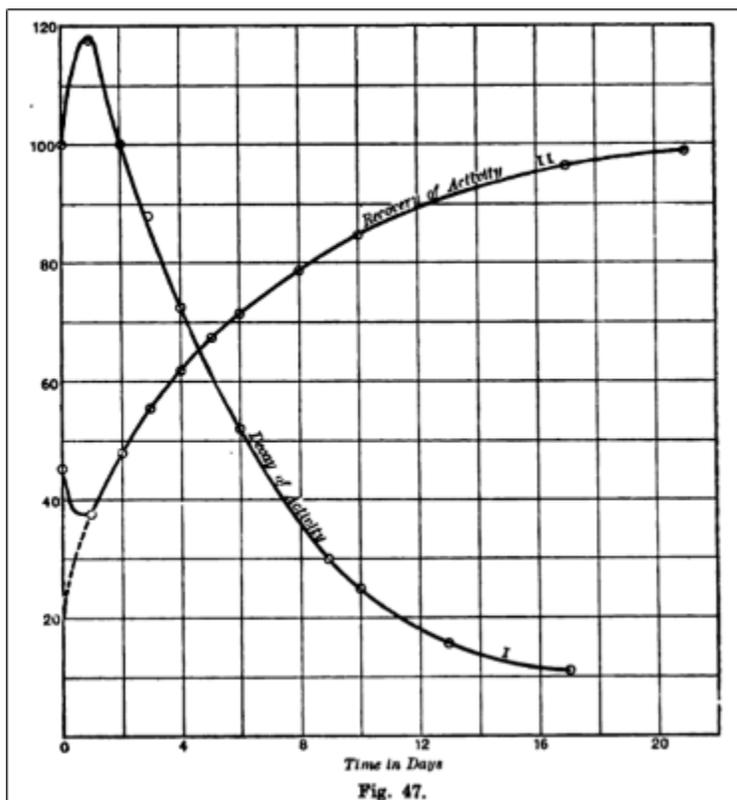
<sup>3</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. settembre e novembre 1902. Trans. Soc. 81, pp 821 e 837, 1902.

del precipitato di torio si riduceva a meno della metà del suo valore iniziale. Questo costituente attivo fu chiamato *ThX* in analogia allo *UrX* di Crookes.

Il residuo attivo consisteva principalmente di impurità dal torio; il *ThX* non poteva essere esaminato chimicamente, e probabilmente era presente solo in minuscole quantità. Si trovò anche che un costituente attivo poteva essere parzialmente separato dall'ossido di torio agitando in acqua per un certo tempo. Filtrando l'acqua, ed evaporandola, si otteneva un residuo molto attivo che era analogo in tutti gli aspetti al *ThX*.

Esaminando i prodotti un mese dopo, si trovò che *il ThX non era più attivo, mentre il torio aveva completamente recuperato la propria attività.*

Fu intrapresa allora una lunga serie di misure per esaminare il ritmo temporale di questi processi di decadimento e recupero dell'attività.



I risultati sono mostrati graficamente in Figura 47, dove l'attività finale del torio e quella iniziale del *ThX* sono in ogni caso riferiti a 100. Le ordinate rappresentano le attività determinate per mezzo della corrente di ionizzazione, e le ascisse rappresentano il tempo in giorni. Si osserverà che entrambe le curve sono irregolari per i primi due giorni. L'attività del *ThX* aumentava inizialmente, mentre quella del torio diminuiva. Trascurando queste irregolarità iniziali delle curve, che saranno spiegate in dettaglio nella sezione 208, si vedrà che, dopo i primi due giorni, il tempo impiegato dal torio a recuperare metà della sua attività persa è circa uguale al tempo impiegato dal *ThX* a perdere metà della sua attività. Questo tempo in ogni caso è di circa 4 giorni. La percentuale dell'attività recuperata dal torio, in ogni dato intervallo, è approssimativamente uguale alla percentuale dell'attività persa dal *ThX* durante lo stesso intervallo.

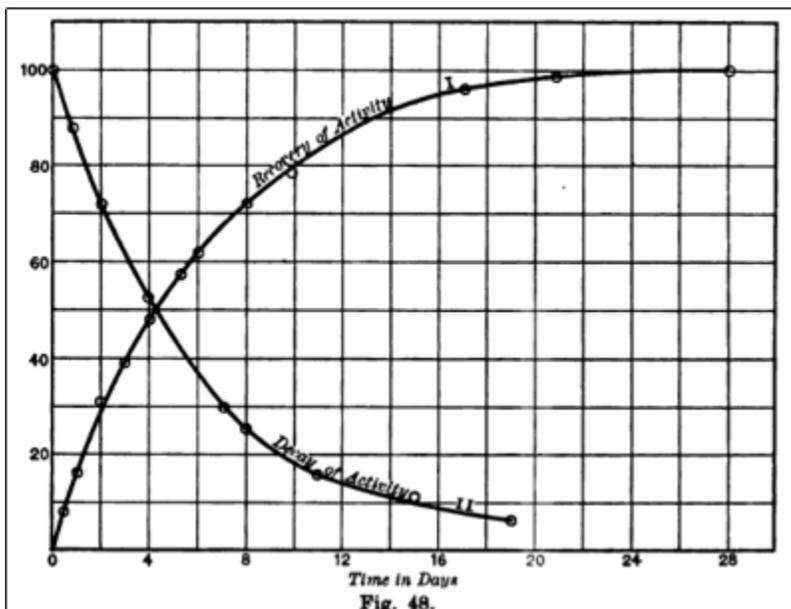
Se la curva di recupero è riprodotta a rovescio per incontrare l'asse verticale, ciò avviene al 25%, e la conclusione precedente diviene più accurata. Questo è chiaramente mostrato dalla Figura 48, dove le percentuali di attività recuperata, valutate dal minimo 25%, sono rappresentate in ordinate. Nella stessa figura la curva di decadimento, dopo il secondo giorno, è mostrata sulla stessa scala. L'attività del *ThX* decade in funzione del tempo in accordo con una legge esponenziale, riducendosi a metà del valore in circa 4 giorni. Se  $I_0$  è l'attività iniziale e  $I_t$  è quella dopo un tempo  $t$ , allora

$$\frac{I_0}{I_t} = e^{-\lambda t}$$

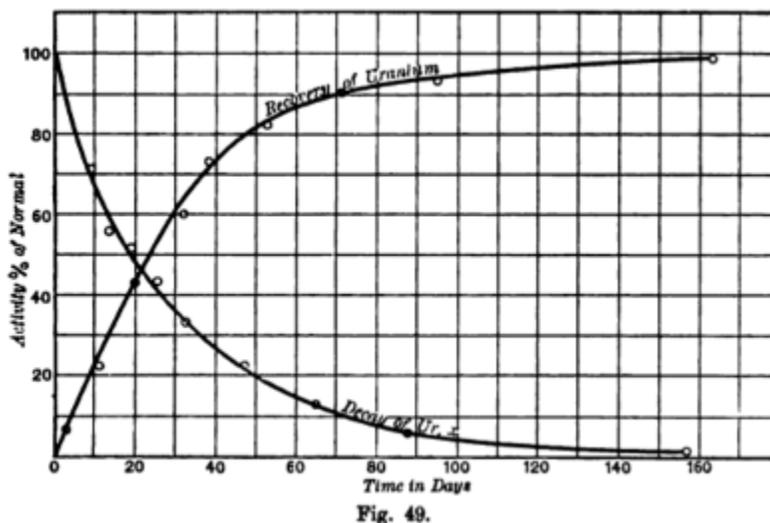
dove  $\lambda$  è una costante ed  $e$  la base del logaritmo naturale. La curva sperimentale della crescita di attività da un minimo a un valore massimo è pertanto espressa dall'equazione

$$\frac{I_t}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

dove  $I_0$  è la quantità di attività recuperata quando si raggiunge la condizione di attività costante,  $I_t$  è l'attività recuperata dopo un tempo  $t$ , e  $\lambda$  è la stessa costante di prima.



**129. Uranio X.** Risultati simili sono ottenuti quando si esamina l'uranio. L' $UrX$  è separato con il metodo di successive precipitazioni di bario di Becquerel. Il decadimento dell'attività separata e il recupero di quella persa sono mostrati graficamente in Figura 49. Una discussione più dettagliata di questo esperimento è data nella sezione 205.



Le curve di decadimento e recupero mostrano le stesse particolarità e si possono esprimere con le stesse equazioni del caso del torio. Il ritmo temporale del decadimento e del recupero è, tuttavia, molto più lento che per il torio, riducendosi a metà l'attività del  $ThX$  in circa 22 giorni.

Un grande numero di risultati con caratteristiche simili sono stati ottenuti da altri prodotti radioattivi, separati dai radio elementi, ma i casi di torio e uranio basteranno per ora a formare una base di discussione dei processi che hanno luogo nei corpi radioattivi.

**130. Teoria dei fenomeni.** Questi processi di decadimento e recupero procedono con lo stesso ritmo se le sostanze sono rimosse dalle vicinanze di un'altra, o racchiuse nel piombo, o poste in un tubo a vuoto. È a prima vista un significativo fenomeno che i processi di decadimento e recupero siano così intimamente connessi, sebbene non vi siano possibilità di reciproca interazione. Questi risultati, tuttavia, sono completamente spiegati dalle seguenti ipotesi:

- (1) Vi è un tasso costante di produzione di nuova materia radioattiva dal corpo radioattivo;
- (2) L'attività della materia così formata diminuisce secondo una legge esponenziale con il tempo dal momento della sua formazione

Supponiamo che  $q_0$  particelle di nuova materia siano prodotte per secondo da una data massa di materia. Il tasso di emissione dell'energia dovuta alle particelle prodotte nel tempo  $dt$  è, nel momento della loro formazione, uguale a  $Kq_0dt$ , con  $K$  costante.

Si chiede di trovare l'attività dovuta all'intera materia prodotta dopo che il processo è proseguito per un tempo  $T$ .

L'attività  $dI$ , dovuta alla materia prodotta durante il tempo  $dt$  al tempo  $t$ , decade secondo una legge esponenziale durante il tempo  $T - t$  che passa prima che la sua attività venga valutata, e di conseguenza è data da

$$dI = Kq_0 e^{-\frac{\lambda}{T-t}} dt$$

dove  $\lambda$  è la costante di decadimento dell'attività della materia attiva. L'attività  $I_T$  dovuta all'intera materia prodotta nel tempo  $T$  è, allora, data da

$$I_T = \int_0^T Kq_0 e^{-\frac{\lambda}{T-t}} dt = \frac{Kq_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T})$$

L'attività raggiunge un valore massimo  $I_0$  quando  $T$  è molto grande, ed è allora data da

$$I_0 = \frac{Kq_0}{\lambda}$$

pertanto

$$\frac{I_T}{I_0} = 1 - e^{-\lambda T}$$

Questa equazione è in accordo con i risultati sperimentali per il recupero dell'attività persa. Un altro metodo per ottenere questa equazione è presentato nella sezione 133.

Si raggiunge una condizione di equilibrio quando il tasso di perdita di attività della materia già prodotta è bilanciato dall'attività fornita dalla produzione di nuova materia attiva. Secondo questo punto di vista, i corpi radioattivi subiscono cambiamenti, ma l'attività rimane costante a causa dell'azione di due processi opposti. Se questa materia attiva può in ogni momento essere separata dalla sostanza nella quale è prodotta, il decadimento della sua attività dovrà seguire una legge esponenziale con il tempo, poiché ogni porzione della materia diminuisce in attività secondo una legge esponenziale con il tempo, qualunque sia la sua età. Se  $I_0$  è l'attività iniziale del prodotto separato, l'attività  $I_t$  dopo un intervallo dato è

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}$$

Pertanto, le due ipotesi - della produzione uniforme di materia attiva e del decadimento della sua attività con una legge esponenziale dal momento della sua formazione - spiegano soddisfacentemente la relazione tra le curve di decadimento e di recupero dell'attività.

**131. Evidenza sperimentale.** Rimangono ora da considerare ulteriori prove sperimentali a sostegno di queste ipotesi. L'idea principale è che i corpi radioattivi sono in grado di produrre da loro stessi materia con proprietà chimiche diverse da quella della materia genitrice, e che questo processo procede con un tasso costante. Questa nuova materia inizialmente manifesta attività, e la perde secondo una legge ben definita. Il fatto che una proporzione dell'attività del radio e del torio possano essere concentrate in piccole quantità di materia attiva come  $ThX$  e  $UrX$  non rappresenta, di per sé, una prova diretta che un materiale costituente responsabile dell'attività sia stato chimicamente separato. Per esempio, nel caso della separazione del  $ThX$  dal torio, si deve supporre che la parte non torio della soluzione sia resa temporaneamente attiva dalla sua associazione con il torio, e che questa proprietà sia mantenuta attraverso i processi di precipitazione, evaporazione e bruciamento e, infine, si manifesti nel residuo restante. Secondo questo punto di vista ci si deve aspettare che ogni precipitato in grado di rimuovere il torio completamente dalla sua soluzione debba produrre residui attivi simili a quelli ottenuti dall'ammoniaca, ma ciò non è mai stato osservato. Per esempio, quando il nitrato di torio è precipitato dal sodio o dal carbonato di ammonio, il residuo dal filtrato dopo evaporazione e bruciamento è privo di attività e il carbonato di torio ottenuto ha la consueta quantità di attività. Infatti, l'ammoniaca è il solo reagente finora trovato in grado di separare completamente il  $ThX$  dal torio. Una separazione parziale del  $ThX$  si può ottenere mescolando ossido di torio con acqua a causa della sua grande solubilità in acqua.

Torio e uranio si comportano in modo alquanto diverso rispetto all'azione dell'ammoniaca e del carbonato di ammonio.  $UrX$  è completamente precipitato con l'uranio in una soluzione di ammoniaca e il filtrato è inattivo.  $UrX$  è separato dal carbonato di ammonio, mentre  $ThX$  nelle stesse condizioni è completamente precipitato con il torio. L' $UrX$  e il  $ThX$  si comportano, quindi, come tipi distinti di materia con proprietà chimiche ben definite del tutto distinte da quelle delle sostanze nelle quali sono prodotti. La rimozione dell' $UrX$  dalla precipitazione di bario è probabilmente non direttamente collegata con le proprietà chimiche dell' $UrX$ . La separazione è probabilmente dovuta al trascinarsi in basso dell' $UrX$  con il denso precipitato di bario. Sir William Crookes trovò che l' $UrX$  era trascinato in basso dai precipitati quando non vi era alcun problema di insolubilità, e un tale risultato è prevedibile se l' $UrX$  esiste in quantità estremamente piccola. Si deve pensare che la quantità effettiva del costituente attivo  $ThX$  e  $UrX$ , separati dal torio e dall'uranio, è probabilmente infinitesimale e che la parte maggiore dei residui è dovuta alle impurità presenti nel sale e nel reagente, essendo mescolata con essi una piccola quantità di materia attiva.

**182. Tasso di produzione del  $ThX$ .** Se il recupero dell'attività dell'uranio e del torio è dovuta alla continua produzione di nuova materia attiva, dovrà essere possibile ottenere una prova sperimentale del processo. Poiché il caso del torio è stato completamente investigato, si darà un breve resoconto di alcuni esperimenti fatti da Rutherford e Soddy<sup>4</sup> per mostrare che il  $ThX$  è prodotto continuamente con un tasso costante. Esperimenti preliminari mostrarono che erano sufficienti tre successive precipitazioni per rimuovere il  $ThX$  quasi completamente dal torio. Il metodo generale impiegato consisteva nel precipitare una soluzione di 5 g di nitrato di torio con ammoniaca. Il precipitato era poi ridisciolto in acido nitrico e il torio era di nuovo precipitato, il più rapidamente possibile, cosicché il  $ThX$  prodotto nel tempo tra successive precipitazioni non inficiava sensibilmente i risultati. La rimozione del  $ThX$  era seguita dalle misure di attività dei residui ottenuti dai successivi filtrati. In tre successive filtrazioni le attività dei residui erano proporzionali rispettivamente a 100, 8, 1.6. Le due precipitazioni, pertanto, bastano quasi da sole a liberare il torio dal  $ThX$ .

Il torio liberato dal  $ThX$  era poi lasciato a riposo per un tempo definito, e la quantità di  $ThX$  formatasi durante questo tempo impiegato per precipitarlo misurava la sua radioattività. Secondo la teoria, l'attività  $I_t$  del torio formato nel tempo  $t$  è dato da

$$\frac{I_t}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

dove  $I_0$  è l'attività totale del  $ThX$ , quando vi è equilibrio radioattivo.

Se  $\lambda t$  è piccolo,

$$\frac{I_t}{I_0} = \lambda t$$

Poiché l'attività del  $ThX$  si riduce alla metà in 4 giorni, il valore di  $\lambda$  espresso in ore è uguale a 0.0072. Lasciandolo a riposo per un periodo di circa  $1 + \frac{1}{140}$  ore, si poteva ottenere dopo  $1 + \frac{1}{6}$  giorni e  $4 + \frac{1}{2}$  giorni del massimo. I risultati sperimentali ottenuti mostravano un accordo, buono come ci si attendeva, con l'equazione che esprime il risultato che il  $ThX$  prodotto con un tasso costante.

Il nitrato di torio che era stato purificato dal  $ThX$  poteva stare a riposo per un mese, e poi era di nuovo sottoposto allo stesso processo. L'attività del  $ThX$  era la stessa di quella ottenuta da un'eguale quantità del nitrato di torio iniziale. In un mese, pertanto, il  $ThX$  era stato rigenerato ed aveva raggiunto un valore massimo. Togliendo il tempo necessario per rigenerare l'intera attività del torio, questo processo può essere ripetuto indefinitamente, ottenendo uguali quantità di  $ThX$  a ogni precipitazione. Il nitrato di torio commerciale e il più puro nitrato ottenibile mostravano esattamente la stessa azione, e uguali quantità di  $ThX$  si potevano ottenere da pesi uguali. Questi processi appaiono, pertanto, essere indipendenti dalla purezza chimica della sostanza<sup>5</sup>.

Il processo di produzione del  $ThX$  è continuo, e non è stata osservata alcuna alterazione nella quantità prodotta nel dato tempo dopo ripetute separazioni. Dopo 23 precipitazioni in 9 giorni, la quantità prodotta in un dato intervallo era circa la stessa di quella all'inizio del procedimento.

Questi risultati sono tutti in accordo con l'ipotesi che il  $ThX$  è continuamente prodotto dal componente del torio ad un tasso costante. La quantità di materia attiva prodotta da 1 g di torio è probabilmente estremamente piccola, ma gli effetti elettrici dovuti alla sua attività sono così grandi che il processo di produzione può essere seguito dopo intervalli estremamente brevi. Con un elettrometro sensibile la quantità di  $ThX$  prodotta per minuto in 10 g di nitrato di torio determina un rapido movimento dell'ago dell'elettrometro. Per intervalli più grandi è necessario aggiungere una capacità aggiuntiva al sistema per riportare gli effetti entro il range strumentale.

**133. Tasso di decadimento dell'attività.** Si è mostrato che l'attività dell' $UrX$  e del  $ThX$  decade secondo una legge esponenziale con il tempo. Questa, come vedremo in seguito, è la legge generale del decadimento dell'attività in ogni tipo di materia attiva, dovuta a se stessa, e liberata da ogni prodotto secondario attivo che può, pure esso, produrne. In ogni caso, quando questa legge non è verificata, si può mostrare che l'attività è dovuta alla sovrapposizione di due o più effetti, ognuno dei quali decade con una legge esponenziale con il tempo. L'interpretazione fisica di questa legge deve ancora essere discussa.

È stato mostrato che nei componenti dell'uranio e del torio vi è una continua produzione di materia attiva che mantiene il componente in equilibrio radioattivo. I cambiamenti tramite i quali è prodotta la materia attiva devono essere di natura chimica, poiché i prodotti dell'azione sono diversi nelle proprietà chimiche dalla materia nella quale sono avvenuti tali cambiamenti. L'attività dei prodotti ha offerto il mezzo di seguire la variazione che in essi avviene. Rimane ora da considerare la connessione tra l'attività in funzione del tempo e la quantità di cambiamento chimica che avviene in quel tempo.

In primo luogo, si è trovato sperimentalmente che la corrente di saturazione  $i_t$ , dopo che il prodotto attivo è decaduto per un tempo  $t$ , è data da

$$\frac{i_t}{i_0} = e^{-\lambda t}$$

<sup>4</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. settembre 1902.

<sup>5</sup>Il metodo generale in merito alla questione deve essere invariato, anche se fu dimostrato che la radioattività del torio non è dovuta completamente al torio ma a una piccola quantità costante di impurità radioattiva ad esso mescolata.

dove  $i_0$  è la corrente di saturazione iniziale e  $\lambda$  la costante di decadimento.

La corrente di saturazione è una misura del numero totale di ioni prodotti per secondo nel contenitore di prova. È già stato mostrato che i raggi  $\alpha$ , che producono la maggior parte della ionizzazione nel gas, sono particelle cariche positivamente scagliate con grande velocità. Supponiamo per semplicità che ogni atomo della materia attiva, durante il suo cambiamento, produca l'emissione di una particella  $\alpha$ . Ogni particella  $\alpha$  produrrà un certo numero medio di ioni lungo il suo cammino prima di colpire il bordo o di essere assorbita nel gas. Poiché il numero di particelle emesse per secondo è uguale al numero di atomi che cambiano per secondo, il numero di atomi  $n_t$  che cambiano per secondo al tempo  $t$  è dato da

$$\frac{n_t}{n_0} = e^{-\lambda t}$$

dove  $n_t$  è il numero iniziale che cambia al secondo. Da questo punto di vista, allora, la legge di decadimento esprime il risultato che il numero di atomi che cambiano nell'unità di tempo, diminuisce in accordo con una legge esponenziale con il tempo. Il numero di atomi  $N_t$  che rimane invariato dopo un intervallo di tempo  $t$  è dato da

$$N_t = \int_t^\infty n_t dt = \frac{n_0}{\lambda} e^{-\lambda t}$$

Se  $N_0$  è il numero di atomi iniziali,

$$N_0 = \frac{n_0}{\lambda}$$

Pertanto

$$(6.0.8) \quad \frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

o la legge del decadimento esprime il fatto che *l'attività di un prodotto in ogni istante è proporzionale al numero di atomi che rimane invariato in quel tempo.*

Questa è la stessa della legge di cambiamento mono molecolare in chimica, ed esprime il fatto che vi è solo un sistema di cambiamento. Se il cambiamento dipendesse dalla mutua azione di due sistemi, la legge di decadimento dovrebbe essere diversa, poiché il tasso di decadimento in quel caso dipenderebbe dalla concentrazione relativa delle due sostanze reagenti. Questo non avviene, per nessun singolo caso finora osservato nel quale la legge di decadimento risentiva della quantità di materia attiva presente.

Dalla 6.0.8

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t$$

o il numero di sistemi che variano nell'unità di tempo è proporzionale al numero invariato in quel tempo.

Nel caso del recupero di attività, dopo la rimozione di un prodotto attivo, il numero di sistemi che cambiano nell'unità di tempo, quando è prodotto l'equilibrio radioattivo, è uguale a  $\lambda N_0$ . Questo deve essere uguale al numero  $q_0$  del nuovo sistema applicato in unità di tempo, o

$$q_0 = \lambda N_0$$

e

$$\lambda = \frac{q_0}{N_0}$$

$\lambda$  ha, pertanto, un significato fisico distinto, e può essere definito come la proporzione del numero totale di sistemi presenti che cambiano ogni secondo. Ha diversi valori per diversi tipi di materia attiva, ma è invariabile per ogni particolare tipo di materia. Per questa ragione,  $\lambda$  sarà chiamata la "*costante radioattiva*" del prodotto.

Siamo ora in grado di discutere con maggiore determinazione la crescita graduale di  $ThX$  nel torio, dopo che il  $ThX$  è stato completamente rimosso da esso. Siano  $q_0$  le particelle di  $ThX$  prodotte per secondo dal torio, e sia  $N$  il numero di particelle di  $ThX$  presenti in ogni istante  $t$  dopo che il  $ThX$  è stato rimosso. Il numero di particelle di  $ThX$  che cambia ogni secondo è  $\lambda N$ , dove  $\lambda$  è la costante radioattiva del  $ThX$ . Nel tempo durante il processo di recupero, il tasso di incremento del numero di particelle di  $ThX$  è uguale al tasso di produzione - il tasso di cambiamento; cioè

$$\frac{dN}{dt} = q_0 - \lambda N$$

La soluzione di questa equazione è della forma  $N = ae^{-\lambda t} + b$ , dove  $a$  e  $b$  sono costanti.

Quando  $t$  è molto grande, il numero presente di particelle di  $ThX$  raggiunge un valore massimo  $N_0$ .

Pertanto, poiché  $N = N_0$  quando  $t = \infty$ ,

$$b = N_0$$

poiché  $N = 0$  quando  $t = 0$ ,

$$a + b = 0$$

quindi

$$b = -a = N_0$$

e l'equazione diviene

$$\frac{N}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

Questa è equivalente all'equazione già ottenuta nella sezione 130, poiché l'intensità della radiazione è sempre proporzionale al numero di particelle presenti.

**134. Influenza delle condizioni sul tasso di decadimento.** Poiché l'attività di ogni prodotto, nel tempo, può essere presa come una misura del tasso con il quale avviene il cambiamento chimico, può essere usata come un mezzo per determinare l'effetto delle condizioni dei cambiamenti che avvengono nella materia radioattiva. Se il tasso di cambiamento fosse accelerato o ritardato, ci si deve aspettare che il valore della costante radioattiva  $\lambda$  aumenti o diminuisca, cioè che la curva di decadimento sia diversa in diverse condizioni.

Finora, tuttavia, questo effetto non si è mai osservato in ogni caso di trasformazione radioattiva, dove nessuno dei prodotti attivi prodotti è in grado di sfuggire dal sistema. Il tasso di decadimento è indipendente da ogni agente chimico o fisico, e in questo senso i cambiamenti nella materia radioattiva sono strettamente distinguibili da quelli chimici. Per esempio, il tasso di decadimento dell'attività per ogni prodotto avviene allo stesso ritmo quando la sostanza è esposta alla luce o quando è posta nell'oscurità, e nel vuoto o in aria o in ogni altro gas a pressione atmosferica. Il suo tasso di decadimento è invariato circondando la materia attiva con un sottile strato di piombo nella condizione in cui ogni radiazione esterna non può interagire. L'attività della materia è indipendente dal bruciamento o da trattamento chimico. Il materiale che dà origine all'attività può essere sciolto in acido e riottenuto per evaporazione della soluzione senza alterarne l'attività. Il tasso di decadimento è lo stesso sia che la materia attiva si trovi allo stato solido o venga posta in soluzione. Quando un prodotto ha perso la propria attività, un nuovo discioglimento o riscaldamento non la recupera, e come vedremo in seguito, il tasso di decadimento del prodotto attivo rimane lo stesso al calore rosso come alla temperatura dell'aria liquida. Infatti, nessuna variazione delle condizioni chimiche o fisiche ha portato ad una differenza osservabile nel decadimento dell'attività di ognuno dei numerosi tipi di materia attiva che sono stati esaminati.

**135. Effetto delle condizioni sul tasso di recupero dell'attività.** Il recupero dell'attività di un radio-elemento con il tempo, quando un prodotto attivo è da esso separato, è governato dal ritmo di produzione di nuova materia attiva e dal decadimento dell'attività di quella già prodotta. Poiché il tasso di decadimento dell'attività del prodotto separato è indipendente dalle condizioni, il tasso di recupero dell'attività può essere modificato solo da un cambiamento nel tasso di produzione di nuova materia attiva. Per quanti esperimenti siano stati fatti, il tasso di produzione, come quello di decadimento, è indipendente dalle condizioni chimiche o fisiche. Vi sono, invece, alcuni casi che mostrano apparenti eccezioni a questa regola. Per esempio, l'emissione di emanazioni radioattive dal torio e dall'uranio è senz'altro dipendente da calore, mescolanza e soluzione. Una più accurata indagine, tuttavia, mostra che l'eccezione è solo apparente e non reale. Questi casi saranno discussi con maggior dettaglio nel capitolo VII, ma si può qui affermare che le differenze osservate sono dovute alle differenze nel tasso di emissione delle emanazioni nel gas circostante, e non da differenze nel tasso di produzione. Per questa ragione è difficile valutare il problema in questione nel caso dei componenti del torio, che nella maggior parte dei casi permette all'emanazione da esso prodotta di sfuggire nell'aria.

Per mostrare che il tasso di produzione è indipendente dallo stato molecolare, dalla temperatura, ecc, è necessario in un tale caso intraprendere una lunga serie di misure estese sull'intero tempo di recupero. È impossibile fare confronti relativi accurati per vedere se l'attività è alterata dalla conversione di un componente in un altro. L'attività relativa in tale caso, quando è misurata dalla distribuzione uniforme di un dato peso di materia su una piastra metallica, varia grandemente con le condizioni fisiche del precipitato, sebbene l'attività totale dei due componenti possa essere la stessa.

Il metodo seguente<sup>6</sup> offre un mezzo accurato e semplice di studiare se il tasso di produzione della materia attiva è influenzato dallo stato molecolare. La sostanza è chimicamente convertita in ogni componente richiesto, facendo attenzione che i prodotti attivi siano recuperati durante il processo. Il nuovo componente è allora distribuito su una piastra metallica e confrontato con un campione standard di uranio per parecchi giorni o settimane. Se il tasso di produzione della materia attiva è alterato dalla conversione, vi sarà un aumento o una diminuzione dell'attività a un nuovo valore stazionario, dove la produzione di materia attiva è ancora bilanciata dal tasso di decadimento. Questo metodo ha il grande vantaggio di essere indipendente dalla condizione fisica del precipitato. Può essere applicato in modo soddisfacente a un composto del torio come il nitrato e l'ossido che sono stati riscaldati al calor bianco, dopo di che sfugge solo una piccola quantità di emanazione. Il nitrato era convertito in ossido in un crogiolo di platino per trattamento con acido solforico e riscaldamento al calor bianco. L'ossido così ottenuto era distribuito su una piastra, ma non venne osservato alcun cambiamento della sua attività in funzione del tempo, mostrando che in questo caso il tasso di produzione era indipendente dallo stato molecolare. Questo metodo, che è limitato nel caso del torio, può essere applicato generalmente ai composti dell'uranio dove i risultati non sono complicati dalla presenza di una emanazione.

Nessuna differenza è stata finora osservata nelle curve di recupero di diversi composti del torio dopo la rimozione del *ThX*. Per esempio, il tasso di recupero è lo stesso sia che l'idrossido precipitato sia convertito in ossido sia in solfato.

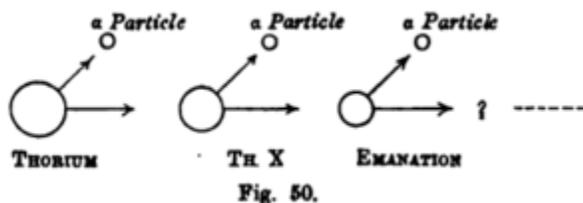
<sup>6</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. settembre 1902.

**136. Ipotesi di disintegrazione.** Nella discussione dei cambiamenti nei corpi radioattivi, sono stati considerati solo i prodotti attivi  $UrX$  e  $ThX$ . Si mostrerà, tuttavia, in seguito che questi due prodotti sono solo esempi di molti altri tipi di materia attiva che sono prodotti dagli elementi radioattivi, e che ognuno di questi tipi di materia attiva ha proprietà chimiche e radioattive definite, che li distinguono, non solo dagli altri prodotti attivi, ma anche dalla sostanza dalla quale sono prodotti.

La completa indagine di questi cambiamenti mostrerà di verificare in ogni particolare l'ipotesi che la radioattività si accompagna a cambiamenti chimici di un tipo speciale che avvengono nella materia, e che la costante di attività dei radio-elementi è dovuta a un processo di equilibrio, nel quale il tasso di produzione di nuova materia attiva bilancia il tasso di cambiamento di quella già formata.

Sarà ora considerata la natura del processo che ha luogo nei radio-elementi, per produrre a un tasso costante nuovi tipi di materia attiva. Poiché nei composti del torio e dell'uranio, che differiscono nelle proprietà chimiche dalla sostanza genitrice, alcuni tipi di cambiamento devono aver luogo nel radio-elemento. Questo cambiamento, con il quale viene prodotta una materia nuova, ha caratteristiche molto diverse dal cambiamento molecolare trattato in chimica, non essendo noto alcun cambiamento che procede con lo stesso tasso alla temperatura corrispondente a un calor rosso e all'aria liquida, ed è indipendente da tutte le azioni chimiche e fisiche. Se, tuttavia, la produzione di materia attiva è supposta essere il risultato dei cambiamenti, non nelle molecole, ma nell'*atomo stesso*, non ci si deve attendere che la temperatura possa esercitare molta influenza. L'esperienza generale dei chimici nel trasformare gli elementi mediante l'azione della temperatura è essa stessa una forte prova che ampi intervalli di temperature non producono molto effetto nell'alterare la stabilità dell'atomo chimico.

Il punto di vista che gli atomi dei radio-elementi subiscono disintegrazioni spontanee è stato proposto da Rutherford e Soddy come un risultato dell'evidenza di questa caratteristica. La scoperta della natura effettiva dei raggi  $\alpha$  aggiunse una forte conferma a questa ipotesi; è stato sottolineato (sezione 95) che l'espulsione di particelle  $\alpha$  deve essere il risultato di una disintegrazione dell'atomo del radio-elemento. Prendendo ad esempio il caso del torio, il processo che avviene nell'atomo può essere descritto nel modo seguente. Si deve supporre che gli atomi di torio non rappresentino un sistema permanentemente stabile, ma, in media, una piccola parte costante di essi - circa un atomo ogni  $10^{16}$  potrebbe bastare - va in pezzi ogni secondo. La disintegrazione consiste nell'espulsione dall'atomo di una o più particelle  $\alpha$  con grande velocità. Per semplicità, si supporrà che ogni atomo espelle una particella  $\alpha$ . È stato mostrato che la particella  $\alpha$  del radio ha una massa circa doppia di quella dell'atomo di idrogeno. Per similitudine tra la particella  $\alpha$  dal torio e dal radio, è probabile che la particella  $\alpha$  del torio non abbia una massa molto diversa da quella del radio, e possa essere uguale a quella. Le particelle  $\alpha$  emesse dagli atomi di torio che si spezzano costituiscono ciò che è noto come "l'attività non separabile" del torio. Questa attività, misurata dai raggi  $\alpha$ , è circa il 25% del massimo. Dopo l'emissione di una particella  $\alpha$ , la parte dell'atomo rimanente, che ha una massa di poco inferiore a quella dell'atomo di torio, tende a redistribuire i suoi componenti per formare un sistema temporaneamente stabile. Ci si deve aspettare che essi differiscano nelle proprietà chimiche dall'atomo di torio dal quale sono derivati. L'atomo della sostanza  $ThX$  è, da questo punto di vista, l'atomo di torio meno una particella  $\alpha$ . Gli atomi di  $ThX$  sono molto più instabili dell'atomo di torio, e uno dopo l'altro si spezzano, espellendo ognuno di essi una particella  $\alpha$  come prima. Queste particelle  $\alpha$  emesse producono la *radiazione* dal  $ThX$ . Poiché l'attività del  $ThX$  si riduce alla metà di quella iniziale in circa 4 giorni, cioè circa la metà degli atomi di  $ThX$  si spezza in quattro giorni, il numero di rotture al secondo sarà sempre proporzionale al numero presente. Dopo che un atomo di  $ThX$  ha espulso una particella  $\alpha$ , la massa del sistema risulta pure ridotta, e le sue proprietà chimiche cambiate. Si mostrerà (sezione 154) che il  $ThX$  produce l'emanazione del torio, che si manifesta come gas radioattivo, e che questo, a sua volta, è trasformato in materia che è depositata su corpi solidi e produce i fenomeni di attività eccitata. I primi cambiamenti in successione che avvengono nel torio sono mostrati graficamente sotto (Figura 50).



Pertanto, come risultato della disintegrazione dell'atomo di torio, viene prodotta una serie di sostanze chimiche, ognuna delle quali ha distinte proprietà chimiche. Ognuno di questi prodotti è radioattivo, e perde la propria attività secondo una legge definita. Poiché il torio ha un peso atomico di 237, e il peso di una particella  $\alpha$  è circa 2, è evidente che, se solo una particella  $\alpha$  è espulsa ad ogni cambiamento, il processo di disintegrazione deve passare attraverso un numero successivo di stadi e lasciarsi dietro, al termine del processo, una massa confrontabile con quella dell'atomo genitore.

Si mostrerà in seguito che un processo di disintegrazione, molto simile a quello già descritto per il torio, potrà avvenire anche nell'uranio, nell'attinio e nel radio. La discussione completa di questo argomento non può essere data con beneficio finché non si considerano in dettaglio i due più importanti prodotti delle tre sostanze torio, radio e attinio, vale a dire le emanazioni radioattive e la materia che determina attività eccitata.

**137. Dimensione dei cambiamenti.** Si può calcolare con molti metodi indipendenti (si veda la sezione 246) che, per tener conto della radioattività osservata nel torio, circa  $3 \cdot 10^4$  atomi in ogni grammo di torio subiscono disintegrazione ogni secondo. È ben noto (sezione 39) che  $1 \text{ cm}^3$  di idrogeno a pressione e temperatura atmosferica contiene circa  $3.6 \cdot 10^{19}$  molecole. Da ciò segue che un grammo di torio contiene  $3.6 \cdot 10^{21}$  atomi. La frazione che si spezza al secondo è allora circa  $10^{-17}$ . Questo è un rapporto estremamente piccolo, ed è evidente che il processo debba continuare per lunghi intervalli di tempo, prima che la quantità di materia mutata possa essere rivelata dallo spettroscopio o dalla bilancia. Con l'elettroscopio è possibile rivelare la radiazione da  $10^{-5} \text{ g}$  di torio, cioè l'elettroscopio è capace di rivelare la ionizzazione che accompagna la disintegrazione di un singolo atomo di torio al secondo. L'elettroscopio è allora un mezzo straordinariamente delicato per la rivelazione di piccoli cambiamenti nella materia, che sono accompagnati, come nel caso dei radio-elementi, dall'espulsione di particelle cariche con grande velocità. È possibile rivelare dalla sua radiazione la quantità di  $ThX$  prodotta in un secondo da  $1 \text{ g}$  di torio, sebbene il processo abbia bisogno di continuare per migliaia di anni prima che possa essere rivelato dalla bilancia o dall'elettroscopio. È allora evidente che i cambiamenti che avvengono nel torio sono di un ordine di grandezza del tutto differente da quello dei comuni cambiamenti chimici, e non è sorprendente che non siano mai stati osservati con metodi chimici diretti.

## Emanazioni Radioattive

**138. Introduzione.** Una più importante e straordinaria proprietà posseduta da radio, torio e attinio, ma non da uranio e polonio, è la capacità di emettere continuamente nello spazio circostante una emanazione materiale, che ha tutte le proprietà di un gas radioattivo. Questa emanazione è in grado di diffondersi rapidamente attraverso gas e sostanze porose e può essere separata dal gas con cui è mescolata per condensazione dall'azione del freddo estremo. Questa emanazione forma un nesso tra l'attività degli stessi radio-elementi e il loro potere di eccitare attività sugli oggetti circostanti, ed è stata studiata più da vicino degli altri prodotti attivi spiegando la sua esistenza allo stato gassoso. Le emanazioni dai tre copri attivi possiedono tutte simili proprietà radioattive, ma gli effetti sono più marcati nel caso dell'emanazione dal radio, a causa della attività molto grande di questo elemento.

*Emanazione del Torio.*

**139. Scoperta dell'emanazione.** Nel corso dell'esame delle radiazioni del torio, parecchi sperimentatori hanno notato che alcuni dei composti del torio, e specialmente l'ossido, erano sorgenti di radiazione molto incostanti, se esaminate in contenitori aperti con il metodo elettrico. Owens<sup>1</sup> trovò che questa incostanza era dovuta alla presenza di correnti d'aria. Quando fu usato un contenitore chiuso, la corrente, immediatamente dopo l'introduzione della materia attiva, aumentava con il tempo, e infine raggiungeva un valore costante. Introducendo un flusso continuo di aria attraverso il contenitore il valore della corrente era molto ridotto. Osservò pure che le radiazioni passavano apparentemente attraverso grandi spessori di carta, che assorbivano completamente la comune radiazione  $\alpha$ .

In un'analisi di queste particolari proprietà dei composti del torio, chi scrive<sup>2</sup> trovò che gli effetti erano dovuti ad un'emissione di particelle radioattive di un certo tipo dai composti del torio. Questa "emanazione", come fu chiamata per comodità, possiede la proprietà di ionizzare il gas e impressiona una lastra fotografica, ed è in grado di diffondere rapidamente attraverso materiali porosi come la carta e sottili fogli metallici.

All'emanazione, come per un gas, si impedisce la fuga ricoprendo la materia attiva con una sottile lastra di mica. L'emanazione può essere portata via da una corrente d'aria; passa attraverso un tappo di ovatta e può essere fatta gorgogliare attraverso soluzioni senza perdita di attività. A tale proposito, si comporta in modo molto diverso dagli ioni prodotti nel gas dai raggi delle sostanze attive, perché queste perdono completamente la loro carica nelle stesse condizioni.

Poiché l'emanazione passa facilmente attraverso grandi spessori di cartone, e attraverso densi filtri di ovatta, non sembra verosimile che l'emanazione consista di particelle di polvere emesse dalla materia attiva. Questo punto fu testato con il metodo usato da Aitken e Wilson per la rivelazione della presenza di particelle di polvere nell'aria. L'ossido, racchiuso in un cilindro di carta, fu posto in un contenitore di vetro e la polvere era rimossa con ripetute piccole espansioni dell'aria su una superficie d'acqua. Le particelle di polvere agiscono come nuclei per la formazione di piccole gocce e sono poi rimosse dall'aria per effetto della gravità. Dopo ripetute espansioni, non si formava alcuna nube e la polvere si considerava rimossa. Aspettando per un dato tempo per permettere l'accumulo dell'emanazione del torio, vennero fatte ulteriori espansioni ma senza ottenere alcuna nube, mostrando che per le piccole espansioni utilizzate, le particelle erano troppo piccole per divenire centri di condensazione. L'emanazione non poteva, quindi, essere considerata come polvere emessa dal torio.

Poiché la capacità di diffondere rapidamente attraverso sostanze porose e di agire sulle lastre fotografiche è posseduta pure da un elemento chimico come il perossido di idrogeno, furono eseguiti alcuni esperimenti per vedere se l'emanazione poteva avere tali caratteristiche. Si trovò, tuttavia, che il perossido di idrogeno non è radioattivo, e che la sua azione sulla lastra è puramente chimica, mentre è la *radiazione* dall'emanazione e non *l'emanazione* stessa che produce effetti ionizzanti e fotografici.

**140. Dispositivi sperimentali.** L'emanazione dal torio è emessa in piccole quantità. Nessuna apprezzabile riduzione del vuoto è osservata quando il composto emanante è posto in un tubo a vuoto e non si osservano nuove linee spettrali.

Per un esame dell'emanazione, è conveniente un dispositivo simili in linea di principio a quello mostrato in Figura 51.

<sup>1</sup>Owens, Phil. Mag. p. 360, ottobre 1899.

<sup>2</sup>Rutherford, Phil. Mag. p.1, gennaio 1900.

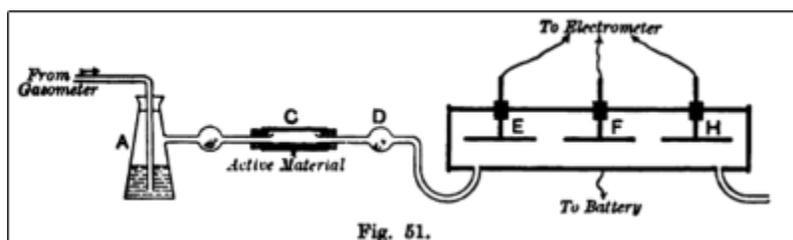


Fig. 51.

Il composto del torio, o scoperto o avvolto nella carta, fu posto in un tubo a vuoto C. Una corrente d'aria da un gasometro, dopo il passaggio attraverso il tubo contenente ovatta per rimuovere particelle di polvere, passò attraverso acido solforico nel contenitore A. Passò poi attraverso un bulbo contenente ovatta addensata per prevenire ogni nebulizzazione che lo potesse portare fuori. L'emanazione mescolata con l'aria, fu trasportata dal contenitore C attraverso un tappo di ovatta D, che rimuoveva completamente tutti gli ioni trasportati con l'emanazione. Infine passava in un lungo cilindro di ottone, lungo 75 cm e con diametro di 6 cm. Il cilindro isolato era collegato con una batteria nel modo consueto. Questi elettrodi isolati, E, F, H, di uguale lunghezza, erano posti lungo l'asse del cilindro, sostenuti da bacchette di ottone passanti attraverso tappi di sughero su un lato del cilindro. La corrente attraverso il gas, dovuta alla presenza dell'emanazione, fu misurata per mezzo di un elettrometro. Una chiave isolata era disposta in modo che uno degli elettrodi E, F, H potesse essere rapidamente collegato con una coppia di quadranti dell'elettrometro, mettendo sempre gli altri due a terra. La corrente osservata nel cilindro era dovuta interamente agli ioni prodotti dall'emanazione trasportata nel contenitore dalla corrente d'aria. Sostituendo un composto dell'uranio al torio, non si osservava la più piccola corrente. Dopo il passaggio un flusso costante per 10 minuti, la corrente dovuta all'emanazione raggiunge un valore costante.

**141. Durata dell'attività dell'emanazione.** L'emanazione perde rapidamente la propria attività in funzione del tempo. Questo è facilmente mostrabile con l'apparato in Figura 51. La corrente diminuisce progressivamente lungo il cilindro, e la variazione da elettrodo a elettrodo dipende dalla velocità del flusso d'aria.

Se la velocità della corrente d'aria è nota, si può dedurre il decadimento dell'attività dell'emanazione in funzione del tempo. Se il flusso d'aria è interrotto, e si apre il cilindro chiuso, la corrente diminuisce in modo costante con il tempo. I valori seguenti illustrano la variazione in funzione del tempo della corrente di saturazione, dovuta all'emanazione in un contenitore chiuso. Le osservazioni furono eseguite in successione e il più rapidamente possibile dopo che la corrente d'aria veniva fermata.

Tempo in secondi	Corrente
0	100
28	69
62	51
118	25
155	14
210	6.7
272	4.1
360	1.8

La curva A della Figura 52, mostra la relazione esistente tra la corrente attraverso il gas e il tempo. La corrente proprio prima che il flusso d'aria venga interrotto è presa come unità. La corrente attraverso il gas, che è una misura dell'attività dell'emanazione, diminuisce secondo una legge esponenziale con il tempo come l'attività dei prodotti  $U_{rX}$  e  $ThX$ . Il tasso di decadimento è, tuttavia, molto più rapido, riducendosi l'attività alla metà in circa un minuto. In accordo con quanto sviluppato nella sezione 138, ciò implica che metà delle particelle dell'emanazione hanno subito un cambiamento in un minuto. Dopo un intervallo di 10 minuti la corrente dovuta all'emanazione è molto piccola, mostrando che praticamente tutta le particelle dell'emanazione presenti hanno subito un cambiamento.

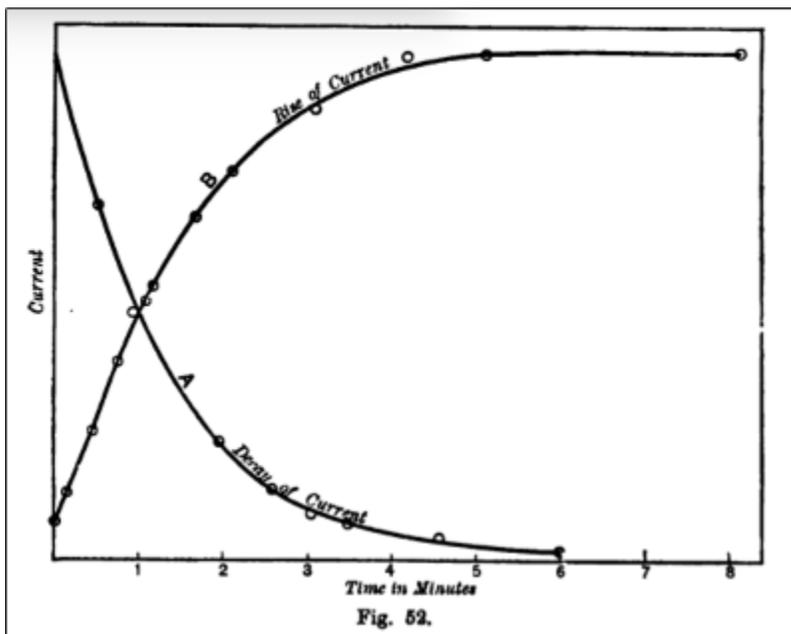


Fig. 52.

Il tasso di decadimento è stato molto accuratamente determinato da Rossignol e Gimmingham<sup>3</sup> i quali trovarono che l'attività si dimezza in 51 secondi. Bronson<sup>4</sup>, usando il metodo di deflessione continua descritto nella sezione 69, misurò il corrispondente tempo in 54 secondi.

La diminuzione della corrente con il tempo è una misura reale della diminuzione dell'attività dell'emanazione, e non è in ogni modo influenzata dal tempo impiegato dagli ioni prodotti a raggiungere gli elettrodi. Se gli ioni sono stati prodotti da un composto dell'uranio, la durata della conduttività per una tensione di saturazione dovrà essere solo una frazione di un secondo.

Il tasso di decadimento dell'attività dell'emanazione è indipendente dalla forza elettromotrice agente sul gas. Ciò mostra che le particelle radioattive non sono distrutte dal campo elettrico. La corrente attraverso il gas in ogni particolare istante, dopo l'interruzione del flusso d'aria, era la stessa sia che la forza elettromotrice fosse stata applicata per l'intero tempo sia solo per il tempo del test.

L'emanazione stessa non è influenzata da un forte campo elettrico e non può essere caricata. Testando la sua attività dopo il passaggio attraverso un lungo cilindro concentrico, caricato ad alto potenziale, si trovò che l'emanazione certamente non si muoveva con velocità maggiore di  $0.00001 \frac{cm}{s}$ , per un gradiente di  $1 \frac{V}{cm}$ , e non vi fu alcuna evidenza che si muovesse. Questa conclusione è stata confermata dagli esperimenti di McClelland<sup>5</sup>.

Il tasso con il quale l'emanazione è prodotta è indipendente dal gas che circonda la materia attiva. Se nel dispositivo di Figura 51 l'aria è sostituita con idrogeno, ossigeno, o acido carbonico, si ottengono risultati simili, sebbene la corrente osservata nel contenitore di verifica vari per diversi gas a causa del diverso assorbimento da parte degli stessi della radiazione proveniente dall'emanazione.

Se un composto del torio, racchiuso nella carta per assorbire la radiazione  $\alpha$ , è posto in un contenitore chiuso, la corrente di saturazione dovuta all'emanazione varia direttamente con la sua pressione. Poiché il tasso di ionizzazione è proporzionale alla pressione per una sorgente costante di radiazione, questo esperimento mostra che il tasso di emissione dell'emanazione è indipendente dalla pressione del gas. L'effetto della pressione sul tasso di produzione dell'emanazione è discusso in dettaglio nella sezione 157.

**142. Effetto dello spessore dello strato.** La quantità di emanazione emessa da una data area di un composto di torio dipende dallo spessore dello strato. Con uno strato molto sottile, la corrente tra due piatti paralleli, posti in un contenitore chiuso come in Figura 17, è dovuta principalmente ai raggi  $\alpha$ . Poiché la radiazione  $\alpha$  è assorbita molto facilmente, la corrente ad essa dovuta praticamente raggiunge un massimo quando la superficie della piastra è completamente ricoperta da un sottile strato di materiale attivo. D'altro canto, la corrente prodotta dall'emanazione aumenta finché lo strato ha uno spessore di parecchi millimetri, e poi non è più modificata dall'aggiunta di ulteriore materia attiva. Questa diminuzione della corrente dopo un certo spessore è stata ottenuta, poiché l'emanazione, che impiega parecchi minuti per diffondersi attraverso lo strato sopra di essa, ha già perso una grande parte della propria attività.

<sup>3</sup>Rossignol e Gimmingham, Phil. Mag. luglio 1904.

<sup>4</sup>Bronson, Amer. Journ. Science, febbraio 1905.

<sup>5</sup>Phil. Mag. aprile 1904.

Con uno strato spesso di ossido di torio in un contenitore chiuso, la corrente tra le piastre è largamente dovuta alla radiazione proveniente dall'emanazione che si trova tra le piastre. Le tabelle seguenti illustrano il modo in cui la corrente varia con lo spessore della carta sia per uno strato sottile sia per uno spesso.

Tabella I. Strato sottile		Tabella I. Strato spesso	
Spessore del foglio di carta 0.0027		Spessore del foglio di carta 0.008 cm	
N° strati di carta	Corrente	N° strati di carta	Corrente
0	1	0	1
1	0.37	1	0.74
2	0.16	2	0.74
3	0.08	5	0.72
		10	0.67
		20	0.55

La corrente iniziale con il composto non schermato è assunta come unità. Nella Tabella I, per uno strato sottile di ossido di torio, la corrente diminuisce rapidamente con fogli di carta aggiuntivi. In questo caso la corrente è dovuta quasi interamente ai raggi  $\alpha$ . Nella Tabella II, la corrente si riduce a 0.74 per il primo strato. In questo caso circa il 26% della corrente è dovuta ai raggi  $\alpha$ , che sono praticamente assorbiti dallo strato di spessore 0.008 cm. La lenta diminuzione con strati aggiuntivi mostra che l'emanazione diffonde così rapidamente attraverso pochi strati di carta che vi è una piccola perdita di attività durante il passaggio. Il tempo impiegato a diffondersi attraverso 20 strati di carta è tuttavia apprezzabile, e la corrente, di conseguenza, è diminuita. Dopo il passaggio attraverso uno strato di cartone spesso 1.6 mm, la corrente è ridotta a un quinto del suo valore iniziale. In contenitori chiusi la proporzione della corrente totale, dovuta all'emanazione, varia con la distanza tra le piastre così come con lo spessore dello strato di materia attiva. Essa varia pure fortemente con il composto esaminato. Nel nitrato, che produce solo una piccola quantità di emanazione, la proporzione è molto più piccola di quella dell'idrossido, che produce una grande quantità di emanazione.

**143. Aumento della corrente con il tempo.** La corrente dovuta all'emanazione non raggiunge il suo valore finale per un certo tempo dopo che è stata introdotta la materia attiva nel contenitore chiuso. La variazione con il tempo è mostrata nella tabella seguente. La corrente di saturazione dovuta all'ossido di torio, ricoperto con carta, fu osservata tra cilindri concentrici di diametro 5.5 cm e 0.8 cm.

Immediatamente prima che le osservazioni della corrente fossero eseguite, fu introdotto nel dispositivo un rapido flusso d'aria. Questo rimosse la maggior parte dell'emanazione. Tuttavia, la corrente dovuta alla ionizzazione del gas da parte dell'emanazione, quando fu trasportata dalla corrente d'aria, era ancora apprezzabile. La corrente, di conseguenza, non parte da zero.

Tempo in secondi	Corrente
0	9
23	25
53	49
96	67
125	76
194	88
244	98
304	99
484	100

I risultati sono mostrati graficamente in Figura 52, curva B. Il decadimento dell'attività dell'emanazione con il tempo, e il tasso di aumento dell'attività dovuto all'emanazione in uno spazio chiuso, sono collegate nello stesso modo in cui lo sono le curve di decadimento e di recupero del  $ThX$  e dell' $UrX$ .

Con la notazione precedente, la curva di decadimento è data da

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}$$

e quella di recupero da

$$\frac{I_t}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

dove  $\lambda$  è la costante radioattiva dell'emanazione.

Questa relazione era attesa, poiché le curve di decadimento e di recupero dell'emanazione sono determinate con esattezza dalle stesse condizioni delle curve di decadimento e recupero del  $ThX$  e  $UrX$ . In entrambi i casi vi è:

- (1) Un rifornimento di particelle radioattive nuove prodotte con tasso costante.
- (2) Una perdita dell'attività delle particelle che segue una legge esponenziale con il tempo.

Nel caso di  $UrX$  e  $ThX$ , la materia attiva prodotta manifesta la propria attività nella posizione in cui si è formata; in questo nuovo fenomeno, una parte della materia attiva sotto forma di emanazione sfugge nel gas circostante. L'attività dell'emanazione, dovuta a un composto del torio posto in un contenitore chiuso, raggiunge, pertanto, un massimo quando il tasso di rifornimento di nuove particelle di emanazione dal composto è bilanciato dal tasso di variazione di quelle già presenti. Il tempo di recupero di metà dell'attività finale è circa di 1 minuto, lo stesso del tempo impiegato dall'emanazione, quando lasciata sola, perde metà della propria attività.

Se  $q_0$  è il numero di particelle di emanazione che sfuggono nel gas al secondo, e  $N_0$  il numero finale quando è raggiunto l'equilibrio radioattivo, allora (sezione 133),

$$q_0 = \lambda N_0$$

Poiché l'attività dell'emanazione si riduce alla metà in 1 minuto

$$\lambda = \frac{1}{87}$$

e  $N_0 = 87q_0$ , o il numero di particelle di emanazione presenti, quando si raggiunge uno stato stazionario, è 87 volte il numero prodotto al secondo.

*Emanazione del Radio.*

**144. Scoperta dell'emanazione.** Poco dopo la scoperta dell'emanazione del torio, Dorn<sup>6</sup> ripeté i risultati, e, in aggiunta, mostrò che anche i composti del radio producono emanazioni, e che la quantità prodotta aumentava considerevolmente con il calore. L'emanazione del radio differisce da quella del torio per il ritmo con cui perde la propria attività. Essa decade molto più lentamente, ma le emanazioni di torio e radio hanno la stessa proporzione. Entrambe le emanazioni ionizzano il gas con cui sono mescolate, e impressionano una lastra fotografica. Entrambe diffondono facilmente attraverso sostanze porose ma non passano attraverso una sottile lastra di mica; entrambe si comportano come un gas temporaneamente radioattivo, mescolato in piccola quantità con l'aria o altro gas nel quale sono portate.

**145. Decadimento dell'attività dell'emanazione.** Un'emanazione molto piccola sfugge dal cloruro di radio allo stato solido, ma la quantità aumenta fortemente riscaldandolo, o sciogliendo il composto in acqua. Insufflando aria in una soluzione di cloruro di radio, o facendo passare aria su un composto di radio riscaldato, si può ottenere una grande quantità di emanazione che può essere raccolta, mescolata in aria, in un apposito contenitore.

Esperimenti per determinare accuratamente il tasso di decadimento dell'attività dell'emanazione sono state eseguite da P. Curie<sup>7</sup> e Rutherford e Soddy<sup>8</sup>. Negli esperimenti di questi ultimi, l'emanazione era prelevata con una pipetta e liberata nel contenitore di misura. Quest'ultimo consisteva di un cilindro di ottone ermetico avente un elettrodo centrale isolato. Fu applicata una tensione di saturazione al cilindro e l'elettrodo interno era collegato all'elettrometro con una opportuna capacità in parallelo. La corrente di saturazione era osservata immediatamente dopo l'introduzione del gas attivo nel contenitore ed era misurata l'attività dell'emanazione presente. La corrente aumentava rapidamente con il tempo necessario alla produzione dell'attività eccitata sulle pareti del contenitore. L'effetto è descritto in dettaglio nel capitolo VIII.

Le misure furono eseguite a intervalli successivi per un periodo di 33 giorni. La tabella seguente riporta i risultati, ponendo l'attività iniziale uguale a 100.

Tempo in ore	Attività relativa
0	100
20.8	85.7
187.6	24.0
354.9	6.9
521.9	1.5
786.9	0.19

L'attività diminuiva con il tempo in accordo con la legge esponenziale e decadeva a metà valore in 3.71 giorni. Con la consueta notazione

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}$$

il valore medio di  $\lambda$  dedotto dai risultati è dato da

$$\lambda = 2.16 \cdot 10^{-6} = \frac{1}{463000}$$

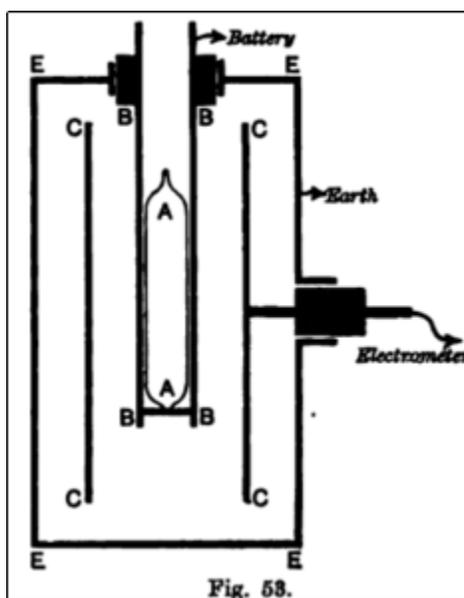
P. Curie determinò il tasso di decadimento dell'attività dell'emanazione con un altro metodo. La materia attiva era posta alla fine di un tubo sigillato. Dopo un tempo sufficiente la parte del tubo contenente il composto di radio era rimossa. La perdita di attività dell'emanazione, accumulata nell'altra parte, era testata ad intervalli regolari osservando la

<sup>6</sup>Dorn, Abh. der. Naturforsch. Ges. für Halle a. S., 1900.

<sup>7</sup>P. Curie, C. R. 135, p. 857, 1902.

<sup>8</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. aprile 1903.

corrente di ionizzazione dovuta ai raggi che passavano attraverso le pareti del contenitore di vetro. L'apparato di misura e i collegamenti sono mostrati chiaramente in Figura 53. La corrente di ionizzazione è osservata tra i contenitori *BB* e *CC*. Il tubo di vetro *A* contiene l'emanazione.



Si mostrerà in seguito che l'emanazione stessa produce solo raggi  $\alpha$  e che questi raggi sono completamente assorbiti dal vetro a meno che sia reso estremamente sottile. I raggi che producono ionizzazione nel contenitore di misura erano, pertanto, non dovuti ai raggi  $\alpha$  dall'emanazione, ma ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  dovuti all'attività eccitata prodotta sulle pareti del tubo di vetro dall'emanazione posta al suo interno. Ciò che era realmente misurato era allora il decadimento dell'attività eccitata derivata dall'emanazione e non il decadimento dell'attività dell'emanazione stessa. Tuttavia, quando si raggiunge uno stato stazionario, la quantità di attività eccitata è quasi proporzionale in ogni istante all'attività dell'emanazione e il tasso di decadimento dell'attività eccitata sulle pareti del contenitore fornisce indirettamente una misura del tasso di decadimento dell'emanazione stessa. Ciò è vero solo se l'emanazione è posta per quattro o cinque ore nel tubo prima di iniziare le osservazioni, per permettere all'attività eccitata il tempo di raggiungere un valore massimo.

Usando questo metodo P. Curie ottenne risultati simili a quelli ottenuti da Rutherford e Soddy con il metodo diretto. L'attività decadeva secondo una legge esponenziale in funzione del tempo, riducendosi alla metà in 3.99 giorni.

Gli esperimenti erano eseguiti nelle più diverse condizioni ma il tasso di decadimento trovato rimaneva invariato. Il tasso di decadimento non dipende dal materiale del contenitore dell'emanazione o dal tipo o pressione del gas con cui l'emanazione era mescolata. Non era influenzato dalla quantità di emanazione presente, o dal tempo di esposizione al radio, fornendo un tempo sufficiente per permettere all'attività eccitata di raggiungere un valore massimo prima dell'inizio delle osservazioni. P. Curie<sup>9</sup> trovò che il tasso di decadimento dell'attività non era alterato esponendo il contenitore con l'emanazione a diverse temperature, varianti tra  $450^\circ$  e  $-180^\circ\text{C}$ .

A questo proposito le emanazioni del torio e del radio sono del tutto analoghe. Il tasso di decadimento sembra non essere influenzato da qualsiasi agente fisico o chimico e le emanazioni si comportano esattamente allo stesso modo dei prodotti radioattivi *ThX* e *Urx*, già presentati. La costante radioattiva  $\lambda$  è pertanto una quantità fissa e inalterabile per entrambe le emanazioni, sebbene in un caso il suo valore sia circa 5000 volte maggiore dell'altro.

#### *Emanazioni dall'Attinio.*

**146.** Debierne<sup>10</sup> trovò che l'attinio produce una emanazione simile a quella del torio e del radio. La perdita di attività dell'emanazione è ancora più rapida di quella del torio, perché la sua attività si dimezza in 3.9 secondi. A causa del rapido decadimento dell'attività, l'emanazione è in grado di diffondere attraverso l'aria solo a breve distanza dalla materia attiva prima di perdere la maggior parte della sua attività. Giesel per primo osservò che la sostanza radioattiva separata da essa, già vista nella sezione 18, ha le stesse proprietà radioattive dell'attinio, producendo una grande quantità di emanazione. È proprio a causa di questa proprietà che gli diede il nome di "sostanza emanante" e più tardi di "emanium". Le preparazioni contaminate di questa sostanza emettono l'emanazione molto liberamente e differiscono per questo dalla maggior parte dei composti del torio. L'emanazione dall'attinio come quella dal torio e dal radio possiedono la proprietà di eccitare attività su corpi inattivi, ma non è finora stata studiata in modo così completo come le meglio note emanazioni del torio e radio.

#### *Esperimenti con grandi quantità di Emanazione del Radio.*

<sup>9</sup>P. Curie, C. R. 126, p. 223, 1903.

<sup>10</sup>Debierne, C. R. 136, p. 146, 1903.

147. Con campioni molto attivi di radio si può ottenere una grande quantità di emanazione. e, di conseguenza, i metodi elettrico, fotografico e fluorescente sono molto intensi. A causa della piccola attività del torio e del rapido decadimento della sua emanazione gli effetti ad essa dovuti sono deboli, e si possono studiare solo per pochi minuti dopo la sua produzione. L'emanazione del radio, d'altro canto, a causa del lento decadimento della sua attività, può essere accumulata mescolata con l'aria in un comune contenitore di gas, e le sue azioni fotografiche ed elettriche possono essere esaminate parecchi giorni o anche settimane dopo, in modo del tutto separato da quelle del radio da cui è ottenuta.

È, in generale, difficile studiare la radiazione dovuta alla sola emanazione, poiché essa produce continuamente un tipo di attività secondaria sulla superficie del contenitore nel quale l'emanazione è racchiusa. Questa attività eccitata raggiunge un valore massimo parecchie ore dopo l'introduzione dell'emanazione e, finché è tenuta nel contenitore, questa attività eccitata sulle pareti decade allo stesso tasso dell'emanazione stessa, cioè dimezza in circa 4 giorni. Se, tuttavia, l'emanazione è esaurita, l'attività eccitata rimane sulla superficie, ma rapidamente perde la propria attività nel giro di poche ore. Dopo parecchie ore l'intensità della radiazione residua è molto piccola.

Questi effetti e il loro legame con l'emanazione sono discussi con completezza nel capitolo VIII.

Giesel<sup>11</sup> ha registrato alcune interessanti osservazioni sull'effetto dell'emanazione radio su uno schermo fosforescente di solfuro di zinco. Quando pochi centigrammi di bromuro di radio umido erano posti su uno schermo, ogni debole movimento dell'aria causava lo spostamento della luminosità avanti e indietro sullo schermo. La direzione della fosforescenza poteva essere alterata con una lenta corrente d'aria. L'effetto era ancora ulteriormente incrementato ponendo il materiale attivo in un tubo e facendo fluire l'aria attraverso di esso in direzione dello schermo. Uno schermo di platino cianuro di bario o di vernice di Balmein non riusciva a dare una luce visibile nelle stesse condizioni. La luminosità non era alterata da un campo magnetico, ma lo era da un campo elettrico. Se lo schermo era carico, la luminosità era più marcata quando la carica era negativa di quando era positiva.

Giesel stabilì che la luminosità non era ugualmente distribuita, ma era concentrata in un modo particolare a forma di anello sulla superficie dello schermo. La concentrazione della luminosità sull'elettrodo negativo, piuttosto che sul positivo, è probabilmente dovuta all'attività eccitata, causata dall'emanazione, e non dall'emanazione stessa, perché questa attività eccitata è concentrata principalmente sull'elettrodo negativo in un campo elettrico (vedi capitolo VIII).

Un esperimento per illustrare la fosforescenza prodotta in alcune sostanze dai raggi da una grande quantità di emanazione è descritto nella sezione 165.

148. Curie e Debierne<sup>12</sup> hanno studiato l'emanazione dal radio, e l'attività eccitata prodotta da essa. Vennero eseguiti alcuni esperimenti sulla quantità di emanazione prodotta dal radio in condizione di pressioni molto basse. Il tubo contenente l'emanazione era svuotato a un buon vuoto mediante una pompa al mercurio. Si osservò che un gas proveniva dal radio che produceva attività eccitata sulle pareti di vetro. Questo gas era estremamente attivo e impressionava rapidamente una lastra fotografica attraverso il vetro. Causava fluorescenza sulla superficie del vetro e rapidamente lo oscurava, ed era ancora attivo trascorsi dieci giorni. All'esame spettroscopico, questo gas non mostrava nuove righe, ma in genere quelle dello spettro dell'acido carbonico, dell'idrogeno, e del mercurio. In base ai risultati descritti nella sezione 124 il gas, prodotto dal radio, era probabilmente composto dai gas non attivi idrogeno e ossigeno, nei quali l'emanazione attiva era mescolata in piccole quantità. Si mostrerà (sezione 242) che l'energia irradiata dall'emanazione è enorme confrontata con la quantità di materia coinvolta, e che gli effetti osservati, nella maggior parte dei casi, sono prodotti da una quantità pressoché infinitesimale dell'emanazione.

In ulteriori esperimenti, Curie e Debierne<sup>13</sup> trovarono che molte sostanze divenivano fosforescenti sotto l'azione dell'emanazione e dell'attività eccitata da essa prodotta. Nei loro esperimenti, erano collegate due bocce di vetro A e B (Figura 54) con un tubo di vetro. Il materiale attivo era posto nella boccia A e la sostanza da esaminare nell'altra.

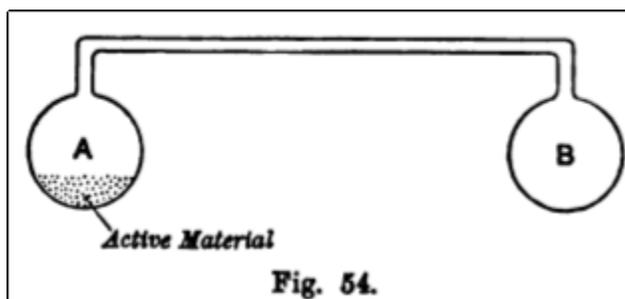


Fig. 54.

Essi trovarono che, in generale, le sostanze che erano fosforescenti in luce ordinaria divenivano luminose. Il solfuro di zinco era particolarmente brillante e diveniva tanto più luminoso se esposto ad una luce intensa. Dopo un tempo

<sup>11</sup>Giesel, D. deutsch. Chem. Ges. p. 3608, 1902.

<sup>12</sup>Curie e Debierne, C. R. 132, pp. 548 e 768, 1901.

<sup>13</sup>Curie e Debierne, C. R. 133, p. 931, 1901.

sufficiente la luminosità raggiungeva un valore costante. La fosforescenza è parzialmente dovuta all'attività eccitata prodotta dall'emanazione sulla sua superficie e parzialmente alla radiazione dall'emanazione.

La fosforescenza era pure prodotta nel vetro. Il vetro di Turingia mostrava l'effetto più marcato. La luminosità del vetro era circa la stessa nelle due bocce, ma era più marcata nel tubo di collegamento. L'effetto nelle due bocce era lo stesso anche se il tubo di collegamento era molto stretto.

Furono eseguiti alcuni esperimenti con una serie di piastre fosforescenti poste nel contenitore a distanze variabili. Con le piastre lontane 1 mm l'effetto era molto debole, ma aumentava direttamente con la distanza e diveniva grande ad una distanza di 3 cm.

Questi effetti ricevono una spiegazione generale alla luce di quanto proposto. Quando il radio è posto in un contenitore chiuso, l'emanazione prodotta a un tasso costante e diffonde gradualmente al suo interno. Poiché il tempo necessario per la diffusione dell'emanazione attraverso i tubi di dimensione ordinaria è piccolo rispetto al tempo necessario affinché l'attività si riduca in modo significativo, l'emanazione, e anche l'attività eccitata dovuta ad essa, sarà quasi equamente distribuita nel contenitore.

La luminosità dovuta ad essa sarà, pertanto, uguale ad ogni terminale del tubo. Anche con un tubo capillare che collega le due bocce, il gas continuamente prodotto dal radio sarà trasportato dall'emanazione con essa producendo una distribuzione praticamente uniforme.

Il graduale aumento della quantità di emanazione attraverso il tubo sarà dato dall'equazione

$$\frac{N_t}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

dove  $N_t$  è il numero delle particelle di emanazione presenti al tempo  $t$ ,  $N_0$  il numero presente quando è raggiunto l'equilibrio radioattivo, e  $\lambda$  è la costante radioattiva dell'emanazione. L'azione fosforescente, che è dovuta in parte alle radiazioni dall'emanazione e in parte all'attività eccitata sulle pareti, raggiungerà, pertanto, la metà del valore massimo in quattro giorni e il suo limite dopo un intervallo di tre settimane.

Ci si deve attendere una variazione della luminosità al variare della distanza tra gli schermi. La quantità di attività eccitata depositata sui bordi è proporzionale alla quantità di emanazione presente. Poiché l'emanazione è equamente distribuita, la quantità di attività eccitata depositata sullo schermo, dovuta all'emanazione tra questi, varia direttamente con la distanza, purché la distanza tra gli schermi sia piccola rispetto alle loro dimensioni. Un tale risultato seguirà pure se la fosforescenza fosse dovuta alla radiazione dall'emanazione stessa, purché la pressione del gas sia sufficientemente bassa in modo da prevenire l'assorbimento della radiazione dall'emanazione nel gas stesso tra gli schermi.

*Misure del Potere Emanante.*

**149. Potere Emanante.** I composti del torio allo stato solido variano assai ampiamente per la quantità di emanazione da essi emessa in condizioni ordinarie. È conveniente usare il termine *potere emanante* per esprimere la quantità di emanazione prodotta ogni secondo da un grammo di composto. Poiché, tuttavia, non abbiamo alcun mezzo per determinare in modo assoluto la quantità di emanazione presente, tutte le misure del potere emanante sono di necessità comparative. Nella maggior parte dei casi, è conveniente assumere un dato peso di composto di torio, che si trova in condizione il più costante possibile e confrontare la quantità di emanazione del composto da esaminare con lo standard.

In questo modo sono stati fatti confronti del potere emanante dei composti di torio da Rutherford e Soddy<sup>14</sup>, usando un apparato simile a quello mostrato in Figura 51.

Un peso noto della sostanza da verificare era distribuito su un piatto basso, posto nel tubo di vetro C. Un flusso di aria priva di polvere, costante durante tutto l'esperimento, passava attraverso il composto e trasportava l'emanazione nel contenitore di misura. Dopo un intervallo di dieci minuti, la corrente dovuta all'emanazione nel contenitore raggiungeva un valore costante. Il composto era allora rimosso, e sostituito con il campione standard di ugual peso; la corrente di saturazione era osservata quando si raggiungeva uno stato stazionario. Il rapporto tra queste due correnti dà il rapporto del potere emanante dei due campioni.

Si è trovato sperimentalmente che, per le velocità della corrente d'aria impiegate, la corrente di saturazione nel contenitore di misura era direttamente proporzionale al peso del torio, per pesi fino a 20 g. Ciò è spiegato dall'ipotesi che l'emanazione è rimossa dalla corrente d'aria dalla massa del composto, nel mentre si formava.

Sia  $i_1$  la corrente di saturazione dovuta a un peso  $\omega_1$  dello standard e  $i_2$  la corrente di saturazione dovuta a un peso  $\omega_2$  del campione da analizzare.

Allora

$$\frac{\text{potere emanante del campione}}{\text{potere emanante standard}} = \frac{i_2 \omega_1}{i_1 \omega_2}$$

Per mezzo di questa relazione si può confrontare il potere emanante dei composti che non sono di peso uguale.

Si è trovato che i composti del torio variano enormemente nel potere emanante, sebbene la percentuale del torio presente nel composto non fosse molto diversa. Per esempio, il potere emanante dell'idrossido di torio era generalmente 3 o 4 volte maggiore di quello del torio comune, ottenuto dalla fabbrica. Il nitrato di torio, allo stato solido, aveva solo

<sup>14</sup>Rutherford e Soddy, Trans. Chem. Soc. p. 321, 1902. Phil. Mag. settembre 1902.

$\frac{1}{200}$  del potere emanante del torio comune, mentre preparazioni del carbonato variavano ampiamente tra loro nel potere emanante, che dipendeva dalle piccole variazioni nel metodo di preparazione.

**150. Effetto delle condizioni sul potere emanante.** Il potere emanante di diversi composti di torio e radio è molto influenzato dall'alterazione delle condizioni chimiche e fisiche. Da questo punto di vista il potere emanante, che è una misura del tasso di emissione dell'emanazione nel gas circostante, non deve essere confuso con il tasso di decadimento dell'attività delle emanazioni stesse, che abbiamo già mostrato non essere influenzato dalle condizioni esterne.

Dorn (citato) per primo osservò che il potere emanante dei composti di torio e radio era molto influenzato dall'umidità. In una completa indagine di questo punto Rutherford e Soddy, trovarono che il potere emanante dei diversi torio è da due a tre volte maggiore in un gas umido che secco. Continue essiccazioni dei composti di torio in un tubo di vetro, contenente pentossido di fosforo, non riducono il potere emanante molto al di sotto di quello osservato in aria secca. Allo stesso modo il cloruro di radio allo stato solido produce molto poca emanazione in un gas secco, ma la quantità è assai maggiore in un gas umido.

Il tasso di fuga dell'emanazione aumenta molto mettendo in soluzione il composto. Per esempio, il nitrato di torio, che ha un potere emanante di solo  $\frac{1}{200}$  di quello del torio allo stato solido, ha in soluzione un potere emanante 3 o 4 volte maggiore dei torio. P. Curie e Debierne osservarono che anche il potere emanante del radio aumentava di molto se messo in soluzione.

La temperatura ha un effetto molto evidente sul potere emanante. Chi scrive mostrò che il potere emanante dei comuni torio aumentava tre o quattro volte riscaldando la sostanza a uno sbiadito calor rosso in un tubo di platino. Se la temperatura era mantenuta costante l'emanazione continuava a sfuggire con tasso costante, ma ritornava al suo valore iniziale raffreddandoli. Se, tuttavia, il composto era riscaldato al calor bianco, il potere emanante era fortemente ridotto e ritornava raffreddandolo a circa il 10% del valore iniziale. Un tale composto è detto essere *de-emanato*. Il potere emanante dei composti del radio varia in modo assai più sorprendente con il crescere della temperatura. Il tasso di emissione dell'emanazione è momentaneamente aumentato anche 10000 volte dal riscaldamento al calor bianco sbiadito. Questo effetto non continua, perché la grande emissione per riscaldamento è in realtà dovuta al rilascio dell'emanazione accumulata nel composto del radio. Come i vari tipi di torio, quando il composto è stato riscaldato a una temperatura molto elevata, perde il proprio potere emanante e non lo riguadagna più. Lo riguadagna, tuttavia, dopo discioglimento e riseparazione.

Un ulteriore esame dell'effetto della temperatura fu eseguito da Rutherford e Soddy<sup>15</sup>. Il potere emanante dei tipi di torio diminuiva molto rapidamente con l'abbassamento della temperatura, e alla temperatura dell'acido carbonico solido è solo circa il 10% del suo valore ordinario. Tornava rapidamente al suo valore iniziale quando si rimuoveva l'agente raffreddante.

L'aumento della temperatura da 80 °C al calor bianco sbiadito del platino accresceva il potere emanante di circa 40 volte e gli effetti si potevano ripetere più volte, con lo stesso composto, purché la temperatura non giunga al valore al quale inizia la de-emanazione. La de-emanazione inizia circa al calor bianco e il potere emanante è allora permanentemente ridotto, ma anche un prolungato riscaldamento al calor bianco non distrugge interamente il potere emanante.

**151. Rigenerazione del potere emanante.** Un'interessante questione è stabilire se la de-emanazione del torio e del radio è dovuta alla rimozione o alla alterazione della sostanza che produce l'emanazione o se l'intenso riscaldamento cambia semplicemente il tasso di emissione dell'emanazione dal solido nell'atmosfera circostante.

È evidente che le proprietà fisiche dei diversi torio sono molto alterate da un intenso riscaldamento. Il composto cambia di colore dal bianco al rosa; diviene più denso e anche meno facilmente solubile in acidi. Per verificare se il potere emanante possa essere rigenerato da un processo chimico ciclico, i vari torio de-emanati sono disciolti, precipitati con idrossido e poi convertiti in ossido. Allo stesso tempo un campione di ossido era sottoposto ad un analogo processo. Il potere emanante di entrambi i composti era lo stesso ed era due o tre volte maggiore di quello dei comuni tipi di torio.

La de-emanazione, pertanto, non distrugge in modo permanente il potere del torio di produrre emanazione, ma semplicemente provoca un'alterazione della quantità di emanazione che sfugge dal composto.

**152. Tasso di produzione dell'emanazione.** Il potere emanante dei composti del torio, quindi, è una quantità molto variabile, dipendente molto da umidità, calore e messa in soluzione. Generalmente parlando, aumentando le temperature e la messa in soluzione, aumenta fortemente il potere di torio e radio.

Le ampie differenze tra i poteri emananti di queste sostanze allo stato solido e in soluzione portano alla conclusione che le differenze siano probabilmente dovute al tasso di emissione dell'emanazione nel gas circostante, e non alla variazione del tasso di reazione che produce l'emanazione.

È ovvio che un rallentamento molto piccolo nel tasso di emissione dell'emanazione del torio dal composto nel gas, produrrà, a causa del rapido decadimento dell'attività dell'emanazione, grandi cambiamenti nel potere emanante. La rigenerazione del potere emanante del torio e del radio de-emanati mediante soluzione e trattamento chimico è evidente che il potere iniziale del torio e del radio di produrre emanazione persiste ancora in modo inalterato.

<sup>15</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. novembre 1902.

La questione se l'emanazione sia prodotta allo stesso tasso nei composti emananti come in quelli non emananti può essere sottoposta ad una prova quantitativa. Se il tasso di produzione dell'emanazione procede alla stesso ritmo nel composto solido dove sfugge in piccole quantità, come nella soluzione dove probabilmente sfugge interamente e, di conseguenza, vi deve essere un improvviso rilascio di questa emanazione nella soluzione del composto. A causa del lento decadimento dell'attività dell'emanazione del radio, gli effetti dovranno essere più marcati in quel composto che nel torio.

Secondo quanto sviluppato nella sezione 133, la legge esponenziale del decadimento dell'emanazione esprime il risultato che il numero  $N_t$  di particelle che rimane invariato al tempo  $t$  è dato da

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

dove  $N_0$  è il numero iniziale di particelle presenti. Quando si raggiunge uno stato stazionario, il tasso di produzione  $q_0$  di nuove particelle di emanazione è esattamente bilanciato dal tasso di cambiamento delle particelle  $N_0$  già presenti, cioè

$$q_0 = \lambda N_0$$

$N_0$  in questo caso rappresenta la quantità di emanazione "bloccata" nel composto. Sostituendo il valore di  $\lambda$  trovato per l'emanazione del radio nella sezione 145,

$$\frac{N_0}{q_0} = \frac{1}{\lambda} = 463000$$

La quantità di emanazione accumulata in un composto di radio non emanante sarà, pertanto, vicina a 500000 volte la quantità prodotta al secondo dal composto. Questo risultato fu verificato nel modo seguente<sup>16</sup>.

Un peso di 0.03 g di cloruro di radio di attività 1000 volte quella dell'uranio era posto in una bottiglia di Drechsel e con una quantità sufficiente di acqua per provocarne il discioglimento. L'emanazione rilasciata era portata da una corrente d'aria in un piccolo contenitore di gas e poi in un cilindro di misura. La corrente iniziale di saturazione era proporzionale a  $N_0$ . Una rapida corrente d'aria veniva poi fatta passare attraverso la soluzione di radio per un certo tempo per rimuovere ogni piccola quantità di emanazione inizialmente non rimossa. La bottiglia di Drechsel era chiusa in modo ermetico e permetteva un mantenimento indisturbato per un tempo  $t$  definito. L'emanazione accumulata era poi inviata come prima in un contenitore di misura. La nuova corrente di ionizzazione rappresenta il valore della quantità  $N_t$  di emanazione formatasi nel composto durante l'intervallo  $t$ .

Nell'esperimento  $t = 105$  minuti e il valore osservato

$$\frac{N_t}{N_0} = 0.0131$$

Assumendo che non vi sia decadimento durante l'intervallo,

$$N_t = 105 \times 60 \times q_0$$

Pertanto

$$\frac{N_0}{q_0} = 480000$$

Facendo la piccola correzione per il decadimento dell'attività durante l'intervallo,

$$\frac{N_0}{q_0} = 477000$$

Abbiamo precedentemente mostrato che dalla teoria

$$\frac{N_0}{q_0} = \frac{1}{\lambda} = 463000$$

L'accordo tra teoria ed esperimento è pertanto buono come ci si deve attendere dalla natura dell'esperimento. Esso prova in modo conclusivo che il tasso di produzione dell'emanazione nel composto solido è lo stesso di quello in soluzione. Nel caso precedente è bloccata, nel successivo sfugge al momento della sua produzione.

È notevole come una piccola emanazione, confrontata con la quantità accumulata nel composto, sfugga dal cloruro di radio solido in un'atmosfera secca. Un esperimento mostrò che il potere emanante allo stato solido secco era minore di  $\frac{1}{2}\%$  di quello della soluzione. Poiché circa 500000 volte tanta emanazione è accumulata nel composto solido quanto è prodotta al secondo, questo risultato mostrò che la quantità di emanazione che sfugge al secondo era minore di  $10^{-6}$  di quella bloccata nel composto.

Se un composto di cloruro di radio solido è tenuto in un'atmosfera umida, il potere emanante diviene confrontabile con la quantità prodotta per secondo nella soluzione. In un tale caso, poiché il tasso di fuga è continuo, la quantità racchiusa sarà molto minore di quella del materiale non emanante.

Il fenomeno di occlusione dell'emanazione del radio è probabilmente non connesso in ogni modo con la sua radioattività, sebbene questa proprietà sia servita per misurarla. L'occlusione dell'elio nei minerali presenta una quasi completa analogia

<sup>16</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. aprile 1903.

con quella dell'emanazione del radio. Parte dell'elio è emessa dalla fergusonite, per esempio, quando è riscaldata e del tutto quando il minerale è in soluzione.

**153.** Risultati simili riguardano il torio, ma, a causa della rapida perdita di attività dell'emanazione, la quantità di emanazione racchiusa in un composto non emanante è molto piccola rispetto a quella osservata per il radio. Se la produzione dell'emanazione del torio procede allo stesso tasso in tutte le condizioni, la soluzione di un composto solido non emanante sarà accompagnata da un getto di emanazione maggiore di quella che è successivamente prodotta. Con la stessa notazione di prima abbiamo per l'emanazione del torio,

$$\frac{N_0}{q_0} = \frac{1}{\lambda} = 87$$

Questo risultato fu verificato nel modo seguente: una quantità di nitrato di torio finemente polverizzato, di potere emanante  $\frac{1}{200}$  di quello dei comuni torio, fu lasciato cadere in una bottiglia di Drechsel contenente acqua calda e l'emanazione rapidamente trasportata in un contenitore di misura da una corrente d'aria. La corrente di ionizzazione saliva rapidamente verso un massimo, ma presto diminuiva ancora portandosi al valore stazionario; mostrando che la quantità di emanazione rilasciata quando il nitrato si scioglie, è maggiore della successiva quantità prodotta dalla soluzione.

La rapida perdita dell'attività dell'emanazione del torio rende un confronto quantitativo come quello per il radio molto difficile. Alterando un poco la condizione sperimentale, tuttavia, si ottenne una prova definitiva che il tasso di produzione dell'emanazione è lo stesso nel composto solido come nella soluzione. Dopo l'inserimento nel nitrato, veniva fatto scorrere un rapido flusso d'aria attraverso la soluzione per 25 secondi nel contenitore di misura. Il flusso d'aria era interrotto e la corrente di ionizzazione immediatamente misurata. La soluzione era allora lasciata indisturbata per 10 minuti. In quel tempo l'accumulazione dell'emanazione raggiungeva un massimo per poi ripresentarsi allo stato stazionario. Il flusso d'aria era fatto passare, come prima, per 25 secondi, poi interrotto e la corrente ancora misurata. In entrambi i casi, l'elettrometro registrava un movimento di 14.6 divisioni al secondo. Facendo passare lo stesso flusso di aria continuamente attraverso la soluzione, la corrente finale corrispondeva a 7.9 divisioni al secondo o circa la metà di quella osservata dopo il primo spunto.

Il tasso di produzione dell'emanazione è, pertanto, lo stesso nel nitrato solido come nella soluzione, sebbene il potere emanante, cioè il tasso di fuga dell'emanazione, è oltre 600 volte maggiore nella soluzione che nel solido.

Sembra probabile che il tasso di produzione dell'emanazione del torio, come il tasso di produzione dell'*UrX* e del *ThX*, sia indipendente dalle condizioni. I cambiamenti nel potere emanante dei vari composti con umidità, calore e soluzione possono tuttavia essere attribuiti solamente a una alterazione nel tasso di fuga dell'emanazione nel gas circostante e non ad un'alterazione nel tasso della sua produzione nel composto.

In quest'ottica, è facile vedere che piccoli cambiamenti nel modo di preparazione di un composto di torio possono produrre un grande cambiamento nel potere emanante. Tali effetti sono stati spesso osservati e devono essere ascritti a piccoli cambiamenti fisici nel precipitato. Il fatto che il tasso di produzione dell'emanazione sia indipendente dalle condizioni chimiche e fisiche del torio, nel quale è prodotta, è allora in armonia con quanto è stato precedentemente osservato per i prodotti radioattivi *UrX* e *ThX*.

*Sorgente dell'emanazione del Torio.*

**154.** Saranno ora considerati alcuni esperimenti di Rutherford e Soddy<sup>17</sup>, che mostrano che l'emanazione del torio è prodotta, non direttamente dal torio stesso, ma dal prodotto attivo *ThX*.

Quando il *ThX*, precipitato con ammoniaca, è rimosso da una quantità di nitrato di torio, l'idrossido di torio precipitato non possiede inizialmente un potere emanante apprezzabile. Questa perdita di potere emanante non è dovuta, come nel caso dell'ossido de-emanato, a un ritardo nel tasso di emissione dell'emanazione prodotta; l'idrossido, disciolto in acido, non produce ancora alcuna emanazione. D'altro canto, la soluzione contenente il *ThX*, possiede potere emanante ad un livello significativo. Quando l'idrossido precipitato e il *ThX* sono lasciati riposare per un certo tempo, si è trovato che il *ThX* decresce nel potere emanante, mentre l'idrossido gradualmente riguadagna il proprio potere emanante. Dopo circa un intervallo di un mese, il potere emanante dell'idrossido ha quasi raggiunto un massimo, mentre il potere emanante del *ThX* è quasi scomparso.

Le curve di decadimento e recupero del potere emanante in funzione del tempo sono esattamente le stesse delle curve di decadimento e recupero dell'attività del *ThX* e dell'idrossido mostrate in Figura 47. Il potere emanante del *ThX*, così come la sua attività, si dimezzano in quattro giorni, mentre l'idrossido riguadagna metà del suo potere emanante finale così come metà della sua attività persa nello stesso intervallo.

Segue da questi risultati che il potere emanante del *ThX* è direttamente proporzionale alla sua attività, cioè che il tasso di produzione delle particelle emananti è sempre proporzionale al numero di particelle  $\alpha$ , emesse dal *ThX* al secondo. *La radiazione dal ThX accompagna, pertanto, il cambiamento del ThX nell'emanazione.* Poiché l'emanazione ha proprietà chimiche distinte da quelle del *ThX*, e anche un diverso tasso di decadimento, esso può essere considerato come un vapore del *ThX*, ma è una sostanza chimica diversa, prodotta dai cambiamenti che avvengono nel *ThX*. Da quanto introdotto nella sezione 136, l'atomo dell'emanazione consiste della parte dell'atomo di *ThX* rimasta dopo l'espulsione di una o più

<sup>17</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. novembre 1902.

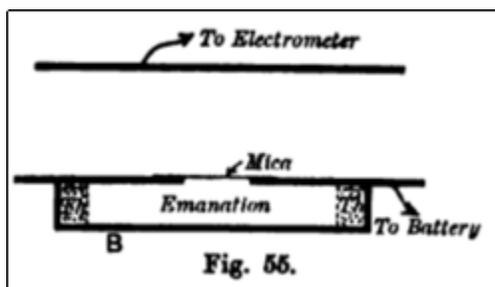
particelle  $\alpha$ . Gli atomi dell'emanazione sono instabili, e di conseguenza espellono particelle  $\alpha$ . Questa emissione di particelle  $\alpha$  costituisce la radiazione dall'emanazione, che serve a misurare la quantità dell'emanazione presente. Poiché l'attività dell'emanazione diminuisce della metà del valore in un minuto mentre quella del  $ThX$  in quattro giorni, l'emanazione consiste di atomi che si disintegrano a intervalli quasi 6000 volte più brevi di quelli degli atomi del  $ThX$ .

*Sorgente del Radio ed Emanazione dell'Attinio.*

**155.** Non è stato osservato nessuno stadio intermedio - Radio X - tra il radio e la sua emanazione, corrispondente al  $ThX$  per il torio. L'emanazione dal radio è probabilmente prodotta direttamente da questo elemento. A tal proposito, l'emanazione dal radio mantiene la stessa posizione rispetto al radio come il  $ThX$  al torio, e la sua produzione dal radio può essere spiegata con un profilo esattamente simile. Si mostrerà in seguito nel capitolo X, che l'emanazione dell'attinio, come quella del torio, non deriva direttamente dall'elemento genitore ma da un prodotto intermedio attinio X, che è molto simile nelle proprietà chimiche e fisiche al  $ThX$ .

*Radiazioni dall'Emanazione.*

**156.** Sono necessari metodi speciali per esaminare la natura della radiazione dalle emanazioni, per le radiazioni che si manifestano nel volume di gas nel quale le emanazioni sono distribuite. Alcuni esperimenti per esaminare le radiazioni dall'emanazione del torio furono svolti da chi scrive nel modo seguente.



Un composto di torio altamente emanante avvolto nella carta era posto dentro una scatola di piombo  $B$  spessa circa  $1\text{ cm}$ , mostrata in Figura 55. Veniva praticata un'apertura nella parte superiore della scatola, sulla quale era fissato con cera un sottile strato di mica. L'emanazione diffondeva rapidamente attraverso la carta nel contenitore, e dopo dieci minuti raggiungeva uno stato radioattivo di equilibrio. Il potere di penetrazione della radiazione proveniente dall'emanazione che passava attraverso la sottile finestra di mica era esaminato con il metodo elettrico nel modo usuale aggiungendo schermi di sottili fogli di alluminio. I risultati sono riprodotti nella seguente tabella:

Spessore finestra di mica	$0.0015\text{ cm}$
Spessore del foglio di alluminio	$0.00034\text{ cm}$
Strati di fogli	Corrente
0	100
1	59
2	30
3	10
4	3.2

La parte maggiore della conduttività è allora dovuta ai raggi  $\alpha$ , come nel caso degli elementi radioattivi. La quantità di assorbimento di questi raggi  $\alpha$  da parte dei fogli di alluminio è circa la stessa di quella dei raggi dai corpi attivi. Nessun confronto diretto può essere fatto e i raggi  $\alpha$  dall'emanazione mostrano le caratteristiche proprietà di aumento del tasso di assorbimento con lo spessore della materia attraversata. Prima di misurare, i raggi erano stati largamente assorbiti dalla finestra di mica, e il potere di penetrazione era di conseguenza diminuito.

Non fu osservata alcuna alterazione nella radiazione dall'emanazione ponendo un filo isolato dentro il contenitore di misura, e caricandolo ad un alto potenziale positivo o negativo. Quando un flusso d'aria attraverso il contenitore portava via l'emanazione appena prodotta, l'intensità della radiazione si riduceva a una piccola parte del suo valore iniziale.

Non fu trovata in questi esperimenti alcuna evidenza della presenza di raggi  $\beta$  nelle radiazioni, sebbene un effetto molto piccolo sia stato rivelato. Dopo un riposo di alcune ore, tuttavia, i raggi  $\beta$  iniziavano ad apparire. Questo era dovuto all'attività eccitata depositata sulle pareti del contenitore da parte dell'emanazione, e non direttamente dall'emanazione stessa.

L'emanazione del radio, come quella del torio, produce solo raggi  $\alpha$ . Questo fu verificato nel modo seguente<sup>18</sup>:

Una grande quantità di emanazione fu introdotta in un cilindro fatto di fogli di rame spessi  $0.005\text{ cm}$ , che assorbivano tutti i raggi  $\alpha$  ma lasciavano passare i raggi  $\beta$  e  $\gamma$ , se presenti, con una piccola perdita. La radiazione esterna al cilindro era determinata ad intervalli, cominciando due minuti dopo l'introduzione dell'emanazione. La quantità osservata inizialmente

<sup>18</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. aprile 1903.

era estremamente piccola, ma aumentava rapidamente e raggiungeva praticamente un massimo in tre o quattro ore. L'emanazione del radio produce, pertanto, raggi  $\alpha$ , e i raggi  $\beta$  appaiono quando l'attività eccitata è prodotta sulle pareti del contenitore. Spazzando via l'emanazione con una corrente d'aria, non vi era immediatamente una significativa diminuzione della radiazione. Questa è un'altra prova che l'emanazione non emette raggi  $\beta$ . In un modo simile si può mostrare che l'emanazione non produce raggi  $\gamma$ ; questi raggi si manifestano sempre nello stesso tempo dei raggi  $\beta$ .

Il metodo d'esame delle radiazioni dalle emanazioni è stato dato in dettaglio così come sono di considerevole importanza i risultati nella discussione, che si daranno nei capitoli X e XI, del legame tra le variazioni che avvengono nei prodotti radioattivi e le radiazioni da essi emesse. Non vi è dubbio che le emanazioni, separate dalle attività eccitate che esse generano, emettono solo raggi  $\alpha$ , consistenti più probabilmente di corpi carichi positivi proiettati con grande velocità.

*Effetto della pressione sul tasso di produzione dell'Emanazione.*

**157.** È già stato ricordato che la conduttività dovuta all'emanazione del torio è proporzionale alla pressione del gas, giungendo alla conclusione che il tasso di produzione dell'emanazione è indipendente dalla pressione, così come dalla natura del gas circostante. Questo risultato venne direttamente confermato con il dispositivo di Figura 55. Quando la pressione del gas al di sotto del contenitore era lentamente ridotta, la radiazione, valutata all'esterno della finestra, aumentava verso un limite per poi rimanere costante entro un ampio intervallo di pressione. L'aumento, che era più marcato nell'aria che nell'idrogeno, è dovuto al fatto che nel gas i raggi  $\alpha$  dall'emanazione erano parzialmente assorbiti nel gas dentro il contenitore in condizioni di pressione atmosferica. Ad una pressione dell'ordine di 1 mm di mercurio, la radiazione esterna diminuiva, ma l'esperimento mostrava che ciò doveva essere attribuito alla rimozione dell'emanazione da parte della pompa e non dal cambiamento nel tasso di produzione. I composti del torio assorbono molto facilmente il vapor acqueo, che è lentamente prodotto a bassa pressione e, di conseguenza, una parte dell'emanazione è portata via dal contenitore con il vapore acqueo.

Curie e Debierne<sup>19</sup> trovarono che sia la quantità di attività eccitata prodotta in un contenitore chiuso contenente campioni attivi del radio, e anche il tempo impiegato a raggiungere un valore massimo, erano indipendenti dalla pressione e natura del gas. Questo era vero nel caso di una soluzione abbassata alla pressione del vapore saturo, e nel caso di sali solidi a pressioni molto basse. Quando la pompa funzionava a pressioni dell'ordine di 0.001 mm di mercurio, la quantità di attività eccitata era di molto diminuita. Questo non era probabilmente dovuto ad una alterazione del tasso di emissione dell'emanazione, ma dalla rimozione dell'emanazione per l'azione della pompa nello stesso tempo in cui si formava.

Poiché la quantità di attività eccitata, in una condizione di equilibrio radioattivo, è una misura della quantità di emanazione che prodotta, questi risultati mostrano che la quantità di emanazione presente, quando il tasso di produzione bilancia il tasso di decadimento, è indipendente dalla pressione e natura del gas. Si è pure trovato che il tempo impiegato a raggiungere il punto di equilibrio radioattivo era indipendente dalle dimensioni del contenitore o dalla quantità di materia attiva presente. Ciò dimostra che la condizione di equilibrio non può in ogni modo essere attribuita al possesso da parte dell'emanazione di una pressione di vapore; se così fosse, il tempo impiegato a raggiungere il valore di equilibrio dipenderebbe dalle dimensioni del contenitore e dalla quantità di materia attiva presente. I risultati sono, comunque, in accordo con l'idea che l'emanazione è presente in piccole quantità nel tubo e che l'equilibrio è governato solamente dalla costante radioattiva  $\lambda$ , la costante di decadimento dell'attività dell'emanazione. Così si è osservato in tutte le condizioni di concentrazione, pressione e temperatura, e, purché non cambi il tasso di rifornimento dell'emanazione da parte della materia attiva, il tasso temporale di aumento dell'attività al valore di equilibrio sarà sempre lo stesso, per qualunque grandezza del contenitore o qualunque sia la natura e pressione del gas circostante.

*Natura chimica dell'Emanazione.*

**158.** Consideriamo ora alcuni esperimenti sulle proprietà fisiche e chimiche dell'emanazione stessa, senza riferimenti al materiale che la produce, per vedere se possiede proprietà che la collegano con un tipo noto di materia.

Abbiamo già osservato che l'emanazione del torio passava invariata attraverso soluzioni acide, e poi lo stesso risultato era mostrato valere nel caso di entrambe le emanazioni per ogni reagente utilizzato. Osservazioni preliminari<sup>20</sup> mostrarono che l'emanazione del torio, ottenuta nel modo consueto facendo passare aria sui vari torio, passava in quantità invariata attraverso un tubo di platino riscaldato elettricamente alla più alta temperatura ottenibile. Il tubo era poi riempito con platino nero e l'emanazione passava attraverso di esso dal freddo a una temperatura aumentata con gradualità, fino al raggiungimento del limite. In un altro esperimento, l'emanazione passava attraverso uno strato di piombo-cromato al calor rosso in un tubo di vetro. La corrente d'aria era sostituita da una corrente di idrogeno e l'emanazione era inviata attraverso polvere di magnesio al calor rosso e di palladio nero al calor rosso, e usando una corrente di biossido di carbonio, attraverso polvere di zinco al calor rosso. In ogni caso l'emanazione passava attraverso senza sensibili cambiamenti in quantità. Se succedesse qualcosa o si avesse un piccolo aumento, a causa del tempo impiegato dalla corrente gassosa a passare attraverso i tubi quando da caldi divenivano lentamente più freddi, il decadimento lungo il percorso diminuirebbe di conseguenza. I soli gas noti in grado di passare in quantità invariata attraverso tutti i reagenti impiegati sono i membri recentemente scoperti della famiglia dell'argon.

<sup>19</sup>Curie e Debierne, C. R. p. 931, 1901.

<sup>20</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. novembre 1902.

Ma vi può essere un'altra possibile interpretazione dei risultati. Se l'emanazione fosse la manifestazione di un tipo di radioattività eccitata sull'atmosfera circostante, allora, poiché per il tipo di esperimenti era necessario impiegare in ogni caso un gas, che, come l'atmosfera, non agiva sul reagente impiegato, il risultato ottenuto poteva essere atteso. Il magnesio al calor rosso non trattiene un'emanazione di idrogeno radioattivo, non la polvere di zinco al calor rosso una emanazione di biossido di carbonio attivo. La non correttezza di questa spiegazione fu mostrata nel modo seguente. Il biossido di carbonio passava sul torio, poi attraverso un tubo a T, dove incontrava una corrente d'aria e si mescolava con essa per passare entrambi nel cilindro di misura. Ma tra questo e il tubo a T era introdotto un grande tubo di calce sodata e la corrente di gas era poi raffreddata dal mescolamento con il biossido di carbonio, prima di essere misurata nel cilindro per l'emanazione. La quantità di emanazione trovata era del tutto invariata, sia che il biossido di carbonio fosse inviato sul torio nel modo descritto, sia che, considerando l'altro dispositivo precedente, una ugualmente rapida corrente d'aria era sostituita ad esso. La teoria che l'emanazione è un effetto dell'attività eccitata sul mezzo circostante è pertanto esclusa.

Esperimenti simili sull'emanazione del radio furono svolti successivamente. Un flusso continuo passava attraverso una soluzione di cloruro di radio e poi attraverso il reagente impiegato, in un contenitore di misura di piccolo volume, così che ogni cambiamento nella quantità di emanazione passante attraverso poteva essere facilmente rivelata. L'emanazione del radio, come quella del torio, passava inalterata in quantità attraverso ogni reagente usato.

In successivi esperimenti di Sir William Ramsay e Mr. Soddy<sup>21</sup>, l'emanazione dal radio era esposta ad un trattamento più drastico. L'emanazione in un tubo di vetro era bruciata per diverse ore con ossigeno o alcali. L'ossigeno era poi rimosso dal fosforo incendiabile e non era lasciato alcun residuo. Quando veniva introdotto un altro gas, mescolato con una piccola quantità di emanazione nel tubo e ritirato, l'attività dell'emanazione rimaneva inalterata. In un altro esperimento, l'emanazione era introdotta in un tubo di magnesio calcinato, che era riscaldato per tre ore al calor rosso. L'emanazione era poi rimossa e misurata, ma non si osservò alcuna diminuzione nel suo potere di scaricamento.

L'emanazione del torio e del radio sopportava trattamenti chimici in un modo finora inosservato tranne nei gas della famiglia dell'argon.

**159.** Ramsay e Soddy registrarono un interessante esperimento per illustrare la natura gassosa dell'emanazione. Una grande quantità di emanazione del radio era raccolta in un piccolo tubo di vetro. Questo tubo diveniva fortemente fosforescente sotto l'influsso dei raggi dell'emanazione. Il passaggio dell'emanazione da un punto ad un altro era osservato in una camera oscura mediante la luminosità eccitata sul vetro. Aprendo il rubinetto che lo collegava con la pompa Töpler, si osservava il lento flusso attraverso il tubo capillare, il rapido passaggio lungo i tubi più ampi, il ritardo nel passaggio attraverso un tampone di pentossido di fosforo e la rapida espansione nel serbatoio della pompa. Una volta compresso, la luminosità dell'emanazione aumentava e diveniva molto brillante quando la piccola bolla contenente l'emanazione era espulsa attraverso il sottile tubo capillare.

*Diffusione delle Emanazioni.*

**160.** È stato mostrato che le emanazioni del torio e del radio si comportano come i gas radioattivi, distribuiti in piccole quantità nell'aria o in altri gas nei quali sono misurate. Con le piccole quantità di materiale attivo da misurare, le emanazioni non sono state finora raccolte in quantità sufficiente per determinarne la densità. Sebbene il peso molecolare delle emanazioni non possa essere ottenuto direttamente con metodi chimici, si può fare una stima indiretta determinando la velocità della loro interdiffusione nell'aria o in altri gas. I coefficienti di interdiffusione di vari gas sono noti da tempo e i risultati mostrano che il coefficiente di diffusione di un gas in un altro è, per i gas più semplici, approssimativamente inversamente proporzionale alla radice quadrata del prodotto del loro peso molecolare. Se, tuttavia, si valuta il coefficiente di diffusione dell'emanazione in aria, sta tra quelli di gas A e B, è probabile che il peso molecolare dell'emanazione si trovi tra quello di A e B.

Sebbene il volume dell'emanazione prodotta dal radio sia molto piccolo, la conduttività elettrica prodotta dall'emanazione nel gas, con cui è mescolato, è spesso molto grande e offre un facile mezzo per misurare l'emanazione presente.

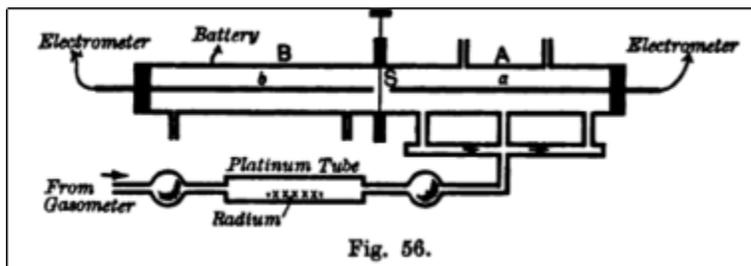
Alcuni esperimenti sono stati fatti da Miss Brook e da chi scrive<sup>22</sup> per determinare la velocità di diffusione dell'emanazione del radio nell'aria, con un metodo simile a quello impiegato da Loschmidt<sup>23</sup> nel 1871, nella sua ricerca del coefficiente di interdiffusione dei gas.

La Figura 56 mostra il dispositivo generale. Un lungo cilindro di ottone AB, lungo 73 cm e con diametro di 6 cm, era diviso in due parti uguali da una guida metallica scorrevole S. La parte terminale del cilindro era chiusa con un blocco di ebanite. Due aste di ottone isolate, a e b, ognuna della lunghezza di metà tubo, passava attraverso l'ebanite ed erano mantenute centralmente nel tubo. Il cilindro era isolato e connesso con un polo di una batteria di 300 Volt, con l'altro polo a terra. L'asta centrale poteva essere collegata con un sensibile elettrometro a quadranti. Il cilindro era ricoperto con un sottile strato di feltro e posto dentro una scatola di metallo riempita con ovatta per mantenere condizioni di temperatura più stabili possibile.

<sup>21</sup>Ramsay e Soddy, Proc. Roy. Soc. 72, p. 204, 1903.

<sup>22</sup>Rutherford e Miss Brooks, Trans. Roy. Soc. Canada 1901, Chem. News 1902.

<sup>23</sup>Loschmidt, Sitzungsber. d. Wien. Akad. II. p. 367, 1871.



Per trasmettere una quantità sufficiente di emanazione nel semicilindro A, fu necessario riscaldare lievemente il radio. La guida S era chiusa e i lati del tubo aperti. Una lenta corrente di aria secca da un gasometro passava attraverso un tubo di platino, nel quale era collocata una piccola quantità di composto di radio. L'emanazione era trasportata con l'aria nel cilindro A. Quando ne era stata introdotta una quantità sufficiente, il flusso d'aria era fermato. I lati del tubo erano chiusi da sottili tubi capillari per prevenire ogni perdita di gas dentro A alla pressione dell'aria esterna. Le tre entrate nel cilindro, mostrato in figura, avevano il compito di mescolare inizialmente l'emanazione e il gas nel modo più uniforme possibile.

Dopo un riposo di parecchie ore per portare la temperatura ad uno stato stazionario, la guida era aperta e l'emanazione iniziava a diffondere nel tubo B. La corrente attraverso i tubi A e B era misurata a intervalli regolari da un elettrometro, con un opportuna capacità in parallelo. Inizialmente non vi era corrente in B, ma dopo l'apertura della guida, la quantità in A diminuiva e quella in B aumentava. Dopo parecchie ore la quantità in ogni metà è all'incirca la stessa, mostrando che l'emanazione è quasi uniformemente diffusa attraverso il cilindro.

Si può facilmente mostrare<sup>24</sup> che se  $K$  è il coefficiente di diffusione dell'emanazione in aria;  $t$  la durata in secondi dell'esperimento di diffusione;  $a$  la lunghezza totale del cilindro;  $S_1$  la pressione parziale dell'emanazione nel tubo A al termine della diffusione;  $S_2$  la pressione parziale dell'emanazione nel tubo B al termine della diffusione, allora

$$\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-\frac{w^2 K t}{a^2}} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9w^2 K t}{a^2}} + \dots \right)$$

I valori di  $S_1$  e  $S_2$  sono proporzionali alla corrente di ionizzazione di saturazione dovuta alle emanazioni nelle due metà del cilindro. Da questa equazione si può determinare  $K$ , se si osservano i valori relativi di  $S_1$  e  $S_2$  dopo che si è avuta la diffusione per un definito intervallo  $t$ .

La determinazione di  $S_1$  e  $S_2$  è complicata dall'attività eccitata prodotta sulle pareti del contenitore. La ionizzazione dovuta a questa deve essere sottratta dalla ionizzazione totale osservata in ogni metà del cilindro, perché l'attività eccitata è prodotta dal materiale componente l'emanazione ed è rimossa agli elettrodi in un campo elettrico. Il rapporto tra la corrente dovuta all'attività eccitata e la corrente dovuta all'emanazione dipende dal tempo di esposizione all'emanazione ed è solo proporzionale ad essa per esposizioni di parecchie ore.

Il metodo generalmente adottato negli esperimenti era di aprire la guida per un definito intervallo, che variava da 15 a 20 minuti. La guida era poi chiusa e le correnti in ogni metà subito determinate. L'asta centrale, che era stata caricata negativamente durante gli esperimenti, aveva la maggior parte dell'attività eccitata concentrata sulle sue superfici. Questa era rimossa e sostituita con una nuova asta e la corrente immediatamente determinata. Il rapporto delle correnti nelle due metà cilindro in queste condizioni era proporzionale a  $S_1$  e  $S_2$ , le quantità di emanazione presente nelle due metà del cilindro.

I valori di  $K$ , dedotti per diversi valori di  $t$ , furono trovati essere in buon accordo. Nei primi esperimenti i valori di  $K$  trovati variavano tra 0.08 e 0.12. In quelli successivi, dove si era prestata grande attenzione al mantenimento di condizioni di temperatura costante, i valori di  $K$  variavano tra 0.07 e 0.09. Il valore più basso 0.07 è probabilmente il più vicino al valore vero, poiché i disturbi della temperatura tendono a dare un valore troppo grande di  $K$ . Nessuna differenza certa fu osservata nei valori di  $K$  in aria secca o umida, o in presenza o assenza di un campo elettrico.

**161.** Alcuni esperimenti sul tasso di diffusione dell'emanazione del radio in aria furono eseguiti in un periodo successivo da P. Curie e Danne<sup>25</sup>. Se l'emanazione è contenuta in un serbatoio chiuso, si è visto che la sua attività, che è una misura della quantità di emanazione presente, decresce secondo una legge esponenziale con il tempo. Se il serbatoio è messo in comunicazione con l'aria esterna attraverso un tubo capillare, l'emanazione è lentamente diffusa e la quantità di emanazione nel serbatoio diminuisce secondo la stessa legge precedente, ma con velocità maggiore. Usando tubi di diverse lunghezze e diametri, il tasso di diffusione obbediva alla stessa legge valida per i gas. Il valore di  $K$  trovato era di 0.100. Questo è probabilmente il valore più grande di  $K$  rispetto al valore più basso di 0.07 trovato da Rutherford e Miss Brooks. Nessuna menzione è fatta da Curie e Danne sulle precauzioni attuate contro i disturbi della temperatura e ciò può spiegare il valore maggiore di  $K$  da essi ottenuto.

<sup>24</sup>Si veda Stefan, Sitzungsber. d. Wien. Akad. 63, II, p. 82, 1871.

<sup>25</sup>P. Curie e Danne, C. R. 136, p. 1314, 1903.

Essi trovarono inoltre che l'emanazione, come un gas, si divideva sempre tra i due serbatoi, posti in collegamento con un altro, in proporzione dei loro volumi. In un esperimento un serbatoio era mantenuto alla temperatura di  $10^{\circ}\text{C}$  e l'altro a  $350^{\circ}\text{C}$ . L'emanazione si divideva tra i due serbatoi nella stessa proporzione di un gas nelle stesse condizioni.

**162.** Per effettuare un confronto, alcuni dei coefficienti di interdizione dei gas, compilato da Landolt e Bernstein sono presentati nella seguente tabella.

Gas o vapore	Coefficiente di diffusione in aria	Peso molecolare
Vapor acqueo	0.198	18
Acido carbonico gassoso	0.142	44
Vapore di alcool	0.101	46
Vapore di etere	0.077	74
Emanazione del radio	0.07	?

La tabella, sebbene non molto soddisfacente per un confronto, mostra che il coefficiente di interdizione segue la legge dell'inverso del peso molecolare. Il valore di  $K$  per l'emanazione del radio è minore di quello del vapore di etere, il cui peso molecolare è 74. Possiamo, pertanto, concludere che l'emanazione è di un peso molecolare superiore a 74. Sembra probabile che l'emanazione abbia un peso molecolare intorno a 100 e forse anche maggiore, perché i vapori di etere e alcool hanno coefficienti di diffusione più grandi rispetto all'acido carbonico che la teoria ci porterebbe a mettere prima. Confrontando i coefficienti di diffusione dell'emanazione e dell'acido carbonico in aria, il valore del peso molecolare dell'emanazione sarebbe circa 176 se il risultato osservato per i gas semplici, posto che il coefficiente di diffusione è inversamente proporzionale alla radice quadrata del peso molecolare, fosse vero nel presente caso. Bumstead e Wheeler<sup>26</sup> confrontarono le velocità di diffusione dell'emanazione del radio e del biossido di carbonio attraverso una piastra porosa e conclusero che il peso molecolare dell'emanazione era circa 180. Nella teoria della disintegrazione, l'atomo di emanazione è derivato dall'atomo di radio per espulsione di una particella. Pertanto, ci si deve attendere che il suo peso molecolare debba essere sopra i 200.

È interessante confrontare il valore di  $K = 0.07$  con quello determinato da Townsend (sezione 37) per gli ioni gassosi prodotti in aria a pressione e temperatura ordinaria, provenienti dai raggi Röntgen e dalle radiazioni di sostanze attive. Townsend trovò che il valore di  $K$  in aria secca era di 0.028 per ioni positivi e 0.043 per quelli negativi. L'emanazione del radio, pertanto, diffonde più rapidamente degli ioni prodotti dalla sua radiazione nel gas, e si comporta come se la sua massa fosse più piccola di quella degli ioni prodotti in aria, ma considerevolmente maggiore di quella delle molecole d'aria con cui è mescolata.

Non è possibile considerare l'emanazione come una condizione temporaneamente modificata del gas originario a contatto con il corpo attivo. In tali condizioni ci si dovrebbe aspettare un valore molto più grande di  $K$ . L'evidenza derivata dagli esperimenti sulla diffusione supporta fortemente l'idea che l'emanazione sia un gas di grande peso molecolare.

Makower<sup>27</sup> ha recentemente affrontato la questione del peso molecolare dell'emanazione del radio con un altro metodo. La velocità di diffusione dell'emanazione attraverso un filtro poroso di gesso era confrontato con quello dei gas ossigeno, biossido di carbonio e biossido di zolfo. Si trovò che la legge di Graham, cioè quella per cui il coefficiente di diffusione  $K$  è inversamente proporzionale alla radice quadrata del suo peso molecolare  $M$ , non era del tutto applicabile. Il valore di  $K\sqrt{M}$  non era costante per questi gas, ma decresceva con l'aumento del peso molecolare del gas. Se, comunque, si rappresentava una curva con  $K\sqrt{M}$  come ordinata e  $K$  come ascissa, i punti corrispondenti ai valori per l' $O$ ,  $CO_2$  e  $SO_2$  si disponevano su una linea retta. Per estrapolazione lineare si stimava il peso molecolare dell'emanazione. Il valore ottenuto sperimentalmente sui tre diversi tamponi porosi era rispettivamente 85.5, 97, 99. Questo metodo indica che il peso molecolare dell'emanazione del radio è circa 100; ma in tutti gli esperimenti di diffusione, si deve ricordare che l'emanazione, la cui velocità di interdizione è stata esaminata, esiste in piccole quantità mescolata con il gas, ed è confrontata con la velocità di interdizione di gas che sono presenti in grande quantità. Per questo motivo, la deduzione del peso molecolare dell'emanazione può essere soggetta a grandi errori, la cui correzione risulta particolarmente difficile.

*Diffusione dell'Emanazione del Torio.*

**163.** A causa del rapido decadimento dell'attività dell'emanazione del torio, non è possibile determinare il valore di  $K$ , il suo coefficiente di diffusione in aria con i metodi impiegati per l'emanazione del radio. Il valore di  $K$  è stato determinato da chi scrive nel modo seguente. Una piastra C, Figura 57, ricoperta con idrossido di torio, era posta orizzontalmente vicino alla base di un lungo cilindro verticale di ottone P. L'emanazione rilasciata dal composto di torio diffonde dentro il cilindro.

<sup>26</sup>Bumstead e Wheeler, Amer. Jour. Science, febbraio 1904.

<sup>27</sup>Makower, Phil. Mag. gennaio 1905.

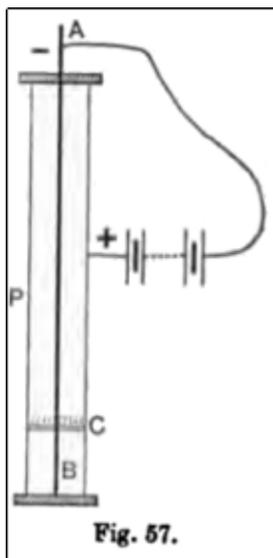


Fig. 57.

Sia  $p$  la pressione parziale dell'emanazione ad una distanza  $x$  dalla sorgente C. Questa sarà approssimativamente uniforme sulla sezione trasversale del cilindro. Dai principi generali di diffusione otteniamo l'equazione

$$K \frac{d^2 p}{dx^2} = -\frac{dp}{dt}$$

L'emanazione è continuamente separata ed emette particelle  $\alpha$ . L'emanazione residua acquista una carica positiva, e, in un campo elettrico, è rimossa subito dal gas verso l'elettrodo negativo.

Poiché l'attività dell'emanazione in ogni istante è sempre proporzionale al numero di particelle che non hanno subito disintegrazione e poiché l'attività decade con il tempo in accordo con una legge esponenziale,  $p = p_1 e^{-\lambda t}$ , dove  $p_1$  è il valore di  $p$  quando  $t = 0$  e  $\lambda$  è la *costante radioattiva* dell'emanazione.

Allora

$$\frac{dp}{dt} = -\lambda p$$

e

$$K \frac{dp^2}{dx^2} = \lambda p$$

Pertanto

$$p = Ae^{-\sqrt{\frac{\lambda}{K}}x} + Be^{\sqrt{\frac{\lambda}{K}}x}$$

Poiché  $p = 0$  quando  $x = \infty$ ,  $B = 0$ .

Se  $p = p_0$  quando  $x = 0$ ,  $A = p_0$ .

Allora

$$p = p_0 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{K}}x}$$

Non è risultato conveniente nell'esperimento determinare l'attività dell'emanazione lungo il cilindro, ma fu usato un metodo equivalente dipendente dalla misurazione della distribuzione di "attività eccitata" prodotta lungo un'asta centrale AB, caricata negativamente.

Si mostrerà in seguito (sezione 177) che la quantità di attività eccitata in ogni punto è sempre proporzionale alla quantità di emanazione in quel punto. La distribuzione di "attività eccitata" lungo l'asta centrale dalla piastra C in avanti dà la variazione di  $p$  per l'emanazione lungo il tubo.

Nell'esperimento, il cilindro era riempito con aria secca a pressione atmosferica ed era mantenuto a temperatura costante. L'asta centrale era caricata negativamente ed esposta per uno o due giorni alla presenza dell'emanazione. L'asta era poi rimossa e la distribuzione dell'attività eccitata lungo di essa determinata con il metodo elettrico. Si è trovato che la quantità di attività eccitata diminuiva con la distanza  $x$  in accordo con la legge esponenziale, dimezzandosi in circa 1.9 cm. Ciò è in accordo con la teoria precedente.

Poiché l'attività dell'emanazione dimezza in 1 minuto,  $\lambda = 0.0115$ . Il valore di  $K = 0.09$  fu dedotto dalla media dei valori sperimentali. Questo è un valore un poco più grande di  $K = 0.07$ , ottenuto per l'emanazione del radio, ma i risultati mostrano che le due emanazioni non differiscono molto tra loro per il peso molecolare.

Makower (citato) confrontò le velocità di diffusione dell'emanazione del torio e del radio attraverso un piatto poroso e concluse che le due emanazioni avevano circa lo stesso peso molecolare, confermando così i risultati ottenuti con il metodo sopra.

*Diffusione dell'Emanazione nei Liquidi.*

**164.** Esperimenti sono stati eseguiti da Wallstabe<sup>28</sup> sul coefficiente di diffusione dell'emanazione del radio in vari liquidi. L'emanazione del radio poteva diffondersi in un serbatoio chiuso, contenente un cilindro di liquido da valutare. Il cilindro comprendeva un tubo e un rubinetto che si estendeva oltre il contenitore chiuso, così che i diversi strati di liquido potessero essere rimossi. Il liquido era poi posto in un contenitore chiuso di misura, dove la corrente di ionizzazione dovuta all'emissione dell'emanazione dal liquido era osservata fino a raggiungere un massimo dopo parecchie ore per poi decadere. Questo valore massimo della corrente era preso come misura della quantità di emanazione assorbita nel liquido.

Il coefficiente di diffusione  $K$  dell'emanazione nel liquido può essere ottenuto dalla stessa equazione usata per determinare la diffusione dell'emanazione del torio in aria

$$p = p_0 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{K}}x}$$

dove  $\lambda$  è la costante di decadimento dell'attività dell'emanazione del radio e  $x$  la profondità dello strato d'acqua dalla superficie.

Ponendo  $\alpha = \sqrt{\frac{\lambda}{K}}$ , si è trovato che

$$\begin{array}{ll} \text{per l'acqua} & \alpha = 1.6 \\ \text{per il toluolo} & \alpha = 0.75 \end{array}$$

Il valore di  $\lambda$  espresso in termini di un giorno come unità di tempo è circa 0.17.

Pertanto il valore di  $K$  per la diffusione dell'emanazione del radio in acqua è  $= 0.066 \frac{cm^2}{giorno}$ .

Il valore di  $K$  trovato da Stefan<sup>29</sup> per diffusione del biossido di carbonio in acqua era  $1.36 \frac{cm^2}{giorno}$ . Questi risultati sono, pertanto, in armonia con la conclusione ricavata dalla diffusione dell'emanazione del radio in aria, e mostra che l'emanazione del radio si comporta come un gas di alto peso molecolare.

*Condensazione delle Emanazioni.*

**165.** Durante un'analisi dell'effetto degli agenti chimici e fisici dell'emanazione del torio, Rutherford e Soddy<sup>30</sup> trovarono che l'emanazione passava in quantità invariata attraverso un tubo di platino al calor bianco e attraverso un tubo raffreddato alla temperatura del biossido di carbonio liquido. In successivi esperimenti furono esaminati gli effetti di temperature ancora più basse e si trovò che alla temperatura dell'aria liquida entrambe le emanazioni erano condensate<sup>31</sup>.

Se l'emanazione è portata da un lento flusso di idrogeno, ossigeno, o dall'aria attraverso una spirale di metallo immerso in aria liquida e posta in collegamento con un contenitore di misura come in Figura 51, nessuna traccia di emanazione sfuggerà nel gas emanante. Quando l'aria liquida è rimossa e la spirale immersa in ovatta, trascorrono parecchi minuti prima di osservare una deflessione dell'ago dell'elettrometro, e poi l'emanazione condensata volatilizza rapidamente e il movimento dell'ago dell'elettrometro è molto repentino, specialmente nel caso del radio. Con una grande quantità di emanazione del radio, nelle condizioni ricordate, passano pochi secondi dopo il primo segnale di movimento prima che l'elettrometro indichi una deflessione di parecchie centinaia di divisione al secondo. Non è necessario in qualunque caso che il composto emanante si tratti nel flusso di gas. Dopo la condensazione dell'emanazione nella spirale, il composto di torio o radio può essere rimosso e il flusso di gas inviato direttamente sulla spirale. Ma nel caso del torio, in queste condizioni, gli effetti osservati sono naturalmente piccoli a causa della rapida perdita di attività dell'emanazione con il tempo, che procede allo stesso ritmo alla temperatura dell'aria liquida così come a temperatura ordinaria.

Se si condensa una grande quantità di emanazione in un tubo di vetro a U, l'avanzamento della condensazione può essere seguito a occhio nudo, per mezzo delle fosforescenze che la radiazione eccita nel vetro. Se gli estremi del tubo sono sigillati e la temperatura può crescere, i bagliori si diffondono uniformemente attraverso il tubo e si possono concentrare in qualche punto a una certa distanza mediante raffreddamento locale del tubo con aria liquida.

**166. Dispositivi sperimentali.** Un semplice dispositivo sperimentale per illustrare la condensazione e la volatilizzazione dell'emanazione e alcune delle loro proprietà caratteristiche è mostrato in Figura 58. L'emanazione ottenuta da pochi milligrammi di bromuro di radio per soluzione o riscaldamento è condensata in un tubo T di vetro a U immerso in aria liquida. Questo tubo a U è poi collegato con una grande tubo di vetro V, nella cui parte superiore è posto uno schermo di solfuro di zinco Z, e nella parte inferiore del tubo un pezzo di willemite. Il rubinetto A è chiuso e il tubo U e il contenitore V sono parzialmente svuotati da una pompa attraverso il rubinetto B. Questa diminuzione di pressione causa una più rapida diffusione dell'emanazione quando è emessa. L'emanazione non sfugge se il tubo T è mantenuto immerso nell'aria liquida. Il rubinetto B è poi chiuso e l'aria liquida rimossa. Non si osserva alcuna luminosità dello schermo o della willemite nel tubo V per parecchi minuti, fino a che la temperatura di T cresce al di sopra del punto di volatilizzazione dell'emanazione. L'emanazione è poi rapidamente trasportata nel contenitore V, parzialmente per espansione del gas nel tubo T con l'aumento della temperatura e parzialmente per diffusione. Lo schermo Z e la willemite W diventano fosforescenti sotto l'influsso dei raggi dall'emanazione che li circonda.

<sup>28</sup>Wallstabe, Phys. Zeit. 4, p. 721, 1903.

<sup>29</sup>Stefan, Wien. Ber. 2, p. 371, 1878.

<sup>30</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. novembre 1902.

<sup>31</sup>Phil. Mag. maggio 1903.

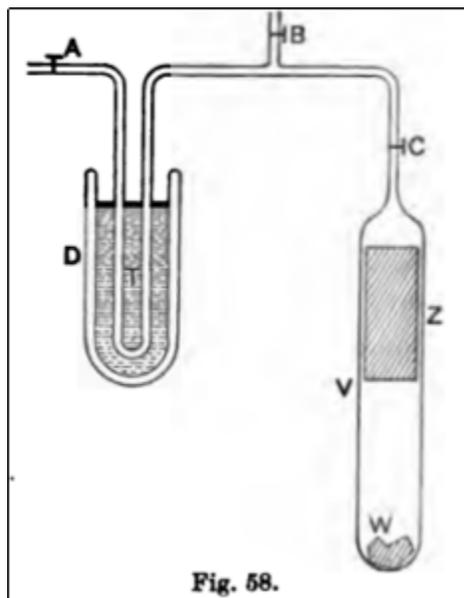


Fig. 58.

Se l'estremo del contenitore V è poi immerso in aria liquida, l'emanazione è ancora condensata nella parte inferiore del tubo e la willemite diviene molto più fosforescente di prima. Questo non è dovuto ad un aumento della fosforescenza della willemite alla temperatura dell'aria liquida, ma all'effetto dei raggi dall'emanazione condensata attorno ad essa. Nello stesso tempo la luminosità del solfuro di zinco gradualmente diminuisce e praticamente scompare dopo parecchie ore se la parte finale del tubo è mantenuta nell'aria liquida. Se il tubo è rimosso dall'aria liquida, l'emanazione volatilizza ancora e illumina lo schermo Z. La luminosità della willemite ritorna al suo valore iniziale dopo parecchie ore. Questo lento cambiamento della luminosità del solfuro di zinco e della willemite è dovuto al graduale decadimento dell'"attività eccitata" prodotta dall'emanazione sulla superficie di tutti i corpo esposti alla sua azione (capitolo VIII). La luminosità dello schermo è allora in parte dovuta alla radiazione dall'emanazione e in parte alla radiazione eccitata da essa causata. Non appena l'emanazione è rimossa dalla parte superiore e inferiore del tubo, la radiazione "eccitata" gradualmente diminuisce nella parte superiore e aumenta in quella inferiore.

La luminosità dello schermo diminuisce con il tempo così come l'emanazione racchiusa perde la propria attività, ma rimane ancora apprezzabile dopo un intervallo di parecchie settimane.

Un apparato con caratteristiche simili per illustrare l'emanazione del radio è stato descritto da P. Curie<sup>32</sup>.

**167. Determinazione della temperatura di condensazione.** Un'indagine dettagliata venne fatta da Rutherford e Soddy (citato) della temperatura alla quale la condensazione e la volatilizzazione iniziavano per le due emanazioni. L'apparato sperimentale del primo metodo è mostrato chiaramente in Figura 59.

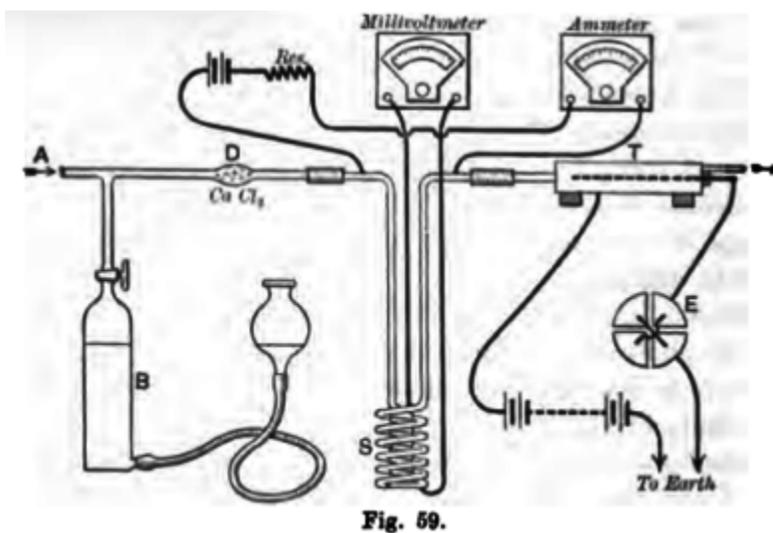


Fig. 59.

Un lento e costante flusso di gas, entrante in A, passava attraverso una spirale di rame lunga 3 metri, immersa in un bagno di etilene liquido. La spirale di rame agiva come termometro di se stessa determinando la propria resistenza

<sup>32</sup>P. Curie, Société de Physique, 1903.

elettrica. La curva di temperatura della resistenza fu ottenuta con osservazioni della resistenza a  $0^{\circ}C$ , al punto di ebollizione dell'etilene liquido  $-103.5^{\circ}C$ , al punto di solidificazione dell'etilene  $-169^{\circ}$  e in aria liquida. La temperatura dell'aria liquida era dedotta dalle tabelle date da Baly per il punto di ebollizione dell'aria liquida per diverse percentuali di ossigeno. La curva temperatura-resistenza, per la particolare spirale utilizzata, era quasi una linea retta tra  $0^{\circ}$  e  $-192^{\circ}$ , intersecando l'asse delle temperature se prodotta quasi allo zero assoluto. La resistenza della spirale, dedotta dalla lettura su un preciso millivoltmetro Weston, con una corrente costante attraverso la spirale, era pressoché proporzionale alla temperatura assoluta. L'etilene liquido era mantenuto rigorosamente agitato da un motore elettrico ed era raffreddato ad ogni temperatura desiderata circondando il contenitore con aria liquida.

Il metodo generale impiegato per l'emanazione del radio consisteva nel passare una opportuna quantità di emanazione, mescolata con il gas da utilizzare, dal contenitore B nella spirale, raffreddarlo al di sotto della temperatura di condensazione. Dopo che l'emanazione era condensata nella spirale, si faceva passare attraverso la spirale una corrente di idrogeno elettrolitico o ossigeno. La temperatura poteva salire gradualmente ed era annotata nell'istante in cui si osservava una deflessione dell'elettrometro, dovuta alla presenza di emanazione nel contenitore di misura T. La resistenza, sottoposta ad una piccola correzione dovuta al tempo impiegato per il trasporto dell'emanazione nel contenitore di misura, forniva la temperatura alla quale un po' di emanazione cominciava a volatilizzare. La corrente di ionizzazione nel contenitore di misura saliva rapidamente verso un valore massimo, mostrando che, per un piccolo aumento di temperatura, tutta l'emanazione del radio era volatilizzata. La tabella seguente offre un'idea dei risultati ottenuti per una corrente di idrogeno di  $1.38 \frac{cm^3}{s}$ .

Temperatura	Divisione per secondo dell'elettrometro
$-160^{\circ}$	0
$-156^{\circ}$	0
$-154^{\circ}.3$	1
$-153^{\circ}.8$	21
$-152^{\circ}.5$	24

La tabella seguente mostra i risultati ottenuti per diverse correnti di idrogeno e ossigeno.

	Corrente di Gas	$T_1$	$T_2$
Idrogeno	$0.25 \frac{cm^3}{s}$	$-151.3$	$-150$
"	$0.32$	$-153.7$	$-151$
"	$0.92$	$-152$	$-151$
"	$1.38$	$-154$	$-153$
"	$2.3$	$-162.5$	$-162$
Ossigeno	$0.34$	$-152.5$	$-151.5$
"	$0.58$	$-155$	$-153$

La temperatura  $T_1$  nella tabella sopra dà la temperatura della volatilizzazione iniziale,  $T_2$  la temperatura per cui metà dell'emanazione condensata viene rilasciata. Per correnti lenti di idrogeno e ossigeno, i valori di  $T_1$  e  $T_2$  sono in buon accordo. Per un flusso di gas rapido come  $2.3 \frac{cm^3}{s}$  il valore di  $T_1$  è molto più basso. Un tale risultato è atteso; infatti, per un flusso troppo rapido, il gas non è raffreddato alla temperatura della spirale e, di conseguenza, la superficie interna della spirale è sopra la temperatura media, e una parte dell'emanazione è emessa a temperatura molto più bassa. Nel caso dell'ossigeno, questo effetto appare per un flusso di gas di  $0.58 \frac{cm^3}{s}$ .

Negli esperimenti sull'emanazione del torio, a causa del rapido decadimento dell'attività, era necessario un metodo diverso. Il flusso continuo di gas passava sul composto di torio e la temperatura era osservata nell'istante in cui si verificava un apprezzabile movimento dell'elettrometro. Ciò dà la temperatura alla quale una piccola frazione dell'emanazione del torio sfugge dalla condensazione e non si osserva il valore di  $T_1$  per l'emanazione del radio, che dà la temperatura per la quale una piccola frazione dell'emanazione precedentemente condensata si volatilizza.

La seguente tabella illustra i risultati ottenuti.

	Corrente di Gas	Temperatura
Idrogeno	$0.71 \frac{cm^3}{s}$	$-155^{\circ} C$
"	$1.38$	$-159^{\circ} C$
Ossigeno	$0.58$	$-155^{\circ} C$

Confrontando questi risultati con i valori ottenuti per l'emanazione del radio, si osserverà che con un uguale flusso di gas le temperature sono quasi le stesse.

Un esame più accurato dell'emanazione del torio mostrava, tuttavia, che questo apparente accordo era solo accidentale e che vi era, in realtà, una differenza marcata nell'effetto di temperatura sulle due emanazioni. Si è trovato sperimentalmente che l'emanazione del radio era molto condensata vicino alla temperatura alla quale iniziava la volatilizzazione e che i punti di condensazione e volatilizzazione erano definiti abbastanza strettamente.

D'altro canto, l'emanazione del torio richiede un intervallo di oltre  $30^{\circ}C$ , dopo che la condensazione è iniziata, per assicurare una completa condensazione. La Figura 60 è un esempio dei risultati ottenuti con un flusso costante di gas di  $1.38 \frac{cm^3}{s}$  per l'ossigeno. Le ordinate rappresentano la percentuale dell'emanazione non condensata a diverse temperature. Si osserverà che la condensazione inizia a circa  $-120^{\circ}$  e che solo assai poca emanazione sfugge a  $-155^{\circ}C$ .

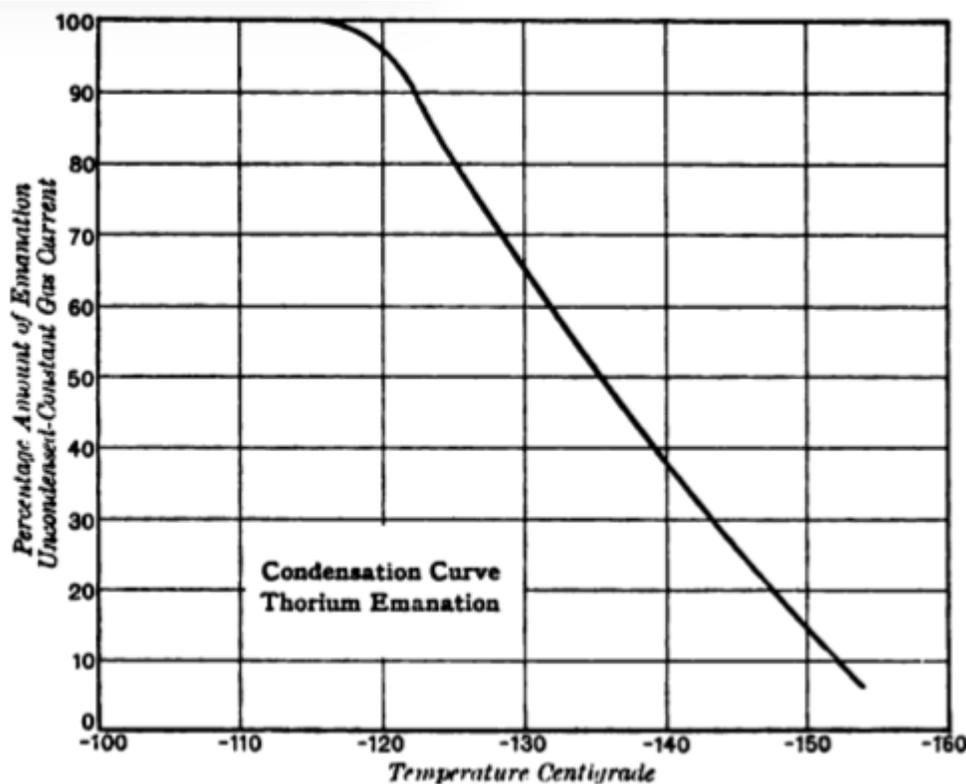


Fig. 60.

Per analizzare questa differenza di comportamento nelle due emanazioni, venne impiegato un metodo statico, che permetteva di fare un loro esame in condizioni confrontabili. L'emanazione mescolata con una piccola quantità di gas, era introdotta in una spirale fredda, in cui si era fatto precedentemente il vuoto con una pompa al mercurio. La quantità di emanazione rimanente non condensata dopo un intervallo definito era rapidamente rimossa per mezzo di una pompa ed era portata con un flusso ausiliario di gas nel contenitore di misura.

Misurata così, si è trovato che il punto di volatilizzazione dell'emanazione del radio era quasi lo stesso di quello ottenuto con il metodo soffiante, cioè  $-150^{\circ}C$ . Con il torio, d'altro canto, la condensazione iniziava a circa  $-120^{\circ}C$  e con il metodo soffiante, continuava per un intervallo di  $30^{\circ}C$ . La porzione di emanazione condensata a qualsiasi temperatura dipendeva dalla varietà delle condizioni, sebbene il punto in cui iniziava, cioè  $-120^{\circ}C$ , era all'incirca lo stesso in ogni caso. Dipendeva dalla pressione e dalla natura del gas, dalla concentrazione dell'emanazione e dal tempo che rimaneva nella spirale. Per una data temperatura una maggiore porzione di emanazione era condensata, più bassa la pressione e più lungo il tempo di permanenza nella spirale. Nelle stesse condizioni, l'emanazione era condensata più rapidamente nell'idrogeno che nell'ossigeno.

**168.** Non vi è dubbio che l'emanazione del torio inizia a condensare a una temperatura più alta di quella dell'emanazione del radio. La spiegazione di questo peculiare comportamento dell'emanazione del torio è chiara quando si consideri il piccolo numero di particelle presenti nel gas. Si è mostrato che entrambe le emanazioni emettono solo raggi  $\alpha$ . È probabile che le particelle  $\alpha$  dalle due emanazioni abbiano caratteristiche simili e producano circa lo stesso numero di ioni nel loro passaggio attraverso il gas. Il numero di ioni prodotto per ogni particella  $\alpha$  prima di dissipare la sua energia è probabilmente circa 70000. (Si veda la sezione 252).

Nell'esperimento, l'elettrometro misurava facilmente una corrente di  $10^{-3}$  unità elettrostatiche. Assumendo che la carica su uno ione sia  $3.4 \cdot 10^{-10}$  unità elettrostatiche, si ha una produzione nel contenitore di misura di circa  $3 \cdot 10^6$  ioni al secondo, che dovrebbero essere prodotti da circa 40 particelle  $\alpha$  emesse al secondo. Ogni particella radiante non

può espellere meno di una particella  $\alpha$  e può espellerne di più, ma è probabile che il numero espulso per un atomo dell'emanazione del torio non sia molto diverso da quello per un atomo dell'emanazione di radio.

Nella sezione 133 si è mostrato che, in accordo con la legge di decadimento,  $\lambda N$  particelle cambiano al secondo quando  $N$  sono quelle presenti. Pertanto, per produrre 40 particelle  $\alpha$ ,  $\lambda N$  non può essere maggiore di 40. Poiché per l'emanazione del torio  $\lambda$  è  $\frac{1}{87}$ , segue che  $N$  non può essere maggiore di 3500. L'elettrometro rivelava, pertanto, la presenza di 3500 particelle per l'emanazione del torio e poiché nel metodo statico il volume della spirale condensante era di circa  $15 \text{ cm}^3$ , ciò corrisponde a una concentrazione di circa 230 particelle per  $\text{cm}^3$ . Un gas comune a pressione e temperatura atmosferica probabilmente contiene  $3.6 \cdot 10^{19}$  molecole per  $\text{cm}^3$ . L'emanazione, pertanto, sarà stata rivelata sulla spirale se possedeva una pressione parziale inferiore ai  $10^{-17}$  di una atmosfera.

Non è allora sorprendente che il punto di condensazione dell'emanazione del torio non sia strettamente definito. È piuttosto una materia di osservazione che la condensazione avvenga così facilmente con una distribuzione di particelle così dispersa nel gas; affinché la condensazione si verifichi, è probabile che le particelle debbano avvicinarsi tra loro nella rispettiva sfera di influenza.

Nel caso dell'emanazione del radio, il tasso di decadimento è circa 5000 volte più lento di quello dell'emanazione del torio e, di conseguenza, il numero effettivo di particelle per produrre la stessa ionizzazione al secondo nel due casi deve essere circa 5000 volte maggiore nel caso del radio rispetto a quello del torio. Questa conclusione implica solo l'ipotesi che lo stesso numero di raggi sia prodotto da una particella di emanazione in ogni caso e che le particelle emesse producano nel loro passaggio attraverso il gas lo stesso numero di ioni. Il numero di particelle presenti, per essere rivelate dall'elettrometro, in questo esperimento, deve essere stato di circa  $5000 \times 3500$ , cioè circa  $2 \cdot 10^7$ . Il diverso comportamento nei due casi è ben spiegato dall'ipotesi che, *per uguali effetti elettrici*, il numero di particelle di emanazione del radio deve essere assai più grande del numero di particelle di emanazione del torio. La probabilità delle particelle di entrare ognuna nelle altre sfere di influenza aumenterà molto rapidamente con l'aumento della concentrazione delle particelle, e, nel caso dell'emanazione del radio, una volta raggiunta la temperatura di condensazione, una piccola percentuale del numero totale di particelle presenti condenserà in un tempo molto breve. Nel caso dell'emanazione del torio, tuttavia, la temperatura potrebbe essere molto al di sotto di quella di condensazione, e una considerevole parte rimarrà non condensata per intervalli in confronto lunghi. I risultati sperimentali ottenuti al riguardo possono essere ragionevolmente prevedibili. Una grande parte dell'emanazione condensa nel più lungo tempo concesso per la condensazione a parità di condizioni. La condensazione avviene più rapidamente nell'idrogeno che nell'ossigeno, così come la diffusione è maggiore nel primo gas. Per lo stesso motivo la condensazione avviene più rapidamente alla pressione più bassa del gas presente. Infine, quando l'emanazione è trasportata da un flusso continuo di gas, si condensa una parte più piccola che negli altri casi, poiché la concentrazione di particelle di emanazione per unità di volume di gas è minore nelle stesse condizioni.

È possibile che la condensazione delle emanazioni non avvenga nello stesso gas ma sulla superficie del contenitore di misura. Osservazioni accurate della temperatura di condensazione sono state eseguite in una spirale di rame, ma la condensazione avviene certamente in tubi di piombo o di vetro all'incirca alla stessa temperatura dei tubi di rame.

**169.** In esperimenti fatti con il metodo statico con una grande quantità di emanazione di radio, fu osservata una piccola quantità dell'emanazione condensata parecchi gradi al di sotto della temperatura alla quale la maggior parte dell'emanazione era rilasciata. Ciò è prevedibile, in tali condizioni, in quanto l'elettrometro è in grado di rivelare una parte molto piccola dell'intera quantità dell'emanazione condensata.

Speciali esperimenti, con una grande quantità di emanazione, che erano eseguiti con la spirale immersa in un bagno di ossido nitrico in rapida ebollizione, mostravano questo effetto molto chiaramente. Per esempio, l'emanazione condensata iniziava a volatilizzare a  $-155^\circ \text{C}$ . In 4 minuti la temperatura era risalita a  $-153.5^\circ \text{C}$ , e la quantità volatilizzata era quattro volte maggiore a  $-155^\circ$ . Nei successivi  $5\frac{1}{2}$  minuti la temperatura saliva a  $-152.3^\circ$  e in pratica l'intera quantità, che era almeno quindici volte la quantità alla temperatura di  $-153.5^\circ$ , era volatilizzata.

Sembra pertanto probabile che, se la temperatura è mantenuta costante, al punto in cui si osserva la volatilizzazione, e l'emanazione rilasciata rimossa ad intervalli, l'intera emanazione sarà nel corso del tempo liberata a quella temperatura. Curie e Dewar e Ramsay hanno osservato che l'emanazione condensata in un tubo a U, immerso in aria liquida, sfuggiva lentamente se la pompa lavorava in modo costante. Questi risultati indicano la probabilità che l'emanazione condensata possieda una effettiva pressione di vapore, ma sarebbero necessari notevoli miglioramenti sperimentali per poter stabilire in via definitiva tale conclusione.

La temperatura effettiva di condensazione dell'emanazione del torio è probabilmente circa  $-120^\circ \text{C}$  e quella del radio circa  $-150^\circ \text{C}$ . Non vi è dubbio che le due emanazioni siano del tutto distinte tra loro sotto questo aspetto, e anche rispetto alla loro radioattività, sebbene entrambe possiedano la proprietà di essere chimicamente inerti. Questi risultati sulla temperatura di condensazione non ci permettono di fare confronti tra i punti di condensazione delle emanazioni con questi gas noti, poiché l'abbassamento dei punti di condensazione dei gas con la diminuzione della pressione non è stata studiata a pressioni estremamente piccole.

**170.** Si è trovato<sup>33</sup> che l'attività dell'emanazione del torio, condensato nella spirale alla temperatura dell'aria liquida, decadeva con lo stesso tasso della temperatura ordinaria. Ciò è in accordo con i risultati di tipi simili ottenuti da P. Curie per l'emanazione del radio (sezione 145), e mostrano che il valore della costante radioattiva non è influenzato da grandi variazioni di temperatura.

*Quantità di Emanazione da Radio e Torio.*

**171.** È stato mostrato nella sezione 93 dai dati sperimentali che 1 grammo di bromuro di radio alla sua minima attività emette circa  $3.6 \cdot 10^{10}$  particelle  $\alpha$  al secondo. Poiché l'attività è dovuta all'emanazione accumulata nel radio, quando è in uno stato di equilibrio radioattivo, è circa un quarto della totale e circa uguale all'attività minima, il numero di particelle  $\alpha$  emesse al secondo dall'emanazione da 1 g di bromuro di radio è circa  $3.6 \cdot 10^{10}$ . È stato mostrato nella sezione 152 che 463000 volte la quantità di emanazione prodotta per secondo è accumulata nel radio. Ma, in una condizione di equilibrio radioattivo, il numero di particelle di emanazione che si rompono per secondo è uguale al numero prodotto per secondo. Assumendo che ogni particella di emanazione nel frazionamento espella una particella  $\alpha$ , segue che il numero di particelle di emanazione presenti in 1 g di bromuro di radio in equilibrio radioattivo è  $463000 \times 3.6 \cdot 10^{10}$ , cioè  $1.7 \cdot 10^{16}$ . Prendendo il numero di molecole di idrogeno in  $1 \text{ cm}^3$  di gas a pressione e temperatura atmosferica pari a  $3.6 \cdot 10^{19}$  (sezione 39), il volume dell'emanazione da 1 g di bromuro di radio è  $4.6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$  a pressione e temperatura atmosferica. Assumendo la composizione del bromuro di radio come  $\text{RaBr}_2$ , la quantità da 1 g di radio in equilibrio radioattivo è  $0.82 \text{ mm}^3$ . Del tutto indipendentemente da ogni metodo di calcolo era molto evidente che il volume dell'emanazione fosse molto piccolo, perché tutti i tentativi precedenti fatti per rivelare la sua presenza dal suo volume erano senza successo. Si vedrà, tuttavia, che, quando era disponibile una grande quantità di radio per gli esperimenti, l'emanazione è stata raccolta in volumi sufficientemente grandi da poter essere misurati.

Nel caso del torio, la massima quantità di emanazione ottenuta da 1 g del solido è molto piccola, sia a causa della piccola attività del torio e della rapida rottura dell'emanazione dopo la sua produzione. Poiché la quantità di emanazione, accumulata in un composto di torio non emanante, è solo 87 volte il tasso di produzione, mentre nel radio è 463000, e il tasso di produzione dell'emanazione del radio è circa 1 milione di volte più grande del torio, segue che la quantità di emanazione ottenibile da 1 g di torio non è maggiore di  $10^{-10}$  della quantità da un uguale peso di radio, cioè il suo volume non è maggiore di  $10^{-13} \text{ cm}^2$  a pressione e temperatura ordinaria. Anche con grandi quantità di torio, la quantità di emanazione è troppo piccola per poterne rivelare il volume.

**172. Volume dell'emanazione del radio.** L'evidenza già considerata spinge fortemente alla conclusione che l'emanazione possiede tutte le proprietà di un gas chimicamente inerte di alto peso molecolare.

Poiché l'emanazione continuamente si frantuma, ed è trasformata in una materia solida depositata sulla superficie dei corpi, il volume dell'emanazione, una volta separata dal radio, si contrarrà con lo stesso tasso con cui perde la sua attività, cioè si dimezzerà in circa quattro giorni. La quantità di emanazione ottenibile da una data quantità di radio è massima quando il tasso di produzione della nuova emanazione bilancia il suo tasso di cambiamento. Questa condizione è praticamente raggiunta quando l'emanazione viene raccolta per un mese. Il volume probabile dell'emanazione ottenibile da 1 grammo di radio fu inizialmente calcolato su certe ipotesi, e dai dati allora disponibili chi scrive dedusse che il volume dell'emanazione da 1 g di radio si collocava tra  $0.06$  e  $0.6 \text{ mm}^3$  a pressione e temperatura atmosferica, ed era probabilmente più vicino al secondo valore. Il volume atteso dagli ultimi dati è stato discusso nella precedente sezione e mostrato essere di circa  $0.82 \text{ mm}^3$ . Il volume dell'emanazione è pertanto molto piccolo, ma non troppo piccolo da non poter essere rivelato avendo la disponibilità di parecchi centigrammi di radio. Ciò è stato dimostrato da Ramsay e Soddy<sup>34</sup> i quali, con accurati esperimenti, riuscirono infine ad isolare una piccola quantità di emanazione e a determinarne il volume. Il loro metodo sperimentale impiegato sarà ora brevemente descritto.

<sup>33</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. maggio 1903.

<sup>34</sup>Proc. Roy. soc. 73, No. 494, p. 346, 1904.

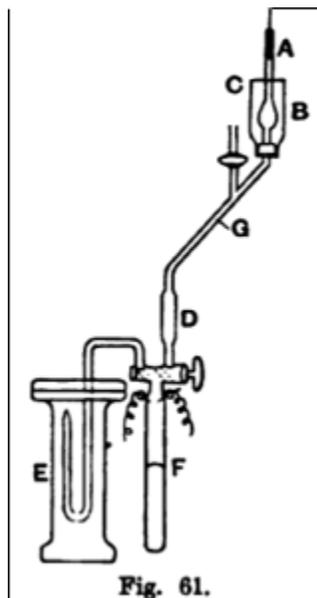


Fig. 61.

L'emanazione da 60 *mg* di bromuro di radio in soluzione era raccolta per 8 giorni e poi estratta attraverso il sifone rovesciato E (Figura 61) nella buretta di esplosione F. Questo gas consisteva per la maggior parte di idrogeno e ossigeno, prodotto dall'azione delle radiazioni sull'acqua della soluzione. Dopo l'esplosione, l'eccesso di idrogeno mescolato con l'emanazione era posto per un certo tempo a contatto con soda caustica, posta nella parte superiore della buretta, per rimuovere tutte le tracce di diossido di carbonio. Nel frattempo la parte superiore dell'apparato veniva fatto il vuoto. La connessione C alla pompa era chiusa e l'idrogeno e l'emanazione potevano entrare nell'apparato, passando sopra un tubo di pentossido di fosforo D. L'emanazione era condensata nella parte inferiore del tubo capillare A, circondandolo con il tubo B pieno di aria liquida. Il processo di condensazione era reso manifesto dalla brillante luminosità della parte inferiore del tubo. Il mercurio dalla buretta era poi mandato in G e il dispositivo era ancora completamente svuotato. La connessione con la pompa era nuovamente chiusa, l'aria liquida era rimossa e l'emanazione volatilizzata era forzata ad entrare nel tubo capillare A. Si osservava poi, di giorno in giorno, il volume dell'emanazione. I risultati sono dati nella tabella sotto.

Tempo	Volume	Tempo	Volume
Inizio	0.124 $mm^3$	7 <i>giorni</i>	0.0050 $cm^3$
1 <i>giorno</i>	0.027	9	0.0041
3	0.011	11	0.0020
4	0.0095	12	0.0011
6	0.0063	28	0.004

Il volume si riduceva col tempo ed era molto piccolo dopo un mese, ma la minuta bolla di emanazione manteneva ancora la propria luminosità fino alla fine. Il tubo diveniva di un color porpora scuro, che rendeva difficile la lettura se non in presenza di una forte luce. Vi era un'improvvisa diminuzione nel primo giorno, dovuta al mercurio che aderiva nel tubo capillare.

Gli esperimenti furono ripetuti con un altro capillare e il volume del gas osservato a pressione normale era di 0.0254  $mm^3$ . Il gas ottenuto obbediva alla legge di Boyle entro il limite degli errori sperimentali su un considerevole intervallo di pressioni. Ma, a differenza del primo esperimento, il gas non si contraeva ma si espandeva rapidamente durante le prime ore, e poi più lentamente, raggiungendo infine un volume dopo 23 giorni di 0.262  $mm^3$  o circa 10 volte il volume iniziale. Le misure erano complicate dalla comparsa delle bolle di gas nella parte alta della colonna di mercurio. Le differenze osservate in questi due esperimenti sono difficile da spiegare. Vedremo, più tardi, che l'emanazione produce sempre elio e, nel primo esperimento, la diminuzione del volume a zero indica che l'elio era bruciato o assorbito nelle pareti del tubo. Nel secondo caso, probabilmente a causa della differenza nel vetro del tubo capillare, l'elio poteva essere stato rilasciato. Questa ipotesi è confermata dall'osservazione che il volume del gas, al termine dell'esperimento, mostrava uno spettro brillante di elio.

Vedremo in seguito che vi è una considerevole evidenza che le particelle  $\alpha$  emesse dalle sostanze radioattive consistono di atomi di elio. Poiché le particelle sono scagliate con grande velocità, esse saranno inglobate nelle pareti del tubo, e poi potranno gradualmente diffondere nel gas con condizioni probabilmente dipendenti dal tipo di vetro impiegato. Poiché le particelle  $\alpha$  sono emesse dall'emanazione e anche da due dei prodotti da essa generati che cambiano rapidamente, il volume dell'elio dovrà essere tre volte il volume iniziale dell'emanazione. Se l'elio prodotto sfugge dalle pareti del tubo nel

gas, il volume apparente del gas nel capillare aumenterà di tre volte il volume iniziale nell'intervallo di un mese, durante il quale l'emanazione stessa si è trasformata in un materiale solido depositato sulle pareti del tubo.

Ramsay e Soddy conclusero dai loro esperimenti che il volume massimo dell'emanazione ottenibile da 1 g di radio era di circa  $1 \text{ mm}^3$  a pressione e temperatura standard, e che l'emanazione era prodotta da 1 g di radio al ritmo di  $3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$  al secondo. Questa quantità è in buon accordo con il valore calcolato ed è una forte indicazione della correttezza generale della teoria sulla quale è basato il calcolo.

**173. Spettro dell'emanazione.** Dopo la separazione dell'emanazione e la determinazione del suo volume, Ramsay e Soddy fecero numerosi tentativi di ottenere il suo spettro. In alcuni dei primi esperimenti si videro per un certo tempo parecchie linee brillanti, ma queste erano presto mascherate dalla comparsa delle linee dell'idrogeno. Negli ultimi esperimenti Ramsay e Collie<sup>35</sup> riuscirono ad ottenere uno spettro dell'emanazione, che persisteva per un certo tempo, durante il quale fu fatta una rapida determinazione delle lunghezze d'onda. Essi stabilirono che lo spettro era molto brillante e consisteva di linee molto brillanti, spaziate da zone perfettamente nere. Lo spettro presentava una stretta somiglianza con il carattere generale dello spettro dei gas della famiglia dell'argon.

Lo spettro sbiadiva rapidamente e iniziava a comparire quello dell'idrogeno. La tabella seguente mostra le lunghezze d'onda delle righe osservate nello spettro. Il grado di coincidenza delle linee di lunghezze d'onda note mostra che l'errore è probabilmente minore di cinque unità Ångstrom.

Lunghezza d'onda	Osservazione
6567	Idrogeno C; lunghezza d'onda vera 6563; osservata in ogni momento
6307	Osservata solo all'inizio; evanescente
5975	Osservata solo all'inizio; evanescente
5955	Osservata solo all'inizio; evanescente
5805	Osservata sempre; persistente
5790	Mercurio; lunghezza d'onda vera, 5790
5768	Mercurio; lunghezza d'onda vera, 5769
5725	Osservata solo all'inizio; evanescente
5595	Osservata sempre; persistente e intensa
5465	Mercurio; lunghezza d'onda vera, 5461
5105	Non osservata all'inizio, appariva dopo alcuni secondi; persisteva ed era visibile durante il secondo esame
4985	Osservata sempre; persistente e intensa
4865	Idrogeno F; lunghezza d'onda vera, 4861
4690	Osservata solo all'inizio
4650	Non osservata quando l'emanazione era di nuovo esaminata
4630	Non osservata quando l'emanazione era di nuovo esaminata
4360	Mercurio; lunghezza d'onda vera, 4359

Gli esperimenti furono ripetuti con una nuova provvista di emanazione, e alcune delle righe più intense furono nuovamente osservate, mentre fecero la loro comparsa alcune nuove righe. Ramsay e Collie suggeriscono che l'intensa riga 5595 può essere identica a quella osservata da Pickering<sup>36</sup> nello spettro del fulmine e non identificata con lo spettro di un gas noto. Finché non saranno disponibili grandi quantità di radio per gli esperimenti sarà difficile essere sicuri su quante di queste righe sono assegnabili allo spettro dell'emanazione e misurare con precisione la loro lunghezza d'onda.

I risultati sono di grande interesse, mostrando che l'emanazione ha uno spettro nuovo e definito con caratteristiche dello stesso tipo dei gas del gruppo dell'argon al quale, come visto, sono chimicamente affini.

*Sommario dei risultati.*

**174.** Le indagini sulla natura delle emanazioni radioattive inducono, pertanto, le seguenti conclusioni: - I radioelementi torio, radio e attinio producono continuamente emanazioni radioattive ad un tasso che è costante in tutte le condizioni. In alcuni casi, le emanazioni diffondono con continuità dai composti radioattivi nel gas circostante; in altri casi, le emanazioni non sono in grado di sfuggire dal materiale nel quale sono prodotte, ma sono inglobate, e possono solo essere liberate mediante soluzione o riscaldamento.

Le emanazioni possiedono tutte le proprietà dei gas radioattivi. Diffondono attraverso gas, liquidi e sostanze porose e possono essere occluse in alcuni solidi. Sotto varie condizioni di pressione, volume e temperatura, le emanazioni si distribuiscono nello stesso modo e secondo le stesse leggi dei gas.

Le emanazioni possiedono l'importante proprietà di condensazione con freddo estremo e in questo modo possono essere separate dai gas con i quali sono mescolati. La radiazione dall'emanazione è materiale fisico e consiste di un flusso di cariche positive emesse con velocità molto grandi.

<sup>35</sup>Proc. Roy. Soc. 73, N0. 495, p. 470, 1904.

<sup>36</sup>Pickering, Astrophys. Journ. Vol. 14, p. 368, 1901.

Le emanazioni sono chimicamente inerti e sotto questo aspetto assomigliano ai gas della famiglia dell'argon. Le emanazioni sono prodotte in piccole quantità; ma una sufficiente quantità di emanazione del radio è stata ottenuta per poterne misurare il volume e lo spettro. Rispetto alle loro velocità di diffusione, le emanazioni del torio e del radio si comportano come gas con alto peso molecolare.

Queste emanazioni sono state rivelate e le loro proprietà analizzate mediante la loro capacità di emettere radiazioni di un tipo speciale. Queste radiazioni consistono interamente di raggi  $\alpha$ , cioè particelle, emesse con grande velocità, che trasportano una carica positiva e hanno una massa circa doppia di quella dell'atomo di idrogeno. Le emanazioni non posseggono la proprietà di irradiare in permanenza, ma l'intensità delle radiazioni diminuisce secondo una legge esponenziale con il tempo, dimezzandosi, per l'attinio in 4 secondi, per il torio in un minuto e per il radio in circa 4 giorni. La legge di decadimento dell'attività non sembra essere influenzata da qualsiasi agente chimico o fisico.

Le particelle di emanazione gradualmente si spezzano, ognuna espellendo un corpo carico. L'emanazione dopo aver irradiato cessa di esistere come tale, ma è trasformata in un nuovo tipo di materia, che è depositata sulla superficie dei corpi e dà origine ai fenomeni di attività eccitata. Quest'ultima proprietà, e i suoi collegamenti con l'emanazione, sono discussi in dettaglio nel capitolo successivo .

## Radioattività eccitata

**175. Radioattività eccitata.** Una delle proprietà più interessanti e degne di nota di torio, radio e attinio è il loro potere di “eccitare” o “indurre” attività temporanea su tutti i corpi nelle loro vicinanze. Una sostanza che è stata esposta per un certo tempo alla presenza di radio o torio si comporta come se la sua superficie fosse ricoperta con un invisibile deposito di materiale intensamente radioattivo. Il corpo “eccitato” emette radiazioni capaci di impressionare una lastra fotografica e di ionizzare un gas. Diversamente dai radioelementi stessi, tuttavia, l’attività del corpo non rimane costante dopo che è stato tolto dall’influsso del materiale attivo eccitante, ma decade con il tempo. L’attività dura per parecchie ore se dovuta al radio e parecchi giorni se dovuta al torio.

Questa proprietà fu osservata la prima volta da M. e Madame Curie<sup>1</sup> per il radio e indipendentemente da chi scrive<sup>2</sup> per il torio<sup>3</sup>.

Se un qualsiasi corpo solido è posto in un contenitore chiuso contenente un composto emanante di torio o radio, la sua superficie diviene radioattiva. Per i composti del torio la quantità di attività eccitata su un corpo è in generale maggiore più il materiale attivo è ad esso vicino. Nel caso del radio, tuttavia, sebbene il corpo sia stato esposto per parecchie ore, la quantità di attività eccitata è quasi del tutto indipendente dalla posizione del corpo nel contenitore con il materiale attivo. I corpi sono resi attivi se esposti direttamente all’azione della sostanza radioattiva o schermati dall’azione diretta dei raggi. Ciò è stato chiaramente mostrato in alcuni esperimenti di P. Curie. Un piccolo contenitore aperto *a* (Figura 62) con una soluzione di radio è posto dentro un contenitore più grande *V*.

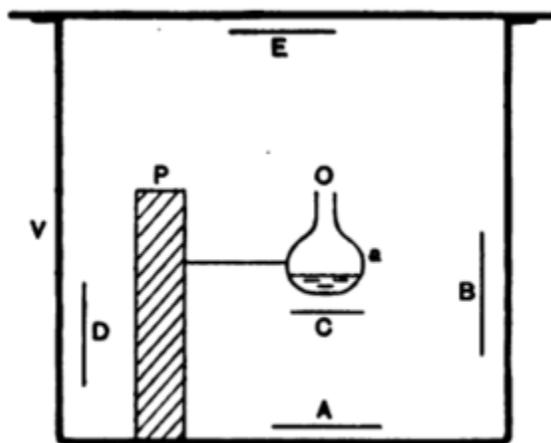


Fig. 62.

Le piastre A, B, C, D, E sono disposte in varie posizioni all’interno. Dopo un’esposizione di un giorno, le piastre dopo la rimozione risultano radioattive anche in posizioni completamente schermate dall’azione diretta dei raggi. Per esempio, la piastra D schermata dalla radiazione diretta da una lastra di piombo O è attiva come la piastra E, esposta direttamente alla radiazione. La quantità di attività prodotta in un dato tempo su una piastra di data area in una posizione definita è indipendente dal materiale della piastra. Piastre di mica, rame, cartone, ebanite, mostrano tutte uguale quantità di attività. Essa dipende dall’area della piastra e dalla quantità di spazio libero nei suoi dintorni, La radioattività eccitata è prodotta anche nell’acqua se esposta all’azione di un composto emanante.

<sup>1</sup>M- e Madame Curie, C. R. 129, p. 714, 1899.

<sup>2</sup>Rutherford, Phil. Mag. gennaio e febbraio 1900.

<sup>3</sup>Riguardo alla data di pubblicazione, la priorità della scoperta dell’attività eccitata” appartiene ai coniugi Curie. Un breve articolo su questo argomento, intitolato “Sur la radioactivité provoquée par les rayons de Becquerel”, fu da essi inviato a Comptes Rendus, il 6 novembre 1899. Una breve nota fu aggiunta all’articolo di Becquerel nella quale i fenomeni di attività eccitata erano attribuiti a un tipo di fosforescenza. Da parte mia, ho simultaneamente scoperto l’emissione di una emanazione dai composti del torio e l’attività eccitata da essi prodotta nel luglio del 1899. Io, tuttavia, ho ritardato la pubblicazione per lavorare con più cura sulle proprietà dell’emanazione e dell’attività eccitata e sul loro legame. I risultati furono pubblicati in due articoli nel Philosophical Magazine (gennaio e febbraio 1900) intitolati “A radioactive substance emitted from thorium compounds” e “Radioactivity produced in substances by the action of thorium compounds”.

**176. Concentrazione della radioattività eccitata su un elettrodo negativo.** Quando torio e radio sono posti in un contenitore chiuso, tutta la superficie interna diviene fortemente attiva. In un campo elettrico intenso, d'altro canto, chi scrive trovò che l'attività era confinata interamente all'elettrodo negativo. Con opportuni dispositivi, l'intera attività eccitata, che era in precedenza distribuita sulla superficie del contenitore, può essere concentrata su un piccolo elettrodo negativo posto dentro il contenitore. Un apparato sperimentale per tale scopo è mostrato in Figura 63.

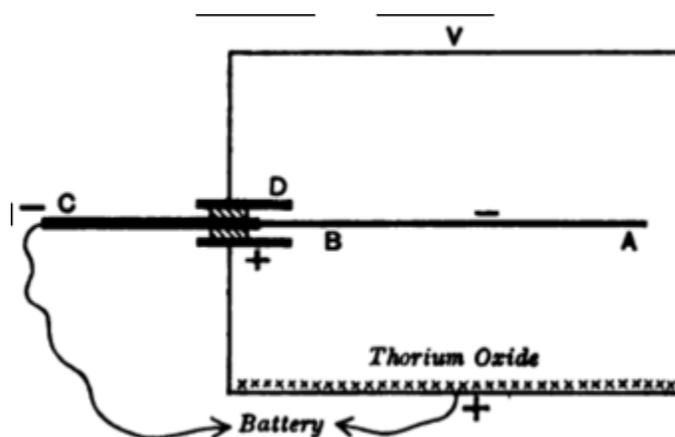


Fig. 63.

Il contenitore metallico V con una grande quantità di torio è collegato con il polo positivo di una batteria di circa 300 V. Il filo AB per essere reso attivo è fissato a un'asta robusta BC, passante attraverso un tappo di ebanite all'interno di un corto cilindro D, fissato su un lato del contenitore. Quest'asta era collegata con il polo negativo della batteria. In questo modo il filo AB è il solo conduttore esposto nel campo con carica negativa e si è trovato che l'intera attività eccitata si è concentrata su di esso.

In questo modo è possibile rendere un corto e sottile filo metallico 10000 volte per unità di superficie attivo come i torio dal quale deriva l'attività eccitata. Allo stesso modo, l'attività eccitata dovuta al radio può essere concentrata principalmente sull'elettrodo negativo. Nel caso del torio, se il filo centrale è caricato positivamente, non si osserva alcuna apprezzabile attività. Con il radio, tuttavia, un corpo carico positivamente diviene un poco attivo. Nella maggior parte dei casi, la quantità di attività prodotta sull'elettrodo positivo non è superiore al 5% della corrispondente quantità quando il corpo è carico negativamente. Sia per il torio che per il radio, la quantità di attività eccitata sugli elettrodi della stessa dimensione è indipendente dal loro materiale.

Tutti i metalli sono resi attivi a parità di estensione e di tempo di esposizione. In assenza di campo elettrico, la stessa quantità di attività è prodotta sugli isolanti come mica e vetro come sui conduttori di uguali dimensioni.

**177. Legame tra emanazione e attività eccitata.** Un esame delle condizioni per le quali l'attività eccitata è prodotta mostra che vi è una connessione molto stretta tra l'emanazione e l'attività eccitata. Se un composto di torio è ricoperto con parecchi schermi di carta, che bloccano i raggi  $\alpha$  ma consentono all'emanazione di passare, anche l'attività eccitata è prodotta nello spazio sotto di esso. Se un sottile strato di mica è colato sul materiale attivo, allora prevenendo la fuga dell'emanazione, non vi è alcuna attività eccitata al di fuori di esso. L'uranio e il polonio che non emettono emanazione non sono in grado di produrre attività eccitata nei corpi. Non solo la presenza dell'emanazione è necessaria per avere attività eccitata, ma la quantità di attività eccitata è sempre proporzionale alla quantità di emanazione presente. Per esempio, vari torio de-emanati producono molto poca attività eccitata rispetto a quelli comuni. In tutti i casi la quantità di attività eccitata prodotta è proporzionale al potere emanante. Quando l'emanazione passa attraverso un campo elettrico perde la sua proprietà di eccitare attività allo stesso ritmo della riduzione del potere radiante. Questo è mostrato dal seguente esperimento.

Una lenta e costante corrente d'aria da un gasometro, liberata dalla polvere mediante il passaggio attraverso un filtro di ovatta, passava attraverso un tubo di legno rettangolare lungo 70 cm. Quattro piastre metalliche uguali e isolate A,B,C,D erano poste ad intervalli regolari lungo il tubo. Il polo positivo di una batteria di 300 V era connesso con un piatto metallico posto nella parte inferiore del tubo, mentre il polo negativo era collegato con le quattro piastre. Una massa di torio era posta in fondo al tubo sotto la piastra A e la corrente dovuta all'emanazione era determinata per ognuna delle quattro piastre. Dopo il passaggio dell'aria a 0.2 cm per secondo per 7 ore lungo il tubo, le piastre erano rimosse e la quantità di attività eccitata prodotta su di esse misurata con il metodo elettrico. Furono ottenuti i seguenti risultati.

	Corrente relativa dovuta all'emanazione	Attività eccitata relativa
Piastra A	1	1
Piastra B	0.55	0.43
Piastra C	0.18	0.16
Piastra D	0.072	0.061

Entro gli errori di misura, la quantità di attività eccitata è proporzionale alla radiazione dall'emanazione, cioè alla quantità di emanazione presente. Le stesse considerazioni valgono per l'emanazione del radio. L'emanazione in questo caso, a causa della lenta perdita della sua attività, può essere accumulata mescolata con l'aria per un lungo periodo in un gasometro e i suoi effetti misurati del tutto indipendentemente dalla materia attiva da cui è prodotta. La corrente di ionizzazione dovuta all'attività eccitata prodotta dall'emanazione è sempre proporzionale alla corrente dovuta all'emanazione per il periodo di un mese o più a seconda che la sua attività sia sufficientemente grande da poter essere misurata in modo opportuno da un elettrometro.

Se in qualsiasi momento durante l'intervallo, una parte dell'emanazione è rimossa e introdotta in un nuovo contenitore di misura, la corrente di ionizzazione inizierà immediatamente a crescere, raggiungendo nel corso di quattro o cinque ore circa il doppio del suo valore iniziale. Questo aumento della corrente è dovuto all'attività eccitata prodotta sulle pareti del contenitore. Spegnendo l'emanazione, l'attività eccitata rimane e subito inizia a decadere. Qualunque sia la sua età, l'emanazione possiede ancora la proprietà di creare attività eccitata ed in quantità sempre proporzionale alla sua attività, cioè alla quantità di emanazione presente.

Questi risultati mostrano che il potere eccitante su sostanze inattive è una proprietà delle emanazioni radioattive ed è proporzionale alla quantità di emanazione presente.

Il fenomeno di attività eccitata non può essere attribuito a una forma di fosforescenza prodotta dai raggi dell'emanazione sui corpi; è stato mostrato che l'attività può essere concentrata sull'elettrodo negativo in un campo elettrico intenso anche se l'elettrodo è schermato dalla radiazione diretta proveniente dalla sostanza attiva che produce l'emanazione. La quantità di attività eccitata non sembra in ogni modo collegata alla ionizzazione prodotta dall'emanazione nel gas con cui è mescolata. Per esempio, se un contenitore chiuso è costruito con due grandi piastre metalliche parallele isolate e su quella inferiore è depositato uno strato di torio, la quantità di attività eccitata sulla piastra superiore, se caricata negativamente, è indipendente dalla distanza tra le piastre quando quella distanza varia da 1 *mm* a 2 *cm*. Questo esperimento mostra che la quantità di attività eccitata dipende solo dalla quantità di emanazione emessa dal torio; la ionizzazione prodotta con una distanza di 2 *cm* tra le piastre è circa dieci volte maggiore di quando è di 1 *mm*.

**178.** Se un filo di platino è reso attivo per esposizione all'emanazione del torio, la sua attività può essere rimossa trattando il filo con certi acidi<sup>4</sup>. Per esempio, l'attività non è molto alterata immergendo il filo in acqua calda o fredda o acido nitrico, ma più dell'80% di essa è rimossa con soluzioni diluite o concentrate di acido solforico o cloridrico. L'attività non è stata eliminata da questo trattamento ma è evidente nella soluzione. Se la soluzione è evaporata, l'attività rimane dietro il piatto.

Questi risultati mostrano che l'attività eccitata è dovuta a un deposito sulla superficie dei corpi di materia radioattiva che ha definite proprietà rispetto alla soluzione in acidi. Questa materia attiva è disciolta in alcuni acidi, ma, quando il solvente è evaporato, la materia attiva rimane. Questa materia attiva è depositata sulla superficie dei corpi e può essere parzialmente rimossa strofinando il corpo con un tessuto e quasi completamente sfregando il piatto con sabbia o carta di vetro. Se un filo carico negativamente è posto in presenza di una grande quantità di emanazione di radio, esso diviene intensamente attivo. Se il filo, dopo averlo rimosso, è tirato attraverso uno schermo di solfuro di zinco o willemite, perde parte della materia attiva e lascia una traccia luminosa sullo schermo. La quantità di materia attiva depositata è estremamente piccola, in quanto non è stata rilevata alcuna differenza di peso in un filo di platino quando era estremamente attivo. Esaminando il filo al microscopio, non è stata osservata alcuna traccia di materia estranea. Ne segue che la materia che causa attività eccitata è molte migliaia di volte più attiva, a parità di peso, dello stesso radio.

È conveniente assegnare un nome definito per questa materia radioattiva, perché il termine "attività eccitata" si riferisce solo alla radiazione dalla materia attiva e non alla materia stessa. Il termine "deposito attivo" sarà generalmente applicato. Il deposito attivo dalle tre sostanze del torio, radio e attinio è, in ogni caso, derivato dalle loro rispettive emanazioni e possiede la stessa proprietà generale di concentrazione sull'elettrodo negativo in un campo elettrico e di agire come un tipo di materia non volatile che è depositata dal gas sulla superficie dei corpi. Questi depositi attivi, tutti solubili in forti acidi, sono chimicamente distinti tra loro.

Il termine "deposito attivo" può, tuttavia, essere usato solo quando la materia è considerata globalmente; si mostrerà in seguito che la materia, in condizioni ordinarie, è complessa e contiene parecchi costituenti che hanno proprietà chimiche e fisiche distinte e anche un diverso tasso di variazione. In accordo con la teoria avanzata nella sezione 136, possiamo supporre che l'emanazione di torio, radio e attinio sia instabile e si rompa con l'espulsione di una particella  $\alpha$ . L'atomo

<sup>4</sup>Rutherford, Phil. Mag. febbraio 1900.

restante dell'emanazione diffonde verso le pareti del contenitore o è rimossa all'elettrodo negativo in un campo elettrico. Questo deposito attivo è a sua volta instabile e si rompe in parecchi stadi successivi.

L'"attività eccitata" propria è la radiazione emessa dal deposito attivo in conseguenza del cambiamento che in esso avviene. Da questo punto di vista, l'emanazione è il genitore del deposito attivo nello stesso modo in cui il  $ThX$  è il genitore dell'emanazione. La proporzionalità che sempre esiste tra l'attività dell'emanazione e l'attività eccitata che genera, è subito spiegata se una sostanza è genitrice dell'altra.

**179. Decadimento dell'attività eccitata prodotta dal torio.** L'attività eccitata prodotta in un corpo dopo una lunga esposizione all'emanazione del torio, decade secondo una legge esponenziale con il tempo, dimezzandosi in circa 11 ore. La tabella seguente mostra il tasso di decadimento dell'attività eccitata prodotta su una bacchetta di ottone.

Tempo in ore	Corrente
0	100
7.9	64
11.8	47.4
23.4	19.6
29.2	13.8
32.6	10.3
49.2	3.7
62.1	1.86
71.4	0.88

I risultati sono mostrati graficamente in Figura 64, curva A.

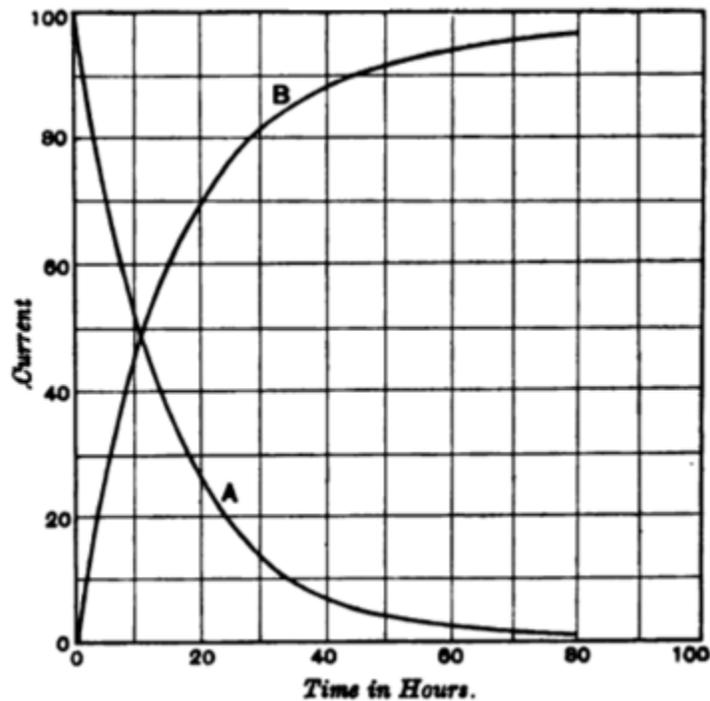


Fig. 64.

L'intensità della radiazione  $I$  dopo un tempo  $t$  è data da  $\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda t}$ , dove  $\lambda$  è la costante radioattiva.

Il tasso di decadimento dell'attività eccitata, come quella dell'attività di altri prodotti radioattivi, non è osservabilmente influenzata dal cambiamento delle condizioni. Il tasso di decadimento è indipendente dalla concentrazione dell'attività eccitata, e del materiale del corpo sul quale è prodotta. È indipendente anche dal tipo e dalla pressione del gas nel quale decade. Il tasso di decadimento è invariato sia che l'attività eccitata sia prodotta sul corpo con o senza un campo elettrico.

La quantità di attività eccitata prodotta su un corpo aumenta all'inizio con il tempo, ma raggiunge un massimo dopo un'esposizione di parecchi giorni. Un esempio di questi risultati è presentato nella tabella seguente. In questo esperimento una bacchetta era il catodo in un contenitore chiuso contenente del torio. Fu rimossa ad intervalli regolari per il breve tempo necessario a misurare la sua attività e a riposizionarla.

Tempo in ore	Corrente
1.58	6.3
3.25	10.5
5.83	29
9.83	40
14.00	59
23.41	77
29.83	83
47.00	90
72.50	95
96.00	100

Questi risultati sono mostrati graficamente nella curva B in Figura 64. Si vede che le curve di decadimento e di recupero possono essere approssimativamente rappresentate dalle seguenti equazioni.

*Per la curva di decadimento A*

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda t}$$

*Per la curva di recupero B*

$$\frac{I}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

Le due curve sono, pertanto, complementari tra loro; esse sono collegate allo stesso modo delle curve di decadimento e recupero di  $UrX$  e possono essere spiegate in un modo simile.

La quantità di radioattività eccitata raggiunge un massimo valore quanto il tasso di reintegro di nuove particelle radioattive bilancia il tasso di cambiamento di quelle già depositate.

**180. Radioattività eccitata prodotta da una breve esposizione.** La parte iniziale della curva di recupero B, Figura 64, non è accuratamente rappresentata dall'equazione sopra. L'attività per le prime ore aumenta più lentamente di quanto espresso dall'equazione. Questo risultato, tuttavia, è completamente spiegato alla luce dei risultati successivi. Chi scrive<sup>5</sup> trovò che, per una breve esposizione di un corpo all'emanazione del torio, l'attività eccitata su di esso dopo la rimozione, invece di un decadimento immediato, aumentava per parecchie ore. In alcuni casi l'attività del corpo aumentava di tre o quattro volte il suo valore iniziale nel corso di poche ore per poi decadere con il tempo ad un tasso normale.

Per un'esposizione di 41 minuti all'emanazione l'attività eccitata dopo la rimozione saliva al triplo del suo valore iniziale in circa 3 ore per poi ritornare all'incirca al tasso normale a metà del valore in 11 ore.

Con un'esposizione più lunga all'emanazione, il rapporto tra l'incremento dopo la rimozione è molto meno netto. Per un'esposizione di un giorno, l'attività dopo la rimozione inizia subito a diminuire. In questo caso, l'aumento di attività della materia depositata nelle ultime poche ore non compensava del tutto la diminuzione dell'attività della materia attiva e, di conseguenza, l'attività iniziava subito a decadere. Questo aumento di attività con il tempo spiega l'irregolarità iniziale nella curva di recupero, perché la materia attiva depositata durante le prime ore richiede un certo tempo per raggiungere la sua massima attività e l'attività iniziale è, di conseguenza, minore di quella attesa dall'equazione.

L'aumento di attività su un'asta esposta per un breve intervallo alla presenza dell'emanazione del torio è stata ulteriormente analizzata da Miss Brooks. La curva C in Figura 65 mostra la variazione in funzione del tempo dell'attività di un'asta di ottone esposta per 10 minuti nel contenitore dell'emanazione riempito con aria priva di polvere. L'attività eccitata dopo la rimozione aumentava nel corso di 3.7 ore fino a cinque volte il suo valore iniziale e, in seguito, decadeva a tasso normale. La linea tratteggiata della curva D rappresenta la variazione dell'attività in funzione del tempo. La spiegazione di questa significativa azione è considerata in dettaglio nella sezione 207.

<sup>5</sup>Rutherford, Phys. Zeit. No. 12, p. 254, 1902. Phil. Mag. gennaio 1903.

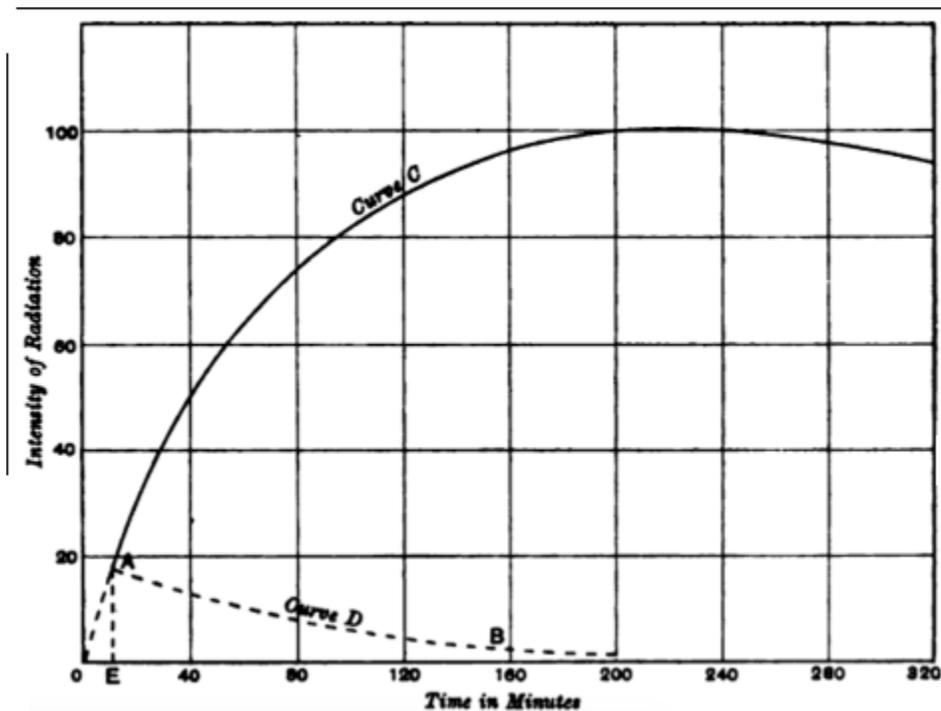


Fig. 65.

**181. Effetto della polvere sulla distribuzione dell'attività eccitata.** Miss Brooks<sup>6</sup>, lavorando al Cavendish Laboratory, osservò che l'attività eccitata dovuta all'emanazione del torio appariva in alcuni casi sull'anodo in un campo elettrico e che la distribuzione dell'attività eccitata variava in modo apparentemente capriccioso. Questo effetto fu alla fine attribuito alla presenza di polvere nell'aria nel contenitore dell'emanazione. Per esempio, con un'esposizione di 5 minuti la quantità di attività eccitata osservata su un'asta dipendeva dal tempo durante il quale l'aria rimaneva indisturbata nel contenitore dell'emanazione. L'effetto cresceva con il tempo di stazionarietà ed aveva un massimo dopo circa 18 ore. La quantità di attività eccitata ottenuta sull'asta era di circa 20 volte maggiore di quella osservata con aria appena introdotta.

L'attività di questa asta non aumentava dopo la rimozione, ma con aria nuova, l'attività eccitata, per un'esposizione di 5 minuti, aumentava di cinque o sei volte il suo valore iniziale.

Questo comportamento anomalo era dovuto alla presenza di particelle di polvere nell'aria del contenitore nel quale i corpi erano resi radioattivi. Queste particelle di polvere, se inattive in presenza dell'emanazione, divengono radioattive. Quando viene introdotta un'asta carica negativamente nel contenitore, una parte della polvere radioattiva è concentrata sull'asta e la sua attività è aggiunta alla normale attività prodotta dal filo. Dopo che l'aria nel contenitore è lasciata indisturbata per un intervallo sufficientemente lungo per far sì che ognuna delle particelle di polvere raggiunga una condizione di equilibrio radioattivo, all'applicazione di un campo elettrico tutte le particelle di polvere cariche positivamente saranno subito trasportate all'elettrodo negativo. L'attività dell'elettrodo inizia subito a decadere, poiché il decadimento dell'attività delle particelle di polvere sul filo maschera completamente la salita iniziale della normale attività prodotta sul filo.

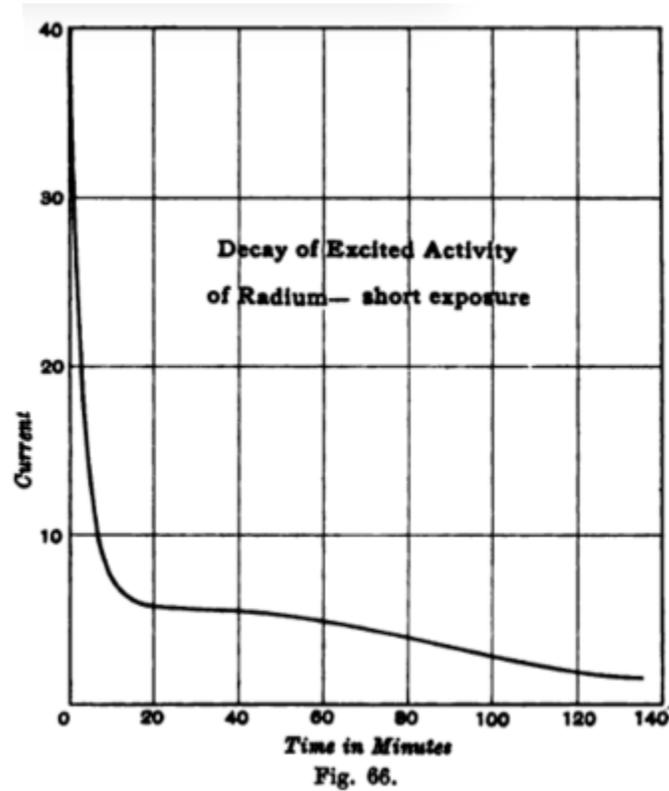
Parte della polvere radioattiva è trasportata all'anodo e la parte aumenta con la durata del tempo durante il quale l'aria è rimasta indisturbata. La quantità maggiore ottenuta all'anodo era circa il 60% di quella sul catodo.

Questi effetti anomali scomparivano se l'aria era liberata dalla polvere passando attraverso un filtro di lana di vetro e mediante l'applicazione per un certo tempo di un forte campo elettrico.

**182. Decadimento dell'attività eccitata dal radio.** L'attività eccitata prodotta sui corpi per esposizione all'emanazione del radio decade molto più rapidamente di quella prodotta dal torio. Per brevi tempi di esposizione<sup>7</sup> all'emanazione, la curva di decadimento è molto irregolare. Questo è mostrato in Figura 66.

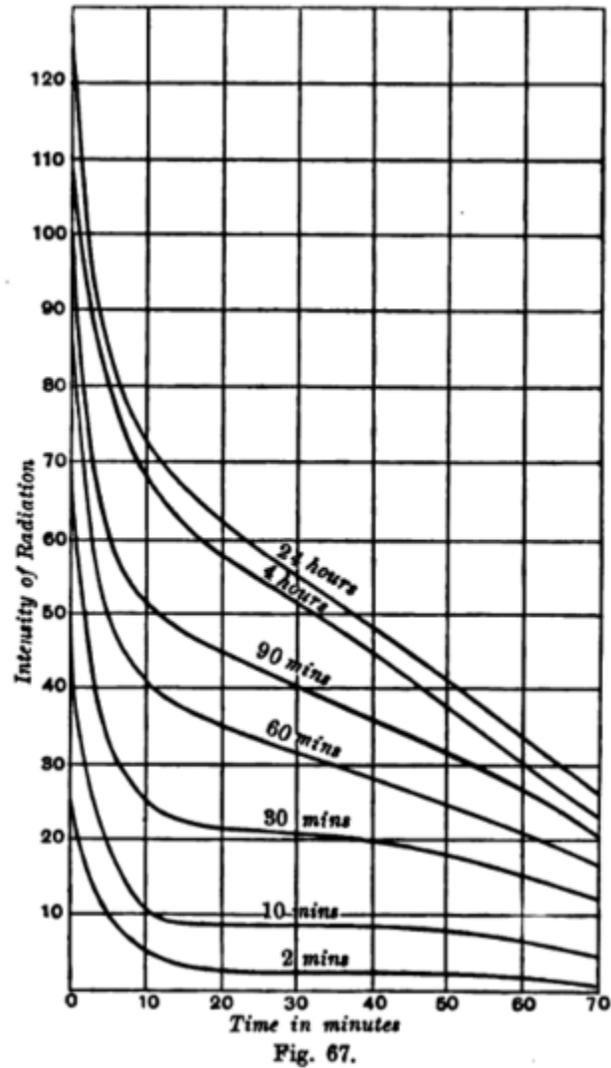
<sup>6</sup>Miss Brooks, Phil. Mag. settembre 1904.

<sup>7</sup>Rutherford e Miss Brooks, Phil. Mag. luglio 1902.



Si è trovato che l'intensità della radiazione misurata dai raggi  $\alpha$  decresce rapidamente per i primi 10 minuti dopo la rimozione, ma circa 15 minuti dopo raggiunge un valore che rimane quasi costante per un intervallo di circa 20 minuti. Decadeva poi infine a zero seguendo una legge esponenziale e l'intensità dimezzava in circa 28 minuti. Con tempi di esposizione più lunghi, le irregolarità nella curva non sono così marcate.

Miss Brooks ha recentemente determinato le curve di decadimento dell'attività eccitata del radio per diversi tempi di esposizione, misurate mediante i raggi  $\alpha$ . I risultati sono mostrati in Figura 67, dove le ordinate iniziali rappresentano l'attività comunicata al corpo per diversi tempi di esposizione per un rifornimento continuo di emanazione. Si osserva che in tutti i casi vi è una diminuzione iniziale improvvisa dell'attività, che diviene meno marcata con l'aumentare del tempo di esposizione. L'attività, parecchie ore dopo la rimozione, diminuisce esponenzialmente in tutti i casi, dimezzandosi in circa 28 minuti.



Non solo le curve di variazione dell'attività eccitata dopo la rimozione dipendono dal tempo di esposizione all'emanazione, ma anche dall'utilizzo per la misura dei raggi  $\alpha$  o  $\beta$ . Le curve ottenute per i raggi  $\gamma$  sono identiche a quelle per i raggi  $\beta$ , mostrando che questi due tipi di raggi compaiono sempre insieme in pari proporzione. Le curve misurate con i raggi  $\beta$  sono molto diverse, specialmente per il caso di una breve esposizione all'emanazione. Ciò è chiaramente mostrato in Figura 68, che dà le curve dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  per esposizioni di 10 minuti, 40 minuti e 1 ora e anche per il caso limite di un'esposizione di 24 ore.

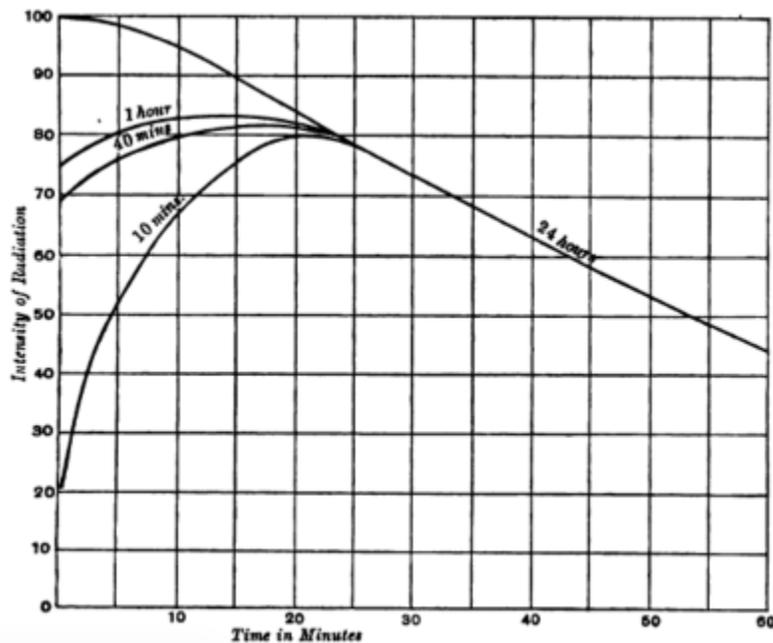


Fig. 68.

Dopo 25 minuti dalla rimozione, l'attività decade approssimativamente con lo stesso ritmo in ogni caso. Per praticità di rappresentazione, le ordinate delle curve furono aggiustate in modo da passare attraverso un punto comune. Vedremo in seguito che i tassi di decadimento non sono identici fino a parecchie ore dopo la rimozione; ma, nella figura è difficile rappresentare le piccole variazioni. Si osserverà che per la breve esposizione di 10 minuti l'attività misurata dai raggi  $\beta$  è piccola inizialmente ma aumenta fino ad un massimo in circa 22 minuti per poi svanire con il tempo. La curva di decadimento dell'attività, misurata dai raggi  $\beta$  per una lunga esposizione, non mostra la rapida caduta iniziale che si ha in tutte le curve dei raggi  $\alpha$ . Curie e Danne<sup>8</sup> studiarono le curve di decadimento dell'attività eccitata per diversi tempi di esposizione all'emanazione del radio, ma apparentemente senza tenere conto del fatto che le misure eseguite per i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  danno curve di decadimento completamente diverse. Alcune delle famiglie di curve, presentate in questo testo, si riferiscono ai raggi  $\alpha$  e altre ai raggi  $\beta$ , Esse mostrano, tuttavia, l'importante fatto che la curva di decadimento ottenuta per una lunga esposizione (che è identica con la curva dei raggi  $\beta$ ) può essere espressa empiricamente da un'equazione della forma

$$\frac{I_t}{I_0} = ae^{-\lambda_1 t} - (a - 1)e^{-\lambda_2 t}$$

dove  $I_0$  è l'intensità iniziale e  $I_t$  l'intensità dopo un tempo  $t$ ;  $\lambda_1 = \frac{1}{2420}$ ,  $\lambda_2 = \frac{1}{1860}$ . La costante numerica  $a = 4.20$ . Dopo un intervallo di 2.5 ore, la curva logaritmica di decadimento è quasi una linea retta, cioè, l'attività decade secondo una legge esponenziale con il tempo, dimezzandosi in circa 28 minuti.

La spiegazione completa di questa equazione e delle particolarità delle varie curve di decadimento dell'attività eccitata del radio, saranno discusse in dettaglio nel capitolo XI.

Come per il caso dell'attività eccitata dal torio, il tasso di decadimento dell'attività eccitata dal radio è per la maggior parte indipendente dalla natura del corpo reso attivo. Curie e Danne (citati) osservarono che i corpi attivi generavano un'emanazione in grado di produrre attività eccitata sui corpi vicini. Questa proprietà scompariva rapidamente ed era non più valutabile 2 ore dopo la rimozione. In certe sostanze come la cellulose o il caucciù, il decadimento dell'attività è molto più lento di quello per i metalli. Questo effetto diviene più marcato con l'aumento del tempo di esposizione all'emanazione. Un effetto simile è mostrato dal piombo, ma in modo meno marcato. Per la durata dell'attività, queste sostanze continuano a produrre emanazione.

È probabile che queste divergenze dalla legge generale non siano dovute ad un reale cambiamento nel tasso di decadimento della effettiva attività eccitata ma ad una occlusione dell'emanazione da parte di queste sostanze durante l'intervallo di esposizione. Dopo l'esposizione l'emanazione gradualmente diffonde e, pertanto, l'attività dovuta a questa emanazione intrappolata e l'attività eccitata prodotta da essa decadono molto lentamente col tempo.

**183. Deposito attivo del decadimento molto lento.** M. e Madame Curie<sup>9</sup> hanno osservato che corpi che erano rimasti esposti per un lungo intervallo di tempo alla presenza dell'emanazione del radio non perdevano la loro attività. L'attività eccitata inizialmente decade con rapidità ad un ritmo normale, dimezzandosi in circa 28 minuti, ma un'attività residua, che essi stabilirono essere dell'ordine di  $\frac{1}{20000}$  di quella iniziale, rimaneva sempre. Un simile effetto fu osservato da

<sup>8</sup>Curie e Danne, C. R. 136, p. 364, 1903.

<sup>9</sup>Madame Curie, Tesi, Parigi, 1903. p. 116.

Giesel. L'autore esaminò la variazione di questa attività residua e trovò che aumentava per parecchi anni. I risultati sono discussi in dettaglio nel capitolo XI. Si mostrerà che questo deposito attivo a lenta trasformazione contiene costituenti radioattivi presenti nel polonio, radio-tellurio e radio-piombo.

**184. L'attività eccitata dall'attinio.** L'emanazione dell'attinio, come quella del torio e del radio, produce attività eccitata sui corpi, che è concentrata sull'elettrodo negativo in un campo elettrico. Debiere<sup>10</sup> trovò che l'attività eccitata decadeva approssimativamente in accordo con un legge esponenziale, dimezzando in 41 minuti. Giesel<sup>11</sup> esaminò il tasso di decadimento dell'attività eccitata dell'"emanio" - che, come visto, probabilmente contiene lo stesso costituente radioattivo dell'attinio - e trovò che dimezzava in 34 minuti. Miss Brooks<sup>12</sup> trovò che le curve di decadimento dell'attività eccitata dall'emanio di Giesel variava con il tempo di esposizione all'emanazione. I risultati sono mostrati graficamente in Figura 69, per tempi di esposizione di 1, 2, 2, 10 e 30 minuti, e anche per una lunga esposizione di 21 ore. Dopo 10 minuti le curve avevano approssimativamente lo stesso tasso di decadimento. Per convenienza, le ordinate delle curve sono aggiustate in modo da passare per un punto comune. Per un'esposizione molto breve, l'attività è inizialmente piccola, ma raggiunge un massimo circa 9 minuti dopo e infine decade esponenzialmente a zero.

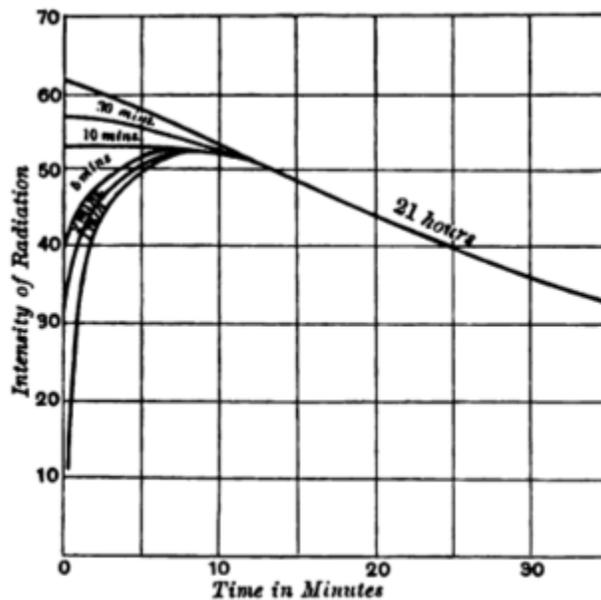


Fig. 69.

La curva di variazione dell'attività per un'esposizione molto breve è stata accuratamente determinata da Bronson; è mostrata in Figura 83. Trovò che il decadimento dell'attività è infine esponenziale, dimezzando in 36 minuti.

La spiegazione di queste curve è discussa in dettaglio nel capitolo X, sezione 212.

**185. Proprietà chimiche e fisiche del deposito attivo.** A causa del lento decadimento dell'attività del deposito attivo dall'emanazione del torio, le sue proprietà chimiche e fisiche sono state esaminate più da vicino rispetto a quelle del deposito dal radio. Si è già ricordato che il deposito attivo del torio è solubile in alcuni acidi. Chi scrive<sup>13</sup> trovò che la materia attiva disciolta dal filo con soluzioni forti o diluite di acido solforico, acido cloridrico e acido fluoridrico, era però solo poco solubile in acqua o acido nitrico. La materia attiva rimaneva quando il solvente evaporava. Il tasso di decadimento dell'attività era inalterato sciogliendo la materia attiva in acido solforico e consentendo il suo decadimento nella soluzione. Nell'esperimento, la materia attiva era disciolta su un filo attivo di platino; allora uguali porzioni delle soluzioni erano prese ad intervalli definiti, evaporate in un piatto di platino e l'attività del residuo misurata con il metodo elettrico. Il tasso di decadimento era esattamente lo stesso come se la materia attiva fosse stata lasciata sul filo. In un altro esperimento, un filo di platino attivo era usato come catodo in una soluzione di solfato di rame con un sottile film di rame depositato su di esso. Il tasso di decadimento dell'attività non subiva cambiamenti dal processo.

Un esame dettagliato delle proprietà chimiche e fisiche del deposito attivo del torio è stato eseguito da F. von Lerch<sup>14</sup> che ottenne alcuni importanti e interessanti risultati. Una soluzione del deposito attivo era preparata mettendo in soluzione il metallo che era stato esposto per un certo tempo alla presenza dell'emanazione del torio. Nella maggior parte dei casi, la materia attiva era precipitata con il metallo. Per esempio, un filo di rame attivo era messo in soluzione con acido nitrico

<sup>10</sup>Debiere, C. R. 138, p. 411, 1904.

<sup>11</sup>Giesel, Ber. d. D. Chem. Ges. No. 3, p. 775, 1905.

<sup>12</sup>Miss Brooks, Phil. Mag. settembre 1904.

<sup>13</sup>Rutherford, Phys. Zeit. 3, No. 12, p. 254, 1902.

<sup>14</sup>P. von Lerch, Annal. d. Phys. 12, p. 745, 1903.

e poi precipitato con potassa caustica. Il precipitato risultava fortemente attivo. Un filo di magnesio attivo, messo in soluzione con acido cloridrico e poi precipitato come fosfato, produceva pure un precipitato attivo. L'attività dei precipitati decadeva al ritmo normale, cioè l'attività dimezzava in 11 ore.

Furono eseguiti esperimenti sulla solubilità dei depositi attivi in diverse sostanze. Una placca di platino era resa attiva e poi posta in diverse soluzioni e veniva osservata la diminuzione dell'attività. In aggiunta agli acidi già indicati, fu trovato un grande numero di sostanze per mettere in soluzione il deposito attivo. La materia attiva non era tuttavia disciolta in modo apprezzabile nell'etere o nell'alcool. Molte sostanze divengono attive se aggiunte ad una soluzione attiva e poi precipitate. Per esempio, una soluzione attiva di acido cloridrico fu ottenuta sciogliendo il deposito attivo su un filo attivo di platino. Fu poi aggiunto il cloruro di bario e precipitato come solfato. Il precipitato era fortemente attivo, suggerendo, pertanto, che la materia attiva era portata via dal bario.

**186. Elettrolisi delle soluzioni.** Dorn mostrò che, se soluzioni di cloruro di bario radifero erano elettrolizzate, entrambi gli elettrodi divenivano temporaneamente attivi, ma l'anodo molto più del catodo. F. von Lerch ha svolto un dettagliato esame dell'azione dell'elettrolisi su una soluzione di deposito attivo del torio. La materia era disciolta su una placca di platino con acido cloridrico e poi elettrolizzata tra elettrodi di platino. Il catodo era molto attivo, ma non vi erano tracce di attività sull'anodo. Il catodo perdeva la sua attività ad un tasso molto più *veloce* del normale. Con un catodo di zinco amalgamato, il tasso di decadimento era normale. Quando una soluzione attiva di acido cloridrico veniva elettrolizzata con un forza elettromotrice più piccola di quella richiesta per decomporre l'acqua, il platino diveniva attivo. L'attività dimezzava in 4.75 ore mentre il normale dimezzamento era di 11 ore. Questi risultati fanno concludere che la materia attiva è complessa e consiste di due parti che hanno diversi tassi di decadimento e che possono essere separate mediante elettrolisi.

In particolari condizioni si trovò possibile rendere l'anodo attivo. Per esempio, se una soluzione cloridrica attiva era elettrolizzata con un anodo di argento, il cloruro di argento formatosi era fortemente attivo e la sua attività decadeva ad un tasso normale. La quantità di attività ottenuta ponendo diversi metalli in soluzioni attive per tempi uguali variava fortemente con il metallo. Per esempio, si è trovato che se una placca di zinco e una di zinco amalgamato, che mostrava uguale differenze di potenziale rispetto all'acido cloridrico, erano immerse per tempi uguali in due soluzioni di uguale attività, la placca di zinco era sette volte più attiva dell'altra. L'attività era quasi rimossa dalla soluzione in pochi minuti inserendo in essa la placca di zinco. Alcuni metalli divengono attivi se immersi in soluzioni attive mentre altri no. Platino, palladio e argento rimangono inattivi, mentre rame, stagno, piombo, nickel, ferro, zinco, cadmio, magnesio e alluminio diventano attivi. Questi risultati confermano decisamente l'ipotesi che l'attività eccitata è dovuta a un deposito di materia attiva che ha comportamenti chimici peculiari.

G. B. Pegram<sup>15</sup> ha compiuto uno studio dettagliato dei depositi attivi ottenuti per elettrolisi di sali di torio puri e reperibili in commercio. Il nitrato di torio commerciale ottenuto da P. de Haen produceva, se elettrolizzato, un deposito di perossido di piombo sull'anodo. Questo deposito era radioattivo e la sua attività decadeva al tasso normale dell'attività eccitata dovuta al torio. Dalle soluzioni di nitrato puro di torio, non si otteneva alcun deposito visibile sull'anodo, ma esso era, tuttavia, trovato essere radioattivo. L'attività decadeva rapidamente, dimezzando in circa un'ora. Alcuni esperimenti furono eseguiti aggiungendo sali metallici alle soluzioni di torio e poi elettrolizzandole. I depositi all'anodo e al catodo di ossidi o metalli ottenuti in questo modo risultavano radioattivi, ma l'attività dimezzava in pochi minuti. I gas prodotti dall'elettrolisi erano radioattivi, ma ciò è dovuto alla presenza dell'emanazione del torio. La spiegazione dei risultati ottenuti da Pegram e von Lerch sarà considerata nella sezione 207. Si mostrerà che il deposito attivo del torio contiene due sostanze distinte che hanno differenti tassi di trasformazione.

**187. Effetto della temperatura.** L'attività di un filo di platino esposto alla presenza dell'emanazione del torio è quasi completamente persa riscaldando il filo al calor bianco. Miss F. Gates<sup>16</sup> trovò che l'attività non era distrutta dall'intenso calore, ma si manifestava sui corpi vicini. Quando il filo attivo era riscaldato elettricamente in un cilindro chiuso, l'attività si trasferiva dal filo alle superfici interne del cilindro in quantità invariata. Soffiando una quantità di aria attraverso il cilindro durante il riscaldamento, una parte della materia attiva era rimossa dal cilindro. Risultati simili furono ottenuti per l'attività eccitata del radio.

F. von Lerch (citato) determinò la quantità di attività rimossa a diverse temperature. I risultati sono mostrati nella tabella seguente per un filo di platino eccitato dall'emanazione del torio<sup>17</sup>.

	Temperatura	Percentuale di attività rimossa
Riscaldato per 2 minuti	800 °C	0
poi per $\frac{1}{2}$ minuto ancora	1020 °C	16
poi per $\frac{1}{2}$ minuto ancora	1260 °C	52
poi per $\frac{1}{2}$ minuto ancora	1460 °C	99

<sup>15</sup>Pegram, Phys. Review, p. 424, dicembre 1903.

<sup>16</sup>Miss Gates, Phys. Review, p. 300. 1903.

<sup>17</sup>Un esame più completo dell'effetto della temperatura sull'attività eccitata del torio è stata fatto da Miss Slater (sezione 207).

L'effetto del calore sulla volatilizzazione del deposito attivo del radio è stato esaminato in dettaglio da Curie e Danne. Gli interessanti e importanti risultati da essi ottenuti saranno discussi nel capitolo I, sezione 226.

**188. Effetto della variazione di F.E.M sulla quantità di attività eccitata dal torio.** Si è mostrato che l'attività eccitata è confinata al catodo in un forte campo elettrico. In campi più deboli l'attività è divisa tra il catodo e le pareti del contenitore. Ciò fu verificato in un dispositivo<sup>18</sup> come quello in Figura 70.

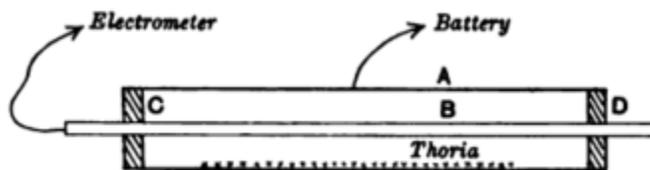


Fig. 70.

A è un contenitore cilindrico del diametro di 5.5 cm, B l'elettrodo negativo passante attraverso i terminali isolati C, D. Per una differenza di potenziale di 50 V, la maggior parte dell'attività eccitata era depositata sull'elettrodo B. Per circa 3 V., metà dell'attività eccitata era prodotta sull'asta B e metà sulle pareti del contenitore. Per qualsiasi voltaggio applicato, la somma delle attività dell'asta centrale e delle pareti del cilindro era costante quando si raggiungeva uno stato stazionario.

In assenza di voltaggio, era operativa la sola diffusione e in quel caso circa il 13% dell'attività totale si trovava sull'asta B. L'applicazione di un campo elettrico non influisce pertanto sulla somma totale dell'attività eccitata, ma solamente controlla la proporzione concentrata sull'elettrodo negativo.

Un esame più dettagliato della variazione con l'intensità del campo della quantità sull'elettrodo negativo venne fatta in un modo simile da F. Henning<sup>19</sup>. Egli trovò che in un campo elettrico intenso la quantità di attività eccitata era praticamente indipendente dal diametro dell'asta B, sebbene lo stesso variasse tra 0.59 e 6.0 mm. Con una piccola tensione, la quantità sull'elettrodo negativo variava con il suo diametro. Le curve che mostrano la relazione tra la quantità di attività eccitata e la tensione sono molto simili a quelle ottenute per la variazione della corrente attraverso un gas ionizzato con la tensione applicata.

La quantità di attività eccitata raggiunge un massimo quando tutta la materia attiva è rimossa dal gas nel mentre si forma. Con campi più deboli, una parte diffonde ai lati del contenitore e produce attività eccitata sull'elettrodo positivo.

**189. Effetto della pressione sulla distribuzione di attività eccitata.** In un intenso campo elettrico, la quantità di attività eccitata prodotta sul catodo è indipendente dalla pressione fino a un valore di circa 10 mm di mercurio. In alcuni esperimenti fatti da chi scrive<sup>20</sup>, il composto di torio emanante era posto dentro un cilindro chiuso di circa 4 cm di diametro, attraverso il quale passava un'asta centrale isolata, che era connessa al polo negativo di una batteria di 50 V. Quando la pressione si riduceva al di sotto dei 10 mm di mercurio, la quantità di attività eccitata prodotta sull'elettrodo negativo diminuiva ed era una frazione molto piccola del suo valore iniziale alla pressione di 0.1 mm. Un poco di attività eccitata era distribuita sulla superficie interna del cilindro. Si può, pertanto, concludere che a basse pressioni l'attività eccitata appare sia sull'anodo che sul catodo anche in un intenso campo elettrico. La probabile spiegazione di questo effetto è presentata nella prossima sezione.

Curie e Debiegne<sup>21</sup> osservarono che quando un contenitore con composto di radio emanante era mantenuto, pompando, ad una pressione bassa, la quantità di attività eccitata prodotta sul contenitore era alquanto ridotta. In questo caso l'emanazione prodotta dal radio era continuamente rimossa dalla pompa con altri gas. A causa del decadimento molto lento dell'attività dell'emanazione, la quantità di attività eccitata sulle pareti del contenitore, nel passaggio dell'emanazione attraverso di esso, era solo una minuta parte della quantità prodotta quando l'emanazione non poteva sfuggire.

**190. Trasmissione di attività eccitata.** La proprietà caratteristica della radioattività eccitata è che può essere confinata al catodo in un intenso campo elettrico. Poiché l'attività è dovuta al deposito di materia radioattiva sulla superficie elettrificata, la materia deve essere trasportata da portatori di carica positiva. Gli esperimenti di Fehrle<sup>22</sup> mostrarono che i portatori di attività eccitata si spostano lungo le linee di forza in un campo elettrico. Per esempio, quando una piccola placca metallica carica negativamente era posta al centro di un contenitore metallico con un composto di torio emanante, era prodotta più attività eccitata sui lati e spigoli della placca che sulla parte centrale.

Una difficoltà sorge, tuttavia, in connessione con i portatori di carica positiva. In accordo con quanto sviluppato nella sezione 136 e successivamente nei capitoli X e XI, la materia attiva che è depositata sui corpi e produce attività

<sup>18</sup>Rutherford, Phil. Mag. febbraio 1900.

<sup>19</sup>Henning, Annal. d. Phys, 7, p. 562, 1902.

<sup>20</sup>Rutherford, Phil. Mag. febbraio 1900.

<sup>21</sup>Curie e Debiegne, C. R. p. 768, 1901.

<sup>22</sup>Fehrle, Phys. Zeit. 8, No. 7, o. 130, 1902.

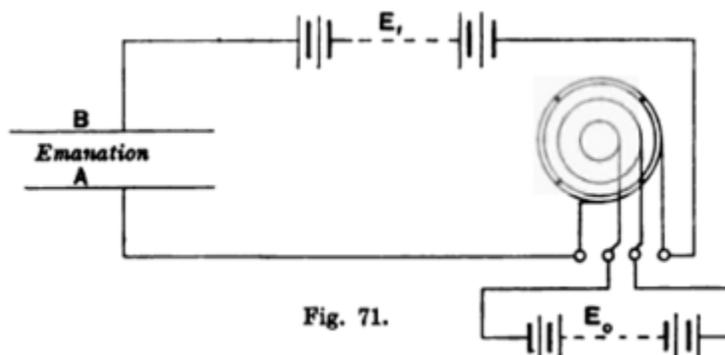
eccitata, è essa stessa derivata dall'emanazione. L'emanazione del torio e del radio emettono solo raggi  $\alpha$ , cioè particelle cariche positivamente. Dopo l'emissione di una particella  $\alpha$ , il rimanente, che è supposto costituire la materia primaria del deposito attivo, dovrebbe avere una carica negativa ed essere trasportato all'anodo in un campo elettrico. Si osserva, tuttavia, l'esatto opposto. L'evidenza sperimentale non supporta l'ipotesi che le particelle  $\alpha$  cariche positivamente, emesse dall'emanazione, siano direttamente responsabili dei fenomeni di attività eccitata; nessuna attività eccitata è prodotta in un corpo esposto ai raggi  $\alpha$  dell'emanazione, purché l'emanazione stessa non venga in contatto con essa.

Vi è stata una tendenza ad associare una eccessiva importanza a questa apparente discrepanza tra teoria ed esperimento. La difficoltà non è così grande da offrire una probabile spiegazione dei risultati selezionandoli da un numero di cause possibili. Mentre non vi può essere dubbio che il fattore principale nella disintegrazione di un atomo consiste nell'emissione di una particella  $\alpha$  trasportante una carica positiva, è probabile che avvenga una complicata serie di processi prima che il residuo dell'atomo sia trasportato all'elettrodo negativo. L'evidenza sperimentale suggerisce che uno o più elettroni di bassa velocità sfuggano dall'atomo nello stesso tempo della particella. Questo è emerso dalla recente scoperta che la particella emessa dal radio, privato dai consueti raggi  $\beta$ , e anche dal polonio, è accompagnata da un numero di elettroni lenti e di conseguenza facilmente assorbibili. Se due elettroni negativi sfuggono allo stesso tempo come la particella  $\alpha$ , il residuo sarà lasciato con una carica positiva e sarà trasportato all'elettrodo negativo. Vi è anche un altro elemento sperimentale che è importante in questa connessione. In assenza di un campo elettrico, i portatori rimangono nel gas per un tempo considerevole e subiscono la loro trasformazione *in situ*. Vi è ancora un'evidenza (sezione 227) che, anche in un campo elettrico, i portatori del deposito attivo non sono sospinti verso l'elettrodo negativo immediatamente dopo la rottura dell'emanazione, ma rimangono per un certo tempo nel gas prima di guadagnare una carica positiva. Si deve ricordare che gli atomi del deposito attivo non esistono come un gas e per il processo di diffusione tendono ad unirsi per formare aggregati. Questi agiranno come piccole particelle metalliche, e, se fossero elettropositivi rispetto al gas, guadagneranno una carica positiva dal gas.

Vi può essere un piccolo dubbio che i processi che avvengono tra la rottura dell'emanazione e il deposito del residuo nel catodo in un campo elettrico, siano complicati e inoltre sono necessari accurati esperimenti per chiarire la sequenza dei fenomeni.

Qualunque sia l'ipotesi sul processo per il quale questi portatori ottengono una carica positiva, vi è solo un piccolo dubbio sul fatto che l'espulsione di una particella  $\alpha$  con grande velocità dall'atomo dell'emanazione lasci il residuo in movimento. A causa della massa comparativamente molto grande di questo residuo, la velocità acquisita sarà piccola rispetto a quella della particella  $\alpha$  emessa, e la massa in moto sarà ridotta presto a riposo alla pressione atmosferica dalla collisione con le molecole del gas sul suo cammino. A basse pressioni, tuttavia, le collisioni saranno così poche che non sarà a riposo prima di impattare le estremità del contenitore. Un forte campo elettrico avrà un effetto molto piccolo nel controllo del moto di una tale massa pesante, a meno che questa sia stata messa a riposo dalle collisioni con le molecole del gas. Questo dovrebbe spiegare perché la materia attiva non è depositata sul catodo a bassa pressione in un campo elettrico. Una prova evidente di un processo di questo tipo, ottenuta da Debièrne nell'esame dell'attività eccitata prodotta dall'attinio, è discussa nella sezione 192.

191. Il metodo seguente è stato impiegato da chi scrive<sup>23</sup> per determinare la velocità dei portatori positivi di attività eccitata del radio e del torio in un campo elettrico.



Supponiamo che A e B (Figura 71) siano due piastre parallele esposte all'influenza dell'emanazione, che è uniformemente distribuita tra di esse. Se una F.E.M. alternata  $E_0$  è applicata tra le piastre, la stessa quantità di attività eccitata è prodotta su ogni elettrodo. Se, in serie con la sorgente della F.E.M. alternata, si pone una batteria di F.E.M.  $E_1$  minore di  $E_0$ , il portatore positivo si muove in un campo elettrico più intenso per metà della fase alternata. Un portatore, di conseguenza, percorre distanze diverse durante le due metà fasi alternate, poiché la velocità del portatore è proporzionale all'intensità del campo in cui si muove. L'attività eccitata sarà, di conseguenza, distribuita in modo ineguale sui due elettrodi. Se la frequenza di alternanza è sufficientemente grande, solo i portatori positivi ad una certa piccola distanza da

<sup>23</sup>Rutherford, Phil. Mag. gennaio 1903.

una piastra saranno convogliati verso di essa, e il resto, durante numerose successive alternanze, sarà trasportato all'altra piastra.

Quando la piastra B è caricata negativamente, la F.E.M. tra le piastre è  $E_0 - E_1$ , quando B è positivo sarà  $E_0 + E_1$ .

Sia  $d$  la distanza tra le piastre,  $T$  il tempo di metà alternanza,  $\rho$  il rapporto tra la radioattività eccitata sulla piastra B e la somma della radioattività su entrambe le piastre,  $K$  la velocità dei portatori positivi per un gradiente di potenziale di 1 V per centimetro.

Dall'ipotesi che il campo elettrico tra le piastre è uniforme e che la velocità del portatore è proporzionale al campo elettrico, la velocità del portatore positivo verso B è

$$\frac{E_0 - E_1}{d} K$$

e, nel corso della successiva metà fase alternata

$$\frac{E_0 + E_1}{d} K$$

verso la piastra A.

Se  $x_1$  è minore di  $d$ , le maggiori distanze  $x_1, x_2$  percorse dal portatore positivo durante due successive metà fasi alternate sono allora date da

$$x_1 = \frac{E_0 - E_1}{d} K T \quad e \quad x_2 = \frac{E_0 + E_1}{d} K T$$

Supponiamo che i portatori positivi siano prodotti ad un tasso uniforme di  $q$  per secondo per unità di distanza tra le piastre. Il numero di portatori positivi che raggiungono B durante metà fase consiste di due parti:

- (1) Una metà da quei portatori che sono prodotti entro la distanza  $x_1$  dalla piastra B. Questo numero è uguale a

$$\frac{1}{2} x_1 q T$$

- (2) Tutti i portatori che sono lasciati entro la distanza  $x_1$  da B alla fine della precedente metà fase. Il numero di questi può facilmente essere mostrato essere

$$\frac{1}{2} x_1 \frac{x_1}{x_2} q T$$

I portatori rimanenti, prodotti tra A e B durante una fase completa, raggiungeranno l'altra piastra A nel corso delle successive fasi, purché non abbia luogo alcuna apprezzabile ricombinazione. Questo deve essere ovviamente il caso, poiché i portatori positivi viaggiano avanti e indietro con le variazioni nel verso del campo elettrico, ma complessivamente si muovono verso la piastra A.

Il numero totale di portatori positivi prodotti tra le piastre durante una fase alternata completa è  $2dqT$ . Il rapporto  $\rho$  tra il numero che raggiunge N e il totale prodotto è allora dato da

$$\rho = \frac{\frac{1}{2} x_1 q T + \frac{1}{2} x_1 \frac{x_1}{x_2} q T}{2dqT} = \frac{1}{4} \frac{x_1}{d} \frac{x_1 + x_2}{x_2}$$

Sostituendo i valori di  $x_1$  e  $x_2$ , troviamo che

$$K = \frac{2(E_0 + E_1)}{E_0(E_0 - E_1)} \frac{d^2}{T} \rho$$

Negli esperimenti, i valori di  $E_0, E_1, d, T$  sono stati variati e i risultati ottenuti erano in generale accordo con l'equazione sopra.

Per il torio si ebbero i seguenti risultati:

Piastre distanti 1.30 cm

$E_0 + E_1$	$E_0 - E_1$	Fasi alternate al secondo	$\rho$	$K$
152	101	57	0.27	1.25
225	150	57	0.38	1.17
300	200	57	0.44	1.24

Piastre distanti 2 cm

$E_0 + E_1$	$E_0 - E_1$	Fasi alternate al secondo	$\rho$	$K$
273	207	44	0.37	1.47
300	200	53	0.286	1.45

La mobilità media  $K$  dedotta da un grande numero di esperimenti era 1.3 centimetri per secondo per volt per centimetro per temperatura e pressione atmosferica. Questa velocità è circa la stessa di quella degli ioni positivi prodotti dai raggi Röntgen in aria, cioè  $1.37 \frac{cm}{s}$ . I risultati ottenuti con l'emanazione del radio erano più incerti di quelli con il torio a causa della distribuzione di parte dell'attività eccitata sull'elettrodo positivo. I valori delle velocità dei portatori erano grosso modo gli stessi per il radio e il torio.

Questi risultati mostrano che i portatori del deposito attivo si muovono nel gas con circa la stessa velocità degli ioni positivi o negativi prodotti dalle radiazioni nei gas. Ciò indica o che la materia attiva si attacca agli ioni positivi o che la materia attiva stessa, acquisendo in qualche modo una carica positiva, forma un agglomerato di molecole neutre che viaggiano con essa.

**192. Portatori dell'attività eccitata dall'attinio e dall'"emanio"**. Giesel<sup>24</sup> osservò che l'"emanio" emetteva una grande quantità di emanazione e che questa emanazione dava origine ad un tipo di radiazione che chiamò raggi E. Uno stretto cilindro metallico contenente la sostanza attiva era posto con la parte inferiore aperta, circa 5 cm sotto la superficie di uno schermo di solfuro di zinco. Lo schermo era caricato negativamente ad un alto potenziale da una macchina elettrica e il cilindro messo a terra. Si osservava uno spot luminoso sullo schermo, che era più luminoso ai bordi che nella parte centrale. Un conduttore, messo a terra, portato vicino allo spot luminoso era apparentemente respinto. Un isolante non mostrava un tale effetto marcato. Rimuovendo la sostanza attiva, la luminosità dello schermo persisteva per un certo tempo. Ciò è probabilmente dovuto all'attività eccitata prodotta sullo schermo.

I risultati ottenuti da Giesel supportano l'ipotesi che i portatori dell'attività eccitata dell'"emanio" hanno una carica positiva. In un campo elettrico intenso i portatori si muovono lungo le linee di forza verso il catodo e ciò produce attività eccitata sullo schermo. Il movimento della zona luminosa all'avvicinarsi di un conduttore è dovuto al disturbo del campo elettrico.

Debierne<sup>25</sup> trovò che l'attinio produceva una grande quantità di emanazione che decadeva molto rapidamente con il tempo, dimezzando in 3.9 s.

Questa emanazione produce attività eccitata sugli oggetti circostanti e a pressione ridotta l'emanazione produce una distribuzione uniforme di attività eccitata nello spazio contenente l'emanazione. L'attività eccitata dimezza il proprio valore in 41 minuti.

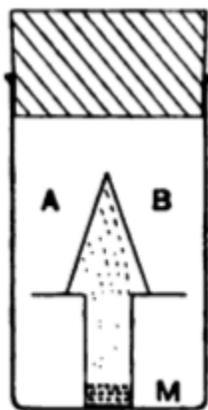


Fig. 71A.

Debierne osservò che la distribuzione di attività eccitata era alterata da un intenso campo magnetico. Il dispositivo sperimentale è mostrato in Figura 71A. La materia attiva era posta in M e due piastre A e B erano posizionate simmetricamente rispetto alla sorgente. All'applicazione di un intenso campo magnetico normale al piano del foglio, l'attività eccitata era inegualmente distribuita tra le due piastre. I risultati mostravano che i portatori di attività eccitata erano deviati da un campo magnetico nel verso opposto ai raggi catodici, cioè i portatori erano carichi positivamente. In alcuni casi, tuttavia, si otteneva l'effetto opposto. Debierne considera che l'attività eccitata dell'attinio sia dovuta agli "ioni attivanti", il cui moto è alterato da un campo magnetico. Altri esperimenti mostrarono che il campo magnetico agiva sugli "ioni attivanti" e non sull'emanazione.

I risultati di Debierne fanno, pertanto, concludere che i portatori di attività eccitata sono derivati dall'emanazione e sono emessi con una velocità considerevole. Questo risultato supporta l'ipotesi, avanzata nella sezione 190, che l'espulsione di particelle  $\alpha$  dall'emanazione deve stabilire la parte del sistema lasciata indietro in moto rapido. Un esame più preciso del modo di trasferimento dell'attività eccitata da parte dell'attinio e dalla sostanza emanazione è probabile che chiarisca ulteriormente i processi che producono il deposito di materia attiva sugli elettrodi.

<sup>24</sup>Giesel, Ber. d. Chem. Ges, 36, p. 342, 1903.

<sup>25</sup>Debierne, C. R. 136, pp.446 e 671; 138, p. 411, 1904.

## Teoria dei cambiamenti successivi

**193. Introduzione.** Abbiamo visto nei precedenti capitoli che la radioattività dei radio elementi è sempre accompagnata dalla produzione di una serie di nuove sostanze con alcune proprietà chimiche e fisiche distintive. Per esempio, il torio produce una sostanza fortemente radioattiva,  $ThX$ , che può essere separata dal torio grazie alla sua solubilità in ammoniacca. Inoltre, il torio dà origine ad un prodotto gassoso, l'emanazione del torio, e anche ad un'altra sostanza che è depositata sulla superficie dei corpi nelle sue vicinanze, dove la sua presenza è indicata dal fenomeno noto come "attività eccitata".

Un esame dell'origine di questi prodotti mostra che essi non sono generati simultaneamente, ma come conseguenza di una successione di trasformazioni che avvengono nel radioelemento. Il torio produce prima il  $ThX$ . Il  $ThX$  produce l'emanazione del torio, e questa a sua volta è trasformata in un sostanza non volatile. Una simile serie di cambiamenti si osserva anche nel radio, tranne che non vi è alcun prodotto nel radio corrispondente al  $ThX$ . Il radio produce prima un'emanazione, che, come per il torio, è trasformata in una sostanza non volatile, Nell'uranio si è osservato solo un prodotto,  $UrX$ , e non vi è emanazione e di conseguenza non produce attività eccitata sui corpi.

Come esempio tipico, dal quale si è dedotto che una sostanza è genitrice dell'altra, considereremo il caso dei due prodotti  $ThX$  e emanazione del torio. È stato mostrato (sezione 154) che dopo la separazione del  $ThX$  da una soluzione di torio mediante precipitazione con ammoniacca, l'idrossido di torio precipitato ha perso una grande parte del suo potere emanante. Questo non può essere attribuito ad un ostacolo alla fuga dell'emanazione prodotta, perché si osserva un'emanazione molto piccola se una corrente d'aria è fatta passare attraverso l'idrossido in stato di soluzione, quando la maggior parte dell'emanazione presente dovrebbe essere portata via. D'altro canto, la soluzione contenente il  $ThX$  produce una grande quantità di emanazione, mostrando che il potere di produrre un'emanazione appartiene al prodotto  $ThX$ .

Si è trovato che la quantità di emanazione prodotta dal  $ThX$  decresce in accordo con una legge esponenziale con il tempo, dimezzando in quattro giorni. Il tasso di produzione dell'emanazione decade con la stessa legge secondo la stessa legge e allo stesso ritmo dell'attività del  $ThX$  misurata nel modo ordinario con i raggi  $\alpha$ . Questo è esattamente il risultato atteso se il  $ThX$  è il padre dell'emanazione, perché l'attività del  $ThX$  è sempre proporzionale al suo tasso di cambiamento, cioè il tasso di produzione del tipo secondario di materia dall'emanazione in conseguenza di un cambiamento in essa. Poiché il tasso di cambiamento dell'emanazione (metà trasformata in 1 minuto) è molto rapido rispetto a quello del  $ThX$ , la quantità di emanazione presente sarà praticamente proporzionale all'attività del  $ThX$  in ogni istante, cioè la quantità di  $ThX$  presente invariato. Il fatto osservato che l'idrossido riguadagna il suo potere emanante nel corso del tempo è dovuto alla produzione di nuovo  $ThX$  da parte del torio, che a sua volta produce l'emanazione.

In un modo simile, l'attività eccitata è prodotta sui corpi sui quali passa l'emanazione e in quantità proporzionale all'attività dell'emanazione, cioè alla quantità di emanazione presente. Ciò mostra che il deposito attivo, che dà origine al fenomeno dell'attività eccitata, è esso stesso un prodotto dell'emanazione. La prova sembra, pertanto, essere conclusiva che il  $ThX$  è padre dell'emanazione e che l'emanazione è genitrice della materia depositata.

**194. Proprietà Chimiche e Fisiche dei prodotti attivi.** Ognuno di questi prodotti radioattivi è caratterizzato da una serie di proprietà chimiche e fisiche distintive che li differenzia dai prodotti precedenti e successivi. Per esempio, il  $ThX$  si comporta come un solido. È solubile in ammoniacca, contrariamente al torio. L'emanazione del torio si comporta come un gas chimicamente inerte ad una temperatura di  $-120^{\circ}C$ . Il deposito attivo dall'emanazione si comporta come un solido ed è facilmente solubile negli acidi solforico e cloridrico ed è solo debolmente solubile in ammoniacca.

La straordinaria disuguaglianza che esiste in molti casi tra le proprietà chimiche e fisiche della materia genitrice e il prodotto che essa genera è molto ben illustrata dal caso del radio e dalla sua emanazione. Il Radio è un elemento che ha proprietà chimiche assai simili a quelle del bario e, a parte una piccola differenza nella solubilità dei cloruri e bromuri, è difficile distinguerli chimicamente. Ha uno spettro definito di righe brillanti simili in molti aspetti agli spettri delle terre alcaline. Come il bario, non è volatile a temperatura ordinaria. D'altro canto, l'emanazione che è continuamente prodotta dal radio è un gas radioattivo e chimicamente inerte, che è condensato a una temperatura di  $-150^{\circ}C$ . In entrambi i loro spettri e nell'assenza di definite proprietà chimiche, assomiglia al gruppo argo-elio di gas inerti, ma differisce da questi per alcune significative caratteristiche.

L'emanazione si deve considerare come un gas instabile che si spezza in un tipo di materia non volatile, essendo la disintegrazione accompagnata dall'espulsione di atomi pesanti di materia (particelle  $\alpha$ ) scagliate con grande velocità. Questo tasso di rottura non è influenzato dalla temperatura entro un considerevole intervallo che è stato esaminato. Dopo un mese, il volume dell'emanazione si riduce a una piccola porzione del suo valore iniziale. Ma la proprietà più straordinaria

dell'emanazione, che, come vedremo in seguito nel capitolo XII, è una diretta conseguenza della sua radioattività, è l'enorme quantità di energia da essa emessa. L'emanazione, rompendosi in successivi stadi, emette circa 3 milioni di volte più energia di quella ottenuta dall'esplosione di un uguale volume di idrogeno e ossigeno, mescolati in giuste proporzioni per formare l'acqua; e ora, in quest'ultima reazione chimica è emesso più calore di ogni altro cambiamento chimico noto.

Abbiamo visto che le due emanazione e i prodotti  $UrX$ ,  $ThX$  perdono la loro attività nel tempo secondo una semplice legge esponenziale, e ad un tasso che è indipendente, per quante osservazioni siano state fatte, dagli agenti chimici e fisici a nostra disposizione. Il tempo richiesto ad ognuno di questi prodotti per dimezzare il loro valore è, pertanto, una definita costante fisica che serve a distinguerli tra loro.

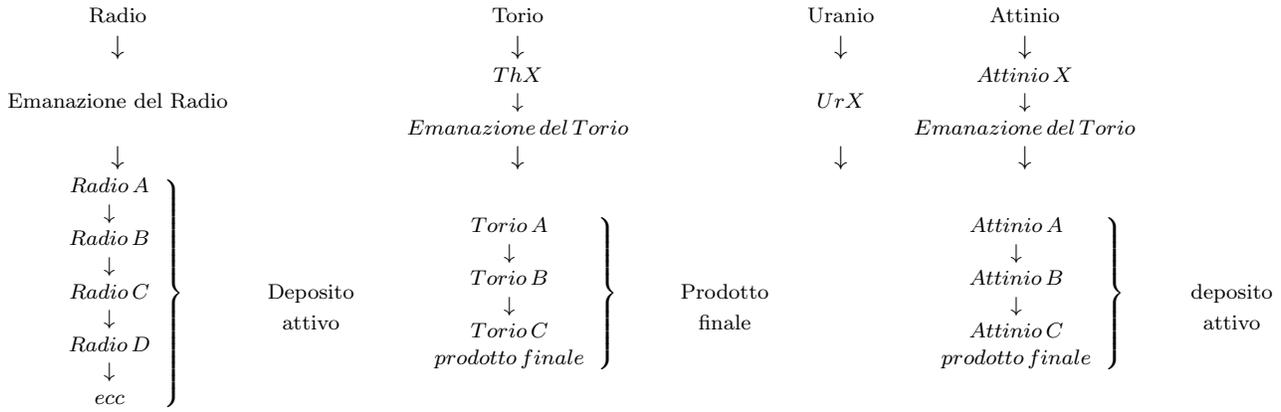
D'altro canto, la variazione dell'attività eccitata prodotta da queste emanazioni non obbedisce nemmeno approssimativamente a una tale legge. Il tasso di decadimento dipende non solo dal tempo di esposizione alle rispettive emanazioni, ma anche, nel caso del radio, dal tipo di radiazione che è usata come mezzo comparativo di misura. Si mostrerà, nei capitoli successivi, che la complessità del decadimento è dovuta al fatto che la materia nei depositi attivi subisce parecchie trasformazioni successive e che le peculiarità delle curve di decadimento, ottenute in diverse condizioni, può essere spiegata completamente assumendo che avvengano due cambiamenti nel deposito attivo del torio e dell'attinio e sei nel deposito attivo del radio.

**195. Nomenclatura.** La nomenclatura applicata ai numerosi prodotti radioattivi è una questione di grande importanza e anche di considerevole difficoltà. Poiché vi sono almeno sette sostanze distinte prodotte dal radio, e probabilmente cinque da torio e attinio, non è né consigliabile né conveniente dare a ognuno un nome speciale come fatto per gli elementi padri. Nello stesso tempo, sta diventando sempre più necessario che ogni prodotto venga chiamato in modo da indicare il suo posto nella successione delle trasformazioni. Questa difficoltà è specialmente sentita nel discutere i numerosi cambiamenti nei depositi attivi dalle diverse emanazioni. Molti dei nomi dei prodotti furono loro assegnati al momento della loro scoperta, prima che la loro posizione nello schema delle trasformazioni fosse conosciuta. In questo modo i nomi  $ThX$ ,  $UrX$  furono applicati ai residui attivi ottenuti dal trattamento chimico dell'uranio e del torio. Poiché, con tutta probabilità, queste sostanze sono i primi prodotti dei due elementi, è consigliabile mantenere questi nomi, che certamente hanno il vantaggio della brevità. Il nome "emanazione" fu originariamente dato al gas radioattivo del torio ed è stato applicato ai prodotti gassosi simili del radio e dell'attinio.

Trovando il nome "emanazione del radio" alquanto lungo e goffo, Sir William Ramsey<sup>1</sup> ha recentemente suggerito "ex-radio" come equivalente. Questo nome è certamente breve e ne suggerisce l'origine; ma almeno altri sei ex-radio, la cui parentela è certa come quella dell'emanazione, rimangono privi di nome. Una difficoltà sorge nell'applicare i corrispondenti nomi ex-torio, ex-attinio agli altri prodotti gassosi, perché, diversamente dal radio, le emanazioni di torio e attinio sono probabilmente il secondo, non il primo, prodotto di disintegrazione dei radio-elementi in questione. Un altro nome è stato, pertanto, applicato al primo prodotto in questi casi. Può essere consigliabile assegnare un nome speciale all'emanazione, poiché è stata il prodotto più studiato e il primo ad essere stato chimicamente isolato; ma, d'altro canto, il nome "emanazione del radio" è storicamente interessante e suggerisce un tipo di materia volatile o gassosa. Poiché il termine attività "eccitata" o "indotta" si riferisce solo alle radiazioni dai corpi attivi, è richiesto un nome per la stessa materia irradiante. L'autore nella prima edizione di questo libro ha suggerito il nome "emanazione X"<sup>2</sup>. Questo nome era assegnato per analogia con i nomi  $UrX$  e  $ThX$ , per indicare che la materia attiva era prodotta dall'emanazione. Il nome, tuttavia, non è molto adatto, e, inoltre, può essere applicato solo al prodotto iniziale depositato e non agli ulteriori prodotti della sua decomposizione. È molto conveniente discutendo matematicamente la teoria delle successive trasformazioni supporre che la materia depositata detta A è cambiata in B, B in C, C in D, e così via. Ho, tuttavia, messo da parte il nome emanazione X e ho usato il termine radio A, radio B, e così via, a significare i prodotti successivi della decomposizione dell'emanazione del radio. Una nomenclatura simile è applicata al torio e all'attinio. Questo sistema di notazione è elastico e semplice e l'ho trovato di grande convenienza nella discussione dei prodotti successivi. Parlando genericamente della materia attiva, che causa attività eccitata, senza tener conto dei suoi costituenti, ho usato il termine "deposito attivo". Lo schema di nomenclatura impiegato in questo libro è chiaramente mostrato sotto:

<sup>1</sup>Ramsay, Proc. Roy. Soc. p. 470, giugno, 1904; C. R. 138, 6 giugno 1904.

<sup>2</sup>Phil. Mag. febbraio, 1904.



Ogni prodotto di questo schema è il genitore del prodotto che lo segue. Poiché solo due prodotti sono stati osservati nel deposito attivo di torio e attinio, torio C e attinio C si riferiscono rispettivamente al loro prodotto finale inattivo. Si mostrerà nel prossimo capitolo che, come nel caso del torio, esiste un prodotto intermedio tra l’attinio e la sua emanazione. Dall’analogia con i prodotti *ThX* e *UrX*, questa sostanza è chiamata “Attinio X”.

**196. Teoria delle trasformazioni successive.** Prima di considerare la prova da cui questi cambiamenti sono dedotti, considereremo la teoria generale delle trasformazioni successive della materia radioattiva. Si supponrà che la materia A si trasformi in B, B in C, C in D, e così via.

Ognuna di queste trasformazioni è supposta avvenire secondo la stessa legge di una trasformazione mono molecolare in chimica, cioè il numero di particelle *N* invariate dopo un tempo *t* è dato da  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , dove  $N_0$  è il numero iniziale e  $\lambda$  la costante di cambiamento.

Poiché  $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ , il tasso di cambiamento in qualsiasi momento è sempre proporzionale alla quantità di materia invariata. Si è in precedenza sottolineato che questa legge di decadimento dell’attività dei prodotti radioattivi è un’espressione del fatto che la trasformazione è dello stesso tipo di un cambiamento chimico mono molecolare.

Supponiamo che *P, Q, R* rappresentino rispettivamente il numero di particelle della materia *A, B, C* in in ogni istante *t*. Siano rispettivamente  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  le costanti di trasformazione della materia *A, B, C*.

Ogni atomo della materia A è supposto dare origine ad un atomo della materia B, un atomo di B uno di C, e così via. I “raggi” espulsi o particelle sono non radioattive e non intervengono nella teoria.

Non è difficile dedurre matematicamente il numero di atomi di *P, Q, R, ...* della materia *A, B, C, ...* esistenti in qualsiasi tempo *t* dopo che questa materia è messa da parte, se i valori iniziali di *P, Q, R, ...* sono dati. In pratica, tuttavia, è in genere necessario solo impiegare tre casi speciali della teoria che corrispondono, come esempi, alle trasformazioni nel deposito attivo, prodotto su un filo esposto a una quantità costante di emanazione del radio e poi rimosso, (1) quando il tempo di esposizione è estremamente breve confrontato con il periodo di trasformazione, (2) quando il tempo di esposizione è così lungo che la quantità di ognuno dei prodotti ha raggiunto un valore stazionario limite, e (3) per qualsiasi tempo di esposizione.

Vi è ancora un altro caso importante che è praticamente un inverso del Caso 3, cioè quando la materia A è fornita ad un tasso costante da una sorgente primaria e le quantità A,B,C sono richieste ad ogni tempo successivo. La soluzione di questo può, tuttavia, essere immediatamente dedotta dal caso 3 senza analisi.

**197. Caso 1.** *Supponiamo che la materia inizialmente considerata sia tutta di un tipo A. Si richiede di trovare il numero di particelle P, Q, R della materia A, B, C rispettivamente presente dopo un tempo t.*

Allora  $P = n e^{-\lambda_1 t}$ , se *n* è il numero di particelle A inizialmente presenti. Ora  $dQ$ , l’aumento del numero di particelle della materia B per unità di tempo, è il numero fornito dalla trasformazione nella materia A, meno il numero dovuto al cambiamento di B in C, pertanto

$$(9.0.9) \quad \frac{dQ}{dt} = \lambda_1 P - \lambda_2 Q$$

Analogamente

$$(9.0.10) \quad \frac{dR}{dt} = \lambda_2 Q - \lambda_3 R$$

Sostituendo nella prima equazione il valore di *P* in funzione di *n*,

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda_1 n e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 Q$$

La soluzione di questa equazione è della forma

$$(9.0.11) \quad Q = n (a e^{-\lambda_1 t} + b e^{-\lambda_2 t})$$

Mediante sostituzione si trova che  $a = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$

Pertanto

$$(9.0.12) \quad Q = \frac{n\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

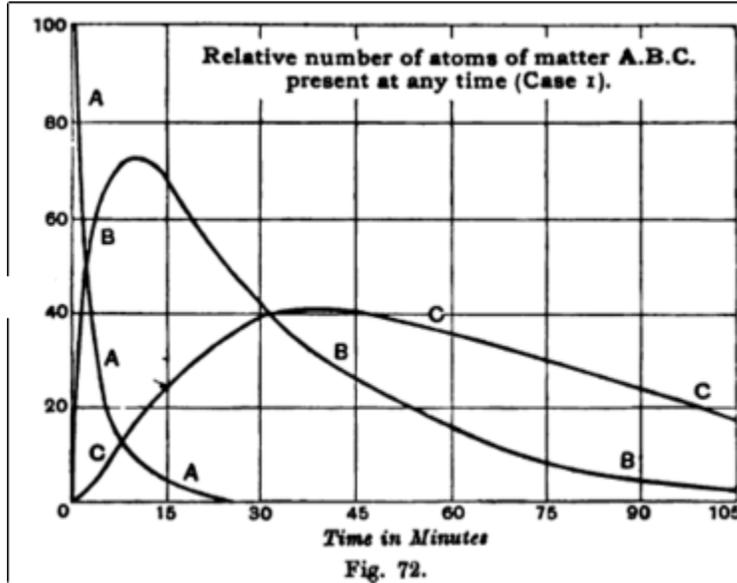
Sostituendo questo valore nell'equazione 9-2, si può facilmente mostrare che

$$(9.0.13) \quad R = n (ae^{-\lambda_1 t} + be^{-\lambda_2 t} + ce^{-\lambda_3 t})$$

dove

$$a = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)} \quad b = \frac{-\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3)} \quad c = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

La variazione dei valori di  $P, Q, R$  con il tempo  $t$ , dopo la rimozione della sorgente, è mostrata graficamente in Figura 72, curve A, B e C rispettivamente.



Per tracciare le curve per il caso pratico che considereremo in seguito corrispondente alla prima delle tre trasformazioni nel radio A, i valori di  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  erano rispettivamente  $3.85 \cdot 10^{-2}, 5.38 \cdot 10^{-4}, 4.13 \cdot 10^{-4}$ , cioè i tempi di dimezzamento richiesti per ogni successivo tipo di materia sono rispettivamente circa 3, 21 e 28 minuti.

Le ordinate delle curve rappresentano il numero relativo di atomi della materia  $A, B, C$  esistente in ogni istante e il valore di  $n$ , il numero originario di atomi della materia A depositata, presa come 100. La quantità di materia B è inizialmente zero, e in questo particolare caso, passa attraverso un massimo circa 10 minuti dopo per poi diminuire con il tempo. In un modo simile, la quantità di C passa attraverso un massimo circa 37 minuti dopo la rimozione. Dopo un intervallo di parecchie ore la quantità sia di B che di C diminuisce molto approssimativamente secondo una legge esponenziale con il tempo, dimezzandosi dopo un intervallo rispettivamente di 21 e 28 minuti.

**198. Caso 2.** Una sorgente primaria fornisce la materia A a un tasso costante e il processo è continuato così a lungo che la quantità dei prodotti  $A, B, C, \dots$  ha raggiunto un valore stazionario limite. La sorgente primaria è poi rapidamente rimossa. Si richiede di trovare le quantità di  $A, B, C, \dots$  rimanenti in ogni istante successivo  $t$ .

In questo caso, il numero  $n_0$  di particelle di A, depositato per secondo dalla sorgente, è uguale al numero di particelle di A che cambia in B per secondo, e di B in C, e così via. Ciò richiede la relazione

$$(9.0.14) \quad n_0 = \lambda_1 P_0 = \lambda_2 Q_0 = \lambda_3 R_0$$

dove  $P_0, Q_0, R_0$  sono il numero massimo di particelle della materia  $A, B, C$  quando è raggiunto uno stato stazionario.

I valori di  $P, Q, R$  in ogni istante dopo la rimozione della sorgente sono dati da equazioni della stessa forma delle 9-3 e 9-5 per una breve esposizione. Ricordando la condizione che inizialmente

$$\begin{aligned} P &= P_0 = \frac{n_0}{\lambda_1} \\ Q &= Q_0 = \frac{n_0}{\lambda_2} \\ R &= R_0 = \frac{n_0}{\lambda_3} \end{aligned}$$

si può facilmente mostrare che

$$(9.0.15) \quad P = \frac{n_0}{\lambda_2} e^{-\lambda_1 t}$$

$$(9.0.16) \quad Q = \frac{n_0}{\lambda_1 - \lambda_2} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t} \right)$$

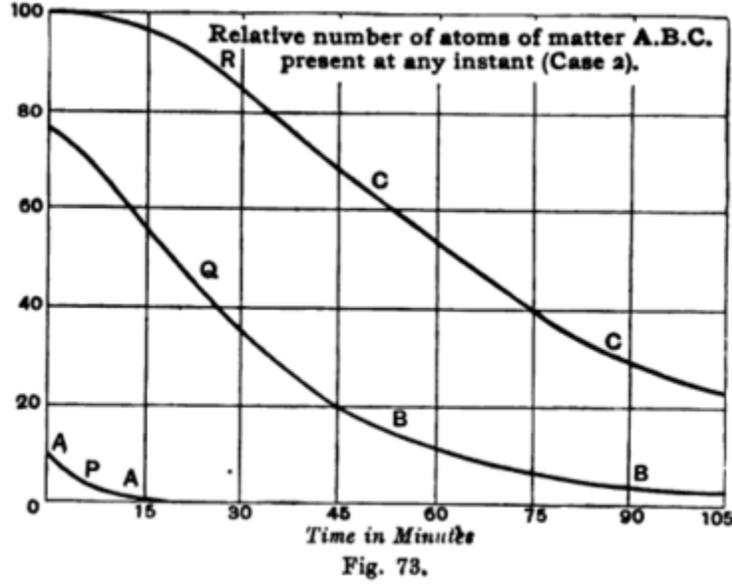
(9.0.17)

$$R = n_0 (ae^{-\lambda_1 t} + be^{-\lambda_2 t} + ce^{-\lambda_3 t})$$

dove

$$a = \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)} \quad b = \frac{-\lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3)} \quad c = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

Il numero relativo di atomi di  $P, Q, R$  esistenti in qualsiasi tempo sono mostrati in Figura 73, rispettivamente curve A, B, C.



Il numero di atomi  $R_0$  è preso come 100 per il confronto e i valori di  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  sono presi corrispondenti alle trasformazioni di 3, 21, 28 minuti nel deposito attivo del radio. Un confronto con la Figura 72 per una breve esposizione fa venire alla luce molto chiaramente la variazione nelle quantità relative di  $P, Q, R$  nei due casi. Inizialmente la quantità di  $R$  decresce molto lentamente. Questo è un risultato del fatto che la provvista di  $C$  dovuta alla rottura di  $B$  dapprima quasi compensa la rottura di  $C$ . I valori di  $Q$  e  $R$  dopo parecchie ore diminuisce esponenzialmente, dimezzandosi in 28 minuti.

**199. Caso 3.** Supponiamo che una sorgente primaria fornisca la materia  $A$  ad un tasso costante per un tempo  $T$  e che venga poi rapidamente rimossa. Si richiedono le quantità di  $A, B, C$  in ogni istante successivo.

Supponiamo che  $n_0$  particelle della materia  $A$  siano depositate ogni secondo. Dopo un tempo di esposizione  $T$ , il numero di particelle  $P_T$  della materia  $A$  presente è dato da

$$P_T = n_0 \int_0^T e^{-\lambda_1 t} dt = \frac{n_0}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 T})$$

Ad un tempo  $t$ , dopo la rimozione della sorgente, il numero di particelle  $P$  della materia  $A$  è dato da

$$P = P_T e^{-\lambda_1 t} = \frac{n_0}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 T}) e^{-\lambda_1 t}$$

Consideriamo il numero di particelle  $n_0 dt$  della materia  $A$  prodotte durante l'intervallo  $dt$ . In un tempo successivo  $t$ , il numero di particelle  $dQ$  della materia  $B$ , che deriva dalla trasformazione in  $A$ , è data da (si veda l'equazione 9-4)

$$(9.0.18) \quad dQ = \frac{n_0 \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 T}) dt = n_0 f(t) dt$$

Dopo un tempo di esposizione  $T$ , il numero di particelle  $Q_T$  della materia  $B$  presente è data da

$$Q_T = n_0 [f(T) dt + f(T - dt) + \dots + f(0) dt] = n_0 \int_0^T f(t) dt$$

Se il corpo è rimosso dall'emissione dopo un'esposizione  $T$ , in ogni istante successivo  $t$  il numero di particelle di  $B$  è nello stesso modo dato da

$$Q = n_0 \int_t^{T+t} f(t) dt$$

Si noterà che il metodo di deduzione di  $Q_T$  e  $Q$  è indipendente dalla particolare forma della funzione  $f(t)$ .

Sostituendo il particolare valore di  $f(t)$  dato nell'equazione 9-10 e integrando, si può facilmente dedurre che

$$(9.0.19) \quad \frac{Q}{Q_T} = \frac{ae^{-\lambda_2 t} - be^{-\lambda_1 t}}{a - b}$$

dove

$$a = \frac{1-e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2} \quad b = \frac{1-e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_1}$$

Analogamente, il numero di particelle  $R$  della materia  $C$  presente in ogni istante di tempo può essere dedotta dalla sostituzione del valore di  $f(t)$  nella equazione 9-5. Queste equazioni sono, tuttavia, troppo complesse nella forma per semplici applicazioni agli esperimenti e non saranno qui considerate.

**200. Caso 4.** *La materia  $A$  è fornita ad un tasso costante da una sorgente primaria. Si richiede di trovare il numero di particelle di  $A, B, C$  in ogni istante successivo  $t$ , quando  $A, B, C$  sono inizialmente assenti.*

La soluzione può essere semplicemente ottenuta nel modo seguente. Supponiamo che le condizioni del Caso 2 siano verificate. I prodotti  $A, B, C$  sono in equilibrio radioattivo e sia  $P_0, Q_0, R_0$  il numero di particelle di ciascuno presenti. Supponiamo che la sorgente sia rimossa. I valori di  $P, Q, R$  in ogni istante successivo. I valori di  $P, Q, R$  in ogni istante successivo sono dati rispettivamente dalle equazioni 9-7, 9-8, 9-9. Supponiamo ora che la sorgente, che è stata rimossa, continui ancora a rifornire  $A$  con lo stesso tasso costante e sia  $P_1, Q_1, R_1$  il numero di particelle di  $A, B, C$  ancora presenti con la sorgente in ogni istante successivo. Abbiamo visto che il tasso di trasformazione di ogni prodotto singolo, considerato da sé, è indipendente dalle condizioni ed è lo stesso sia con la materia mescolata con la sostanza padre sia rimossa da essa. Poiché i valori di  $P_0, Q_0, R_0$  rappresentano uno stato stazionario dove il tasso di rifornimento di ogni tipo di materia è uguale al suo tasso di trasformazione, la somma del numero di particelle  $A, B, C$  presente in ogni istante con la sorgente e nella materia dalla quale è rimossa, deve in ogni istante essere uguale a  $P_0, Q_0, R_0$ , cioè

$$\begin{aligned} P_1 + P &= P_0 \\ Q_1 + Q &= Q_0 \\ R_1 + R &= R_0 \end{aligned}$$

Così deve essere ovviamente essere altrimenti vi dovrebbe essere una distruzione o creazione di materia mediante semplici processi di separazione della sorgente dai suoi prodotti; ma, per ipotesi, né il tasso di rifornimento dalla sorgente né la legge di cambiamento dei prodotti sono stati alterati dalla rimozione.

Sostituendo i valori di  $P, Q, R$  dalle equazioni 9-7, 9-8, 9-9, otteniamo

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{P_0} &= 1 - e^{-\lambda_1 t} \\ \frac{Q_1}{Q_0} &= 1 - \frac{(\lambda_1 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 t})}{\lambda_1 - \lambda_2} \\ \frac{R_1}{R_0} &= 1 - \lambda_3 (a e^{-\lambda_1 t} + b e^{-\lambda_2 t} + c e^{-\lambda_3 t}) \end{aligned}$$

dove  $a, b, c$  hanno i valori dati dopo la 9-9. Le curve che rappresentano l'aumento di  $P, Q, R$  sono, pertanto, in tutti i casi, complementari alle curve mostrate in Figura 73. La somma delle ordinate delle due curve di crescita e decadimento in ogni istante è uguale a 100. Abbiamo già visto esempi di questo nel caso delle curve di decadimento e recupero di  $UrX$  e  $ThX$ .

**201. Attività di una miscela di prodotti.** Nei calcoli precedenti abbiamo visto come il numero di particelle di ognuno dei successivi prodotti vari in funzione del tempo in diverse condizioni. È ora necessario considerare come questo numero sia collegato all'attività della miscela di prodotti.

Se  $N$  è il numero di particelle di un prodotto, il numero delle particelle che si rompono ogni secondo è  $\lambda N$ , dove  $\lambda$  è la costante di trasformazione. Se ogni particella di ogni prodotto, rompendosi, emette una particella  $\alpha$ , vediamo che il numero di particelle  $\alpha$  espulse al secondo da una miscela di prodotti in ogni istante è uguale a  $\lambda_1 P + \lambda_2 Q + \lambda_3 R + \dots$ , dove  $P, Q, R, \dots$  sono i numeri delle particelle dei prodotti successivi  $A, B, C, \dots$ . Sostituendo i valori di  $P, Q, R$  già trovati in ognuno dei quattro casi precedentemente considerati, si può determinare la variazione del numero di particelle  $\alpha$  espulse al secondo in funzione del tempo.

Il metodo ideale di misura dell'attività di ogni miscela di prodotti radioattivi dovrà determinare il numero di particelle  $\alpha$  o  $\beta$  da esso espulse al secondo. In pratica, tuttavia, ciò è sconveniente e anche molto difficile sperimentalmente.

Alcune difficoltà pratiche sorgono nel tentativo di confrontare l'attività di un prodotto con un altro. Vedremo in seguito che, in molti casi, non tutti i prodotti successivi emettono raggi  $\alpha$ . Alcuni emettono solo raggi  $\beta$  o  $\gamma$ , mentre vi sono parecchi prodotti "senza raggi", cioè, prodotti che non emettono né raggi  $\alpha$ , né  $\beta$  o  $\gamma$ . Nel caso del radio, per esempio, il radio A emette solo raggi  $\alpha$ , il radio B nessun raggio, mentre il radio C emette raggi  $\alpha, \beta, \gamma$ .

In pratica, l'attività relativa di ogni singolo prodotto in ogni istante è usualmente determinata dalle misure relative della corrente di saturazione di ionizzazione prodotta tra gli elettrodi di un opportuno contenitore di misura.

Si consideri, per esempio, il caso di un prodotto che emette solo raggi  $\alpha$ . Il passaggio delle particelle  $\alpha$  attraverso il gas produce un grande numero di ioni lungo il suo cammino. Poiché le particelle  $\alpha$  da ogni singolo prodotto, sono scagliate con la stessa velocità media in tutte le condizioni, la quantità relativa della ionizzazione prodotta per secondo nel contenitore di misura rappresenta un metodo accurato per determinare la variazione nella sua attività. Due prodotti, tuttavia, non emettono particelle  $\alpha$  con la stessa velocità media. Abbiamo visto che i raggi da alcuni prodotti sono più facilmente fermati nel gas di altri. Allora, la corrente di saturazione relativa, dovuta ai due diversi prodotti in un contenitore di misura, non serve come metodo accurato di confronto tra i relativi numeri di particelle  $\alpha$  espulse al secondo. Il rapporto tra le correnti dipenderà in generale dalla distanza tra le piastre del contenitore di misura e, a meno che la ionizzazione relativa dovuta

alla particella  $\alpha$  media dai due prodotti sia nota da altri dati, il confronto delle correnti può, al massimo, essere solo una guida approssimata al numero relativo di particelle  $\alpha$  sfuggite nel gas.

**202.** Considereremo ora alcuni esempi per mostrare come i fattori, sopra considerati, influenzino il carattere delle curve di attività ottenute in diverse condizioni sperimentali. A scopo illustrativo, considereremo la variazione dopo la rimozione dell'attività eccitata su un corpo esposto per tempi diversi al rifornimento continuo dell'emanazione del radio. Il deposito attivo consiste in generale di una miscela dei prodotti radio  $A, B, C$ . La natura dei raggi prodotti da ognuno, il tempo di trasformazione per ogni prodotto e il valore di  $\lambda$  sono tabulati sotto per comodità:

Prodotto	Raggi	$T$	$\lambda$ ( $sec^{-1}$ )
Radio A	raggi $\alpha$	3 min	$3.85 \cdot 10^{-3}$
Radio B	nessun raggio	21 min	$5.38 \cdot 10^{-4}$
Radio C	raggi $\alpha, \beta, \gamma$	28 min	$4.13 \cdot 10^{-4}$

Poiché solo il prodotto  $C$  emette raggi  $\beta$  e  $\gamma$ , l'attività misurata da uno di questi tipi di raggi sarà proporzionale alla quantità di  $C$  presente in ogni istante, cioè il valore di  $R$  in ogni istante. Per una lunga esposizione, la variazione di attività in funzione del tempo misurata dai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  sarà rappresentata, pertanto, dalla curva superiore  $CC$  della Figura 73, dove le ordinate rappresentano l'attività. Questa curva si vedrà essere molto simile nella forma alla curva sperimentale per una lunga esposizione che è data nella Figura 68.

Poiché il radio  $B$  non emette raggi, il numero di particelle  $\alpha$  espulse dal deposito attivo al secondo è proporzionale a  $\lambda_1 P + \lambda_2 R$ . L'attività misurata dai raggi  $\alpha$ , usando il metodo elettrico, è, pertanto, proporzionale in ogni istante a  $\lambda_1 P + K \lambda_2 R$ , dove  $K$  è una costante che rappresenta il rapporto tra il numero di ioni, prodotti nel contenitore di misura, da una particella  $\alpha$  da  $C$  e quelli da una particella  $\alpha$  emessa da  $A$ .

Si vedrà in seguito che, per questo caso particolare,  $K$  è quasi uno. Ponendo  $K = 1$ , l'attività in ogni istante dopo la rimozione è proporzionale a  $\lambda_1 P + \lambda_2 R$ .

CASO 1. Consideriamo per prima la curva dell'attività per un'esposizione breve all'emanazione del radio. I valori relativi di  $P, Q, R$  in ogni istante corrispondenti a questo caso sono graficamente mostrati in Figura 74. L'attività misurata dai raggi  $\alpha$  in ogni istante sarà la somma delle attività dovute separatamente ad  $A$  e  $C$ .

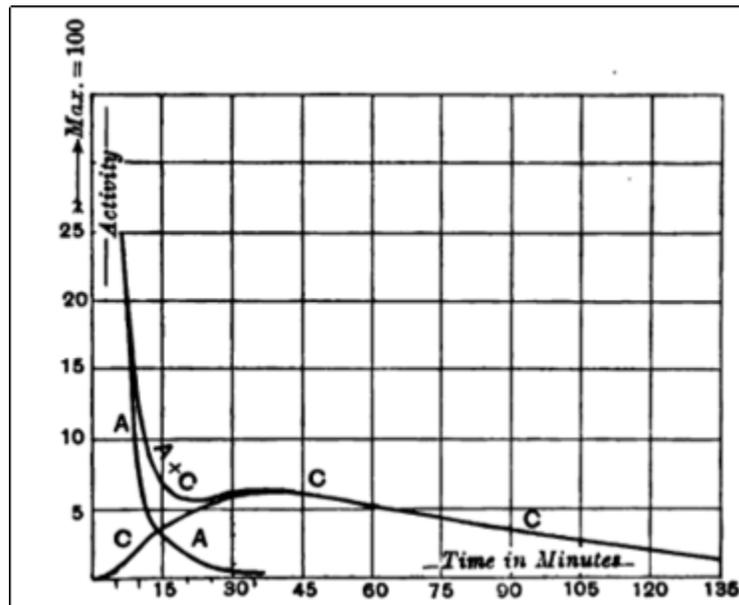


Fig. 74.

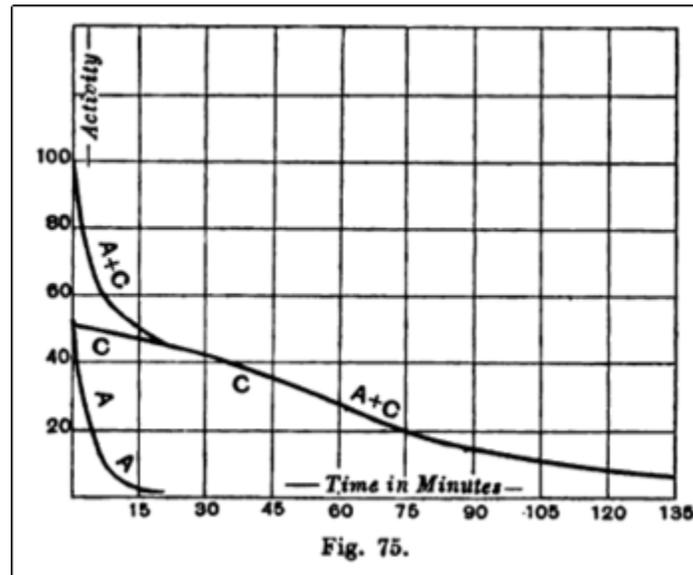
La curva  $AA$  (Figura 74) rappresenta l'attività dovuta ad  $A$ . Questa decresce esponenzialmente, dimezzandosi in 8 minuti. Per mostrare la piccola attività dovuta a  $C$  chiaramente nella figura, l'attività dovuta ad  $A$  è disegnata dopo un intervallo di 6 minuti, quando l'attività si è ridotta al 25% del suo massimo valore. L'attività dovuta a  $C$  è proporzionale a  $\lambda_2 R$ , e per rappresentare l'attività dovuta a  $C$  nella stessa scala di  $A$ , è necessario ridurre la scala delle ordinate della curva  $CC$  in Figura 72 nel rapporto  $\frac{\lambda_3}{\lambda_1}$ .

L'attività dovuta a  $C$  è allora rappresentata dalla curva  $CCC$ , Figura 74. L'attività totale è rappresentata da una curva  $A+C$  le cui ordinate sono la somma delle ordinate di  $A$  e  $C$ .

Questa curva teorica dell'attività è simile nei suoi tratti generali alla curva sperimentale mostrata in Figura 66, dove l'attività per una esposizione molto breve è misurata dai raggi  $\alpha$ .

CASO 2. Considereremo ora la curva di attività per una lunga esposizione all'emanazione. L'attività dopo la rimozione di  $A$  e  $C$  è proporzionale a  $\lambda_1 P + \lambda_2 R$ , dove i valori di  $P$  e  $R$  sono mostrati graficamente in Figura 75 dalle curve  $AA, CC$ .

Inizialmente dopo la rimozione,  $\lambda_1 P_0 = \lambda_3 R_0$ , poiché A e C sono in equilibrio radioattivo e si rompe lo stesso numero di particelle di ogni prodotto per secondo. L'attività dovuta solo ad A è mostrata nella curva AA della Figura 75. L'attività decresce esponenzialmente, dimezzandosi in 3 minuti. L'attività dovuta a C in ogni istante è proporzionale a  $R$  ed è inizialmente uguale a quella di A. La curva dell'attività dovuta a C è, pertanto, rappresentata dalla curva CC, che è la stessa curva della curva superiore CC della Figura 73. L'attività di A e C insieme è rappresentata dalla curva superiore A+C (Figura 75), dove le ordinate sono uguali alla somma delle ordinate delle curve A e C. Questa curva teorica è simile nella forma alla curva sperimentale (Figura 67) mostrante il decadimento dell'attività del deposito attivo per una lunga esposizione misurata dai raggi  $\alpha$ .



**203. Effetto di una trasformazione senza raggi sulle curve di attività.** Alcuni casi importanti si presentano nell'analisi delle trasformazioni radioattive, quando uno dei prodotti non emette raggi e non può essere rivelato direttamente. La presenza di queste trasformazioni può, tuttavia, essere facilmente osservata dalle variazioni che avvengono nell'attività del prodotto successivo.

Si consideri, per esempio, il caso in cui la materia inattiva A, inizialmente tutta di un tipo, si trasformi nella materia B che emette raggi. La materia inattiva A è supposta essere trasformata secondo la stessa legge dei prodotti radioattivi. Siano rispettivamente  $\lambda_1, \lambda_2$  le costanti della trasformazione di A in B. Se  $n$  è il numero di particelle di A, inizialmente presenti, vediamo dalla equazione 9-4, sezione 197, che il numero di particelle della materia B presente in ogni istante è data da

$$Q = \frac{n\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

Differenziando e uguagliando a zero, si vede che il valore di  $Q$  passa attraverso un massimo ad un tempo  $T$  dato dall'equazione

$$\lambda_2 e^{-\lambda_2 T} = \lambda_1 e^{-\lambda_1 T}$$

Per meglio illustrare, considereremo la variazione dell'attività del deposito attivo del torio, dovuta ad una esposizione molto breve all'emanazione. Il torio A non produce raggi e il torio B emette raggi  $\alpha, \beta, \gamma$ , mentre il torio C è inattivo.

La materia A è per metà trasformata in 11 ore, e quella B in 55 minuti. Il valore di  $\lambda_1 = 1.75 \cdot 10^{-5} s^{-1}$  e  $\lambda_2 = 2.08 \cdot 10^{-4} s^{-1}$ . L'attività della mescolanza dei prodotti A+B è dovuta al solo B e sarà, di conseguenza, sempre proporzionale alla quantità di B presente, cioè, al valore di  $Q$ .

La variazione dell'attività in funzione del tempo è mostrata graficamente in Figura 76. L'attività sale da zero a un massimo in 220 minuti e poi decade, decrescendo alla fine, secondo una legge esponenziale, con dimezzamento in 11 ore.

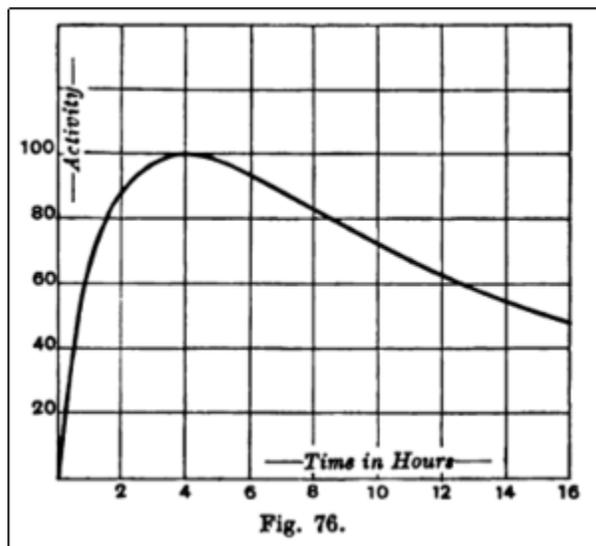


Fig. 76.

Questa curva teorica è in stretto accordo nella forma con la curva sperimentale (Figura 65), che mostra la variazione dell'attività del deposito attivo del torio, prodotto da una breve esposizione alla presenza dell'emanazione.

Vi sono parecchi punti di interesse in connessione con una curva di attività con queste caratteristiche. L'attività, alcune ore dopo la rimozione, decade secondo una legge esponenziale, non allo stesso ritmo del prodotto B, dal quale l'attività deriva, ma allo stesso tasso della prima trasformazione senza raggi. Così sarà anche se il prodotto senza raggi ha un tasso più basso del cambiamento del successivo prodotto attivo. Data una curva di attività del tipo della Figura 76, possiamo da essa dedurre che la prima trasformazione non è accompagnata da raggi e così anche il periodo delle due trasformazioni in questione. Non siamo, tuttavia, in grado di determinare dalla curva a quale dei periodi di cambiamento si riferisce il prodotto. Si vede che la curva di attività è invariata se i valori di  $\lambda_1, \lambda_2$ , cioè, se i periodi dei prodotti sono interscambiati, purché l'equazione sia simmetrica in  $\lambda_1, \lambda_2$ . Per esempio, nel caso del deposito attivo del torio, senza ulteriori dati è impossibile decidere se il periodo della prima trasformazione ha un valore di 55 minuti o di 11 ore. In tali casi la questione può essere risolta solo usando alcuni metodi chimici o fisici per separare il prodotto A dal B, e poi misurare separatamente il tasso di decadimento della loro attività. In pratica, ciò può sovente essere compiuto con elettrolisi o utilizzando la differenza in volatilità dei due prodotti. Se un prodotto è separato dalla miscela di A e B che perde la propria attività secondo una legge esponenziale, dimezzandosi in 55 minuti (cosa sperimentalmente osservabile), possiamo concludere che il prodotto attivo B ha il periodo di 55 minuti.

L'aspetto caratteristico della curva di attività mostrato in Figura 76 diviene meno evidente con l'aumento del tempo di esposizione di un corpo all'emanazione, cioè, quando sempre più B è mescolato con A nel momento della rimozione. Per un lungo tempo di esposizione, quando i prodotti A e B sono in equilibrio radioattivo, l'attività dopo la rimozione è proporzionale a  $Q$ , dove

$$Q = \frac{n_0}{\lambda_1 - \lambda_2} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t} \right)$$

(si veda l'equazione 8, sezione 198). Il valore di  $Q$ , in questo caso, non aumenta dopo la rimozione, ma subito inizia a diminuire. L'attività, di conseguenza, decresce dal momento della rimozione, ma più lentamente di quanto previsto da una legge esponenziale. L'attività infine decade esponenzialmente, come nel caso precedente, dimezzando in 11 ore.

Nel caso precedente abbiamo discusso la curva di attività ottenuta quando i prodotti attivo e inattivo hanno tassi di trasformazione comparativamente rapidi. In certi casi che sorgono nell'analisi delle trasformazioni in attinio e radio, il prodotto senza raggi ha un tasso di cambiamento estremamente lento se paragonato a quello del prodotto attivo. Ciò corrisponde al caso in cui la materia attiva B è fornita da A ad un tasso costante. La curva di attività sarà, pertanto, identica nella forma con le curve di recupero del  $ThX$  e del  $UrX$ , cioè, l'attività  $I$  in ogni istante  $t$  sarà rappresentata dall'equazione  $\frac{I}{I_0} = 1 - e^{-\lambda_2 t}$ , dove  $I_0$  è il valore massimo dell'attività e  $\lambda_2$  la costante di trasformazione di B.

**204.** In questo capitolo abbiamo considerato la variazione in funzione del tempo, in diverse condizioni, del numero di atomi dei prodotti successivi, quando sono dati il periodo e il numero di trasformazioni. Si è visto che le curve di attività attese in varie condizioni possono essere facilmente dedotte dalla semplice teoria. In pratica, tuttavia, il ricercatore si è trovato di fronte molte più difficoltà nel problema inverso di dedurre il periodo, il numero e le caratteristiche dei prodotti, mediante l'analisi delle curve ottenute in diverse condizioni.

Nel caso del radio, dove si hanno almeno sette distinte trasformazioni, il problema è stato di considerevole difficoltà ed una soluzione è stata possibile solo ideando speciali metodi fisici e chimici di isolamento di parte dei prodotti.

Vedremo in seguito che due trasformazioni senza raggi si hanno nel radio e nell'attinio e una nel torio. È a prima vista un fatto sorprendente che la presenza di una sostanza che non emette raggi possa essere rivelata e le sue proprietà

analizzate. Questo è possibile solo quando il prodotto senza raggi è trasformato in un'altra sostanza che emette raggi; purché la variazione dell'attività di quest'ultima possa essere tale da determinare non solo il periodo ma anche le proprietà fisiche e chimiche del prodotto genitore. Nei due capitoli seguenti l'applicazione della teoria delle trasformazioni successive verrà presentata per rendere conto in modo soddisfacente dei complicati processi che avvengono nei radio-elementi.

## Prodotti di trasformazione di Uranio, Torio e Attinio.

**205.** Nell'ultimo capitolo si è considerata la teoria matematica delle trasformazioni successive. I risultati ottenuti saranno applicati per spiegare i fenomeni radioattivi osservati con uranio, torio, attinio, radio e i loro prodotti.

*Prodotti di trasformazione dell'Uranio.* Si è mostrato nelle sezioni 127 e 129 che un componente attivo  $UrX$  può essere separato dall'uranio con numerosi e diversi processi. L'attività dell' $UrX$  separato decade in funzione del tempo, dimezzandosi in circa 22 giorni. Allo stesso tempo, l'uranio, dal quale l' $UrX$  è stato separato, gradualmente recupera la sua attività persa. La legge di decadimento dell' $UrX$  e del recupero dell'attività persa dell'uranio sono espresse dalle equazioni

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t} \quad e \quad \frac{I_t}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

dove  $\lambda$  è la costante radioattiva dell' $UrX$ . La sostanza  $UrX$  è prodotta dall'uranio ad un tasso costante e la costante radioattiva osservata nell'uranio rappresenta uno stato di equilibrio, dove il tasso di produzione di nuova materia attiva è bilanciato dal tasso di trasformazione dell' $UrX$  già prodotto.

I processi radioattivi che avvengono nell'uranio presentano numerosi punti di differenza dai processi che avvengono nel torio e nel radio. In primo luogo, l'uranio non produce emanazione e, di conseguenza, non produce nemmeno attività eccitata sui corpi. Così è stato osservato nell'uranio un solo prodotto attivo,  $UrX$  che differisce dal  $ThX$  e dall'emanazione poiché la radiazione da esso prodotta consiste quasi interamente di raggi  $\beta$ . Questa peculiarità della radiazione dall' $UrX$  inizialmente portò a qualche confusione nell'interpretazione delle osservazioni sull' $UrX$  e sull'uranio dal quale era stato separato. Se esaminato con il metodo fotografico, l'uranio liberato dall' $UrX$  non mostrava alcuna attività, mentre l' $UrX$  la possedeva in quantità significativa. Con il metodo elettrico, d'altro canto, i risultati ottenuti erano esattamente il contrario. L'uranio liberato dall' $UrX$  mostrava una perdita di attività molto piccola, mentre l'attività dell' $UrX$  era molto piccola. La spiegazione di questi risultati fu data da Soddy<sup>1</sup> e da Rutherford e Grier<sup>2</sup>. I raggi  $\alpha$  dell'uranio sono fotograficamente quasi inattivi, ma producono la maggior parte della ionizzazione nel gas. I raggi  $\beta$ , d'altro canto, producono una forte azione fotografica, ma una ionizzazione molto piccola rispetto a quella dei raggi  $\alpha$ . Quando l' $UrX$  è separato dall'uranio, quest'ultimo non emette dapprima raggi  $\beta$ . Nel corso del tempo nuovo  $UrX$  è prodotto dall'uranio e cominciano ad apparire i raggi  $\beta$ , aumentando gradualmente in intensità fino a raggiungere il valore iniziale mostrato prima della separazione dall' $UrX$ .

Per determinare le curve di recupero dell'uranio dopo la separazione dell' $UrX$ , fu pertanto necessario misurare il tasso di aumento dei raggi  $\beta$ . Ciò avvenne ricoprendo l'uranio con uno strato di alluminio di sufficiente spessore per assorbire tutti i raggi  $\alpha$  e poi misurando la ionizzazione dovuta ai raggi in un dispositivo simile alla Figura 17.

L'uranio non risultava inattivo se misurato con il metodo elettrico. Becquerel<sup>3</sup> affermò di essere in grado di ottenere uranio inattivo, ma nei suoi esperimenti l'uranio era ricoperto con uno strato di carta annerita, che doveva assorbire completamente i raggi  $\alpha$ . Non vi sono prove che la radiazione  $\alpha$  dall'uranio sia stata alterata o in caratteristiche o in quantità da un trattamento chimico. I raggi  $\alpha$  appaiono essere inseparabili dall'uranio e mostreremo in seguito che il torio e il radio così come l'uranio possiedono un'attività non separabile consistente solo di raggi  $\alpha$ . Le trasformazioni che avvengono nell'uranio devono allora essere considerate di due tipi, (1) la trasformazione che emette i raggi  $\alpha$  e il prodotto  $UrX$ , (2) la trasformazione che emette i raggi  $\beta$  dall' $UrX$ .

La possibilità di separare l' $UrX$ , che dà origine ai raggi  $\beta$  dell'uranio, mostra che i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  sono prodotti del tutto indipendentemente l'uno dall'altro e da materia con diverse proprietà chimiche.

Seguendo le considerazioni generali discusse nella sezione 136 possiamo supporre che ogni secondo alcuni degli atomi di uranio - una frazione molto piccola del numero totale presente basterà - diviene instabile e si spezza, espellendo particelle  $\alpha$  dotate di grande velocità. L'atomo di uranio, meno una particella  $\alpha$ , diviene l'atomo della nuova sostanza,  $UrX$ . Questa a sua volta è instabile e si spezza con l'espulsione di una particella  $\beta$  e la comparsa di un raggio  $\gamma$ .

Le trasformazioni che avvengono nell'uranio sono graficamente mostrate in Figura 77.

<sup>1</sup>Soddy, Trans. Chem. Soc. 81, p. 460, 1902.

<sup>2</sup>Rutherford e Grier, Phil. Mag. settembre 1902.

<sup>3</sup>Becquerel, C. R. 131, p. 137, 1900.

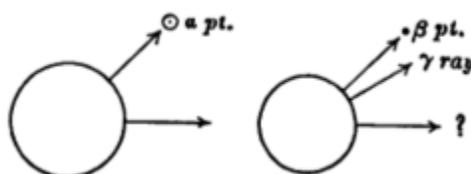


Fig. 77.

Da questo punto di vista l'attività  $\alpha$  dell'uranio dovrà essere una proprietà intrinseca dell'uranio e non separabile da essa con metodi fisici o chimici. L'attività  $\beta$  e  $\alpha$  dell'uranio è una proprietà di  $UrX$ , che differisce nelle proprietà chimiche dalla sostanza genitrice e può in ogni istante essere completamente rimossa da essa. Il prodotto finale, dopo il decadimento dell' $UrX$ , è così poco attivo che la sua attività non è stata sinora osservata. Vedremo in seguito (capitolo XIII) che vi sono alcuni motivi di credere che le trasformazioni nell'uranio non terminano a questo punto ma continuano attraverso uno o più stadi, dando origine alla fine al radio, o in altre parole che il radio è un prodotto della disintegrazione dell'atomo di uranio.

Meyer e Schweidler<sup>4</sup>, in un recente articolo, affermano che l'attività dovuta alle preparazioni di uranio aumenta alquanto in un contenitore chiuso. Rimuovendo l'uranio, tuttavia, non si osserva più alcuna attività residua. Essi considerano che questo effetto possa essere dovuto ad una emanazione emessa dall'uranio con una vita molto breve.

**206. Effetto di cristallizzazione sull'attività dell'uranio.** Meyer e Schweidler<sup>5</sup> recentemente osservarono che il nitrato di uranio, dopo certi metodi di trattamento, mostrava spiccate variazioni nella sua attività, misurata con i raggi  $\beta$ . L'attività  $\alpha$ , d'altro canto, era inalterata. Un poco di nitrato di uranio era disciolto in acqua e poi mescolato con etere e la parte di etere estratta. I primi esperimenti di Crookes mostrarono che, con questo metodo, l'uranio nella porzione di etere era fotograficamente inattivo. Ciò è spiegato semplicemente supponendo che l'uranio  $X$  è insolubile nell'etere e, di conseguenza, rimane nella frazione d'acqua. La frazione di etere gradualmente riguadagnava la sua attività  $\beta$  al tasso normale atteso se  $UrX$  era prodotto dall'uranio a tasso costante, recuperando metà della sua attività finale in circa 22 giorni. Una parte dell'uranio nella frazione d'acqua era cristallizzato e posto sotto un elettroscopio. L'attività  $\beta$  all'inizio cadeva rapidamente dimezzandosi nel corso di quattro giorni. L'attività rimaneva poi costante e non si osservava alcun ulteriore cambiamento nell'arco di un mese. Altri esperimenti furono fatti con cristalli di nitrato di uranio, che non era stato trattato con etere. Il nitrato veniva disciolto in acqua e uno strato di cristalli separato. L'attività  $\beta$  di questi cristalli cadeva dapprima rapidamente, variando un poco il tasso in diversi esperimenti, ma raggiungeva un valore minimo dopo circa cinque giorni. L'attività  $\beta$  poi cresceva ancora ad un ritmo più lento per parecchi mesi.

Il rapido calo di attività dei cristalli sembrava, a prima vista, indicare che la cristallizzazione era in grado in qualche modo di alterare l'attività dell'uranio.

Il dr. Godlewski, lavorando nel laboratorio di chi scrive, ripeté il lavoro di Meyer e Schweidler e ottenne risultati con caratteristiche simili, ma il calo iniziale di attività variava sia in ritmo che in quantità in diversi esperimenti. Questi risultati furono dapprima molto sorprendenti e difficili da spiegare, perché il liquido madre, rimasto dopo la rimozione dei cristalli, non mostrava la corrispondente crescita iniziale, attendibile se la variazione di attività era dovuta alla parziale separazione di un nuovo prodotto dell'uranio.

La causa di questo effetto era, tuttavia, resa molto evidente da alcuni esperimenti ben costruiti fatti da Godlewski. Il nitrato di uranio era disciolto in acqua calda in un piatto e poteva cristallizzare sotto l'elettroscopio. Fino al momento della cristallizzazione l'attività  $\beta$  rimaneva costante, ma appena i cristalli cominciarono a formarsi nella parte superiore della soluzione, l'attività  $\beta$  rapidamente cresceva nel giro di pochi minuti a cinque volte il valore iniziale. Dopo aver raggiunto il massimo, l'attività decresceva molto gradualmente verso il valore normale. Se, tuttavia, il piatto dei cristalli era rovesciato, l'attività  $\beta$  era inizialmente inferiore al normale, ma aumentava tanto rapidamente quanto prima diminuiva.

La spiegazione di questo effetto è semplice.  $UrX$  è molto solubile in acqua e, inizialmente, non cristallizza con l'uranio, ma rimane in soluzione e, di conseguenza, quando inizia la cristallizzazione nella parte alta del contenitore lo strato superiore del liquido diviene più ricco di  $UrX$ . Poiché i raggi  $\beta$  provengono solo dal prodotto  $UrX$  e non dall'uranio stesso, e l' $UrX$  è quasi del tutto confinato nello strato superiore, una maggiore proporzione di raggi  $\beta$  sfuggono rispetto a quando l' $UrX$  è uniformemente distribuito sullo strato spesso di uranio. Quando la quantità di acqua aggiunta è tale da consentire la cristallizzazione, l' $UrX$  nello strato superiore dei cristalli gradualmente diffonde attraverso la massa e, di conseguenza, l'attività della superficie superiore diminuisce e cresce quella dello strato inferiore. Una spiegazione simile si applica agli effetti osservati da Meyer e Schweidler. La frazione d'acqua, rimasta dopo il trattamento con l'etere, conteneva tutto l' $UrX$ . Il primo strato di cristalli formatosi conteneva un poco di  $UrX$  e questo era per la maggior parte confinato nello strato superiore dei cristalli. La quantità di raggi  $\beta$  inizialmente diminuiva a causa della graduale diffusione dell' $UrX$  dalla superficie. Nel primo esperimento, la quantità di  $UrX$  presente era in equilibrio radioattivo con l'uranio e, dopo il calo iniziale, l'attività  $\beta$  rimaneva costante. Nel secondo esperimento, la graduale crescita era dovuta al fatto che i cristalli

<sup>4</sup>Meyer e Schweidler, Wien. Ber. 1 dicembre 1904.

<sup>5</sup>Meyer e Schweidler, Wien. Ber. 113, luglio 1904.

di uranio prima formati contenevano meno della quantità all'equilibrio di  $Ux$ . Dopo la discesa a un minimo, l'attività  $\beta$ , di conseguenza, saliva ancora lentamente verso il valore di equilibrio.

Questi effetti mostrati dall'uranio sono di grande interesse e illustrano in modo straordinario la differenza nelle proprietà di  $Ux$  e dell'uranio. La graduale diffusione dell' $Ux$  per tutta la massa di cristalli è degna di nota. Mediante misure della variazione in funzione del tempo dell'attività  $\beta$ , dovrebbe essere possibile dedurre il suo tasso di diffusione nella massa cristallizzata.

*Trasformazione dei prodotti del Torio.*

**207. Analisi del deposito attivo.** I processi radioattivi che avvengono nel torio sono ancora più complicati di quelli dell'uranio. È già stato mostrato nel capitolo VI che un prodotto radioattivo  $ThX$  è continuamente emesso dal torio. Questo  $ThX$  si spezza, dando origine all'emanazione radioattiva. Quest'ultima produce un tipo di materia attiva che è depositata sulla superficie dei corpi, dove produce i fenomeni di attività eccitata o indotta. Questo deposito attivo possiede alcune proprietà chimiche e fisiche distintive che lo differenziano dall'emanazione e dal  $ThX$ . Abbiamo visto (sezione 180) che il tasso al quale il deposito attivo perde la propria attività dipende dal tempo di esposizione del corpo reso attivo dall'emanazione. Considereremo ora la spiegazione delle curve di attività per diversi tempi di esposizione.

La curva di variazione dell'attività per una breve esposizione di 10 minuti è già stata data in Figura 65. L'attività è piccola inizialmente ma cresce rapidamente con il tempo; passa attraverso un massimo circa 4 ore dopo, e infine decade esponenzialmente con il tempo, dimezzando in 11 ore.

Questo effetto notevole può essere completamente spiegato<sup>6</sup> se si suppone che il deposito attivo consiste di due sostanze distinte. La materia inizialmente depositata dall'emanazione, che sarà chiamata torio A, si suppone che cambi in torio B. Il torio A è trasformato in accordo con la consueta legge esponenziale, ma il cambiamento non è accompagnato da raggi ionizzanti. In altre parole, la trasformazione da A a B è "senza raggi". D'altronde, B si spezza in C con l'accompagnamento di tutti e tre i tipi di raggi. Da questo punto di vista l'attività del deposito attivo in ogni istante rappresenta la quantità di sostanza B presente, poiché C è inattivo o attivo per un periodo molto breve.

Se la variazione dell'attività impartita a un corpo esposto per un breve intervallo alla presenza dell'emanazione del torio, è dovuta al fatto che vi sono due trasformazioni successive nella materia depositata A, la prima delle quali è "senza raggi", l'attività  $I_t$  in ogni istante dopo la rimozione sarà proporzionale al numero  $Q_t$  di particelle della materia B presente in ogni istante. Dall'equazione 9-4 della sezione 197, si è mostrato che

$$Q = \frac{\lambda_1 n}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

Il valore di  $Q_t$  passa per un massimo a  $Q_T$  all'istante  $T$  quando

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)T}$$

L'attività massima  $I_T$  è proporzionale a  $Q_T$  e

$$\frac{I_t}{I_T} = \frac{Q_t}{Q_T} = \frac{e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}}{e^{-\lambda_2 T} - e^{-\lambda_1 T}}$$

Mostreremo in seguito che la variazione con il tempo dell'attività, impartita a un corpo da una breve esposizione, è espressa dall'equazione della forma di quella sopra. Rimangono, pertanto, da fissare i valori di  $\lambda_1, \lambda_2$ . Poiché l'equazione sopra è simmetrica rispetto a  $\lambda_1, \lambda_2$ , non è possibile stabilire dall'accordo tra la curva teorica e sperimentale quale valore di  $\lambda$  si riferisce alla prima trasformazione. La curva di variazione dell'attività con il tempo è inalterata se i valori di  $\lambda_1, \lambda_2$  sono scambiati.

Si è trovato sperimentalmente che l'attività 5 o 6 ore dopo la rimozione decade molto approssimativamente in accordo con una legge esponenziale, dimezzandosi in 11 ore. Questo è il normale tasso di decadimento del torio per tutti i tempi di esposizione, purché le misure inizino solo parecchie ore dopo la rimozione del corpo attivo dall'emanazione.

Ciò fissa i valori delle costanti di una delle trasformazioni. Si assuma per il momento che ciò fornisca il valore di  $\lambda_1$ .

Allora  $\lambda_1 = 1.75 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Poiché l'attività massima è raggiunta dopo un intervallo  $T = 220$  minuti (si veda la Figura 65), sostituendo i valori di  $\lambda_1$  e  $T$  nell'equazione, si otterrà come valore di  $\lambda_2$

$$\lambda_2 = 2.08 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

Questo valore di  $\lambda_2$  corrisponde ad un cambiamento nel quale metà materia è trasformata in 55 minuti.

Sostituendo i valori di  $\lambda_1, \lambda_2, T$ , l'equazione si riduce a

$$\frac{I_t}{I_T} = 1.37 (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

L'accordo tra i risultati dell'equazione teoria e i valori osservati è mostrato nella seguente tabella:

<sup>6</sup>Rutherford, Phil. Trans. A. 204, pp. 169-219, 1904.

Tempo in minuti	Valore teorico di $\frac{I_t}{I_T}$	Valori osservati di $\frac{I_t}{I_T}$
15	0.22	0.23
30	0.38	0.37
60	0.64	0.63
120	0.90	0.91
220	1.00	1.00
305	0.97	0.96

Dopo 5 ore l'attività diminuiva quasi esponenzialmente con il tempo, dimezzandosi in 11 ore.

Si è visto, pertanto, che la curva di crescita dell'attività per una breve esposizione è spiegata in modo molto soddisfacente dalla supposizione che si hanno due trasformazioni nella materia depositata, la prima delle quali è senza raggi.

Ulteriori dati sono richiesti per fissare quali costanti di tempo delle trasformazioni si riferiscono alla prima di queste. Per risolvere questo punto, è necessario isolare uno dei prodotti delle trasformazioni ed esaminare la variazione della sua attività in funzione del tempo. Se, per esempio, si può separare un prodotto la cui attività dimezza in 55 minuti, si mostrerà che la seconda trasformazione è la più rapida delle due. Pegram<sup>7</sup> ha esaminato i prodotti radioattivi ottenuti per elettrolisi delle soluzioni del torio.

I tassi di decadimento dei prodotti attivi dipendevano dalle condizioni, ma trovò che, in parecchi casi, si ottenevano prodotti rapidamente decadenti, la cui attività si dimezzava in circa 1 ora. Ammettendo per probabilità che il prodotto esaminato non fosse completamente isolato dall'elettrolisi, ma contenesse anche una traccia dell'altro prodotto, questo risultato indicherà che l'ultima trasformazione che produce raggi è la più rapida delle due.

Questo punto è molto chiaramente portato alla luce da alcuni esperimenti di Miss Slater<sup>8</sup>, che aveva fatto un esame dettagliato dell'effetto della temperatura sul deposito attivo del torio.

Un filo di platino fu reso attivo mediante l'esposizione per un lungo intervallo all'emanazione del torio e poi riscaldato per qualche minuto ad una temperatura desiderata per mezzo della corrente elettrica. Il filo, mentre era riscaldato, era circondato da un cilindro di piombo affinché ogni materia da esso espulsa fosse raccolta sulla sua superficie. Il decadimento dell'attività sia del filo sia del cilindro di piombo era poi misurato separatamente. Dopo il riscaldamento a uno spento calor rosso, non si osservava inizialmente alcuna diminuzione dell'attività, ma il tasso di decadimento dell'attività sul filo era più rapido del normale. L'attività del cilindro di piombo era piccola inizialmente ma aumentava a un massimo dopo 4 ore per poi decadere al tasso normale con il tempo.

Questi risultati sono attesi se un poco di torio A è volatilizzato dal filo; la crescita dell'attività sul cilindro di piombo è molto simile a quella osservata su un filo esposto per un breve tempo alla presenza dell'emanazione del torio, cioè nella condizione che solo il torio sia inizialmente presente.

Riscaldando il filo sopra i 700 °C l'attività si riduceva, mostrando che un poco di torio B era stato rimosso. Riscaldando per pochi minuti a circa 1000 °C quasi tutto il torio A era andato via. L'attività sul filo decadeva poi esponenzialmente con il tempo, dimezzandosi in circa 1 ora. Dopo il riscaldamento per un minuto a circa 1200 °C tutta l'attività era rimossa. Questi risultati mostrano che il torio A è più volatile del B e che il prodotto che emette raggi, cioè torio B, ha un periodo di circa 55 minuti.

Venne fatta un'altra serie di esperimenti, nei quali un disco di alluminio attivo era posto in un tubo svuotato ed esposto alla scarica dei raggi catodici. In queste condizioni, una parte dell'attività del disco era rimossa. Quando il disco diveniva l'anodo, la perdita di attività era di solito tra il 20 e il 60% per una esposizione di mezzora. Se il disco era usato come catodo, la perdita era molto maggiore, raggiungendo il 90% in 10 minuti. Parte della materia attiva rimossa dal disco era raccolta su un secondo disco posto nella vicinanze. Questo secondo disco, una volta rimosso, perdeva la propria attività ad un ritmo molto più rapido del consueto. Anche il tasso di decadimento sul primo disco era alterato in quanto l'attività a volte aumentava anche dopo la rimozione. Questi risultati indicano che, in questo caso, l'apparente volatilità dei prodotti è invertita. Il torio B è espulso dal disco più facilmente del torio A. I tassi di decadimento ottenuti in diverse condizioni furono soddisfacentemente spiegati supponendo che le superfici dei dischi dopo l'esposizione alla scarica erano rivestite con diverse proporzioni di torio A e B.

L'allontanamento del torio B dal disco per effetto della scarica sembra piuttosto essere il risultato di un'azione simile alla ben nota "polverizzazione" degli elettrodi che a un diretto ruolo della temperatura.

I risultati ottenuti da von Lerch<sup>9</sup> sull'elettrolisi di una soluzione del deposito attivo ammettono pure una simile interpretazione. Furono ottenuti prodotti sugli elettrodi con diversi tassi di decadimento, che si dimezzavano in tempi variabili tra 1 e 5 ore. Questa variazione è dovuta alla mescolanza dei due prodotti in diverse proporzioni. L'evidenza supporta, pertanto, la conclusione che il deposito attivo dal torio subisce le due seguenti successive trasformazioni:

- (1) Una trasformazione "senza raggi" per la quale  $\lambda_1 = 1.75 \cdot 10^{-5}$ , cioè nella quale metà materia è trasformata in 11 ore.

<sup>7</sup>Pegram, Phys. Rev. p. 424, dicembre 1903.

<sup>8</sup>Miss Slater, Phil. Mag. 1905.

<sup>9</sup>von Lerch, Ann. de Phys. novembre 1903.

- (2) Una seconda trasformazione che produce raggi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , per la quale  $\lambda_2 = 2.08 \cdot 10^{-4}$ , cioè, nella quale metà materia è trasformata in 55 minuti<sup>10</sup>.

È, a prima vista, un risultato inaspettato che il tasso finale di decadimento del deposito attivo dal torio determini il tasso di cambiamento non dell'ultimo prodotto stesso, ma del prodotto precedente, che non produce alcuna radiazione.

Una simile particolarità si osserva nel decadimento dell'attività eccitata dell'attinio, che è discussa nella sezione 212.

Per una lunga esposizione alla presenza di un costante rifornimento di emanazione del torio, l'equazione che esprime la variazione dell'attività con il tempo è data dall'equazione 9-8, sezione 198,

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} = \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(1 - 0.083 e^{-1.90 \cdot 10^{-4} t}\right)$$

Circa 5 ore dopo la rimozione, il secondo termine in parentesi diviene molto piccolo e, dopo quel tempo, l'attività decadrà in buon accordo con una legge esponenziale con il tempo, dimezzandosi in 11 ore. Per un tempo di esposizione  $T$ , l'attività all'istante  $t$  dopo la rimozione (si veda l'equazione 9-1, sezione 199) è data da

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{Q}{Q_T} = \frac{ae^{-\lambda_2 t} - be^{-\lambda_1 t}}{a - b}$$

dove  $I_0$  è il valore iniziale dell'attività, immediatamente dopo la rimozione, e

$$a = \frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2} \qquad b = \frac{1 - e^{-\lambda_1 T}}{\lambda_1}$$

Dalla variazione di  $T$  possono essere dedotte dall'equazione in modo accurato le curve di variazione dell'attività per ogni durata di esposizione, quando si sostituiscono i valori delle due costanti  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ . Miss Brooks<sup>11</sup> ha esaminato le curve di decadimento dell'attività eccitata per il torio per diversi tempi di esposizione e ha osservato un sostanziale accordo tra esperimenti e teoria.

I risultati sono mostrati graficamente in Figura 78. Il massimo valore dell'attività è, per ogni durata dell'esposizione, preso come 100. I valori teorici e quelli osservati sono mostrati in figura.

<sup>10</sup>La trasformazione "senza raggi" certamente non produce raggi  $\alpha$  e speciali esperimenti mostrarono l'assenza di una quantità valutabile di raggi  $\beta$ . D'altro canto, la seconda trasformazione emette tutti e tre i tipi di raggi.

<sup>11</sup>Miss Brooks, Phil. Mag. settembre 1904.

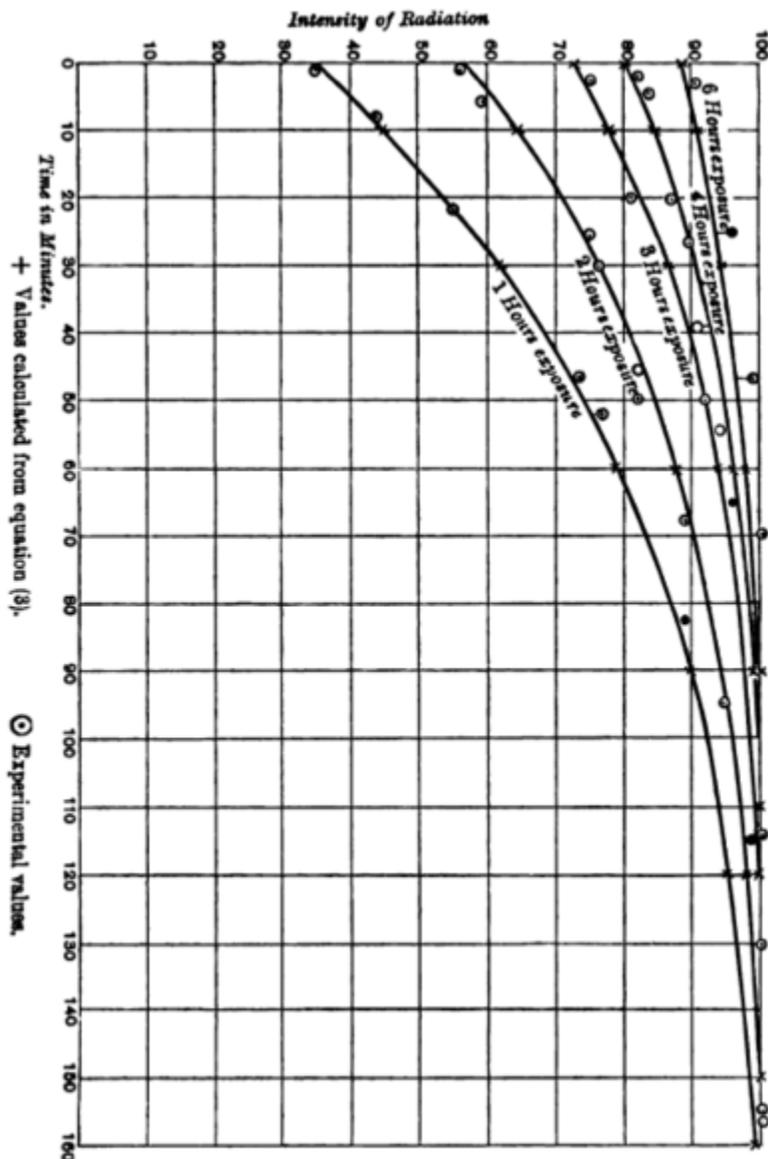


Fig. 78.

**208. Analisi delle curve di decadimento e recupero del  $ThX$ .** Considereremo ora le peculiarità delle parti iniziali della curve di decadimento e recupero rispettivamente del  $Thx$  e del torio (Curve A e B, Figura 47, sezione 128). Si era mostrato che quando il  $ThX$  è rimosso dal torio per precipitazione con ammoniaca, la radiazione aumentava di circa il 15% durante il primo giorno, passava per un massimo per poi diminuire secondo una legge esponenziale, dimezzandosi in 4 giorni. Nello stesso tempo l'attività dell'idrossido separato diminuiva per il primo giorno, passava per un minimo e poi lentamente cresceva ritornando al suo valore iniziale dopo un tempo di circa un mese.

Quando un composto di torio è in una condizione di equilibrio radioattivo, le serie di trasformazioni nelle quali il  $ThX$ , l'emanazione e il torio A e B sono prodotti, vanno avanti simultaneamente. Poiché una condizione di equilibrio è stata raggiunta per ognuno di questi prodotti, la quantità di ogni prodotto che cambia nell'unità di tempo è uguale alla quantità di quel prodotto fornito dalla precedente trasformazione nell'unità di tempo. La materia  $ThX$  è solubile in ammoniaca, mentre il torio A e B non lo sono. Il  $ThX$  è, pertanto, rimosso dal torio per precipitazione con ammoniaca, ma A e B rimangono con il torio. Poiché il deposito attivo è prodotto dall'emanazione, che a sua volta deriva dal  $ThX$ , rimuovendo la materia genitore  $ThX$ , la radiazione dovuta a questo deposito attivo decadrà, poiché il tasso di produzione di nuova materia non bilancia più a lungo il suo tasso di trasformazione. Trascurando l'iniziale irregolarità nella curva di decadimento del deposito attivo, la sua attività si dimezzerà in circa 11 ore e avrà un quarto del valore dopo 22 ore. Non appena, tuttavia, il  $ThX$  è stato separato, nuovo  $ThX$  è prodotto nel composto di torio. L'attività di questo nuovo  $ThX$  non è, tuttavia, sufficiente a compensare da subito la perdita di attività dovuta alla trasformazione in deposito attivo, cosicché l'attività dapprima diminuirà, passerà per un minimo per poi aumentare ancora.

La correttezza di questa spiegazione è stata testata da Rutherford e Soddy<sup>12</sup> come segue: Se l'idrossido di torio precipitato dopo la rimozione del *ThX* passa attraverso una serie di precipitazioni con ammoniaca a brevi intervalli, il *ThX* è rimosso quasi nello stesso momento in cui si forma, e, nello stesso tempo, l'attività del torio B nel torio decade.

La tabella seguente indica i risultati ottenuti. Una parte dell'idrossido precipitato era rimosso dopo ogni serie di precipitazioni e la sua attività misurata nel modo consueto.

	Attività % dell'idrossido
Dopo 1 precipitazione	46
Dopo 3 precipitazioni a intervalli di 24 ore	39
Dopo altre 3 precipitazioni a intervalli di 24 ore e 3 a intervalli di 8 ore	22
Dopo altre 3 ogni 8 ore	24
Dopo altre 6 ogni 4 ore	25

Le differenze negli ultimi tre numeri non sono significative, data la difficoltà di eseguire confronti accurati dell'attività dei composti di torio precipitati in condizioni leggermente diverse. Si vede, pertanto, che, come risultato di successive precipitazioni, l'attività è ridotta a un minimo di circa il 25%. La curva di recupero dell'attività di queste 23 idrossidi precipitati è mostrata in Figura 79. Il calo iniziale nella curva è del tutto assente, e la curva, partendo dal minimo, è praticamente identica alla curva mostrata in Figura 48, che offre la curva di recupero dell'idrossido di torio dopo i primi due giorni. Questa attività residua - circa il 25% del massimo - non è separabile dal torio con nessun processo chimico utilizzato.

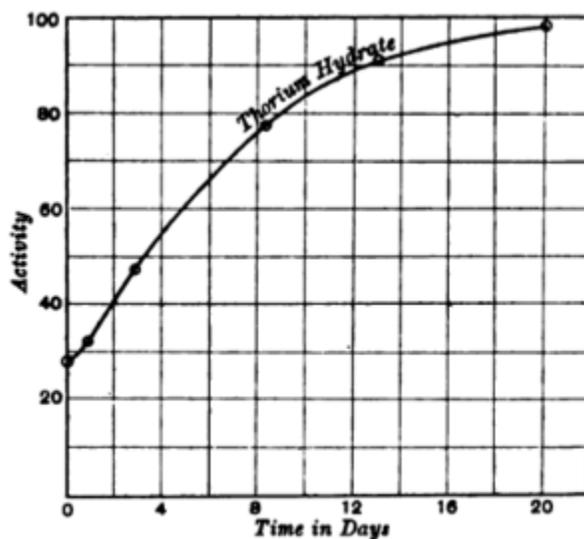


Fig. 79.

Considereremo ora la crescita iniziale dell'attività del *ThX*, dopo essere stato separato. In tutti i casi si è trovato che l'attività del *ThX* separato aumentava di circa il 15% dopo 24 ore e poi decadeva regolarmente, dimezzandosi in circa quattro giorni.

Questa particolarità della curva del *ThX* segue, necessariamente, dalle considerazioni già avanzate per spiegare la diminuzione nella curva di recupero. Non appena il *ThX* è separato, produce l'emanazione e questa, a sua volta, produce torio A e B. L'attività dovuta al torio B dapprima più che compensa il decadimento dell'attività del *ThX* stesso. L'attività totale, pertanto, aumenta fino a un massimo per poi decadere lentamente a zero in accordo con una legge esponenziale con il tempo. La curva che esprime la variazione dell'attività del *ThX* separato con il tempo si può dedurre dalla teoria delle trasformazioni successive già considerata nel capitolo IX. Nel presente caso vi sono quattro trasformazioni successive che avvengono nello stesso tempo, cioè la trasformazione di *ThX* nell'emanazione, dell'emanazione in torio A, di A in B e di B in un prodotto non attivo. Poiché, tuttavia, la trasformazione dell'emanazione in torio A (circa metà cambiata in un minuto) è assai più rapida di quella che avviene in *ThX* o in torio A e B, per scopi di calcolo si può assumere senza significativi errori che il *ThX* si trasformi subito in deposito attivo. La trasformazione di 55 minuti sarà trascurata per lo stesso motivo.

<sup>12</sup>Rutherford e Soddy, Trans. Chem. Soc. 81, p. 837, 1902. Phil. Mag. novembre 1902.

Siano  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  le costanti di decadimento dell'attività di  $ThX$  e di torio A rispettivamente. Poiché l'attività di  $ThX$  e di torio A si dimezza rispettivamente in 4 giorni e 11 ore, il valore di  $\lambda_1 = 0.0072$  e di  $\lambda_2 = 0.063$ , dove 1 ora è assunta come unità di tempo.

Il problema si riduce al seguente: *Data la materia A ( $ThX$ ) tutta di un tipo, che si trasforma in B (torio B), trovare l'attività di A e B insieme in ogni istante successivo.* Ciò corrisponde al CASO 1 (sezione 197). La quantità  $Q$  di B in un dato tempo  $T$  è data da

$$Q = \frac{\lambda_1 n_0}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

e l'attività  $I$  in ogni istante dei due insieme è proporzionale a  $\lambda_1 P + K\lambda_2 Q$ , dove  $K$  è il rapporto tra le ionizzazioni di B e A.

Allora

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{\lambda_1 P + K\lambda_2 Q}{\lambda_1 n_0} = e^{-\lambda_1 t} \left[ 1 + \frac{K\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left( 1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t} \right) \right]$$

dove  $I_0$  è l'attività iniziale dovuta a  $n_0$  particelle di  $ThX$ .

Confrontando questa equazione con la curva di variazione dell'attività di  $ThX$  in funzione del tempo, mostrata in Figura 47, si è trovato che  $K$  è quasi 0.44. Si deve ricordare che l'attività dell'emanazione e del  $ThX$  sono considerate insieme, cosicché l'attività del torio B è circa la metà di quella dei due precedenti prodotti.

I valori calcolati di  $\frac{I_t}{I_0}$  per diversi valori di  $t$  sono mostrati nella seconda colonna della seguente tabella e i valori osservati nella terza.

Tempo	Valore teorico	Valore osservato
0	1.00	1.00
0.25 giorni	1.09	—
0.5	1.16	—
1	1.15	1.17
1.5	1.11	—
2	1.04	—
3	0.875	0.88
4	0.75	0.72
6	0.53	0.53
9	0.315	0.295
13	0.157	0.152

I valori teorici e osservati sono, pertanto, in accordo entro i limiti di errore delle misure. La curva teorica è mostrata nella curva A della Figura 80 (con indicati i punti osservati per confronto). La curva B mostra la curva teorica del decadimento dell'attività di  $ThX$  e dell'emanazione, supponendo che non vi siano ulteriori cambiamenti nel deposito attivo. La curva C mostra la differenza tra la curva A e B, cioè la parte di attività in diversi istanti dovuta al deposito attivo. L'attività dovuta a quest'ultimo, pertanto, aumenta fino a un massimo circa due giorni dopo la rimozione del  $ThX$ , per poi decadere in funzione del tempo allo stesso ritmo del  $ThX$ , cioè, l'attività si dimezza ogni quattro giorni. Quando  $t$  supera i quattro giorni, il termine  $e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}$  nell'equazione teorica è molto piccolo.

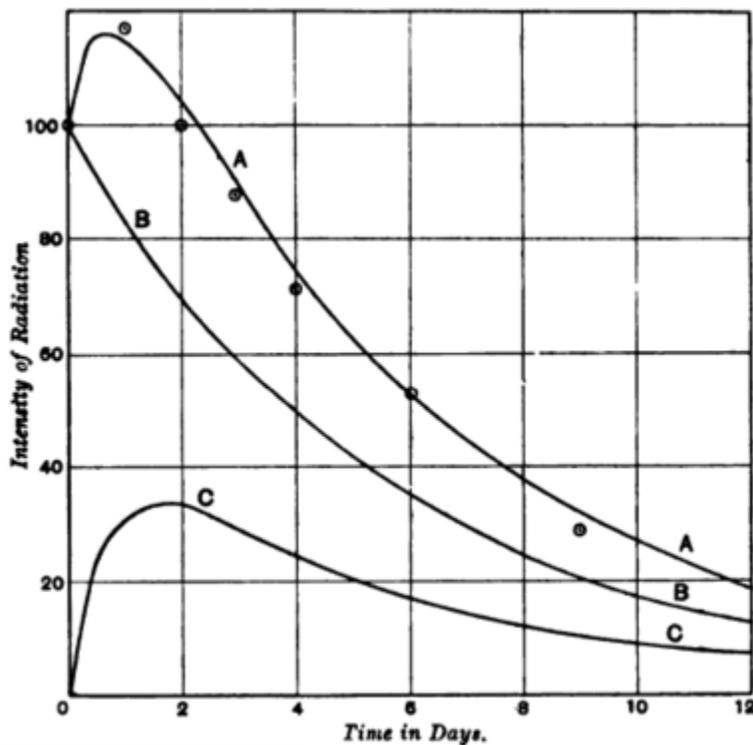


Fig. 80.

L'equazione del decadimento dopo questo tempo è quindi espressa da

$$\frac{I_t}{I_0} = \left(1 + \frac{K\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\right) e^{-\lambda_1 t}$$

cioè l'attività decade secondo una legge esponenziale in funzione del tempo.

**209. Radiazioni dai prodotti del Torio.** È stato mostrato nell'ultima sezione che l'attività del torio, per successive precipitazioni con ammoniaca, è ridotto a un valore limite di circa il 25% dell'attività iniziale. Questa "attività non separabile" consiste di raggi  $\alpha$ , essendo interamente assenti i raggi  $\beta$  e  $\gamma$ . In accordo con la teoria della disintegrazione, questa è un'espressione del fatto che la rottura iniziale dell'atomo di torio è accompagnata solo dall'espulsione di particelle  $\alpha$ . Abbiamo visto nella sezione 156 che l'emanazione del torio produce solo raggi  $\alpha$ . Nel deposito attivo, il torio A non emette raggi, mentre il torio B emette tutti e tre i tipi di raggi.

Alcune ore dopo la separazione, il *ThX* emette raggi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ma la presenza dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  è probabilmente dovuta al torio B associato con esso. L'attività  $\beta$  e  $\gamma$  del *ThX* è molto ridotta se viene continuamente aspirata una corrente d'aria attraverso la soluzione di *ThX* per rimuovere l'emanazione. Sembra probabile che se l'emanazione viene rimossa nel momento della sua formazione, così da prevenire la formazione del torio B nella sua massa, il *ThX* stesso debba emettere solo raggi  $\alpha$ ; ma, a causa del rapido tasso di cambiamento dell'emanazione del torio, è difficile una tale realizzazione sperimentale.

**210. Prodotti di trasformazione del Torio.** I prodotti di trasformazione del torio e i raggi emessi da essi sono graficamente mostrati sotto (Figura 81).

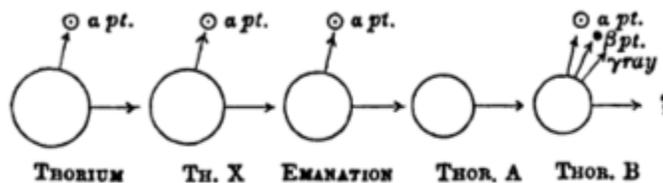


Fig. 81.

Sotto è mostrata una tabella dei prodotti della trasformazione con alcune delle loro proprietà fisiche e chimiche.

Prodotto	Tempo di dimezzamento	$\lambda s^{-1}$	Radiazioni	Proprietà fisiche e chimiche
Torio	—	—	raggi $\alpha$	Insolubile in ammoniacca
↓				
<i>ThX</i>	4 giorni	$2.00 \cdot 10^{-6}$	raggi $\alpha$	Solubile in ammoniacca
↓				
Emanazione	54 secondi	$1.28 \cdot 10^{-2}$	raggi $\alpha$	Gas inerte, condensa a $120^{\circ}C$
↓				
<i>Torio A</i>	11 ore	$1.75 \cdot 10^{-5}$	<i>nessuno</i>	Solubile in forte acido.
↓				
<i>Torio B</i>	55 minuti	$2.1 \cdot 10^{-4}$	raggi $\alpha, \beta, \gamma$	Volatile al calor bianco. B può essere separato da A per elettrolisi e per differenza di volatilità
↓				
	—	—	—	—

**211. Trasformazione dei prodotti dell'Attinio.** Si è in precedenza evidenziato (sezioni 17 e 18) che l'attinio di Debiere e l'emanio di Giesel contengono lo stesso costituente radioattivo. Entrambi producono un'emanazione di breve vita che produce attività sulla superficie dei corpi. Recentemente, grazie al Dr. Giesel di Braunschweig, preparazioni di emanio sono state messe sul mercato e la maggior parte delle investigazioni che sono descritte dopo sono state fatte con questa sostanza.

*Attinio X.* Attinio e torio hanno proprietà radioattive molto vicine tra loro. Entrambi emettono una emanazione che è rapidamente trasformata, ma il tasso di cambiamento dell'emanazione dell'attinio è ancora più rapido di quello del torio, dimezzandosi in 3.7 secondi. Miss Brooks<sup>13</sup> ha analizzato il deposito attivo dall'emanazione dell'attinio e ha mostrato che in esso avvengono due trasformazioni successive, molto simili per caratteristiche a quelle osservate nel deposito attivo del torio. Sembra, pertanto, probabile, per analogia, che un prodotto intermedio, corrispondente al *ThX* nel torio, debba essere trovato nell'attinio<sup>14</sup>. Recenti lavori hanno verificato questa ipotesi. Giesel<sup>15</sup> e Godlewski<sup>16</sup> in modo indipendente hanno osservato che una sostanza molto attiva può essere separata dall'"emanio", molto simile per proprietà chimiche e fisiche al *ThX* nel torio. Questo prodotto, sarà chiamato, per analogia, "attinio X". Lo stesso metodo, usato da Rutherford e Soddy per separare il *ThX* dal torio, è anche valido nel separare l'attinio X dall'attinio. Dopo la precipitazione della soluzione attiva con ammoniacca, l'attinio X rimane nel filtrato. Dopo evaporazione e bruciamento, rimane un residuo molto attivo. Allo stesso tempo, l'attinio precipitato perde una gran parte della propria attività.

Giesel osservò la separazione di un prodotto attivo, usando uno schermo fluorescente per rivelare le radiazioni. Un esame molto completo dell'emanazione del prodotto attinio X è stato fatto da Godlewski nel laboratorio di chi scrive.

Dopo la separazione dell'attinio, l'attività, se misurata con i raggi  $\alpha$  o  $\beta$ , aumenta di circa il 15% durante il primo giorno e, in seguito, decade esponenzialmente in funzione del tempo, dimezzandosi in 10.2 giorni. L'attività dell'attinio separato era piccola inizialmente ma aumentava con costanza nel tempo, raggiungendo un massimo dopo un intervallo di sei giorni. Dopo il primo giorno, le curve di decadimento e recupero dell'attività erano complementari tra loro. Le curve di crescita e decadimento sono mostrate graficamente in Figura 82, rispettivamente curva I e II.

<sup>13</sup>Miss Brooks, Phil. Mag. settembre 1904.

<sup>14</sup>Rutherford, Phil. Trans. A. p. 169, 1904.

<sup>15</sup>Giesel, Ber. d. D. Chem. Ges. p. 775, 1905.

<sup>16</sup>Godlewski, Nature, p. 294, 19 gennaio 1905.

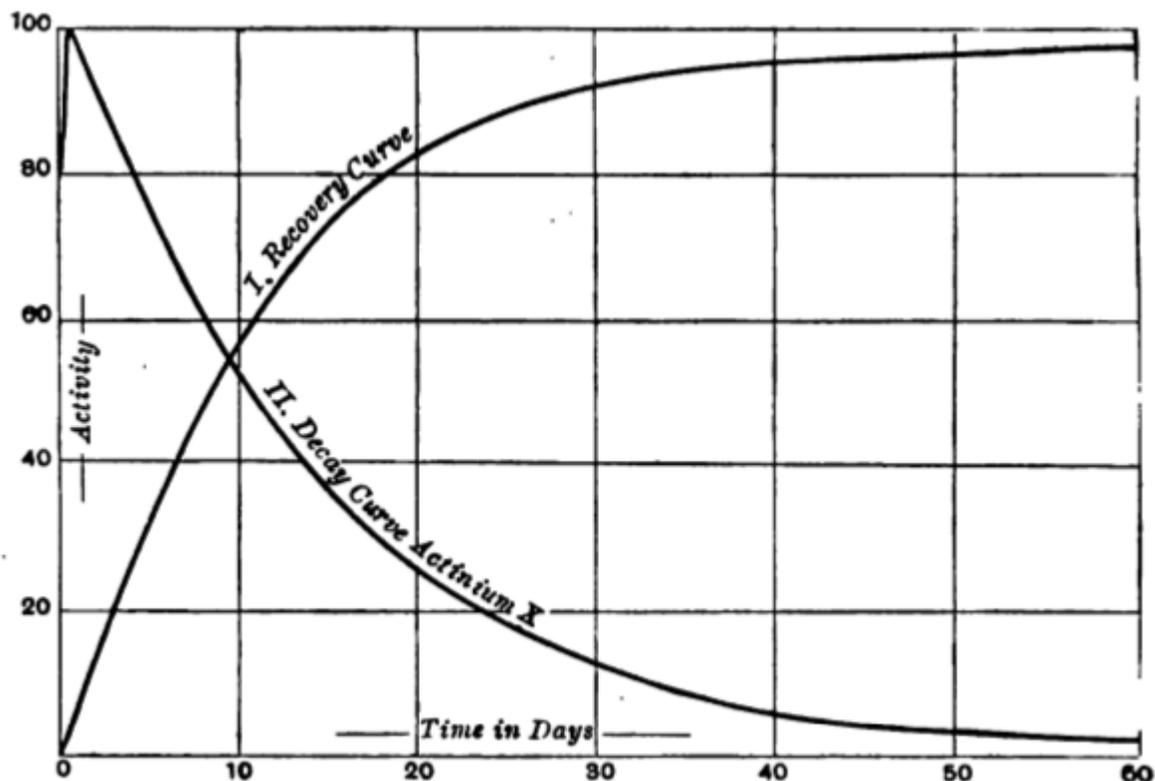


Fig. 82.

Godlewski osservò che una soluzione di attinio, priva di attinio X, produceva un'emanazione molto piccola, mentre una soluzione di attinio X produceva una grande quantità di emanazione. La quantità di emanazione dalla soluzione fu misurata osservando l'attività prodotta in un contenitore di misura, simile a quello mostrato in Figura 51, quando una corrente costante di aria passava attraverso la soluzione. Il potere emanante dell'attinio X decresceva esponenzialmente in funzione del tempo allo stesso ritmo con cui l'attinio X perdeva la propria attività. Nello stesso tempo la soluzione di attinio aumentava il proprio potere emanante, raggiungendo il suo valore iniziale dopo circa 60 giorni. Il comportamento dell'attinio e del torio è, pertanto, del tutto analogo e la spiegazione avanzata per rendere conto delle curve di decadimento e recupero del torio si applicano ugualmente bene alle corrispondenti curve dell'attinio.

L'attinio X è prodotto ad un tasso costante dalla materia genitore attinio ed è trasformato in accordo con una legge esponenziale funzione del tempo. La costante di trasformazione  $\lambda = 0.068 \text{ giorni}^{-1}$  e questo valore è caratteristico del prodotto attinio X. Come nel caso del torio, gli esperimenti sopra mostrano che l'emanazione non deriva dall'attinio stesso ma dall'attinio X. L'emanazione si spezza e dà origine a un deposito attivo sulla superficie dei corpi.

**212. Analisi del deposito attivo dall'emanazione.** Debiere<sup>17</sup> osservò che l'attività eccitata prodotta dall'attinio dimezzava in circa 41 minuti. Miss Brooks<sup>18</sup> mostrò che le curve di decadimento dell'attività eccitata dopo la rimozione dipendevano dalla durata dell'esposizione all'emanazione. Le curve per diversi tempi di esposizione sono già state mostrate in Figura 69.

Bronson, usando il metodo di deflessione diretta descritto nella sezione 69, determinò in modo accurato la curva di attività corrispondente a una breve esposizione all'emanazione dell'attinio. La curva ottenuta è mostrata in Figura 83.

<sup>17</sup>Debiere, C. R. 138, p. 411, 1904.

<sup>18</sup>Miss Brooks, Phil. Mag. settembre 1904.

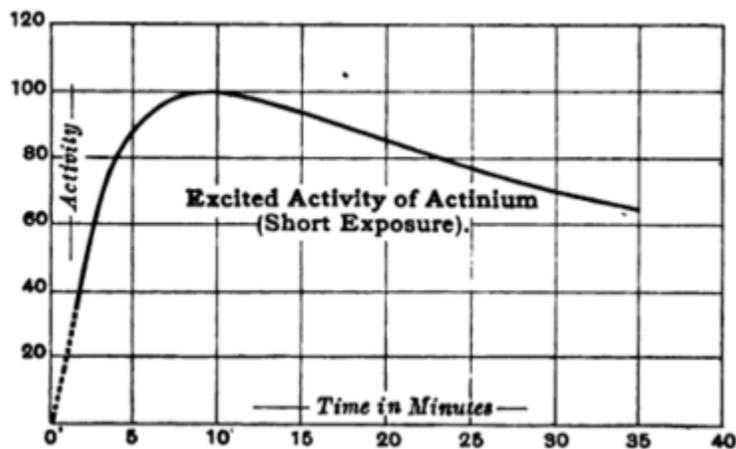


Fig. 83.

Questa curva è simile nella forma alla corrispondente curva ottenuta per il deposito attivo dal torio ed è spiegabile nello stesso modo. L'attività  $I_t$  in ogni istante è data da

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}}{e^{-\lambda_2 T} - e^{-\lambda_1 T}}$$

dove  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  sono due costanti e  $I_T$  l'attività massima raggiunta dopo un intervallo  $T$ . Dopo 20 minuti l'attività diminuiva esponenzialmente in funzione del tempo, dimezzandosi in 35.7 minuti. Si ha così il valore  $\lambda_1 = 0.0194 \text{ min}^{-1}$ . Dal confronto con la curva, il valore di  $\lambda_2$  fu trovato essere  $0.317 \text{ min}^{-1}$ . Ciò corrisponde ad una trasformazione nella quale metà materia è trasformata in 2.15 min. Esattamente come nella curva analoga per il torio, si può mostrare che la materia inizialmente depositata subisce due trasformazioni, la prima delle quali è senza raggi. La stessa difficoltà sorge nella correzione, in cui valore di  $\lambda$  si riferisce alla prima trasformazione. Un esperimento eseguito da Miss Brooks (citato) mostra che il prodotto senza raggi ha il periodo più lento di trasformazione. Il deposito attivo dell'attinio fu disciolto su un filo di platino e poi elettrolizzato. L'anodo diventava attivo e l'attività diminuiva esponenzialmente con il tempo, dimezzandosi in circa 1.5 minuti. Tralasciando per la difficoltà di una misura accurata un tale rapido tasso di decadimento, questo risultato indica che il prodotto che emette raggi ha il periodo rapido di 2.15 minuti. L'analisi del deposito attivo dell'attinio, pertanto, porta alle seguenti conclusioni:

- (1) La materia inizialmente depositata dall'emanazione, detta attinio A, non emette raggi ed è dimezzata in 35.7 minuti.
- (2) Una trasformazione in B, che è dimezzata in 2.15 minuti e produce raggi sia  $\alpha$  sia  $\beta$  (e probabilmente  $\gamma$ ).

Godlewski trovò che il deposito attivo dell'attinio era molto facilmente volatilizzabile. Un riscaldamento di parecchi minuti alla temperatura di  $100^\circ \text{C}$ , era sufficiente ad eliminare la materia attiva. Il deposito attivo è facilmente solubile in ammoniaca e in forti acidi.

**213. Radiazioni dall'attinio e suoi prodotti.** L'attinio in equilibrio radioattivo emette raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Godlewski trovò parecchi punti di distinzione tra i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  dell'attinio e del radio. I raggi  $\beta$  dell'attinio appaiono essere omogenei, perché l'attività misurata da un elettroscopio mostrò una diminuzione in accordo con una legge esponenziale in funzione dello spessore della materia attraversata. La metà dei raggi  $\beta$  era assorbita da uno spessore di alluminio di 0.21 mm. Ciò indica che le particelle  $\beta$  sono espulse dall'attinio con la stessa velocità. A questo riguardo, l'attinio si comporta in modo molto diverso dal radio, perché quest'ultimo emette particelle  $\beta$  le cui velocità variano entro un ampio intervallo.

Dopo che i raggi  $\beta$  furono assorbiti, fu osservato un altro tipo di raggi più penetranti, che probabilmente corrispondono ai raggi  $\gamma$  da altri elementi radioattivi. I raggi  $\gamma$  dell'attinio erano, tuttavia, molto meno penetranti di quelli del radio. L'attività dovuta a questi raggi era ridotta alla metà dopo il passaggio attraverso 1.0 mm di piombo, mentre lo spessore del piombo richiesto per assorbire metà dei raggi  $\gamma$  del radio è di circa 9 mm.

Il deposito attivo produceva raggi  $\alpha$  e  $\beta$  (e probabilmente  $\gamma$ ). Era difficile decidere definitivamente se l'attinio emetteva raggi  $\beta$  oltre che  $\alpha$ . Quando l'attinio X era riscaldato al calor rosso, l'attività  $\beta$  era temporaneamente ridotta a circa la metà del suo valore iniziale. Questa diminuzione era probabilmente dovuta alla rimozione del deposito attivo, il quale, come visto, è facilmente volatilizzabile con il calore. Se l'attività  $\beta$  non poteva essere ulteriormente ridotta, si poteva concludere che l'attinio X, come l'attinio B, emette raggi  $\beta$ , ma la prova ottenuta non è conclusiva.

La facilità con cui il deposito attivo si volatilizza con il calore offre una spiegazione molto semplice delle particolarità iniziali delle curve di decadimento e di recupero (Figura 82) dell'attinio X. L'attività dell'attinio X cresce inizialmente, ma non vi è alcuna diminuzione corrispondente nell'attività dell'attinio rimasto. È stato mostrato che il deposito attivo è solubile in ammoniaca e, di conseguenza, è rimosso con l'attinio X. I prodotti attinio A e B e attinio X, immediatamente dopo la separazione, sono in equilibrio radioattivo e non ci si deve, pertanto, aspettare di trovare un incremento dell'attività

dopo la rimozione, come osservato nel caso del torio, quando il torio A e B non sono rimossi con il torio X. Riscaldando l'attinio X per eliminare i sali di ammonio, una parte del deposito attivo è volatilizzata. Dopo il raffreddamento, la quantità di deposito attivo aumenta quasi al suo vecchio valore e vi è un corrispondente aumento dell'attività.

**214. Prodotti dell'Attinio.** Vi è un interessante punto di distinzione tra il comportamento radioattivo del torio e dell'attinio. Quest'ultimo dopo la rimozione dell'attinio X, mostra solo il 5% dell'attività iniziale, mentre il torio, dopo la rimozione del *ThX*, presenta sempre un'attività residua di circa il 25% del valore massimo. Questa attività residua molto piccola indica che l'attinio, se completamente liberato da tutti i suoi prodotti, non emette alcun raggio, in altre parole, la prima trasformazione nell'attinio è senza raggi.

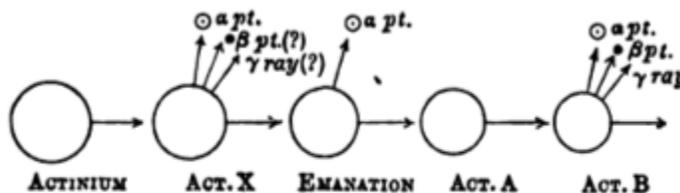


Fig. 84.

I prodotti radioattivi dell'attinio sono mostrati graficamente nella Figura 84. Alcune delle loro proprietà fisiche e chimiche sono elencate qui sotto.

Prodotti	Tempo per metà trasformazione	Raggi	Alcune proprietà fisiche e chimiche
Attinio	?	Nessun raggio	Insolubile in ammoniaca
Attinio X	10.2 <i>giorni</i>	$\alpha$ , ( $\beta$ e $\gamma$ )	Solubile in ammoniaca
Emanazione	3.9 <i>sec</i>	raggi $\alpha$	Comportamento di un gas
Attinio A	35.7 <i>min</i>	Nessun raggio	Solubile in ammoniaca e potenti acidi.
Attinio B	2.15 <i>min</i>	$\alpha$ , $\beta$ e $\gamma$	Volatilizza a 100 °C B può essere separato da A per elettrolisi

## Prodotti di Trasformazione del Radio

**215. Radioattività del radio.** Malgrado l'enorme differenza nelle loro attività, la radioattività del radio presenta molte analogie con quelle di torio e attinio. Entrambe le sostanze producono emanazione che a sua volta produce "attività eccitata" sui corpi nelle loro vicinanze. Il radio, tuttavia, non emette alcun prodotto intermedio tra l'elemento stesso e la sua emanazione, o, in altre parole, non vi è alcun prodotto nel radio che corrisponda al  $ThX$  nel torio.

Giesel per primo pose l'attenzione sul fatto che un composto di radio gradualmente aumentava in attività dopo la separazione, raggiungendo un valore costante solo dopo un intervallo di un mese. Se un composto del radio è disciolto in acqua e bollito per un certo tempo, o una corrente d'aria passa attraverso la soluzione, sull'evaporazione si è trovato che l'attività era diminuita. Lo stesso risultato è osservato se un composto solido di radio è riscaldato all'aria aperta. Questa perdita di attività è dovuta alla rimozione dell'emanazione per un processo di messa in soluzione o di riscaldamento. Consideriamo il caso di un composto di radio che è stato mantenuto per un certo tempo in soluzione in un contenitore poco profondo, esposto all'aria aperta, e poi evaporato a secco. L'emanazione che, allo stato di soluzione, era rimossa nel momento in cui si formava, è ora intrappolata e, insieme con il deposito attivo che essa produce, aggiunge le sue radiazioni a quelle del radio iniziale. L'attività aumenterà a un valore massimo quando il tasso di produzione di nuova emanazione bilancia il tasso di cambiamento di quella già prodotta.

Se ora il composto è nuovamente disciolto o riscaldato, l'emanazione sfugge. Poiché il deposito attivo non è volatile ed è insolubile in acqua, non rimosso dal processo di messa in soluzione o di riscaldamento. Poiché, tuttavia, la materia genitrice è rimossa, l'attività dovuta al deposito attivo inizierà immediatamente a decadere e nel corso di alcune ore sarà quasi scomparsa. L'attività del radio misurata dai raggi  $\alpha$  è trovata essere circa il 25% del suo valore iniziale. Questa attività residua del radio, consistente interamente di raggi  $\alpha$ , non è separabile e non è stata ulteriormente diminuita con metodi chimici o fisici.

Rutherford e Soddy<sup>1</sup> esaminarono l'effetto dell'aspirazione per lunghi intervalli di tempo attraverso una soluzione di cloruro di radio. Dopo le prime ore l'attività si riduceva al 25% e un'ulteriore aspirazione per tre settimane non si osservava alcuna diminuzione. Il radio era poi evaporato a secco e si determinava l'aumento della sua attività con il tempo. I risultati sono mostrati nella tabella seguente. L'attività finale nella seconda colonna è presa come 100. Nella colonna 3 è data la percentuale dell'attività recuperata.

Tempo in giorni	Attività	Percentuale attività recuperata
0	25.0	0
0.70	33.7	11.7
1.77	42.7	23.7
4.75	68.5	58.0
7.83	83.5	78.0
16.0	96.0	95.0
21.0	100.0	100.0

I risultati sono mostrati in Figura 85.

<sup>1</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. aprile 1903.

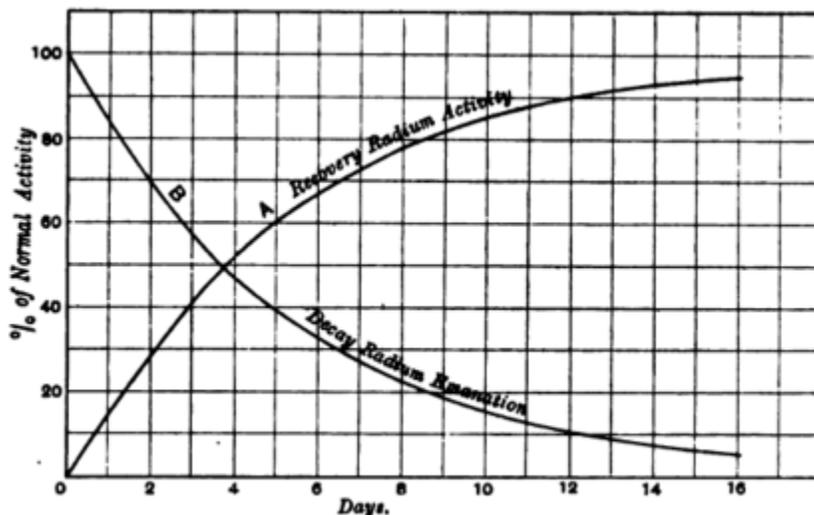


Fig. 85.

La curva di decadimento dell'emanazione del radio è mostrata nella stessa figura. La curva di recupero dell'attività persa del radio è, pertanto, analoga alle curve di recupero dell'uranio e del torio una volta liberati rispettivamente dai prodotti attivi  $UrX$  e  $ThX$ . L'intensità  $I_t$  dell'attività recuperata in ogni istante è data da  $\frac{I_t}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}$ , dove  $I_0$  è il valore finale e  $\lambda$  è la costante radioattiva dell'emanazione. Le curve di decadimento e recupero sono tra loro complementari.

Conoscendo il tasso di decadimento dell'attività dell'emanazione del radio, la curva di recupero dell'attività del radio può allora essere subito dedotta, purché tutta l'emanazione formatasi rimanga racchiusa nel composto del radio.

Quando l'emanazione è rimossa dal composto di radio mediante discioglimento o riscaldamento, l'attività misurata mediante i raggi  $\beta$  tende quasi a zero, ma aumenta nel corso di un mese al suo valore iniziale. La curva che mostra l'aumento dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  con il tempo è praticamente identica alla curva in Figura 85, che mostra il recupero dell'attività persa del radio misurata dai raggi  $\alpha$ . La spiegazione di questo risultato sta nel fatto che i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  dal radio provengono solo dal deposito attivo e che l'attività non separabile del radio emette solo raggi  $\alpha$ . Rimuovendo l'emanazione, l'attività del deposito attivo decade quasi a zero e, di conseguenza, i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  quasi scompaiono. Quando al radio è permesso di stabilizzarsi, l'emanazione inizia ad accumularsi e produce a sua volta il deposito attivo, che emette raggi  $\beta$  e  $\gamma$ . La quantità di raggi  $\beta$  e  $\gamma$  (lasciando un periodo di ritardo di alcune ore) aumenterà poi allo stesso ritmo dell'attività dell'emanazione, che è continuamente prodotta dal radio.

**216. Effetto della fuoriuscita dell'emanazione.** Se dal radio l'emanazione prodotta può sfuggire nell'aria, la curva di recupero sarà diversa da quella mostrata in Figura 85. Per esempio, supponiamo che il composto di radio rilasci ogni secondo una frazione costante  $\alpha$  della quantità di emanazione, presente nel composto in ogni istante. Se  $n$  è il numero delle particelle di emanazione presenti nel composto all'istante  $t$ , il numero di particelle di emanazione che si trasformano nel tempo  $dt$  è  $\lambda ndt$ , dove  $\lambda$  è la costante di decadimento dell'attività dell'emanazione. Se  $q$  è il tasso di produzione delle particelle di emanazione al secondo, l'aumento del numero  $dn$  nel tempo  $dt$  è dato da

$$dn = qdt - \lambda ndt - \alpha ndt$$

o

$$\frac{dn}{dt} = q - (\lambda + \alpha)n$$

La stessa equazione è ottenuta quando non sfugge alcuna emanazione, con la differenza che la costante  $\lambda + \alpha$  è sostituita da  $\lambda$ . Quando si raggiunge uno stato stazionario,  $\frac{dn}{dt} = 0$  e il massimo valore di  $n$  è uguale a  $\frac{q}{\lambda + \alpha}$ .

In assenza di emissione, il valore massimo di  $n$  è uguale a  $\frac{q}{\lambda}$ . L'emissione dell'emanazione ridurrà, pertanto, la quantità di attività recuperata nella proporzione  $\frac{\lambda}{\lambda + \alpha}$ . Se  $n_0$  è il numero finale delle particelle di emanazione accumulate nel composto, l'integrazione dell'equazione sopra dà  $\frac{n}{n_0} = 1 - e^{-(\lambda + \alpha)t}$ .

La curva di recupero dell'attività è, quindi, della stessa forma generale della curva in assenza di emanazione, ma la costante  $\lambda$  è sostituita da  $\lambda + \alpha$ .

Per esempio, se  $\alpha = \lambda = \frac{1}{463000}$ , l'equazione dell'aumento dell'attività è data da  $\frac{n}{n_0} = 1 - e^{-2\lambda t}$  e, di conseguenza, l'aumento dell'attività verso il massimo sarà molto più rapido di quello in assenza di emanazione.

Una emissione molto debole di emanazione produrrà, pertanto, una grande alterazione sia nel massimo finale sia nella curva di recupero dell'attività.

Una serie di esperimenti è stata descritta da Madame Curie nella sua *Tesi presentata alla Facoltà delle Scienze di Parigi* sul ruolo di messa in soluzione e di riscaldamento nella diminuzione dell'attività del radio. I risultati ottenuti sono in generale accordo con quanto detto sopra, che il 75% dell'attività del radio è dovuta all'emanazione e all'attività eccitata

da essa prodotta. Se l'emanazione è completamente o parzialmente rimossa mediante discioglimento o riscaldamento, l'attività del radio è corrispondentemente diminuita, ma l'attività del composto di radio è spontaneamente recuperata a causa della produzione di nuova emanazione. Una condizione di equilibrio radioattivo è raggiunta quando il tasso di produzione di nuova emanazione bilancia il tasso di trasformazione nell'emanazione accumulata nel composto. Le differenze osservate nel tasso di recupero del radio in diverse condizioni era probabilmente dovuto alle variazioni nel tasso di emissione dell'emanazione.

**217.** È stato mostrato nella sezione 152 che l'emanazione è prodotta allo stesso ritmo allo stato solido o in soluzione e che tutti i risultati ottenuti portano alla conclusione che l'emanazione è prodotta dal radio ad un tasso costante, che è indipendente dalle condizioni fisiche. Il radio, come il torio, mostra una non separabile attività del 25% dell'attività massima e consistente di soli raggi  $\alpha$ . I raggi  $\beta$  e  $\gamma$  derivano solo dal deposito attivo. L'emanazione stessa (sezione 156) emette solo raggi  $\alpha$ . Questi risultati, pertanto, hanno una spiegazione come quella per il torio (sezione 136). Gli atomi di radio si spezzano ad un ritmo costante con l'emissione di particelle  $\alpha$ . Il residuo dell'atomo di radio diviene l'atomo dell'emanazione. Questo a sua volta è instabile e si spezza con l'espulsione di una particella  $\alpha$ . L'emanazione è trasformata per metà in quattro giorni. Abbiamo visto che questa emanazione produce un deposito attivo. I risultati ottenuti a questo stadio sono mostrati con il diagramma sottostante.



**218. Analisi del deposito attivo dal radio.** Abbiamo visto nel capitolo VIII che l'attività eccitata prodotta sui corpi dall'azione dell'emanazione del radio è dovuta ad un sottile film di materia attiva depositata sulla superficie dei corpi. Questo deposito attivo è un prodotto della decomposizione dell'emanazione del radio e non ad altra azione delle radiazioni sulla superficie della materia.

Le curve che mostrano la variazione dell'attività eccitata in funzione del tempo sono molto complesse, dipendendo non solo dal tempo di esposizione alla presenza dell'emanazione, ma anche dal tipo di radiazione usata per la misura. La porzione maggiore dell'attività di questo deposito scompare nel giro di 24 ore, ma una frazione molto piccola rimane ancora, che cambia poi molto lentamente.

Mostreremo in questo capitolo che avvengono almeno sei successive trasformazioni nel deposito attivo. La materia inizialmente prodotta dall'emanazione è detta radio *A* e i prodotti successivi *B, C, D, E, F*. Le equazioni che esprimono la quantità di *A, B, C...* presente in ogni istante sono molto complicate, ma il confronto tra teoria e esperimento può essere alquanto semplificato trascurando temporaneamente alcuni termini poco importanti: per esempio, i prodotti *A, B, C* sono trasformati ad un tasso molto rapido rispetto a *D*. L'attività dovuta a  $D + E + F$  è, nella maggior parte dei casi, trascurabile rispetto ad *A* o *C*, essendo di solito minore di  $\frac{1}{100000}$  dell'attività iniziale osservata per *A* o *C*. L'analisi del deposito attivo del radio può, pertanto, essere convenientemente suddivisa in due fasi:

- (1) Analisi del deposito di rapida trasformazione, che è principalmente composto di radio *A, B, C*;
- (2) Analisi del deposito a lenta trasformazione, che è composto di radio *D, E, F*.

**219. Analisi del deposito di rapida trasformazione.** Negli esperimenti descritti sotto, una soluzione di radio era posta in un contenitore chiuso di vetro. L'emanazione poi raccolta nello spazio in aria al di sopra della soluzione. La barra, resa attiva, era introdotta attraverso un'apertura nel tappo ed esposta alla presenza dell'emanazione per un definito intervallo di tempo. Se il decadimento era misurato con i raggi  $\alpha$ , la barra diveniva l'elettrodo centrale in un contenitore cilindrico come mostrato in Figura 18. Si applicava una tensione di saturazione e si misurava la corrente tra i cilindri con un elettrometro. Se si misurava una barra molto attiva, si utilizzava un galvanometro sensibile, ma, in un tale caso, era richiesta una grande tensione per produrre saturazione. Una lenta corrente d'aria priva di polvere veniva fatta continuamente circolare attraverso il cilindro onde rimuovere l'emanazione che poteva aderire alla barra. Per esperimenti sui raggi  $\beta$  e  $\gamma$ , si è trovato consigliabile l'uso di un elettroscopio, come mostrato in Figura 12, al posto di un elettrometro. Per misure con i raggi  $\gamma$ , la barra attiva era posta sotto l'elettroscopio e prima di essere inserita nel contenitore i raggi passavano attraverso uno strato di metallo di spessore sufficiente ad assorbire tutti i raggi  $\alpha$ . Per misure con i raggi  $\gamma$ , l'elettroscopio era posto su una piastra di piombo spessa 0.6 cm e la barra attiva posta al di sotto della piastra. I raggi  $\alpha$  e  $\beta$  erano completamente bloccati dal piombo e la scarica nell'elettroscopio era allora dovuta ai soli raggi  $\gamma$ . L'elettroscopio è molto vantaggioso per le misure di questo tipo e consente accurate osservazioni in modo semplice e rapido.

La curva di decadimento dell'attività, misurata con i raggi  $\alpha$  per un'esposizione di 1 minuto in presenza dell'emanazione del radio è mostrata in Figura 86, curva BB.

La curva mostra tre fasi:

- (1) Un rapido decadimento nel corso di 15 minuti a meno del 10% del valore immediatamente dopo la rimozione;
- (2) Un periodo di 30 minuti nel quale l'attività varia molto poco;
- (3) Una graduale diminuzione quasi a zero.

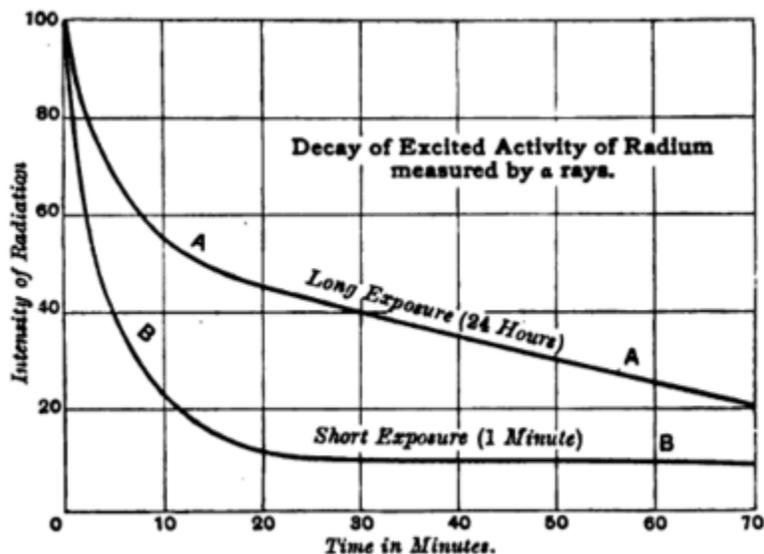


Fig. 86.

La diminuzione iniziale decade approssimativamente secondo una legge esponenziale in funzione del tempo, dimezzandosi in circa 3 minuti. Tre o quattro ore dopo la rimozione l'attività decade ancora secondo una legge esponenziale in funzione del tempo, dimezzandosi in circa 28 minuti. La famiglia delle curve ottenute per diversi tempi di esposizione sono già state mostrate in Figura 67.

Questi risultati indicano pertanto:

- (1) Un iniziale cambiamento nel quale metà materia si trasforma in 3 minuti;
- (2) Un cambiamento finale nel quale metà materia è trasformata in 28 minuti.

Prima di considerare la spiegazione della parte intermedia della curva saranno considerati ulteriori risultati sperimentali.

La curva di decadimento dell'attività eccitata per una lunga esposizione (24 ore) è mostrata graficamente in Figura 86, curva AA. Vi è inizialmente una rapida diminuzione per i primi 15 minuti a circa il 50% del valore iniziale, poi un lento decadimento e, dopo un intervallo di circa 4 ore, un graduale decadimento quasi a zero, secondo una legge esponenziale in funzione del tempo, dimezzandosi in 28 minuti.

Le curve di variazione in funzione del tempo dell'attività eccitata misurata con i raggi  $\beta$  sono mostrate graficamente nelle Figure 87 e 88.

La Figura 87 è per una breve esposizione di 1 minuto. La Figura 88 mostra il decadimento per una lunga esposizione di circa 24 ore.

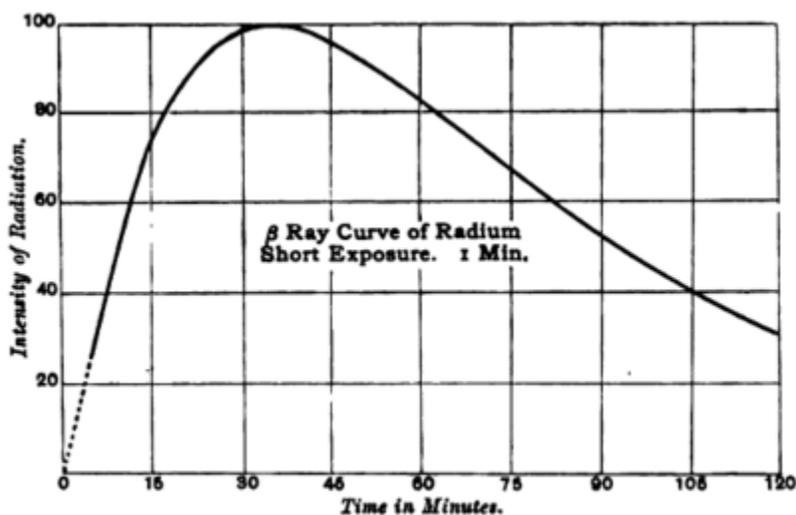


Fig. 87.

Le curve ottenute per i raggi  $\beta$  sono del tutto diverse da quelle per i raggi  $\alpha$ . Per una breve esposizione, l'attività misurata dai raggi  $\beta$  è prima piccola, poi passa per un massimo circa 36 minuti dopo la rimozione. Vi è allora una graduale diminuzione e dopo parecchie ore l'attività decade secondo una legge esponenziale, dimezzandosi, come negli altri casi, in 28 minuti.

La curva mostrata nella Figura 88 per i raggi  $\beta$  ha una forma molto simile alla corrispondente curva AA della Figura 86, per i raggi  $\alpha$ , con l'eccezione che il rapido calo iniziale osservato per i raggi  $\alpha$  è del tutto assente. Le parti finali della curva hanno una forma simile, e, trascurando i primi 15 minuti dopo la rimozione, l'attività decade esattamente allo stesso ritmo in entrambi i casi.

Le curve ottenute per mezzo dei raggi  $\alpha$  sono identiche a quelle ottenute per i raggi  $\beta$ . Questo mostra che i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  si presentano sempre insieme e nella stessa proporzione.

Aumentando il tempo di esposizione da 1 minuto a 24 ore, le curve ottenute hanno forma intermedia tra le due curve limite rappresentative, Figura 87 e 88. Alcune di queste curve sono già state mostrate in Figura 68.

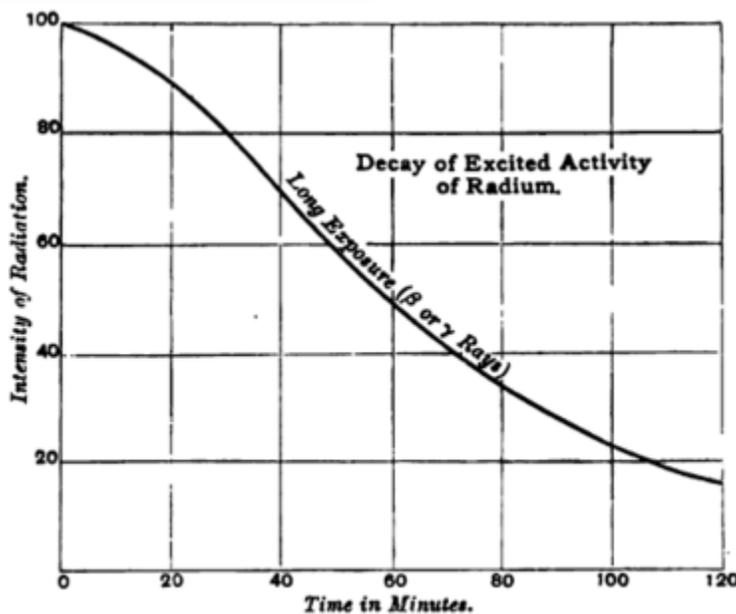


Fig. 88.

**220. Spiegazione delle curve.** È stato messo in evidenza che la rapida caduta iniziale per le curve A e B, Figura 86, è dovuta ad una trasformazione che produce raggi  $\alpha$ , nella quale metà della materia è trasformata in circa 3 minuti. L'assenza del calo nelle curve corrispondenti, misurate con i raggi  $\beta$ , mostra che la prima trasformazione di 3 minuti non emette raggi  $\beta$ ; se, infatti, producesse raggi  $\beta$ , l'attività diminuirebbe alla stesso ritmo della corrispondente curva  $\alpha$ .

È stato mostrato che l'attività parecchie ore dopo la rimozione decade in tutti i casi secondo una legge esponenziale in funzione del tempo, dimezzandosi in circa 28 minuti. Questo è il caso sia per una breve o lunga esposizione sia quando l'attività è misurata con i raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ . Ciò indica che la trasformazione finale in 28 minuti produce tutti e tre i tipi di raggi.

Si mostrerà che questi risultati possono essere completamente spiegati con l'ipotesi che le tre trasformazioni successive avvengono nella materia depositata con le seguenti caratteristiche<sup>2</sup>:

- (1) Una trasformazione della materia A inizialmente depositata nella quale metà è trasformata in circa 3 minuti.
- (2) Una seconda trasformazione "senza raggi" nella quale metà materia B è trasformata in 21 minuti.
- (3) Una terza trasformazione nella quale metà materia C è trasformata in 28 minuti. Questa emette raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

**221. Analisi delle curve  $\beta$ .** L'analisi delle trasformazioni è molto semplificata trascurando temporaneamente i primi 3 minuti. Nei 6 minuti successivi alla rimozione, tre quarti della materia A si è trasformata in B e 20 minuti dopo la rimozione tutta la materia tranne l'1% si è trasformata. La variazione della quantità di materia B e C presente in ogni istante è in stretto accordo con la teoria, se la prima trasformazione è completamente trascurata. Una discussione di questo importante aspetto è presentata più avanti (sezione 228).

Si considererà per prima la spiegazione delle curve  $\beta$  (vedi le Figure 87 e 88), ottenuta per diversi tempi di esposizione. Per una esposizione molto breve, l'attività misurata dai raggi  $\beta$  è inizialmente piccola, passa per un massimo circa 36 minuti dopo e poi decade costantemente in funzione del tempo.

La curva mostrata in Figura 87 è molto simile nella forma generale alle corrispondenti curve di torio e attinio. È, pertanto, necessario supporre che la trasformazione della materia B in C non emetta raggi  $\beta$ , mentre lo faccia quella di C in D. In un tale caso l'attività (misurata dai raggi  $\beta$ ) è proporzionale alla quantità di C presente. Trascurando il primo

<sup>2</sup>Rutherford, Phil. Trans. A. p. 169, 1904. Curie e Danne, C. R. p. 748, 1904.

rapido cambiamento, l'attività  $I_t$  in ogni istante  $t$  sarà espressa da un'equazione della stessa forma (sezione 207) del torio e attinio, cioè,

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}}{e^{-\lambda_2 T} - e^{-\lambda_1 T}}$$

dove  $I_T$  è la massima attività osservata, che è raggiunta dopo un intervallo  $T$ . Poiché l'attività infine decade secondo una legge esponenziale (dimezzandosi in 28 minuti), uno dei valori di  $\lambda$  è uguale a  $4.13 \cdot 10^{-4}$ . Come nel caso di torio e attinio, le curve sperimentali non ci consentono di stabilire se questo valore di  $\lambda$  è assegnato a  $\lambda_2$  o a  $\lambda_1$ . Da altri dati (si veda la sezione 226) si mostrerà che si riferisce a  $\lambda_2$ . Pertanto  $\lambda_2 = 4.13 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

La curva sperimentale è in stretto accordo con la teoria se  $\lambda_2 = 5.38 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

L'accordo tra teoria ed esperimento è mostrato nella tabella data di seguito. Il massimo valore  $I_T$  (che è preso pari a 100) è raggiunto al tempo  $T = 36$  minuti.

Per ottenere la curva  $\beta$ , fu adottata la seguente procedura.

Uno strato di alluminio fu posto dentro un tubo di vetro, prima svuotato. Una grande quantità di emanazione del radio era poi rapidamente introdotta aprendo il rubinetto comunicante con il contenitore dell'emanazione, che si trovava alla pressione atmosferica. L'emanazione era lasciata nel tubo per 1.5 minuti e poi era rapidamente portata via da una corrente d'aria. L'alluminio era poi rimosso e posto sotto un elettroscopio, come mostrato in Figura 12. I raggi  $\alpha$  emessi dall'alluminio erano eliminati interponendo uno schermo di alluminio dello spessore di 1 mm. Il tempo era valutato a partire da un periodo di 45 secondi dopo l'introduzione dell'emanazione.

Tempo in minuti	Valore teorico dell'attività	Valore osservato dell'attività
0	0	0
10	58.1	55
20	88.6	86
30	97.3	97
36	100	100
40	99.8	99.5
50	93.4	92
60	83.4	82
80	63.7	61.5
100	44.8	42.5
120	30.8	29

Vi è, pertanto, un buon accordo tra i valori calcolati e osservati dell'attività misurata con i raggi  $\beta$ .

I risultati sono soddisfacentemente spiegati se si suppone:

- (1) che la trasformazione di B in C (dimezzamento in 21 minuti) non emetta raggi  $\beta$ ;
- (2) che la trasformazione di C in D (dimezzamento in 28 minuti) emetta raggi  $\beta$ .

**222.** Queste conclusioni sono molto fortemente supportate dalle osservazioni del decadimento misurato dai raggi  $\beta$  per una lunga esposizione. La curva di decadimento è mostrata nelle Figure 88 e 89, curva I.

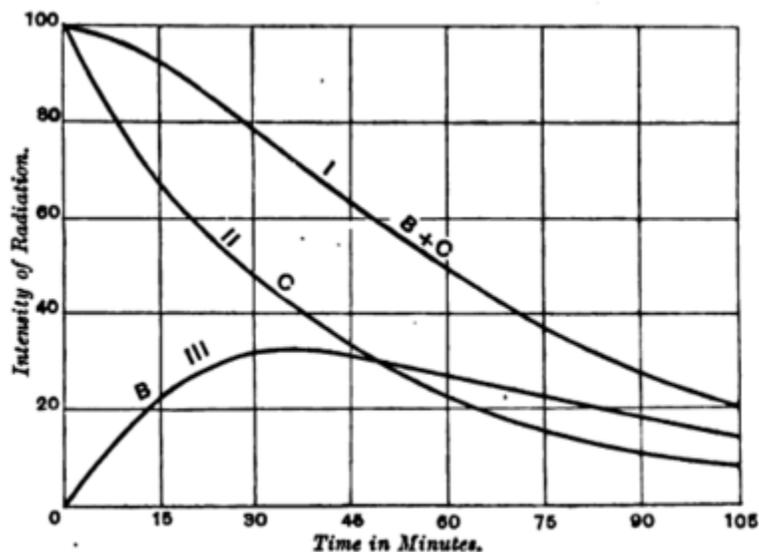


Fig. 89.

P. Curie e Danne fecero l'importante osservazione che la curva di decadimento C, corrispondente a quella mostrata nella Figura 88, per una lunga esposizione, poteva essere accuratamente espressa da un'equazione empirica della forma

$$\frac{I_t}{I_0} = ae^{-\lambda_3 t} - (a-1)e^{-\lambda_2 t}$$

dove  $\lambda_2 = 5.38 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  e  $\lambda_3 = 4.13 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , e  $a = 4.20$  è una costante numerica.

Si è trovato che entro il limite di errore sperimentale questa equazione rappresenta il decadimento dell'attività eccitata del radio per una lunga esposizione, misurata dai raggi  $\beta$ . L'equazione che esprime il decadimento dell'attività, misurata dai raggi  $\alpha$ , differisce notevolmente da questa, specialmente nella prima parte della curva. Parecchie ore dopo la rimozione l'attività decade secondo una legge esponenziale in funzione del tempo, dimezzandosi in 28 minuti. Ciò fissa il valore di  $\lambda_3$ . La costante  $a$  e il valore di  $\lambda_2$  sono dedotti dalla curva sperimentale. Abbiamo già mostrato (sezione 207) che nel caso del deposito attivo dal torio, dove vi sono due trasformazioni di costanti  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$ , nelle quali solo la seconda trasformazione emette una radiazione, l'intensità della radiazione è data da

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t}$$

per un lungo tempo di esposizione (si veda l'equazione 9-8). Questa è un'equazione della stessa forma di quella trovata sperimentalmente da Curie e Danne. Sostituendo i valori  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  trovati per essa,

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} = 4.3 \quad e \quad \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} = 3.3$$

Pertanto, l'equazione teorica si accorda nella forma con quella dedotta dall'osservazione e anche i valori delle costanti numeriche sono concordanti. Se la prima così come la seconda trasformazione emette una radiazione, l'equazione avrà la stessa forma generale, ma il valore delle costanti numeriche sarà diverso, dipendendo dal rapporto tra la ionizzazione della prima e della seconda trasformazione. Se, per esempio, si suppone che entrambe le trasformazioni emettano raggi  $\beta$  in eguale quantità, si può facilmente calcolare che l'equazione del decadimento sarà

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{5\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_2 t} - 5 \left( \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} - 1 \right) e^{-\lambda_3 t}$$

Prendendo i valori di  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  trovati da Curie, il fattore numerico  $e^{-\lambda_2 t}$  diviene 2.15 invece di 4.3 e 1.15 invece di 3.3. La curva teorica del decadimento in questo caso sarà facilmente distinguibile da quella osservata. Il fatto che l'equazione di decadimento trovata da Curie e Danne richieda la necessità di una trasformazione iniziale senza radiazioni può essere mostrata nel modo seguente:

La Curva I (Figura 89) mostra la curva sperimentale. Al momento della rimozione del corpo dall'emanazione (trascurando la rapida trasformazione iniziale), la materia sarà composta da B e da C. Consideriamo la materia che esiste nella materia C al momento della rimozione. Si trasformerà secondo una legge esponenziale, dimezzandosi in 28 minuti. Questo è mostrato nella curva II. La curva III rappresenta la differenza tra le ordinate delle curve I e II. Si vedrà che è identica nella forma alla curva (Figura 87) che mostra la variazione dell'attività per una breve esposizione, misurata dai raggi  $\beta$ . Passa per un massimo nello stesso tempo (circa 36 minuti). La spiegazione di una tale curva è possibile solo assumendo che la prima trasformazione sia senza radiazioni. Le ordinate della curva III esprimono l'attività aggiunta in conseguenza della trasformazione della materia B, presente dopo la rimozione, nella materia C. La materia B presente gradualmente si trasforma in C, e questa, nella sua trasformazione in D, emette la radiazione osservata. Poiché consideriamo solo la materia B, la variazione dell'attività nel tempo dovuta alle sue ulteriori trasformazioni, mostrata nella curva III, sarà in accordo con la curva ottenuta per una breve esposizione (si veda la Figura 87), e questo, come visto, è il caso.

L'accordo tra teoria ed esperimento è mostrato nella tabella seguente. La prima colonna dà la curva teorica del decadimento per una lunga esposizione dedotta dall'equazione

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t}$$

assumendo il valore di  $\lambda_2 = 5.38 \cdot 10^{-4}$  e  $\lambda_3 = 4.13 \cdot 10^{-4}$ .

Tempo in minuti	Valori calcolati	Valori osservati
0	100	100
10	96.8	97.0
20	89.4	88.5
30	78.6	77.5
40	69.2	67.5
50	59.9	57.0
60	49.2	48.2
80	34.2	33.5
100	22.7	22.5
120	14.9	14.5

La seconda colonna da l'attività osservata (misurata con un elettroscopio) per una lunga esposizione di 24 ore in presenza dell'emanazione.

Nei casi dove la corrente d'aria continua porta via il corpo attivo, i valori osservati sono leggermente inferiori di quelli teorici. Ciò è probabilmente dovuto a una piccola volatilità del prodotto radio B a temperature ordinarie.

**223. Analisi della curve  $\alpha$ .** Analizzeremo ora le curve di decadimento dell'attività eccitata del radio, misurate con i raggi  $\alpha$ . La seguente tabella mostra la variazione dell'intensità della radiazione dopo una lunga esposizione alla presenza dell'emanazione del radio. Una placca di platino era resa attiva esponendola per parecchi giorni in un tubo di vetro contenente una grande quantità di emanazione. Il platino attivo dopo la rimozione era posto sulla parte inferiore di due piatti paralleli di piombo isolati e veniva poi applicata una forza elettromotrice saturante di 600 V. La corrente di ionizzazione era sufficientemente grande da essere misurata con un galvanometro sensibile di alta resistenza e le letture erano prese il più rapidamente possibile dopo la rimozione del platino dal contenitore con l'emanazione. Il valore iniziale della corrente (preso pari a 100) era dedotto prolungando le curve verso il basso per incontrare l'asse verticale (si veda la Figura 90) e si ottenne  $3 \cdot 10^{-8}$  A.

Tempo in minuti	Corrente	Tempo in minuti	Corrente
0	100	30	40.4
2	80	40	35.6
4	69.5	50	30.4
6	62.4	60	25.4
8	57.6	80	17.4
10	52.0	100	11.6
15	48.4	120	7.6
20	45.4		

Questi risultati sono mostrati graficamente nella curva superiore della Figura 90. La rapida diminuzione iniziale è dovuta al decadimento dell'attività della materia A. Se la pendenza della curva è riportata indietro da un tempo di 20 minuti dopo la rimozione, essa taglia l'asse verticale a circa 50. La differenza tra le ordinate delle curve A+B+C e LL in ogni istante è mostrata nella curva AA. La curva AA rappresenta l'attività in ogni istante fornita dalla trasformazione in radio A. La curva LL che parte dall'asse verticale è identica a quella già considerata, che rappresenta il decadimento dell'attività misurata per i raggi  $\beta$  per un lungo periodo di esposizione (si veda la Figura 88).

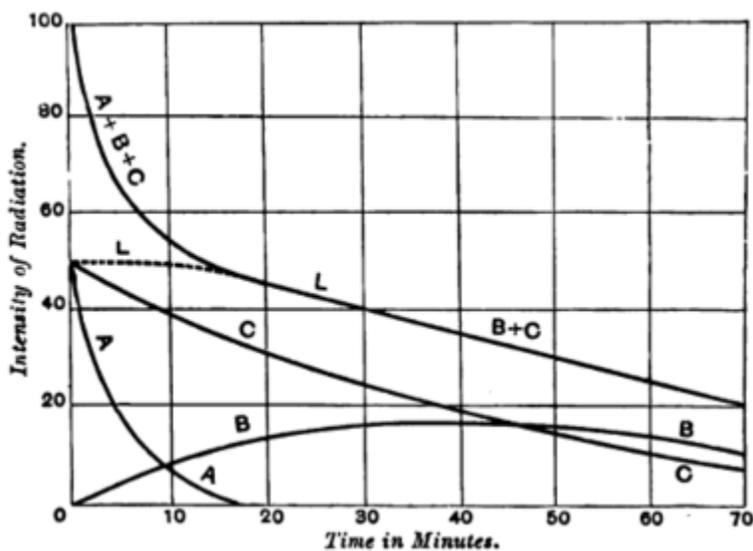


Fig. 90.

Ciò è mostrato dall'accordo dei valori numerici nella tabella seguente. La prima colonna nella tabella dà i valori teorici dell'attività dedotta dall'equazione

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_3 t} - \frac{\lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{-\lambda_2 t}$$

per i valori di  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  impiegati in precedenza. La seconda colonna dà i valori osservati dell'attività dedotti dalla curva di decadimento LL.

Tempo in minuti	Valori calcolati dell'attività	Valori osservati dell'attività
0	100	100
10	96.8	97.0
20	89.4	89.2
30	78.6	80.8
40	69.2	71.2
50	59.9	60.8
60	49.2	50.1
80	34.2	34.8
100	22.7	23.2
120	14.9	15.2

Lo stretto accordo della curva LL con la curva teorica dedotta dall'ipotesi che vi siano due trasformazioni, la prima delle quali non emette raggi, mostra che la trasformazione del radio B in C non emette raggi  $\alpha$ . Similmente, come nella curva I, Figura 89, la curva LL può essere analizzata nelle sue due componenti rappresentate dalle due curve CC e BB. La curva CC rappresenta l'attività fornita dalla materia C presente nel momento della rimozione. La curva BB rappresenta l'attività risultante dalla trasformazione di B in C ed è identica alla corrispondente curva della Figura 89. Usando la stessa linea precedente di ragionamento, possiamo concludere che la trasformazione di B in C non è accompagnata da raggi  $\alpha$ . È già stato mostrato che non produce raggi  $\beta$  e l'identità delle curve  $\beta$  e  $\gamma$  mostra che non emette neppure raggi  $\gamma$ . La trasformazione di B in C è, pertanto, "senza raggi", mentre quella di C in D emette tutti e tre i tipi di radiazione.

Un'analisi del decadimento dell'attività eccitata del radio mostra, pertanto, che avvengono tre distinte trasformazioni nella materia depositata, cioè:

- (1) La materia A, derivata dalla trasformazione nell'emanazione, è trasformata per metà in 3 minuti ed è accompagnata dai soli raggi  $\alpha$ ;
- (2) La materia B è trasformata per metà in 21 minuti e non emette alcuna radiazione ionizzante;
- (3) La materia C è trasformata per metà in 28 minuti ed è accompagnata dai raggi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;
- (4) Una quarta trasformazione molto lenta sarà discussa in seguito.

**224. Equazioni rappresentanti le curve di attività.** Le equazioni che rappresentano la variazione dell'attività in funzione del tempo sono, per comodità, raggruppate sotto, dove  $\lambda_1 = 3.8 \cdot 10^{-3}$ ,  $\lambda_2 = 5.38 \cdot 10^{-4}$ ,  $\lambda_3 = 4.13 \cdot 10^{-4}$ :

- (1) Breve esposizione: attività misurata con raggi  $\beta$

$$\frac{I_t}{I_T} = 10.3 (e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

dove  $I_T$  è il massimo valore dell'attività;

- (2) Lunga esposizione: attività misurata con i raggi  $\beta$ ,

$$\frac{I_t}{I_0} = 4.3e^{-\lambda_3 t} - 3.3e^{-\lambda_2 t}$$

dove  $I_0$  è il valore iniziale;

- (3) Un dato tempo di esposizione  $T$ : attività misurata con i raggi  $\beta$ ,

$$\frac{I_t}{I_T} = \frac{ae^{-\lambda_3 t} - be^{-\lambda_2 t}}{a - b}$$

dove

$$a = \frac{1 - e^{-\lambda_3 T}}{\lambda_3} \quad b = \frac{1 - e^{-\lambda_2 T}}{\lambda_2}$$

- (4) Attività misurata con i raggi  $\alpha$ : lungo tempo di esposizione

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{2}e^{-\lambda_1 t} + \frac{1}{2}(4.3e^{-\lambda_3 t} - 3.3e^{-\lambda_2 t})$$

L'equazione per i raggi  $\alpha$  per qualsiasi tempo di esposizione può essere facilmente dedotta, ma le espressioni sono complicate.

**225. Equazioni della crescita dell'attività eccitata.** Le curve che esprimono il graduale aumento verso il massimo dell'attività eccitata prodotta su un corpo esposto in presenza di una quantità costante di emanazione sono complementari alle curve di decadimento per una lunga esposizione. La somma delle ordinate delle curve di aumento e decadimento in funzione del tempo è costante. Questo segue necessariamente dalla teoria e può anche essere dedotto semplicemente da una considerazione *a priori* (si veda la sezione 200).

Le curve di crescita e decadimento dell'attività eccitata per i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  sono mostrate graficamente in Figura 91. La curva con la linea spessa è per i raggi  $\alpha$ . La differenza tra l'andamento delle curva di decadimento, se misurata con i raggi

$\alpha$  o  $\beta$ , è chiaramente evidenziata nella figura. Le equazioni che rappresentano l'aumento dell'attività verso un massimo sono presentate qui sotto.

Per i raggi  $\beta$  e  $\gamma$

$$\frac{I_t}{I_{max}} = 1 - (4.3e^{-\lambda_3 t} - 3.3e^{-\lambda_2 t})$$

Per i raggi  $\alpha$ ,

$$\frac{I_t}{I_{max}} = 1 - \frac{1}{2}e^{-\lambda_1 t} + \frac{1}{2}(4.3e^{-\lambda_3 t} - 3.3e^{-\lambda_2 t})$$

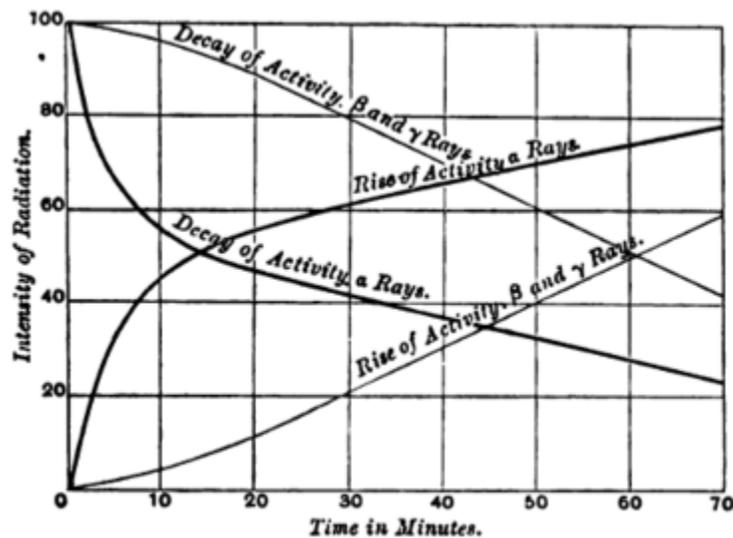


Fig. 91.

**226. Effetto della temperatura.** Non abbiamo finora considerato la prova per la quale la trasformazione che avviene nella materia C è di 28 minuti invece che di 21 minuti. Questa prova è stata fornita da alcuni recenti e importanti esperimenti di P. Curie e Danne<sup>3</sup> sulla volatilizzazione della materia attiva depositata dall'emanazione. Miss Gates<sup>4</sup> mostrò che questa materia attiva si volatilizzava da un filo di platino al di sopra del calor rosso, e si depositava sulla superficie di un cilindro freddo che circondava il filo. Curie e Danne estesero questi risultati sottoponendo un filo di platino attivo per un breve tempo ad una variazione di temperatura da  $15^{\circ}C$  a  $1350^{\circ}C$ , esaminando poi a temperatura ambiente le curve di decadimento non solo per la materia attiva rimanente sul filo, ma anche per la parte volatilizzata. Essi trovarono che l'attività della parte distillata aumentava sempre dopo la rimozione, passando per un massimo e infine decadendo secondo una legge esponenziale dimezzandosi in 28 minuti. Ad una temperatura di circa  $630^{\circ}C$  la materia attiva rimasta sul filo decadeva subito in accordo con una legge esponenziale, dimezzandosi in 28 minuti. P. Curie e Danne mostrarono che la materia B è molto più volatile della C. La prima è completamente volatilizzata a circa  $600^{\circ}C$ , mentre la seconda non è del tutto volatilizzata anche a temperatura di  $1300^{\circ}C$ . Il fatto che la materia C, rimasta quando B è completamente volatilizzata, si dimezza in 28 minuti mostra che la materia C stessa e non la B si dimezza in 28 minuti.

Curie e Danne trovarono anche che il tasso di decadimento della materia attiva variava con la temperatura del filo di platino. A  $630^{\circ}C$  il tasso di decadimento era normale, a  $1100^{\circ}C$  l'attività si riduceva a metà del valore in 20 minuti, mentre a  $1300^{\circ}C$  si riduceva a metà in circa 25 minuti.

Ho ripetuto gli esperimenti di Curie e Danne e ho ottenuto risultati simili. Si pensava possibile che il tasso di decadimento misurato osservato dopo il riscaldamento potesse essere dovuto a un permanente aumento nel tasso di volatilizzazione di C a temperature ordinarie. Questa spiegazione, tuttavia, non è sostenibile, perché si trovò che l'attività decresceva alla stesso ritmo se l'attività sul filo era testata in un tubo chiuso o in uno aperto con un corrente d'aria passante sopra di esso.

Questi risultati sono di grande importanza, perché indicano che il tasso di trasformazione del prodotto C non è costante, ma dipende da differenze di temperatura. Questo è il primo caso in cui si mostra che la temperatura esercita una valutabile influenza sul tasso di cambiamento di un prodotto radioattivo.

<sup>3</sup>P. Curie e Danne, Comptes Rendus, 138, p. 748, 1904.

<sup>4</sup>Miss Gates, Phys. Rev. p. 300, 1903.

**227. Volatilità del radio B a temperatura ordinaria.** Miss Brooks<sup>5</sup> ha osservato che un corpo, reso attivo mediante esposizione all'emanazione del radio, possiede il potere di eccitare un'attività secondaria sulle pareti di un contenitore nel quale è posto. Questa attività era usualmente circa  $\frac{1}{1000}$  del totale, ma la quantità era aumentata di circa  $\frac{1}{200}$  se il filo attivo era bagnato in acqua ed essiccato su una fiamma - metodo spesso adottato per liberare il filo da ogni traccia di emanazione del radio. Questo effetto di produrre l'attività era più marcato immediatamente dopo la rimozione del filo dall'emanazione ed era quasi non valutabile dieci minuti dopo.

L'effetto era particolarmente evidente in alcuni esperimenti con una piastra di rame, che era resa attiva lasciandola per un breve tempo in una soluzione di deposito attivo dal radio. Questa soluzione attiva era ottenuta ponendo un filo di platino attivo in acido cloridrico diluito. Ponendo la piastra di rame in un contenitore di misura per alcuni minuti, per poi rimuoverlo, l'attività osservata sulle pareti del contenitore ammontava a circa l'1% dell'attività della piastra di rame.

Si trovò che questo effetto non era dovuto all'emissione di una emanazione dal corpo attivo, ma doveva essere attribuito ad una piccola volatilità del radio B a temperature ordinarie. Questo era provato dalle osservazioni sulla variazione dell'attività della materia depositata sulle pareti del contenitore. L'attività era piccola inizialmente, ma cresceva a un massimo dopo circa 30 minuti per poi decadere con il tempo. La curva di crescita era molto simile a quella mostrata in figura 87 ed evidenziava che la materia B inattiva era trasportata verso le pareti e poi si trasformava in C, che emetteva la radiazione osservata.

Solo il prodotto B sfugge dal corpo per un breve tempo dopo la rimozione. Questa è una forte indicazione che la sua apparente volatilità è collegata alla presenza del prodotto A rapidamente cambiante. Poiché A si spezza con l'espulsione di una particella  $\alpha$ , parte degli atomi residui che costituiscono il radio B possono acquisire una velocità sufficiente a sfuggire nel gas e sono poi trasferiti dalla diffusione alle pareti del contenitore.

Miss Brooks osservò che l'attività non era concentrata sull'elettrodo negativo in un campo elettrico ma era uniformemente diffusa sulle pareti del contenitore. Questa osservazione è importante considerando la spiegazione degli effetti anomali evidenziati dal deposito attivo del radio, che saranno discussi nella sezione seguente.

**228. Effetto della prima rapida trasformazione.** Abbiamo visto che la legge di decadimento dell'attività, misurata dai raggi  $\beta$  o  $\gamma$ , si può spiegare in modo molto soddisfacente se si trascura la prima trasformazione di 3 minuti. Il completo esame teorico della questione dato nelle sezioni 197 e 198 e le curve delle Figure 72 e 73 mostrano, tuttavia, che la presenza della prima trasformazione esercita un effetto di grandezza sufficiente da essere rivelata nelle misure dell'attività dovute alle trasformazioni successive. La questione è di grande interesse, perché coinvolge l'importante punto teorico se le sostanze A e B sono prodotte indipendentemente una dall'altra, o se A è genitore di B. Nel secondo caso, la materia che è presente si trasforma in B e, di conseguenza, la quantità di B presente dopo A sarà trasformata in modo alquanto maggiore che se B fosse prodotto indipendentemente. Poiché la trasformazione di A è abbastanza rapida, l'effetto sarà più marcato nella prima parte della curva.

Per esaminare questo aspetto sperimentalmente, fu determinata la curva di crescita dell'attività, misurata dai raggi  $\beta$ , immediatamente dopo l'introduzione di una grande quantità di emanazione del radio nel contenitore chiuso. La curva di decadimento dell'attività su un corpo per una lunga esposizione dopo la rimozione dell'emanazione, e la crescita dell'attività dopo l'introduzione dell'emanazione, sono in tutti i casi complementari tra loro. È però difficile misurare con certezza se l'attività è calata in un dato tempo, per esempio, da 100 a 99 o 98.5, è facile essere sicuri se il corrispondente aumento dell'attività nell'esperimento inverso è l'1 o l'1.5% della quantità finale. La Figura 92, curva I, mostra l'aumento dell'attività (misurata dai raggi  $\beta$ ) ottenuta per un intervallo di 20 minuti dopo l'introduzione dell'emanazione. Le ordinate rappresentano la quantità percentuale dell'attività finale riguadagnata in ogni istante.

La curva III mostra la curva teorica ottenuta con l'ipotesi che A è un genitore di B. Questa curva è calcolata dall'equazione 9-9 discussa nella sezione 198, e  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  sono i valori precedentemente trovati.

La curva II dà l'attività teorica in ogni istante nell'ipotesi che le sostanze A e B crescano indipendentemente. Questo è calcolato da un'equazione della stessa forma della 9-8 sezione 198.

<sup>5</sup>Miss Brooks, Nature, 21 luglio 1904.

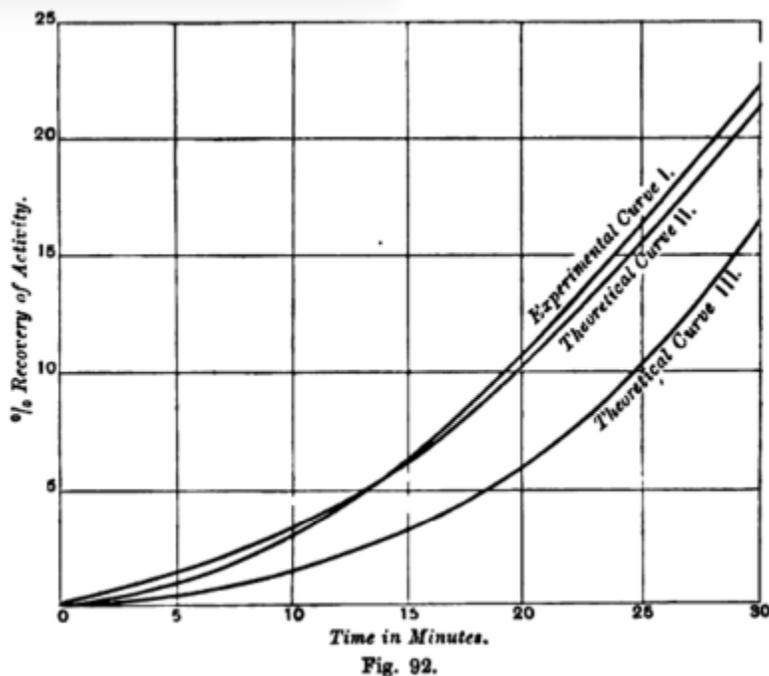


Fig. 92.

Si vede che i risultati sperimentali sono in buon accordo con l'ipotesi che A e B crescano indipendentemente. Una tale conclusione, tuttavia, è di importanza troppo grande per essere accettata prima di esaminare da vicino se le condizioni teoriche che i portatori che fanno aumentare l'attività eccitata sono depositati sulla superficie del corpo, resi immediatamente attivo dopo la loro formazione. Vi è, tuttavia, qualche evidenza che alcuni di questi portatori esistano per un considerevole intervallo nel gas prima del loro deposito sul corpo. Per esempio, si è trovato che se un corpo è introdotto per un breve intervallo, circa 1 minuto, nel contenitore con l'emanazione del radio, rimasta indisturbata per parecchie ore, l'attività dopo il primo rapido decadimento (Figura 86, curva B) è molto maggiore rispetto al caso in cui un campo elettrico ha agito in precedenza per un certo tempo. Questo risultato indica che i portatori di B e C sono raccolti insieme nel gas e sono inviati agli elettrodi quando si applica un campo elettrico. Ho pure osservato che se l'emanazione del radio, rimasta indisturbata per un certo tempo, è mandata in un contenitore di misura, la curva di crescita non è complementare a quella del decadimento, ma indica che un grande quantità di radio B e C è presente con l'emanazione. Gli esperimenti di Miss Brooks, riferiti in precedenza, indicano che il radio B non ottiene una carica e così rimarrà nel gas. Il dr. Bronson, lavorando nel laboratorio di chi scrive, ha ottenuto una prova che una grande quantità di radio rimane nel gas anche in un campo elettrico intenso. Se la materia B esistesse in una parte del gas, si potrebbe spiegare la differenza tra le curve teoriche per le tre successive trasformazioni; poiché, trasferendo l'emanazione ad un altro contenitore, la materia B mescolata con essa inizierà da subito a mutarsi in C dando origine ad una parte della radiazione osservata.

L'equa divisione dell'attività tra i prodotti A e C (si veda la Figura 90) supporta l'ipotesi che C è un prodotto di A, perché quando è raggiunto l'equilibrio radioattivo, il numero di particelle di A che si trasformano ogni secondo è uguale al numero di B o C che si trasformano ogni secondo. Se ogni atomo di A e C espelle una particella  $\alpha$  della stessa massa e con la stessa velocità media, l'attività dovuta alla materia A sarà uguale a quella dovuta alla materia C; e questo, come visto, avviene.

Mentre è particolarmente difficile dare una prova sperimentale definitiva che i radio A e B sono prodotti consecutivi, penso non vi sia alcun dubbio sulla correttezza dell'ipotesi. Determinazioni accurate delle curve di crescita e decadimento possono gettare nuova luce sui complicati processi che senza dubbio avvengono tra la rottura degli atomi dell'emanazione e la comparsa del deposito attivo sugli elettrodi.

**229. Attività relativa fornita dai raggi  $\alpha$  prodotti dal radio.** Vi sono quattro prodotti nel radio che emettono raggi  $\alpha$ , cioè lo stesso radio, l'emanazione, il radio A e C. Se questi prodotti sono in equilibrio radioattivo, lo stesso numero di particelle di ogni prodotto è trasformato ogni secondo e, se ogni atomo si spezza con l'emissione di una particella  $\alpha$ , il numero di particelle  $\alpha$  espulse ogni secondo sarà lo stesso per ogni prodotto.

Poiché, tuttavia, le particelle  $\alpha$  dai diversi prodotti non sono espulse con la stessa velocità, l'attività, misurata dalla corrente di ionizzazione nel modo consueto, non sarà la stessa per tutti i prodotti. L'attività, se misurata dalla corrente di saturazione tra piatti paralleli fra loro sufficientemente distanti da assorbire tutti i raggi  $\alpha$  nel gas, è proporzionale all'energia delle particelle  $\alpha$  che sfuggono nel gas.

Si è visto che l'attività minima del radio dopo la rimozione dell'emanazione, misurata dai raggi  $\alpha$ , è il 25% del valore massimo. Il restante 75%, è dovuto alle particelle  $\alpha$  da altri prodotti. L'attività fornita dal radio A e C è quasi la stessa (sezione 228). Se l'emanazione è introdotta in un contenitore cilindrico del diametro di circa 5 cm, l'attività aumenta di

circa il doppio del suo valore iniziale a causa del deposito del radio A e C sulla superficie del contenitore. Questo mostra che l'attività dell'emanazione ha circa la stessa grandezza di quella fornita dal radio A e C, ma un confronto accurato è ricavato con difficoltà, perché l'emanazione è distribuita dentro il gas, mentre il radio A e C sono depositati sulle pareti del contenitore. Inoltre, l'assorbimento relativo dell'emanazione confrontato con quello dei radio A e C non è noto.

Chi scrive ha compiuto alcuni esperimenti sulla diminuzione dell'attività del radio immediatamente dopo il riscaldamento ad una temperatura sufficiente ad eliminare l'emanazione. I risultati ottenuti con questo metodo sono complicati dall'alterazione della superficie radiante a causa del riscaldamento, ma indicano che l'emanazione fornisce circa il 70% dell'attività del radio A o C.

Ciò porta alla conclusione che le particelle  $\alpha$  dall'emanazione sono emesse con minore velocità di quelle dal radio C.

La seguente tabella mostra approssimativamente l'attività fornita dai diversi prodotti del radio in equilibrio radioattivo.

Prodotto	Parte percentuale dell'attività totale
Radio	25%
Emanazione	17%
Radio A	29%
Radio B	0%
Radio C	29%

I prodotti del radio e le loro radiazioni sono graficamente mostrati in Figura 95.

**230. Deposito attivo del radio di lenta trasformazione.** Si è evidenziato (sezione 183) che un corpo, esposto alla presenza dell'emanazione del radio, non perde tutta la propria attività per un lungo intervallo di tempo dopo la rimozione; si osserva sempre una piccola attività residua. La grandezza di questa attività residua dipende non solo dalla quantità di emanazione impiegata, ma anche dal tempo di esposizione del corpo alla presenza dell'emanazione. Per una esposizione di parecchie ore, l'attività residua è minore di un milionesimo dell'attività immediatamente dopo la rimozione.

Sarà ora un resoconto di alcune indagini eseguite da chi scrive sulla natura di questa attività residua e sulle proprietà chimiche della materia attiva. È prima di tutto necessario mostrare che l'attività residua sorge come conseguenza di un deposito di materia radioattiva e non è dovuta all'azione di un'intensa radiazione alla quale il corpo reso attivo è stato sottoposto.

L'interno di un lungo tubo di vetro era ricoperto con una uguale area di metallo sottile, inclusi alluminio, ferro, rame, argento, piombo e platino. Una grande quantità di emanazione di radio era introdotta nel tubo prima della sua chiusura. Dopo sette giorni le piastre metalliche erano rimosse e, trascorsi due giorni per la scomparsa dell'attività eccitata, veniva misurata l'attività residua delle piastre con un elettrometro. L'attività delle piastre risultava disuguale, essendo maggiore per rame e argento e minore per l'alluminio. L'attività del rame era doppia di quella dell'alluminio. L'attività delle piastre era nuovamente misurata dopo un'altra settimana. L'attività di ognuno era diminuita nell'intervallo trascorso, ma le differenze iniziali osservate non erano più così marcate. Dopo aver raggiunto un valore minimo l'attività di ogni piastra lentamente ma con costanza aumentava allo stesso ritmo. Dopo un mese l'attività di ogni piastra era quasi la stessa e circa tripla del valore minimo. Le irregolarità iniziali nelle curve di decadimento dei diversi metalli sono, con tutta probabilità, dovute ad un debole ma diverso grado di assorbimento dell'emanazione del radio da parte delle lastre metalliche, essendo l'assorbimento maggiore per il rame e l'argento e minore per l'alluminio. Quando l'emanazione imprigionata era lentamente rilasciata o perdeva la propria attività, l'attività del metallo cadeva a un valore limite. L'assorbimento dell'emanazione del radio da parte di piombo, paraffina e caucciù è stato analizzato da Curie e Danne (sezione 182).

L'attività residua sulle lastre comprendeva sia raggi  $\alpha$  che  $\beta$ , quest'ultima presente, in tutti i casi, in una proporzione insolita. L'uguaglianza dell'attività e l'identità della radiazione emessa da ogni lastra mostra che l'attività residua è dovuta alla trasformazione di un certo tipo di materia depositata sulle lastre e che non può essere attribuita ad un'azione delle intense radiazioni; se così fosse, ci si dovrebbe aspettare una variazione dell'attività prodotta sulle diverse lastre non solo in quantità, ma anche in qualità. Questo risultato è confermato dall'osservazione che la materia attiva può essere rimossa da una lastra di platino mettendola in soluzione in acido solforico e per altre proprietà chimiche e fisiche.

Considereremo dapprima la variazione nel tempo dell'attività residua misurata dai raggi  $\alpha$ . Una lastra di platino era esposta alla presenza dell'emanazione del radio per sette giorni. La quantità di emanazione inizialmente presente era uguale a quella ottenuta da circa 3 mg di bromuro di radio puro. La lastra, immediatamente dopo la rimozione, dava una corrente di saturazione, misurata tra i piatti paralleli di un galvanometro, di  $1.5 \cdot 10^{-7}$  A. Alcune ore dopo la rimozione, l'attività decadeva in accordo con una legge esponenziale funzione del tempo, dimezzandosi in 28 minuti. Tre giorni dopo la rimozione la piastra attiva dava una corrente di saturazione, misurata da un elettrometro, di  $5 \cdot 10^{-12}$  A; cioè  $\frac{1}{300000}$  dell'attività iniziale. L'attività aumentava costantemente con il tempo. I risultati sono mostrati in Figura 93, dove il tempo è valutato dalla metà del tempo di esposizione all'emanazione.

La curva è inizialmente quasi una linea retta passante per l'origine. L'attività aumenta con il tempo per un intervallo osservato di otto mesi. La parte finale della curva, tuttavia, cade sotto la tangente alla curva tracciata per l'origine, mostrando che l'attività non aumenta proporzionalmente con il tempo.

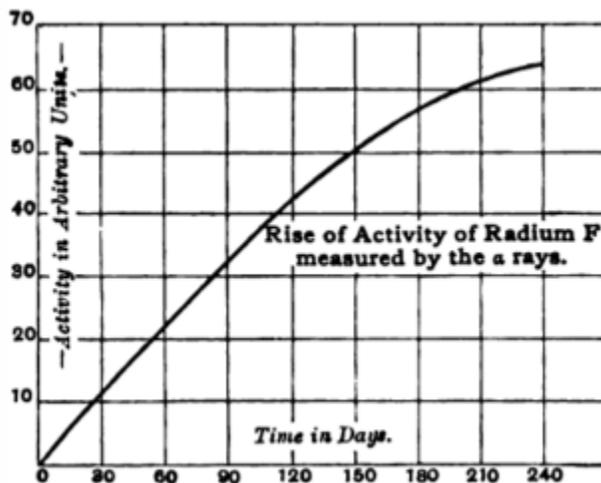


Fig. 98.

Il deposito attivo, ottenuto in un modo diverso, è stato esaminato per un periodo ancora più lungo. L'emanazione da 30 mg di bromuro di radio era condensata in un tubo di vetro e poi sigillato. Dopo un mese, il tubo veniva aperto e si introduceva acido solforico diluito. L'acido scioglieva il deposito attivo nel tubo ed eliminando l'acido con il calore, si otteneva un residuo radioattivo. L'attività di questo residuo, misurata dai raggi  $\alpha$ , aumentava con costanza per un periodo di 18 mesi, ma la curva di variazione dell'attività con il tempo, disegnata in Figura 93, tende ad appiattirsi e ad avvicinarsi a un valore massimo.

La spiegazione di questa curva sarà considerata nella sezione 236.

**231. Variazione dell'attività  $\beta$ .** L'attività residua consiste sia di raggi  $\alpha$  che  $\beta$ , essendo questi ultimi presenti in una grande e insolita proporzione. Il rapporto tra la parte di  $\alpha$  e di  $\beta$  dalla lastra di platino, un mese dopo la rimozione, era più di un cinquantesimo di quello da un sottile film di bromuro di radio in equilibrio radioattivo. Diversamente dall'attività  $\alpha$ , l'attività misurata con i raggi  $\beta$  rimane costante dopo che il deposito attivo ha oltre un mese e, di conseguenza, la proporzione di  $\alpha$  e  $\beta$  aumenta costantemente nel tempo. Gli esperimenti mostravano che l'intensità dei raggi  $\beta$  non variava molto, se mai, dopo un ulteriore periodo di diciotto mesi. La mancanza di proporzionalità tra i raggi  $\alpha$  e  $\beta$  mostra che i due tipi di radiazione derivano da diversi prodotti. Questa conclusione è confermata dagli esperimenti, descritti più avanti, che mostrano che i prodotti che emettono raggi  $\alpha$  e  $\beta$  possono essere temporaneamente separati uno dall'altro con metodi fisici e chimici.

Se le osservazioni del deposito attivo iniziavano subito, l'attività, misurata dai raggi  $\beta$ , era inizialmente piccola, ma aumentava con il tempo, raggiungendo un massimo circa 40 giorni dopo. Vennero eseguiti esperimenti su una lastra di platino, che era esposta per 3.75 giorni in un contenitore con emanazione del radio. Le osservazioni dell'attività  $\beta$  iniziavano 24 ore dopo la rimozione. I risultati sono mostrati in Figura 94, dove il tempo era misurato dalla metà del tempo di esposizione.

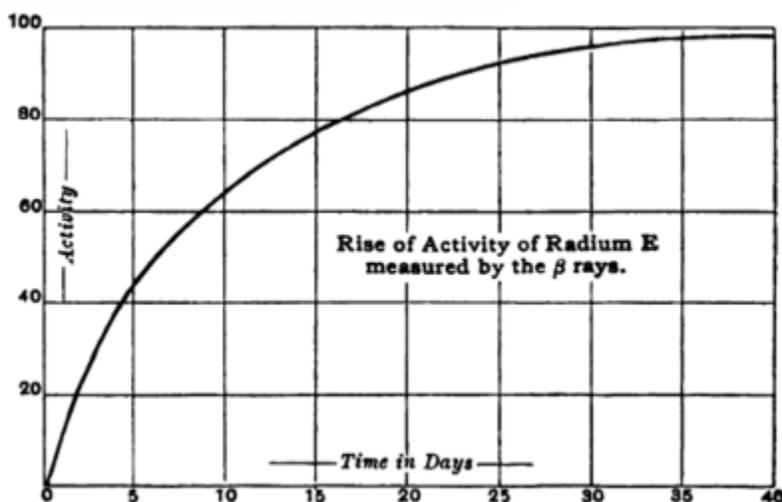


Fig. 94.

Risultati simili erano ottenuti per un filo carico negativamente esposto all'emanazione. La curva, se riportata indietro verso l'origine, era molto simile alle curve di recupero di  $UrX$  e di altri prodotti e può essere espressa dall'equazione  $\frac{I_t}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}$ , dove  $I_0$  è il valore massimo dell'attività. L'attività raggiunge metà del suo valore finale in circa sei giorni e il valore di  $\lambda$  è uguale a  $0.115 \text{ giorni}^{-1}$ . Abbiamo mostrato nella sezione 203 che una curva crescente con queste caratteristiche indica che l'attività  $\beta$  deriva da un prodotto che è fornito ad un tasso costante da una sorgente primaria. Prima di discutere in dettaglio la spiegazione di queste curve, che mostrano l'aumento con il tempo dell'attività  $\alpha$  e  $\beta$ , si considereranno ulteriori risultati sperimentali.

**232. Effetto della temperatura sull'attività.** Una lastra di platino, resa attiva nel modo descritto, era esposta a temperature variabili in un forno elettrico e l'attività era misurata alla temperatura atmosferica dopo l'esposizione. Un'esposizione di quattro minuti nel forno, inizialmente a  $430^\circ C$  e successivamente a  $800^\circ C$  aveva un piccolo effetto sull'attività. Dopo quattro minuti a circa  $1000^\circ C$ , l'attività diminuiva di circa il 20% e un'ulteriore esposizione di otto minuti a una temperatura di circa  $1050^\circ C$  era quasi completamente rimossa l'attività  $\alpha$ . D'altro canto, l'attività  $\beta$ , se misurata immediatamente dopo la rimozione, non era alterata dal riscaldamento, ma l'esposizione a temperature ancora più alte ne causava la diminuzione. Questi risultati mostrano che la materia attiva è di due tipi. La parte che emette raggi  $\beta$  non è volatile a  $1000^\circ C$ , ma l'altra parte, che emette raggi  $\alpha$  è quasi del tutto volatilizzata a quella temperatura.

Si è, inoltre, trovato che l'attività  $\beta$  dopo il riscaldamento a circa  $1000^\circ$  non era permanente, ma decadeva secondo una legge esponenziale funzione del tempo, dimezzandosi in circa 4.5 giorni. Dalla curva di recupero dell'attività  $\beta$  già considerata, ci si aspettava che l'attività decadesse della metà in sei giorni. Questa differenza nei periodi di tempo è possibilmente dovuta a un effetto dell'alta temperatura nell'alterare il tasso di decadimento del radio E. Il periodo di sei giorni è probabilmente quello più corretto. I risultati ottenuti sulla crescita e sul decadimento dei raggi  $\beta$ , presi assieme, mostra:

- (1) Che il prodotto che emette raggi  $\beta$  è fornito ad un tasso costante da una certa materia genitrice con un tasso di trasformazione molto lento.
- (2) Che questa materia genitrice volatilizza alla temperatura di  $1000^\circ C$  o superiore, e che alla fine rimane solo il prodotto che emette raggi  $\beta$ . Poiché la materia genitrice è rimossa, il prodotto inizia immediatamente a perdere la propria attività al suo caratteristico tasso, cioè l'attività dimezza in circa sei giorni.

**233. Separazione dei costituenti per mezzo di una lastra di bismuto.** La materia attiva a lento decadimento era ottenuta in soluzione introducendo acido solforico diluito in un tubo di vetro nel quale era stata accumulata l'emanazione da  $30 \text{ mg}$  di bromuro di radio per un mese. La soluzione mostrava forte attività ed emetteva raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , questi ultimi, come in altri casi, presenti in una grande e insolita proporzione.

Se un disco di bismuto lucido era mantenuto per alcune ore nella soluzione, diveniva fortemente attivo. La materia attiva depositata sul bismuto emetteva raggi  $\alpha$ , ma non vi era traccia di raggi  $\beta$ . Dopo aver messo in soluzione numerosi dischi di bismuto, la materia attiva, che emette raggi  $\alpha$ , era quasi completamente rimossa. Ciò era mostrato evaporando la soluzione dopo il trattamento. L'attività  $\beta$  rimaneva invariata, ma quella  $\alpha$  era ridotta a circa il 10% del suo valore iniziale. Tre dischi di bismuto, resi attivi in questo modo, erano messi da parte e la loro attività misurata a intervalli regolari. L'attività diminuiva in accordo con una legge esponenziale funzione del tempo durante i 200 giorni dalla sua rimozione, mentre quella di ognuno si dimezzava in media in circa 143 giorni.

Allo stesso tempo si osservava che la soluzione, dalla quale l'attività  $\alpha$  era rimossa, gradualmente riguadagnava la sua attività, mostrando che la sostanza attiva che emetteva raggi  $\alpha$  era prodotta continuamente dalla materia rimasta nella soluzione.

**234. Spiegazione dei risultati.** Abbiamo visto che un esame ravvicinato del deposito attivo a lenta trasformazione ha rivelato,

- (1) la presenza di un prodotto emettitore  $\beta$  che perde metà della propria attività in circa sei giorni;
- (2) la presenza di un prodotto emettitore  $\alpha$ , che è depositato sul bismuto ed è volatilizzato a  $1000^\circ C$ . Questo prodotto dimezza la propria attività in 143 giorni;
- (3) la presenza di una sostanza genitrice, che produce l'emettitore  $\beta$  ad un tasso costante.

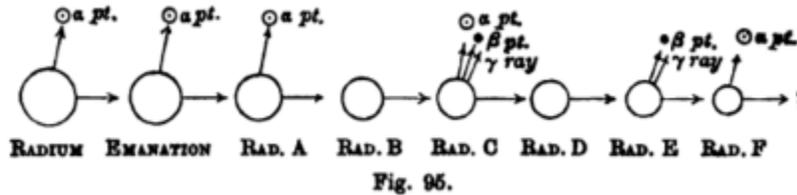
Questo prodotto genitore si deve trasformare molto lentamente poiché il prodotto che emette raggi  $\beta$ , che deriva da esso, raggiunge presto un valore di equilibrio, che non cambia in modo apprezzabile per un periodo di oltre un anno. Dall'evidenza sperimentale si può concludere che il prodotto genitore non emette raggi  $\beta$ , ma che questi derivano interamente dal prodotto successivo. Questo prodotto genitore non può emettere raggi  $\alpha$ , perché abbiamo visto che l'attività  $\alpha$  iniziale è nella prima fase estremamente piccola, ma aumenta costantemente nel tempo per un periodo di almeno diciotto mesi. Il prodotto genitore, pertanto, non emette raggi  $\alpha$  o  $\beta$  e deve essere "senza raggi".

I primi tre prodotti di transizione dell'emanazione del radio, cioè radio A,B,C sono già stati analizzati e mostrano di essere consecutivi. Sembra, quindi, probabile che il deposito attivo di lenta trasformazione derivi dalle successive trasformazioni dell'ultimo prodotto radio C. I risultati già ottenuti si possono spiegare completamente se si suppone che i tre prodotti di transizione, cioè radio D,E,F sono presenti nel deposito attivo di lento tasso di trasformazione. Le proprietà di questi prodotti sono riassunte qui sotto.

- Il Radio D è il prodotto privo di raggi con tasso di trasformazione molto lento. Si mostrerà in seguito che si dimezza in 40 anni. È volatile sotto i  $1000^{\circ}C$  ed è solubile in forti acidi.
- Il Radio E è prodotto dal radio D. Nella rottura, emette raggi  $\beta$  (e probabilmente  $\gamma$ ) ma non raggi  $\alpha$ . Si dimezza in circa 6 giorni e non è così volatile come il radio D e F.
- Il Radio F è prodotto dal radio E. Esso emette solo raggi  $\alpha$  e si dimezza in 143 giorni. Questa sostanza in soluzione si attacca al bismuto. È volatile sopra i  $1000^{\circ}C$ .

A parte il loro valore e interesse nel mostrare i passi di trasformazione dell'atomo di radio, i risultati di questa analisi hanno un'importante rilevanza sull'origine di alcune delle ben note sostanze radioattive separate dalla pechblenda; si mostrerà in seguito che il prodotto radio F è la sostanza radioattiva presente nel radio-tellurio e probabilmente anche nel polonio. Inoltre, vi è una forte evidenza che il piombo radioattivo ottenuto da Hofmann contenga i tre prodotti radio D,E,F insieme.

Le trasformazioni del radio così come attualmente note, sono mostrate graficamente in Figura 95. È possibile che un'ulteriore indagine mostri che la trasformazione non termina con il radio F.



Mentre abbiamo visto che il radio D è genitore del radio E, non abbiamo presentato una prova conclusiva che E è genitore di F. Questa prova è, tuttavia, fornita dal seguente esperimento. Una lastra di platino, resa attiva nel modo già descritto, era posta in un forno elettrico e riscaldata per quattro minuti a circa  $1000^{\circ}C$ . La maggior parte dei prodotti D e F era volatilizzata, ma E rimaneva. Poiché la materia genitrice D era rimossa, E da subito cominciava a perdere la sua attività  $\beta$ . Nello stesso tempo si osservava che la piccola attività  $\alpha$ , rimasta sulla lastra di platino, aumentava all'inizio rapidamente e poi più lentamente, mentre l'attività di E diveniva sempre più piccola. Questo esperimento mostra che E era il genitore di F, l'emettitore di raggi  $\alpha$ .

**235. Tasso di trasformazione del radio D.** È stato osservato sperimentalmente che ognuno dei prodotti del radio, che emette raggi  $\alpha$ , fornisce circa una uguale parte dell'attività del radio quando è in equilibrio radioattivo. Poiché, quando si raggiunge l'equilibrio, lo stesso numero di particelle di ognuno dei prodotti successivi si spezza al secondo, questa è un'espressione del fatto che ogni atomo di ciascun prodotto si spezza con l'espulsione di un ugual numero (probabilmente uno) di particelle  $\alpha$ . Il radio D è direttamente derivato dal radio C e, poiché il tasso di trasformazione di D è molto lento rispetto a quello di C, il numero di particelle di D inizialmente presenti deve essere quasi uguale al numero di particelle del radio C che si spezza nel tempo in cui il radio D si sta formando. Ora D non emette radiazioni, ma il prodotto successivo, E, sì. I prodotti D e E sono praticamente in equilibrio radioattivo un mese dopo che D si è depositato e la variazione dell'attività  $\beta$  di E serve allora come misura della variazione del prodotto genitore D. Supponiamo che un contenitore venga riempito con una grande quantità di emanazione del radio. Dopo parecchie ore, il prodotto radio C, che emette particelle  $\beta$ , raggiunge un valore massimo e poi decresce con lo stesso ritmo con cui l'emanazione perde la propria attività, cioè si dimezza in 3.8 giorni. Se  $N_1$  è il numero di particelle  $\beta$  espulse dal radio C al suo valore massimo, il numero totale  $Q_1$  di particelle  $\beta$  espulse durante la vita dell'emanazione è dato approssimativamente da

$$Q_1 = \int_0^{\infty} N_1 e^{-\lambda_1 t} dt = \frac{N_1}{\lambda_1}$$

dove  $\lambda_1$  è la costante di trasformazione dell'emanazione.

Dopo la scomparsa dell'emanazione e con i prodotti finali D+E in equilibrio radioattivo, supponiamo che il numero di particelle  $\beta$ ,  $N_2$ , espulse ogni secondo dal radio E sia determinato. Se  $Q_2$  è il numero totale di particelle espulse durante la vita di D+E, allora  $Q_2$  come prima è approssimativamente dato da  $Q_2 = \frac{N_2}{\lambda_2}$ , dove  $\lambda_2$  è la costante di trasformazione del radio D. Abbiamo visto che se ogni particella di C ed E emette una particella  $\beta$ , ci si deve aspettare che

$$Q_1 = Q_2$$

o

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Il rapporto  $\frac{N_2}{N_1}$  viene determinato sperimentalmente misurando l'attività dovuta ai raggi  $\beta$  da C ed E nello stesso contenitore di misura. Allora, poiché  $\frac{N_2}{N_1}$  è noto e così anche il valore di  $\lambda_1$ , si ottiene il valore della costante di trasformazione,  $\lambda_2$ , del radio D. In questo modo si calcolò che D si dimezza in circa 40 anni.

Nei calcoli sopra si è assunto, in prima approssimazione, che i raggi  $\beta$  da C ed E abbiano la stessa velocità media. Ciò non è probabilmente molto vero, ma il numero sopra certamente serve a fissare l'ordine di grandezza del periodo del prodotto D. Questo calcolo è confermato dalle osservazioni fatte in seguito sulla quantità di D ed E nel radio originario.

Può essere interessante ricordare che chi scrive calcolò il periodo del radio F con un metodo simile, prima che il suo valore fosse determinato sperimentalmente e trovò che D doveva dimezzarsi in circa un anno. Ciò non è molto diverso dal valore sperimentale di 143 giorni trovato in seguito. Inoltre, si assumeva nel calcolo che le particelle  $\alpha$  da C e F fossero emesse con la stessa velocità e, di conseguenza, fosse prodotta la stessa quantità di ionizzazione. In pratica, tuttavia, si è trovato che la particella  $\alpha$  di F è assorbita entro una distanza pari a circa la metà di quella da C e, di conseguenza, produce solo metà della ionizzazione di quest'ultima. Se si effettua questa correzione, il periodo calcolato per metà trasformazione diventa di sei mesi invece di un anno.

Una tabella dei prodotti di trasformazione del radio, insieme con alcune delle loro proprietà fisiche e chimiche, è presentata qui sotto.

Prodotti di Trasformazione		Tempo dimezzamento	Raggi	Proprietà Fisiche e Chimiche
Radio		1200 anni	$\alpha$	—
↓				
Emanazione		3.8 giorni	$\alpha$	Gas chimicamente inerte; condensa a $150^{\circ}C$
↓				
Radio A		3 minuti	$\alpha$	Si comporta come solido; depositato sulla superficie dei corpi; concentrato sul catodo in campo elettrico
↓	deposito attivo di rapida trasformazione			
Radio B		21 minuti	no raggi	Solubile in forti acidi; volatile al calor bianco.
↓				
Radio C		28 minuti	$\alpha, \beta, \gamma$	B è più volatile di A e C
↓				
Radio D		circa 40 anni	no raggi	Solubile in forti acidi e volatilizzato sotto i $1000^{\circ}C$
↓	deposito attivo di lenta trasformazione			
Radio E		6 giorni	$\beta$ (e $\gamma$ )	Non volatile a $1000^{\circ}C$
↓				
Radio F		143 giorni	$\alpha$	Volatile a $1000^{\circ}C$ ; depositato dalla soluzione sulla lastra di bismuto
?		—	—	—

**236. Variazione dell'attività su lunghi periodi di tempo.** Siamo ora in grado di calcolare la variazione dell'attività  $\alpha$  e  $\beta$  del deposito attivo sul lungo periodo di tempo. Se supponiamo che la materia inizialmente depositata consista solo di D, le quantità  $P, Q, R$  del radio D,E,F esistenti in ogni tempo successivo sono date dalle equazioni 9-3, 9-4, 9-5 della sezione 197.

Poiché, tuttavia, il prodotto intermedio E ha un tasso più rapido di trasformazione di D o F, le equazioni si possono semplificare, senza eccessiva perdita di precisione, trascurando la trasformazione E e supponendo che D emetta raggi  $\beta$  e si trasformi direttamente nel prodotto F che emette raggi  $\alpha$ .

Siano  $\lambda_1, \lambda_2$  le costanti di trasformazione rispettivamente di D e F. Sia  $n_0$  il numero di particelle di D inizialmente presenti. Allora usando la notazione della sezione 197, la quantità  $P$  di radio D in ogni istante  $t$  è data da  $P = n_0 e^{-\lambda_1 t}$ . La quantità  $Q$  di radio F è data da

$$Q = \frac{n_0 \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

Il numero di particelle  $\beta$  emesse da D+E per secondo, alcuni mesi dopo, è  $\lambda_1 n_0 e^{-\lambda_1 t}$  e il numero di particelle  $\alpha$  emesse dal radio F è

$$\frac{\lambda_1 \lambda_2 n_0}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

I risultati sono mostrati graficamente nella Figura 96, dalle curve EE e FF, nelle quali le ordinate rappresentano il numero di particelle  $\alpha$  e  $\beta$  espulse ogni secondo rispettivamente dai prodotti D e F. Il calcolo completo per le tre trasformazioni mostra che il numero di particelle  $\beta$  raggiunge prima un massimo per poi decadere quasi esponenzialmente in funzione del tempo, dimezzandosi in 40 anni. Il numero di particelle  $\alpha$  espulse ogni secondo aumenta per parecchi anni, ma raggiunge un massimo dopo 2.6 anni per poi diminuire, riducendosi esponenzialmente con il tempo alla metà in 40 anni.

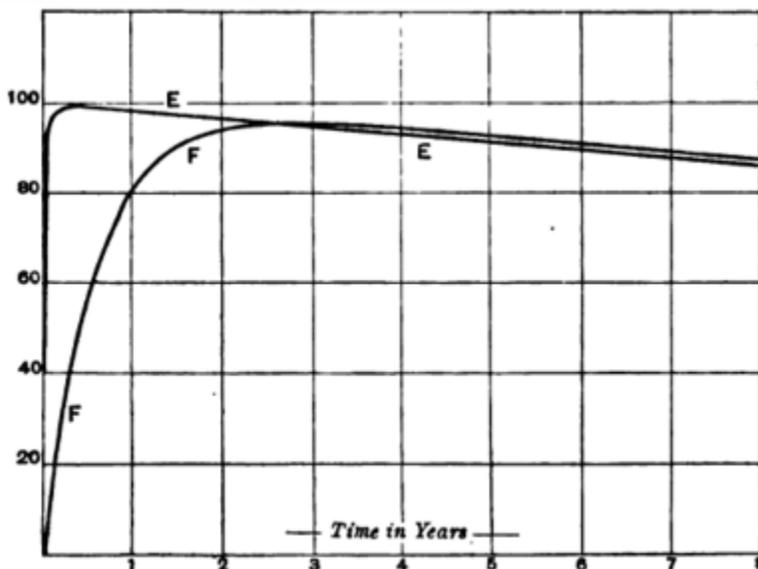


Fig. 96.

La curva sperimentale della crescita dell'attività  $\alpha$ , mostrata in Figura 93, così come è stata determinata, si trova accuratamente su questa curva, se il massimo è calcolato dalla teoria presentata. L'attività osservata dopo un periodo di 250 giorni è indicato dal punto X sulla curva.

**237. Esperimenti con radio invecchiato.** Poiché la sostanza radio D è prodotta dal radio ad un ritmo costante, la quantità presente mescolata con il radio aumenterà con il tempo. Chi scrive ha in suo possesso una piccola quantità di cloruro di radio impuro, cortesemente prestato dai Professori Elster e Geitel quattro anni fa. La quantità di radio D presente era misurata nel modo seguente: - La sostanza era disciolta in acqua e mantenuta continuamente rovente per un periodo di circa sei ore. In queste condizioni l'emanazione era rimossa il più rapidamente possibile nel momento della sua formazione e i raggi  $\beta$  dal radio, dovuti al prodotto radio C, praticamente scomparivano. Un campione appena preparato di bromuro di radio in queste condizioni riteneva solo una frazione dell'1% della sua originaria radiazione  $\beta$ . Il radio invecchiato, tuttavia, mostrava (immediatamente dopo questo trattamento) un'attività misurata dai raggi  $\beta$  di circa l'8% della sua quantità iniziale. L'attività non poteva essere ridotta a valori inferiori mediante ulteriore riscaldamento o aspirazione di aria attraverso la soluzione. Questa residua attività  $\beta$  era dovuta al prodotto radio E accumulato nel radio. L'attività  $\beta$  dovuta al radio E era di circa il 9% di quella dovuta al radio C. Trascurando le differenze nell'assorbimento dei raggi  $\beta$ , quando l'attività del prodotto E nel radio raggiunge un valore massimo, l'attività  $\beta$  sarà la stessa di quella dovuta al C. Poiché il prodotto genitore D è dimezzato in quaranta anni, la quantità presente nel radio dopo quattro anni dovrà essere circa il 7% della quantità massima; cioè, mostrerà un'attività  $\beta$  di circa il 7% di quella dovuta al radio C. I valori osservati e calcolati (rispettivamente 7% e 9%) sono, pertanto, dello stesso ordine di grandezza. La quantità di raggi  $\beta$  dal radio E presente nel bromuro di radio puro dell'età di circa un anno era circa il 2% del totale.

La quantità di radio F presente nel radio invecchiato era misurata dalle osservazioni dell'attività impartita al disco di bismuto rimasto parecchi giorni in soluzione e aveva lo stesso ordine del valore teorico. Il radio F non è depositato su una valutabile estensione del bismuto da una soluzione acquosa di bromuro di radio. Se, tuttavia, si aggiunge una traccia di acido solforico alla soluzione, il radio F si deposita facilmente sul bismuto. L'aggiunta di acido solforico alla soluzione di radio praticamente determina una separazione del radio D,E,F dal radio; quest'ultimo era precipitato come solfato e i prodotti D,E,F rimanevano in soluzione. Dopo il filtraggio, la soluzione conteneva la maggior proporzione dei prodotti D,E,F e molto poco radio.

**238. Variazione dell'attività del radio nel tempo.** È stato mostrato che l'attività del radio appena preparato aumenta all'inizio con il tempo e raggiunge praticamente un valore massimo dopo un intervallo di circa un mese. I risultati già considerati mostrano che vi è un ulteriore piccolo aumento dell'attività nel tempo. Così è se l'attività è misurata dai raggi  $\alpha$  o  $\beta$ . Si mostrerà in seguito che il radio è probabilmente dimezzato in circa 1000 anni. Da ciò si può facilmente calcolare che dopo un intervallo di 200 anni la quantità dei prodotti radio D,E,F avrà raggiunto il valore massimo. Lo stesso numero di atomi di ognuno dei prodotti C e E si spezzerà, quindi, ogni secondo. Se ogni atomo di questi prodotti nella disintegrazione perde un ugual numero (probabilmente uno) di particelle  $\beta$ , il numero di quelle perse ogni secondo sarà due volte più grande del radio con un'età di pochi mesi. Il numero aumenterà inizialmente al ritmo di circa il 2% per anno.

Simili considerazioni si applicano all'attività  $\alpha$ . Poiché, tuttavia, vi sono quattro altri prodotti di radio oltre il radio stesso che espellono particelle  $\alpha$ , il numero di particelle  $\alpha$  emesse ogni secondo dal radio datato non sarà più del 25%

maggiore del numero dal radio dell'età di qualche mese. L'attività misurata dai raggi  $\alpha$  non aumenterà, pertanto, più del 25% e, probabilmente anche meno, delle particelle  $\alpha$  del radio F che produce meno ionizzazione di quella delle particelle  $\alpha$  espulse dagli altri prodotti del radio. L'attività del radio aumenterà, di conseguenza, a un massimo dopo 200 anni per poi tendere a zero lentamente con il tempo.

**239. Presenza di questi prodotti nella pechblende.** I prodotti radio D,E,F devono essere presenti nella pechblenda in quantità proporzionali alla quantità di radio presente e dovrebbero poter essere separati dal minerale con opportuni metodi chimici. Le proprietà radioattive di queste sostanze, se ottenute allo stato puro, sono qui sotto riassunte.

Il *Radio D* quando è separato per primo, emetterà una molto ridotta radiazione  $\alpha$  e  $\beta$ . L'attività  $\beta$  aumenterà rapidamente, raggiungendo la metà del suo massimo valore in 6 giorni. L'attività  $\alpha$  aumenterà inizialmente in modo quasi proporzionale con il tempo e raggiungerà un valore massimo dopo un intervallo di circa 3 anni. L'attività  $\alpha$  e  $\beta$ , dopo aver raggiunto il massimo, infine decadrà, dimezzandosi in circa 40 anni. Poiché il radio D è trasformato per metà in 40 anni e il radio in 1200 anni, la massima attività  $\beta$  del radio D, a parità di peso, sarà circa 300 volte quella del radio.

L'attività  $\alpha$ , in ogni istante, sarà rimossa ponendo un disco di bismuto in soluzione.

Il *Radio F*, dopo la separazione, emetterà solo raggi  $\alpha$ . La sua attività, dopo la separazione, diminuirà secondo una legge esponenziale, dimezzandosi in 143 giorni. Poiché il radio in equilibrio radioattivo contiene quattro prodotti che emettono raggi  $\alpha$ , il numero di particelle  $\alpha$  espulse ogni secondo dal radio F sarà, a parità di peso, circa 800 volte così numeroso come il nuovo radio in equilibrio radioattivo. Poiché le particelle  $\alpha$  dal radio F producono solo metà della ionizzazione dovuta alle particelle  $\alpha$  degli altri prodotti del radio, l'attività del radio F, misurata con il metodo elettrico, sarà circa 400 volte quella del radio.

**240. Origine di radio-tellurio e polonio.** È ora necessario considerare se questi prodotti del radio sono stati precedentemente separati dalla pechblenda e conosciuti sotto altri nomi.

Considereremo innanzitutto il prodotto emettitore di raggi  $\alpha$ , radio F. Il radio-tellurio di Marckwald e il polonio di Madame Curie assomigliano entrambi al radio F emettendo solo raggi  $\alpha$  e depositandosi su un disco di bismuto in soluzione. Se il costituente attivo presente nel radio-tellurio è lo stesso del radio F, la sua attività decadrà con lo stesso ritmo. Chi scrive<sup>6</sup> ha accuratamente confrontato i tassi di decadimento dell'attività del radio F e del radio-tellurio di Marckwald e ha trovato che così è entro i limiti dell'errore sperimentale. Entrambi dimezzano la loro attività in circa 143 giorni<sup>7</sup>. Un valore simile del tasso di decadimento del radio-tellurio è stato ottenuto da Meyer e Schweidler<sup>8</sup>.

Gli esperimenti sul radio-tellurio furono fatti sulle lastre di bismuto attivo fornite dal Dottor Sthamer di Amburgo, che erano state preparate sotto la direzione di Marckwald.

Una prova aggiuntiva<sup>9</sup> dell'identità di questi due prodotti fu ottenuta confrontando l'assorbimento dei raggi  $\alpha$  con un foglio di alluminio. I raggi  $\alpha$  da diversi prodotti sono emessi con diverse velocità e, di conseguenza, sono diversamente assorbiti dalla materia. L'assorbimento dei raggi  $\alpha$  dai due prodotti da parte del foglio di alluminio sono in stretto accordo, indicando la probabile identità delle sostanze dalle quali sono emessi.

Non vi può essere, pertanto, alcun dubbio che il costituente attivo presente nel radio-tellurio di Marckwald è identico al prodotto radio F. Questo è un risultato molto interessante e mostra come un esame più accurato delle trasformazioni successive dei corpi radioattivi possa fare luce sull'origine delle varie sostanze trovate nella pechblenda.

Abbiamo già visto (sezione 21) che Marckwald, con speciali metodi chimici, era in grado di ottenere qualche milligrammo di sostanze molto attive operando con 2 tonnellate di pechblenda. Abbiamo già visto (sezione 239) che questa sostanza, se ottenuta allo stato puro, è 400 volte più attiva del radio. Misure comparative dell'attività di questa sostanza con il radio indicheranno, pertanto, il grado di impurezza presente nel primo. Questo metodo darà il grado di purificazione del radio F allo scopo di determinarne lo spettro, che non è stato finora osservato.

**241. Polonio.** Dalla separazione della sostanza attiva di Marckwald, da lui chiamata radio-tellurio, si è discusso se il costituente attivo sia lo stesso di quello presente nel polonio di Madame Curie. Entrambe queste sostanze hanno simili proprietà radioattive e chimiche, ma la principale obiezione sulla loro identità è che essi si basa su una affermazione iniziale di Marckwald secondo la quale l'attività di una delle sue preparazioni non decade in modo significativo nel corso di sei mesi. Questa obiezione è ora rimossa, perché abbiamo visto che l'attività del radio-tellurio non decade abbastanza rapidamente. Fu inizialmente riconosciuto che l'attività del polonio, separato dalla pechblenda con il metodo di Madame Curie, non era permanente, ma decadeva nel tempo. Sono state fatte osservazioni molto precise sul tasso di decadimento, ma Madame Curie afferma che alcune delle sue preparazioni perdono metà della loro attività in circa sei mesi ma in altre il tasso di decadimento era minore. È possibile che le differenze osservate inizialmente nei tassi di decadimento di diversi campioni di polonio siano dovute alla presenza di radio D con il polonio. Il polonio in mio possesso perde la propria attività abbastanza rapidamente tanto che si è ridotta a un piccola parte del suo valore nel corso di circa quattro anni.

<sup>6</sup>Rutherford, Nature, p. 841, 9 febbraio 1905.

<sup>7</sup>Marckwald (Ber. d. D. Chem. Ges. p. 591, 1905) ha recentemente trovato che l'attività del suo radio-tellurio si dimezza in 139 giorni.

<sup>8</sup>Meyer e Schweidler, Wien, Ber. 1 dicembre, 1904.

<sup>9</sup>Rutherford, Phil. Trans. A. p. 169, 1904.

Osservazioni grossolane della sua attività, fatte di tanto in tanto, mostravano che la sua attività dimezzava in circa sei mesi. Se fosse identico al radio-tellurio, l'attività si dimezzerebbe in 143 giorni e io penso che rimanga solo un piccolo dubbio e che misure più accurate dimostreranno l'esattezza di tale ipotesi.

Finché la prova dell'identità del costituente attivo nel polonio non sarà così definitiva come per il radio-tellurio, penso che non vi sia dubbio che queste sostanze contengano entrambe la stessa sostanza attiva, che è il settimo prodotto di trasformazione del radio. Marckwald ha notato alcune differenze nel comportamento del polonio e radio-tellurio, ma poco peso si può dare a tali osservazioni, perché si deve ricordare che il costituente attivo in entrambi i casi è presente in quantità minute nel materiale in esame e che le proprietà chimiche apparenti delle sostanze attive sono molto influenzate dalla presenza delle impurità. La verifica più importante e affidabile rimane l'identità delle radiazioni e del periodo di decadimento.

**241. Origine del piombo radioattivo.** Discuteremo ora alcuni esperimenti che mostrano che il piombo radioattivo separato la prima volta dalla pechblenda da Hofmann (sezione 22) contiene i prodotti radio D,E,F. Hofmann ha osservato che l'attività di questa sostanza non decade in modo apprezzabile nel corso di numerosi anni. In alcuni recenti esperimenti, Hofmann, Gonder e Wöflf<sup>10</sup> hanno eseguito un esame chimico del piombo radioattivo e hanno mostrato la presenza di due costituenti radioattivi, che sono probabilmente identici ai prodotti radio E e F. Le misure radioattive erano sfortunatamente non molto precise e i periodi di trasformazione dei prodotti separati non sono stati esaminati molto precisamente.

Sono stati fatti esperimenti sull'effetto di sostanze aggiuntive a una soluzione di radio-piombo e rimuovendolo successivamente mediante precipitazione. Rimanevano nella soluzione per tre settimane piccole quantità di iridio, rodio, palladio e platino, sotto forma di cloruri, e poi venivano precipitati con formalina o idrossilamina. Tutte queste sostanze emettevano raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , essendo l'attività maggiore per il rodio e minore per il platino. Una grande parte dell'attività  $\beta$  scompariva nel corso di sei settimane e dell'attività  $\alpha$  in un anno. È probabile che i due prodotti radio E e F fossero in parte rimossi con i metalli dal radio-piombo. Abbiamo visto che il radio E emette raggi  $\beta$  e dimezza la propria attività in sei giorni, mentre il radio F emette solo raggi  $\alpha$  e la sua attività si dimezza in 143 giorni. Questa conclusione è ulteriormente confermata dagli esperimenti sull'effetto del calore sull'attività di queste sostanze. Riscaldando a un pieno calor rosso, l'attività  $\alpha$  era persa in pochi secondi. Questo è in accordo con i risultati (sezione 232) dove abbiamo visto che il radio F volatilizza a circa 1000 °C e il radio E rimane.

Sali d'oro, argento e mercurio aggiunti al radio-piombo mostravano solo attività  $\alpha$  dopo la rimozione. Ciò è in accordo con l'idea che solo il radio F è rimosso con queste sostanze. Sali di bismuto, d'altro canto, mostravano inizialmente attività  $\alpha$  e  $\beta$ , ma quest'ultima svaniva rapidamente. La presenza di raggi  $\beta$  nei nuovi preparati di polonio fu osservata la prima volta da Madame Curie. L'attività  $\alpha$  e  $\beta$  del radio-piombo è molto ridotta dalla precipitazione del bismuto aggiunto alla soluzione. L'attività  $\alpha$  e  $\beta$  del radio-piombo, tuttavia, si riprende ancora. Questo risultato è esattamente quello atteso se il radio-piombo contiene radio D,E,F. Radio E e F sono rimossi con il bismuto, ma la sostanza genitrice, radio D, rimane e, di conseguenza, si ha una nuova fornitura di radio E e F.

Ulteriori esperimenti sono necessari per stabilire definitivamente se i prodotti separati dal radio-piombo sono identici al radio E e F, non vi è dubbio che così è. Questa conclusione è rafforzata da alcuni esperimenti che ho eseguito su un campione di radio-piombo, che mi aveva gentilmente offerto Mr Boltwood di New Haven. Questo piombo attivo emette raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , questi ultimi essendo presenti insolitamente in grande proporzione. Il piombo attivo aveva quattro mesi quando fu misurato la prima volta. L'attività  $\beta$  nei successivi sei mesi rimase sensibilmente costante, ma l'attività  $\alpha$  era costantemente aumentata. Questi risultati sono attesi se il radio-piombo contiene radio D. Il radio E raggiungerà un massimo circa 40 giorni dopo la separazione del prodotto radio D con il piombo. L'attività  $\alpha$  dovuta al radio F aumenterà a un massimo in circa 2.6 anni (si veda la sezione 236).

Sono richiesti ulteriori esperimenti per stabilire se il piombo immediatamente dopo la separazione dalla pechblenda contiene solo radio D o se con esso è presente anche il radio E. Sembra, tuttavia, verosimile che il bismuto, che è inizialmente presente in soluzione nel momento della separazione del piombo, ritenga sia il radio E che il radio F e che la presenza di questi prodotti nel radio-piombo sia dovuta alla loro produzione, dopo la separazione, dalla sostanza genitrice, radio D.

Avrà valore scientifico la separazione del radio D dalla pechblenda e il suo ottenimento allo stato puro, perché, un mese dopo la rimozione, l'attività  $\beta$  da esso sarà circa 300 volte maggiore di un uguale peso di radio. Ponendo una lastra di bismuto in una soluzione di questa sostanza, il radio F (polonio) risulterà separato, e, purché si consideri un intervallo di tempo sufficiente, si può ottenere una nuova fornitura di radio F in ogni istante.

Il tasso di trasformazione del radio D (dimezzamento in 40 anni) è sufficientemente lento da non interferire sulla sua utilità in molti esperimenti.

<sup>10</sup>Hofmann, Gonder e Wöflf, Annal. d. Phys. 15, p. 615, 1904.

I risultati del confronto dei prodotti del radio con quelli contenuti in polonio, radi-tellurio e radio-piombo sono qui sotto riassunti.

$$\text{Prodotti nel radio - piombo} \left\{ \begin{array}{l} \text{Radio D=prodotto in nuovo radio-piombo, senza raggi. Dimezzamento 40 giorni} \\ \downarrow \\ \text{Radio E emette raggi } \beta, \text{ separato con bismuto, iridio e platino. Dimezzamento 143 giorni} \\ \downarrow \\ \text{Radio F=prodotto in polonio e radio-tellurio. Emette solo } \alpha. \text{ Dimezzamento 143 giorni} \end{array} \right.$$

**242. Attività temporanea di materia inattiva separata dalle sostanze radioattive.** Abbiamo visto nell'ultima sezione che i metalli platino e bismuto acquistano un'attività temporanea mescolandoli con una soluzione di radio-piombo e che questi effetti sono spiegati in modo molto soddisfacente dall'ipotesi che alcuni dei prodotti di trasformazione del radio-piombo sono rimossi con le sostanze inattive. Effetti molto simili sono stati osservati da Pegram e von Lerch (sezione 186), quando si aggiungono sostanze inattive alle soluzioni di torio e del deposito attivo del torio. Questi risultati sono quasi certamente dovuti alla rimozione di uno o più prodotti del torio con la materia inattiva. Esempi di questo tipo si possono facilmente moltiplicare, e alcuni dei più interessanti e importanti di questi saranno brevemente discussi in seguito.

Ci sono stati due punti di vista generali riguardanti il carattere di questa attività che è temporaneamente acquisita dalla materia inattiva. Alcuni hanno supposto che le molecole inattive della sostanza, mescolate con la soluzione, acquistano per "induzione radioattiva" attività temporanea, e l'idea sottostante è che la mescolanza di una sostanza inattiva con una attiva comunichi la proprietà di irraggiare ad alcune molecole della prima. In accordo con la teoria della disintegrazione della radioattività, d'altro canto, l'attività temporanea della originaria materia inattiva non è dovuta ad una alterazione della stessa sostanza inattiva, ma ad una mescolanza con essa di uno o più dei numerosi prodotti radioattivi. L'idea dell'"induzione radioattiva" non ha chiare prove sperimentali a sostegno, mentre vi sono molte prove indirette contro di essa.

Considereremo ora come questi fatti sono interpretati secondo la teoria della disintegrazione. In un campione di radio datato, per esempio, vi sono presenti, oltre allo stesso radio, i sette prodotti successivi che da esso derivano. Ognuno di essi differisce per le proprietà fisiche e chimiche dagli altri. Se ora, per esempio, si introduce una barra di bismuto nella soluzione, uno o più di questi prodotti risulta depositato sul bismuto. Questa azione ha una natura molto probabilmente elettrolitica e dipenderà dal comportamento elettrochimico del bismuto rispetto a quello dei prodotti in soluzione. Una sostanza elettronegativa tenderà a rimuovere il prodotto o i prodotti che sono fortemente elettropositivi. Questa interpretazione serve a spiegare perché diversi metalli sono resi attivi in modo diverso, in base alla loro posizione nelle serie elettrochimiche.

Sembra probabile che l'attività comunicata alla materia inattiva per precipitazione da una soluzione attiva avvenga solo durante la precipitazione. La correttezza di questa ipotesi potrà essere facilmente verificata osservando se il tempo in cui la sostanza inattiva è presente in soluzione ha un qualche effetto sulla grandezza dell'attività ad essa impartita.

Da quando si è ricordato che nella pechblenda sono presenti i radio elementi uranio, torio e attinio e le loro numerose famiglie di prodotti, non è sorprendente che molte delle sostanze inattive separate da essi possano mostrare una considerevole attività dovuta alla mescolanza dei prodotti che da essa possono essere rimossi. Nell'attuazione degli esperimenti sulla separazione del radio dalla pechblenda, M. e Madame Curie osservarono che la separazione della sostanza attiva è quasi completa se la fase di purificazione non è anticipata. Rame, antimonio e arsenico possono essere separati solo leggermente attivi, ma altre sostanze come piombo e ferro mostrano sempre attività. Quando la fase di precipitazione è più avanzata, ogni sostanza separata dalla soluzione attiva mostra attività.

Una delle prime osservazioni in questa direzione fu fatta da Debierne, il quale trovò che il bario diveniva attivo in soluzione con l'attinio. Il bario attivo rimosso dall'attinio preservava ancora la sua attività dopo il trattamento chimico e, in questo modo, si otteneva il cloruro di bario con un'attività 6000 volte quella dell'uranio. Sebbene l'attività del cloruro di bario potesse essere concentrata nello stesso modo dell'attività del cloruro di bario radiferò, esso non mostrava ognuna delle righe spettroscopiche del radio e ciò non era dovuto alla mescolanza di quell'elemento con il bario. L'attività del bario non era permanente e Debierne stabilì che essa si riduceva a un terzo del suo valore in tre mesi. Sembra probabile che il bario precipitato trasportasse con sé il prodotto attinio X e anche lo stesso attinio e che il decadimento osservato fosse dovuto alla trasformazione dell'attinio X. È interessante notare che il bario è in grado di rimuovere un gran numero di prodotti dei diversi radio-elementi. Questo effetto è probabilmente collegato alla sua posizione nelle serie elettrochimiche, essendo il bario altamente elettropositivo.

Giesel mostrò nel 1900 che il bismuto poteva essere reso attivo ponendolo in una soluzione di radio e considerò che il polonio era in realtà bismuto attivato dal processo di induzione. Ne successivi esperimenti, trovò che la placca di bismuto emetteva solo raggi  $\alpha$  e che l'attività del bismuto non poteva essere attribuita al radio per la mancanza di raggi  $\beta$ . Abbiamo visto che questa attività del bismuto è dovuta al prodotto radio F depositato sulla sua superficie.

Madame Curie trovò che il bismuto era attivato dalla soluzione con un composto di radio e succedeva frazionando il bismuto allo stesso modo del polonio. In questo modo si otteneva bismuto 2000 volte più attivo dell'uranio, ma l'attività, come quella del polonio separato dalla pechblenda, decresceva nel tempo. Alla luce degli esperimenti sui prodotti di trasformazione del radio, si vede che questi primi esperimenti di Madame Curie aggiungono ulteriori conferme all'ipotesi che il prodotto (radio F) separato dal radio è identico al polonio ottenuto direttamente dalla pechblenda.

## Tasso di emissione dell'energia

243. Si è in precedenza ammesso che una considerevole quantità di energia è emessa dai corpi radioattivi sotto forma di radiazione caratteristica. La maggior parte delle prime stime della quantità di questa energia furono basate sul numero e sull'energia delle particelle emesse, e risultarono troppo basse. È stato sottolineato (sezione 114) che la parte maggiore dell'energia emessa dai corpi radioattivi sotto forma di radiazioni ionizzanti è dovuta ai raggi  $\alpha$  e che i raggi  $\beta$  al confronto ne forniscono solo una frazione molto piccola.

Rutherford e McClung<sup>1</sup> fecero una stima dell'energia dei raggi, emessi da un sottile strato di materia attiva, determinando il numero totale degli ioni prodotti dal completo assorbimento dei raggi  $\alpha$ . L'energia richiesta per produrre uno ione fu determinata sperimentalmente dalle osservazioni dell'effetto riscaldante dei raggi X e dal numero totale degli ioni prodotti quando i raggi erano completamente assorbiti in aria. L'energia richiesta per produrre uno ione in aria fu trovato essere  $1.90 \cdot 10^{-10}$  *erg*. Questa, come mostreremo in seguito nell'Appendice A, è probabilmente una sovrastima, ma con il corretto ordine di grandezza. Da questo si calcolò che un grammo di ossido di uranio distribuito su una lastra come un sottile strato di polvere emetteva energia nell'aria al tasso di 0.032 grammo-calorie per anno. Questa è un'emissione molto piccola di energia, ma nel caso di una sostanza fortemente radioattiva come il radio, la cui attività è circa due milioni di volte quella dell'uranio, la corrispondente emissione di energia è di 69000 grammo-calorie per anno. Questa è ovviamente una sottostima, perché include solo l'energia irradiata in aria. La quantità effettiva di energia rilasciata sotto forma di raggi  $\alpha$  è evidentemente molto maggiore di questa tenendo conto dell'assorbimento dei raggi  $\alpha$  da parte della stessa materia attiva.

Si mostrerà in seguito che l'effetto riscaldante del radio e dei suoi prodotti è una misura dell'energia delle particelle  $\alpha$  emesse.

**244, Calore emesso dal radio.** P. Curie e Laborde<sup>2</sup> per primi posero l'attenzione sullo straordinario risultato che un composto di radio si manteneva costantemente ad una temperatura di parecchi gradi più alta di quella dell'atmosfera circostante. L'energia emessa dal radio si può dimostrare, pertanto, con il suo diretto riscaldamento così come con i metodi fotografico ed elettrico. Curie e Laborde determinarono il tasso di emissione di calore in due modi diversi. In un metodo la differenza della temperatura era osservata per mezzo di una termocoppia ferro-costantina tra un tubo contenente un grammo di cloruro di bario radifero, di attività circa  $\frac{1}{6}$  del radio puro, e un identico tubo contenente un grammo di cloruro di bario puro. La differenza di temperatura osservata era di  $1.5^\circ C$ . Per misurare il tasso di emissione del calore, era posta una bobina di resistenza nota nel cloruro di bario puro e si valutava l'intensità della corrente elettrica richiesta per dare al bario la stessa temperatura di quello radifero. Nell'altro metodo, il bario attivo, racchiuso in un tubo di vetro, era posto dentro un calorimetro Bunsen. Prima di introdurre il radio, si osservava che il livello del mercurio nel gambo rimanesse costante. Non appena il radio, che era precedentemente raffreddato in ghiaccio fondente, era posto nel calorimetro, la colonna di mercurio iniziava a muoversi ad un ritmo regolare. Se il tubo con il radio era rimosso, il movimento del mercurio cessava. Si trovò da questo esperimento che l'emissione di calore da 1 *g* di bario radifero, contenente circa  $\frac{1}{6}$  del suo peso di cloruro di radio puro, era di 14 grammo-calorie per ora. Furono fatte misure anche con 0.08 *g* di cloruro di radio puro. Curie e Laborde dedussero da questi risultati che 1 *g* di radio puro emette una quantità di calore uguale a circa 100 grammo-calorie per ora. Questo risultato fu confermato dagli esperimenti di Runge e Precht<sup>3</sup> e altri. Per quanto sappiamo finora, questo tasso di emissione del calore è continuo e invariato nel tempo. Pertanto, 1 *g* di radio emette durante un giorno 2400, e durante un anno 876000 grammo-calorie. La quantità di calore sviluppata nell'unione di idrogeno e ossigeno per formare 1 *g* di acqua è 3900 grammo-calorie. Si vede, pertanto, che 1 *g* di radio emette ogni giorno molta più energia di quella richiesta per dissociare 1 *g* di acqua.

In alcuni degli ultimi esperimenti usando 0.7 *g* di bromuro di radio puro, P. Curie<sup>4</sup> trovò che la temperatura del radio indicata dal termometro di mercurio era di  $3^\circ C$  sopra quella dell'aria circostante. Questo risultato fu confermato da Giesel, che ottenne una differenza di temperatura di  $5^\circ C$  con 1 *g* di bromuro di radio. L'aumento effettivo di temperatura osservato dipendeva ovviamente dalle dimensioni e dalla natura del contenitore del radio.

Durante la loro visita in Inghilterra nel 1903 alle lezioni alla Royal Institution, M. e M.me Curie eseguirono alcuni esperimenti con il Professor Dewar, per misurare con un altro metodo il tasso di emissione del calore dal radio a temperatura

<sup>1</sup>Phil. Trans, A. p. 25, 1901.

<sup>2</sup>P. Curie e Laborde, C. R. 136, p. 673, 1908.

<sup>3</sup>Runge e Precht, Sitz. Ak. Wiss. Berlin, Mo. 38, 1903.

<sup>4</sup>P. Curie, Société de Physique, 1903.

molto bassa. Questo metodo dipendeva dalla misura della quantità di gas volatilizzato quando si poneva una preparazione di radio all'interno di un tubo immerso in un gas liquefatto al suo punto di ebollizione. Il dispositivo del calorimetro è mostrato in Figura 97.

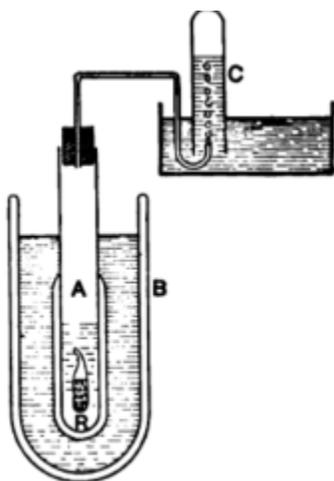


Fig. 97.

La piccola boccetta Dewar chiusa A contiene il radio in un tubo di vetro R, immerso nel liquido da impiegare. La boccetta A è circondata da un altro bulbo Dewar B, contenente lo stesso liquido, cosicché nessun calore è comunicato ad A dall'esterno. Il gas liberato nel tubo A è raccolto nel modo solito sull'acqua o sul mercurio e il suo volume determinato. Con questo metodo, il tasso di emissione del radio era circa lo stesso di quello nel biossido di carbonio e nell'ossigeno, e anche nell'idrogeno liquido. Uno speciale interesse va dato al risultato ottenuto con l'idrogeno liquido, poiché a questa bassa temperatura la consueta attività chimica è sospesa. Il fatto che l'emissione di calore del radio sia inalterata su un così ampio range di temperature indirettamente mostra che il tasso di espulsione delle particelle  $\alpha$  dal radio è indipendente dalla temperatura, e si mostrerà in seguito che l'effetto riscaldante osservato è dovuto al bombardamento delle particelle  $\alpha$  del radio.

L'uso dell'idrogeno liquido è molto conveniente per dimostrare il tasso di emissione del calore da una piccola quantità di radio. Da 0.7 g di bromuro di radio (preparato solo 10 giorni prima) si ottenevano  $73 \text{ cm}^3$  di gas al minuto.

Nell'ultimo esperimento P. Curie (citato) trovò che il tasso di emissione del calore da una data quantità di radio dipendeva dal tempo trascorso dalla sua preparazione. L'emissione di calore era inizialmente piccola, ma dopo un intervallo di un mese raggiungeva un massimo. Se il composto di radio è disciolto e posto in un tubo sigillato, il tasso di emissione del calore raggiunge lo stesso massimo di una uguale quantità di radio allo stato solido.

**245. Connessione tra emissione di calore e radiazioni.** L'osservazione di Curie che il tasso di emissione del calore dipendeva dall'età della preparazione del radio portava alla conclusione che il fenomeno dell'emissione di calore del radio era collegato con la radioattività di quell'elemento. Era noto da tempo che i composti del radio aumentavano la loro attività per circa un mese dopo la loro preparazione, fino a che essi raggiungevano uno stato stazionario. Si è mostrato (sezione 215) che questo aumento di attività è dovuto alla continua produzione da parte del radio dell'emanazione radioattiva, che è racchiusa nel composto di radio e aggiunge le sue radiazioni a quelle del radio. Sembrava, pertanto, probabile che l'effetto di riscaldamento fosse in qualche modo connesso con la presenza dell'emanazione. Alcuni esperimenti su questa questione furono eseguiti da Rutherford e Barnes<sup>5</sup>. Per misurare la piccola quantità di calore emesso, fu impiegato un tipo di calorimetro differenziale ad aria mostrato in Figura 98. Due beute uguali di vetro di circa  $500 \text{ cm}^3$  furono riempite con aria secca a pressione atmosferica. Queste beute furono collegate tramite un tubo di vetro a U riempito con xilene, che fungeva da manometro per determinare ogni variazione di pressione dell'aria nelle beute. Un piccolo tubo di vetro, chiuso all'estremità inferiore, era introdotto nel mezzo di ogni beuta. Quando una sorgente continua di calore venne introdotta nel tubo di vetro, l'aria che lo circondava fu riscaldata e la pressione aumentata. La differenza di pressione, al raggiungimento di una condizione stazionaria, fu osservata sul manometro per mezzo di un microscopio con una scala micrometrica all'oculare. Ponendo la sorgente di calore nel tubo simile dell'altra beuta, la differenza di pressione era invertita. Per mantenere l'apparato a temperatura costante, le due beute erano immerse in un bagno d'acqua che era sempre mescolata.

<sup>5</sup>Rutherford e Barnes, Nature, 29 ottobre 1903. Phil. Mag. febbraio 1904.

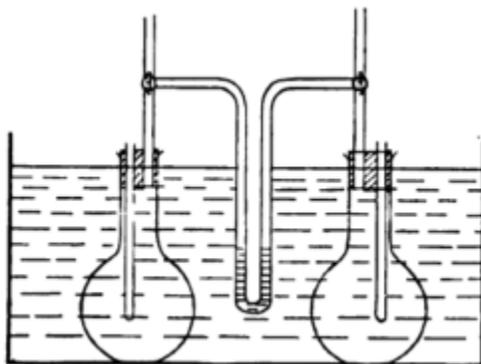


Fig. 98.

Le prime osservazioni sull'emissione del calore furono eseguite con 30 *mg* di bromuro di radio. La differenza di pressione osservata sul manometro era standardizzata ponendo una piccola spira di resistenza nota al posto del radio. L'intensità della corrente attraverso la spira era aggiustata per fornire la stessa differenza di pressione sul manometro. In questo modo si trovò che l'emissione di calore per grammo di bromuro di radio corrispondeva a 65 grammo-calorie per ora. Assumendo il peso atomico del radio pari a 225, questo è equivalente a un tasso di emissione di calore da un grammo di radio metallico di 110 grammo-calorie per ora.

L'emanazione da 30 *mg* di bromuro di radio fu poi rimossa riscaldando il radio (sezione 215). Passando l'emanazione attraverso un piccolo tubo di vetro immerso in aria liquida, l'emanazione condensava. Il tubo era sigillato mentre l'emanazione si condensava nel tubo. In questo modo l'emanazione era concentrata in un piccolo tubo di vetro lungo circa 4 *cm*. L'effetto riscaldante del radio privo di emanazione e del tubo con l'emanazione era poi determinato ad intervalli di tempo. Si trovò che, dopo la rimozione dell'emanazione, l'effetto riscaldante del radio decadeva nel corso di qualche ora a un minimo, corrispondente a circa il 25% dell'emissione di calore iniziale, per poi aumentare gradualmente fino a raggiungere il suo valore iniziale dopo circa un mese. L'effetto riscaldante dell'emanazione nel tubo aumentava per le prime ore dopo la separazione a un massimo per poi decadere regolarmente nel tempo secondo una legge esponenziale, dimezzandosi in circa 4 giorni. L'effettiva emissione di calore dell'emanazione era determinata inviando una corrente attraverso una bobina che occupava la stessa lunghezza e posizione del tubo con l'emanazione.

La variazione nel tempo dell'effetto riscaldante da 30 *mg* di radio e dall'emanazione è mostrata in Figura 99.

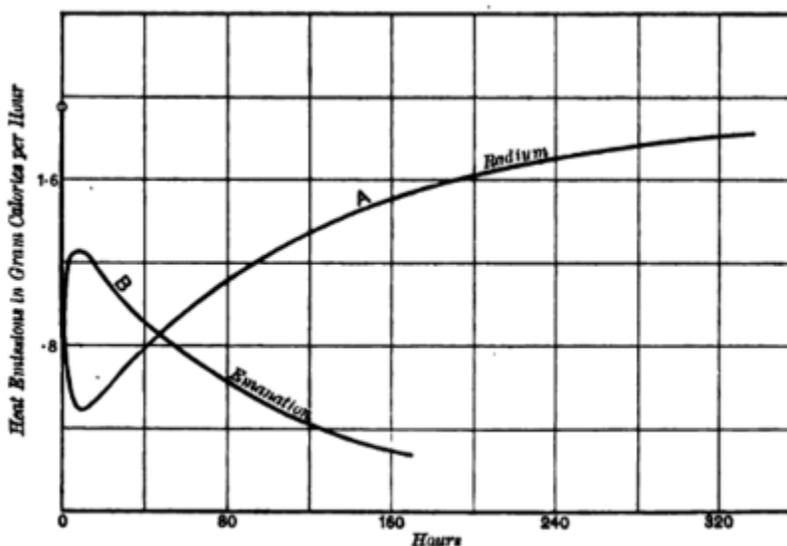


Fig. 99.

La curva A mostra la variazione nel tempo dell'emissione di calore del radio e la curva B quella dell'emanazione. La somma totale tasso di emissione del radio e dell'emanazione fu trovata per ogni istante uguale a quella del radio originario. Il massimo effetto riscaldante del tubo contenente l'emanazione da 30 *mg* di bromuro di radio fu di 1.26 grammo-calorie per ora. L'emanazione insieme con i prodotti secondari che da essa derivano, ottenuta da un grammo di radio, dovrebbe fornire allora 42 grammo-calorie per ora. L'emanazione accumulata nel radio è, quindi, responsabile per più dei due terzi dell'emissione totale di calore dal radio. Si vedrà in seguito che la diminuzione verso un minimo dell'effetto riscaldante del radio, dopo la rimozione dell'emanazione, è collegata con il decadimento dell'attività eccitata. Analogamente, l'aumento dell'effetto riscaldante dell'emanazione verso un massimo alcune ore dopo la rimozione è pure

un risultato dell'attività eccitata prodotta dall'emanazione sulle pareti del contenitore. Trascurando per il momento questi rapidi cambiamenti iniziali nell'emissione del calore, si vede che l'effetto riscaldante dell'emanazione e dei suoi prodotti, dopo il raggiungimento di un massimo, diminuisce con lo stesso tasso con cui l'emanazione perde la propria attività, cioè, si dimezza in quattro giorni. Se  $Q_{max}$  è il massimo effetto riscaldante e  $Q_t$  l'effetto riscaldante in ogni istante  $t$  successivo, allora  $\frac{Q_t}{Q_{max}} = e^{-\lambda t}$  dove  $\lambda$  è la costante di trasformazione dell'emanazione.

La curva di recupero dell'effetto riscaldante del radio dal suo valore minimo è identica a quella della sua attività misurata dai raggi  $\alpha$ . Poiché il minimo effetto riscaldante è il 25% del totale, l'emissione di calore  $Q_t$  in ogni istante  $t$  dopo il raggiungimento di un minimo è dato da

$$\frac{Q_t}{Q_{max}} = 0.25 + 0.75 (1 - e^{-\lambda t})$$

dove  $Q_{max}$  è il tasso massimo di emissione del calore e  $\lambda$ , come prima, è la costante di trasformazione dell'emanazione.

L'identità delle curve di recupero e diminuzione dell'effetto riscaldante del radio e delle sua emanazione con le corrispondenti curve per l'aumento e diminuzione della radioattività mostra che l'emissione di calore del radio e dei suoi prodotti è direttamente collegata alla loro radioattività. La variazione nell'emissione di calore del radio e della sua emanazione è approssimativamente proporzionale alla loro attività misurata dai raggi  $\alpha$ . Non è proporzionale all'attività misurata con i raggi  $\beta$  o  $\gamma$ , perché la loro intensità tende a zero alcune ore dopo la rimozione dell'emanazione, mentre l'attività  $\alpha$ , come l'effetto riscaldante, tende al 25%. Questi risultati sono, pertanto, in accordo con l'ipotesi che l'emissione di calore del radio accompagna l'espulsione di particelle  $\alpha$  e che è approssimativamente proporzionale al numero espulso. Prima che una tale conclusione possa essere considerata certa, è necessario mostrare che l'effetto riscaldante del deposito attivo dall'emanazione varia allo stesso modo dell'attività  $\alpha$ . Saranno ora considerati esperimenti per verificare questo aspetto.

**246. Emissione di calore del deposito attivo dall'emanazione.** Il Radio nuovo in equilibrio radioattivo contiene quattro prodotti successivi che si spezzano con l'emissione di particelle  $\alpha$ , cioè, lo stesso radio, l'emanazione, il radio A e C. Il radio B non emette radiazioni. L'effetto dei prodotti successivi D,E,F si possono trascurare, se il radio non è stato preparato da più di un anno.

Non è facile stabilire definitivamente l'attività relativa fornita da ognuno di questi prodotti in condizioni di equilibrio radioattivo, ma si è mostrato nella sezione 229 che l'attività non è molto diversa per i quattro prodotti emettenti  $\alpha$ . Le particelle  $\alpha$  dal radio A e C sono più penetranti di quelle dal radio e dall'emanazione. La prova ad ora ottenuta porta alla conclusione che l'attività fornita dall'emanazione è minore di quella fornita da altri prodotti. Ciò indica che le particelle  $\alpha$  dall'emanazione sono emesse con minore velocità che negli altri casi.

Quando l'emanazione è rapidamente rilasciata dal radio per riscaldamento o soluzione, i prodotti radio A, B, C rimangono. Poiché la materia genitrice è rimossa, la quantità dei prodotti A,B,C comincia subito a diminuire e dopo circa tre ore raggiunge un valore molto piccolo. Se l'effetto riscaldante dipende dall'emissione del radio dovrebbe rapidamente diminuire a un minimo dopo la rimozione dell'emanazione.

Quando l'emanazione è introdotta in un contenitore, i prodotti radio A,B,C mostrano subito un aumento in quantità, raggiungendo un valore massimo circa 3 ore dopo. L'effetto riscaldante dell'emanazione aumenta, pertanto, per parecchie ore dopo l'introduzione dell'emanazione.

Per seguire i rapidi cambiamenti nell'effetto riscaldante del radio, dopo la rimozione dell'emanazione, Rutherford e Barnes (citato) usarono una coppia di termometri differenziali al platino. Ogni termometro era formato da un filo sottile di platino lungo 35 cm, avvolto accuratamente all'interno di un sottile tubo di vetro del diametro di 5 mm, formante una spirale lunga 3 cm. Il tubo di vetro contenente il radio e anche quello contenente l'emanazione furono scelti per scorrere facilmente all'interno della spirale, essendo il filo a diretto contatto con l'avvolgimento di vetro contenente la sorgente di calore. La variazione della resistenza dei termometri di platino era facilmente misurata, quando il radio o l'emanazione erano trasferiti da una spirale all'altra.

L'effetto riscaldante del radio in equilibrio radioattivo fu determinato inizialmente in modo accurato. Il tubo con radio era riscaldato per far fuoriuscire l'emanazione, che era rapidamente condensata in un piccolo tubo di vetro lungo 3 cm e del diametro interno di 3 mm. Dopo un breve tempo per consentire alla temperatura di divenire stazionaria, veniva misurato l'effetto riscaldante del radio. I risultati sono mostrati in Figura 100.

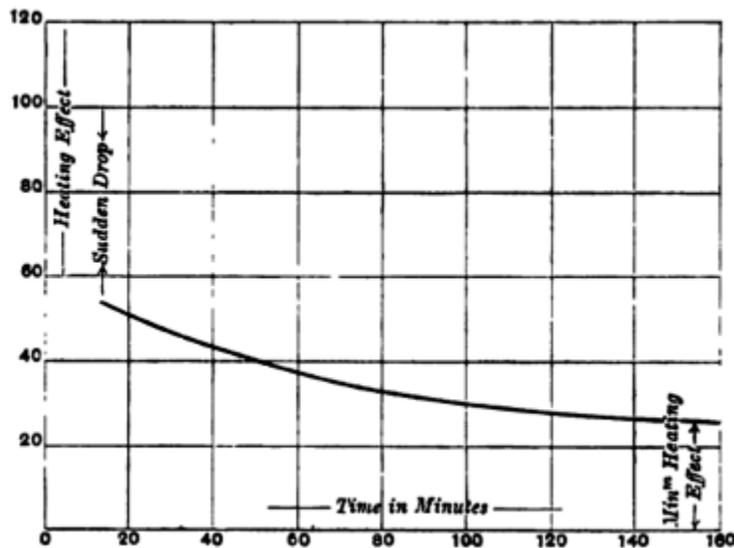


Fig. 100.

Un'osservazione non fu eseguita prima di circa 12 minuti dalla rimozione dell'emanazione e l'effetto riscaldante si riduceva a circa il 55% del valore massimo. Diminuiva costantemente con il tempo raggiungendo infine un valore minimo del 25%, parecchie ore dopo.

Non è possibile negli esperimenti di questo tipo separare l'effetto riscaldante dell'emanazione da quello fornito dal radio A. Poiché A si dimezza in tre minuti, il suo effetto riscaldante scomparirà in massima parte dopo 10 minuti e la diminuzione sarà allora principalmente dovuta alla trasformazione nel radio B e C.

La variazione nel tempo dell'effetto riscaldante del deposito attivo è ancora più chiaramente messa in evidenza da un'esame dell'aumento dell'effetto riscaldante quando l'emanazione è introdotta in un piccolo tubo e della diminuzione dell'effetto riscaldante dopo la rimozione dell'emanazione. La curva di crescita è mostrata nella curva superiore della Figura 101.

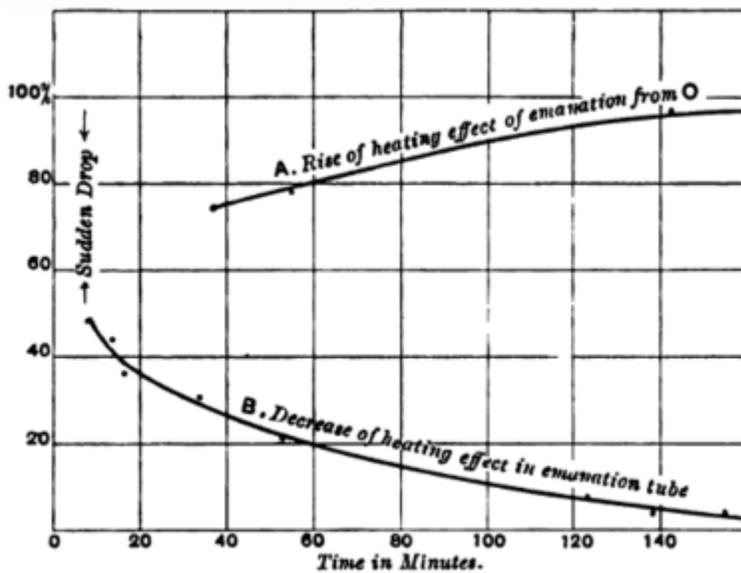


Fig. 101.

40 minuti dopo l'introduzione dell'emanazione, l'effetto riscaldante era salito al 75% del valore massimo che è stato raggiunto dopo un intervallo di circa 3 ore.

Dopo che l'effetto riscaldante dell'emanazione aveva raggiunto un massimo, l'emanazione è stata rimossa e il decadimento nel tempo osservato nel più breve tempo possibile. I risultati sono mostrati nella curva inferiore della Figura 101. Si vede che le due curve di crescita e decadimento sono tra loro complementari. La prima osservazione fu eseguita 10 minuti dopo la rimozione e l'effetto riscaldante è sceso poi al 47% del valore originario. L'improvvisa caduta è dovuta in parte alla rimozione dell'emanazione in parte alla rapida trasformazione del radio A. La curva inferiore è quasi identica nella forma alla corrispondente curva dei raggi  $\alpha$  per il decadimento dell'attività eccitata dopo una lunga esposizione (si veda la Figura 86) e mostra chiaramente che l'effetto riscaldante è direttamente proporzionale all'attività misurata dai raggi

$\alpha$  sull'intero intervallo esaminato. L'effetto riscaldante diminuisce secondo la stessa legge e allo stesso ritmo dell'attività misurata dai raggi  $\alpha$ .

Venti minuti dopo la rimozione dell'emanazione, il radio A è stato quasi completamente trasformato e l'attività è, quindi, proporzionale alla quantità di radio C presente, poiché il prodotto intermedio B non emette raggi. Lo stretto accordo tra le curve dell'attività e dell'emissione di calore mostra che l'effetto riscaldante è proporzionale anche alla quantità di radio C. Possiamo, pertanto, concludere che il prodotto B privo di raggi contribuisce poco. Se il radio B fornisse la stessa quantità del radio C, la curva di diminuzione dell'effetto riscaldante nel tempo differirebbe in modo considerevole dalla curva dell'attività.

La conclusione che la trasformazione del radio B non è accompagnata dal rilascio di molto calore come nelle altre trasformazioni è prevedibile se l'effetto riscaldante è principalmente dovuto all'energia di moto delle particelle  $\alpha$  espulse.

L'effetto riscaldante relativo dovuto ai prodotti del radio è mostrato nella tabella seguente. L'effetto riscaldante iniziale di C è dedotto dal confronto con la corrispondente curva di attività.

Prodotti	Radiazione	Tasso iniziale di emissione del calore
Radio	raggi $\alpha$	25% del totale
Emanazione	raggi $\alpha$	44% del totale
Radio A	raggi $\alpha$	
Radio B	nessun raggio	0% del totale
Radio C	raggi $\alpha, \beta, \gamma$	31% del totale

Poiché il radio A e C forniscono quasi una uguale proporzione di attività, è probabile che essi abbiano un uguale effetto riscaldante iniziale. Se così fosse, l'effetto riscaldante dell'emanazione da solo è il 13% del totale.

**247. Effetti riscaldanti dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$ .** Si è mostrato nella sezione 114 che l'energia cinetica delle particelle  $\beta$  emesse dal radio non è probabilmente maggiore dell'1% di quella dovuta alle particelle  $\alpha$ . Se l'emissione di calore è un risultato del bombardamento da parte delle particelle espulse dalla sua massa, ci si deve aspettare che l'effetto riscaldante dei raggi  $\beta$  sia molto piccolo rispetto a quello dovuto ai raggi  $\alpha$ . Questa anticipazione è nata dalle misure sperimentali. Curie misurò l'effetto riscaldante del radio (1) racchiuso in un sottile involucro e (2) circondato da un millimetro di piombo. Nel primo caso una grande parte dei raggi  $\beta$  sfuggiva mentre nel secondo quasi tutti erano assorbiti. L'incremento di potere riscaldante nel caso (2) era solo del 5% e questa è probabilmente una sovrastima.

In modo simile, poiché la ionizzazione totale dovuta ai raggi  $\beta$  è circa uguale a quella prodotta dai raggi  $\gamma$ , ci dovremmo aspettare che l'effetto riscaldante dei raggi  $\gamma$  sia molto piccolo rispetto a quello derivante dai raggi  $\alpha$ .

Paschen ha eseguito alcuni esperimenti sull'effetto riscaldante del radio in un calorimetro Bunsen a ghiaccio dove il radio era circondato da un spessore di 1.92 cm di piombo - una profondità sufficiente ad assorbire una grande parte dei raggi  $\gamma$ . Nella sua prima pubblicazione<sup>6</sup>, i risultati indicavano che l'effetto riscaldante dei raggi  $\gamma$  era perfino maggiore di quello dei raggi  $\alpha$ . Ciò non fu confermato da osservazioni successive con lo stesso metodo. Egli concluse che il calorimetro a ghiaccio non era affidabile per la misura di quantità di calore molto piccole.

Dopo la pubblicazione del primo articolo di Paschen, Rutherford e Barnes<sup>7</sup> esaminarono la questione con un metodo diverso. Fu impiegato un calorimetro ad aria del tipo mostrato in Figura 98 che offriva risultati molto soddisfacenti. L'emissione di calore del radio era misurata (1) quando il radio era circondato da un cilindro di alluminio e (2) da un cilindro di piombo delle stesse dimensioni. L'alluminio assorbiva solo una piccola parte dei raggi  $\gamma$  mentre il piombo ne fermava più della metà. Non fu osservata una sicura differenza tra l'effetto riscaldante nei due casi, sebbene dai primi esperimenti di Paschen vi fosse una differenza di almeno il 50%.

Dobbiamo, quindi, concludere che i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  insieme forniscono solo una piccola percentuale dell'emissione totale di calore del radio - un risultato che è in accordo con i calcoli basati sulla ionizzazione totale prodotta dai diversi tipi di raggi.

**248. Sorgente di energia.** Si è mostrato che l'effetto riscaldante del radio è strettamente proporzionale all'attività misurata dai raggi  $\alpha$ . Poiché l'attività è in genere misurata tra piatti paralleli posti a una distanza lungo la quale la maggior parte delle particelle  $\alpha$  sono assorbite nel gas, questo risultato mostra che l'effetto riscaldante è proporzionale all'energia delle particelle  $\alpha$  emesse. La rapida emissione di calore dal radio segue naturalmente dalla teoria della disintegrazione della radioattività. Si suppone che il calore derivi non da sorgenti esterne ma dall'energia interna dell'atomo di radio. L'atomo è ritenuto un sistema complesso consistente di parti cariche in rapido movimento e, di conseguenza, contenente una grande quantità di energia latente, che si può manifestare solo in caso di una sua rottura. Per questo motivo, il sistema atomico diviene instabile e una particella  $\alpha$ , di massa circa doppia di quella dell'atomo di idrogeno, sfugge, portando con sé la sua energia di movimento. Poiché le particelle  $\alpha$  dovrebbero essere assorbite in uno spessore di radio inferiore a 0.001 cm, la maggior parte delle particelle  $\alpha$ , espulse da una massa di radio, si dovrà fermare nel radio stesso e la loro energia di moto si manifesterà sotto forma di calore. Il radio allora si riscalderà per il suo stesso bombardamento al

<sup>6</sup>Paschen, Phys. Zeit. 15, 1904.

<sup>7</sup>Rutherford e Barnes, Nature, 18 dicembre 1904; Phil. Mag. maggio 1905.

di sopra della temperatura dell'aria circostante. L'energia delle particelle  $\alpha$  espulse probabilmente non giustifica l'intera emissione di calore del radio. È evidente che la violenta espulsione di una parte dell'atomo deve determinare un intenso disturbo elettrico nell'atomo. Allo stesso tempo, le parti restanti dell'atomo disintegrato si ridisporranno per formare un sistema stabile in modo permanente o solo temporaneo. Durante questo processo anche un poco di energia è probabilmente emessa, che si manifesta sotto forma di calore nel radio stesso.

L'ipotesi che l'emissione di calore sia dovuta in larga parte all'energia cinetica posseduta dalle particelle  $\alpha$  espulse è fortemente confermata dai calcoli sulla grandezza dell'effetto riscaldante atteso per tale ipotesi. Si è mostrato nella sezione 93 che un grammo di bromuro di radio emette circa  $1.44 \cdot 10^{11}$  particelle  $\alpha$  al secondo. Il numero corrispondente per 1 g di radio ( $Ra = 225$ ) è  $2.5 \cdot 10^{11}$ . Ora è stato calcolato dai dati sperimentali nella sezione 94, che l'energia cinetica media delle particelle  $\alpha$  espulse dal radio è  $5.9 \cdot 10^{-6}$  erg. Poiché tutte le particelle  $\alpha$  sono assorbite o nel radio stesso oppure nell'ambiente circostante, l'energia totale delle particelle  $\alpha$  emesse per secondo è  $1.5 \cdot 10^6$  erg. Ciò corrisponde ad una emissione di energia di circa 130 grammo-calorie per ora. L'effetto riscaldante osservato del radio è circa 100 grammo-calorie per ora. Considerando la natura del calcolo, l'accordo tra i valori studiati e sperimentali è assai vicino a quello atteso e ciò supporta direttamente l'ipotesi che l'emissione di calore del radio è dovuta in larga parte al bombardamento del radio e del suo contenitore da parte delle particelle  $\alpha$  espulse dalla sua massa.

**249. Effetto riscaldante dell'emanazione del radio.** Le enormi quantità di calore liberato nelle trasformazioni radioattive che sono accompagnate dall'espulsione di particelle  $\alpha$  è molto ben illustrata dal caso dell'emanazione del radio.

L'emissione di calore dell'emanazione rilasciata da 1 g di radio è 75 grammo-calorie per ora al suo massimo valore. Questa emissione di calore non è dovuta alla sola emanazione, ma anche ai suoi prodotti ulteriori che sono inclusi con esso. Poiché il tasso di emissione del calore decade esponenzialmente in funzione del tempo dimezzando il proprio valore in quattro giorni, la quantità totale del calore liberato durante la vita dell'emanazione da 1 g di radio è uguale a

$$\int_0^{\infty} 75e^{-\lambda t} dt = \frac{75}{\lambda} \simeq 10000 \text{ grammo - calorie}$$

poiché  $\lambda = 0.0072 \text{ ore}^{-1}$ . Il volume dell'emanazione da 1 g di radio è circa  $1 \text{ mm}^3$  a pressione e temperatura standard (sezione 172). Pertanto,  $1 \text{ cm}^3$  di emanazione durante la sua trasformazione emetterà  $10^7$  grammo-calorie. Il calore emesso durante la combinazione di  $1 \text{ cm}^3$  di idrogeno e ossigeno per formare l'acqua è circa 2 grammo-calorie. L'emanazione, pertanto, emette durante la sua trasformazione  $5 \cdot 10^6$  volte più energia della combinazione di un uguale volume di idrogeno e ossigeno per formare l'acqua, sebbene quest'ultima reazione sia accompagnata da un maggior rilascio di energia rispetto ad altre reazioni chimiche note.

La produzione di calore da  $1 \text{ cm}^3$  dall'emanazione del radio è circa 21 grammo-calorie per secondo. Questa generazione di calore sarebbe sufficiente a riscaldare al rosso, se non fondessero, le pareti del tubo di vetro contenente l'emanazione.

Il probabile tasso di emissione di calore da 1 g dell'emanazione si può facilmente dedurre, assumendo che l'emanazione ha un peso molecolare circa 100 volte quello dell'idrogeno. Poiché  $100 \text{ cm}^3$  di emanazione pesano circa 1 g, l'emissione totale di calore da 1 g di emanazione è circa  $10^9$  grammo-calorie.

Si può facilmente calcolare che un peso di una libbra di emanazione, al suo massimo, irradiano energia al tasso di circa 10000 cavalli vapore. Questo irraggiamento di energia si ridurrà con il tempo, ma l'emissione totale dell'energia durante la vita dell'emanazione corrisponderà a 60000 cavalli vapore al giorno.

**250. Effetti riscaldanti di uranio, torio e attinio.** Poiché l'emissione di calore del radio è una diretta conseguenza del suo bombardamento da parte delle particelle  $\alpha$  espulse dalla sua massa, ci si deve attendere che tutti i radio-elementi che emettono raggi  $\alpha$  emettano pure calore ad un tasso proporzionale alla loro attività  $\alpha$ .

Poiché l'attività del radio puro è probabilmente circa due milioni di volte quello di uranio e torio, l'emissione di calore da 1 g di torio o uranio dovrà essere circa  $5 \cdot 10^{-5}$  grammo-calorie per ora, o circa 0.44 grammo-calorie per anno. Questo è un tasso di generazione di calore molto piccolo, ma sarà rilevabile se si impiega una grande quantità di uranio o torio. Sono stati fatti esperimenti per determinare l'effetto riscaldante del torio da Pegram<sup>8</sup>. Tre chilogrammi di ossido di torio, racchiusi in un bulbo Dewar, erano mantenuti in un bagno di ghiaccio e veniva determinata la differenza di temperatura tra il torio e il bagno con una serie di coppie termoelettriche di ferro e costantana. La massima differenza di temperatura osservata era di  $0.04^\circ\text{C}$ , e, dal tasso di cambiamento della temperatura, fu calcolato che un grammo di ossido di torio liberava  $8 \cdot 10^{-5}$  grammo-calorie per ora. Una determinazione più accurata dell'emissione di calore è in svolgimento, ma i risultati ottenuti sono dell'ordine di grandezza atteso.

**251. Energia emessa da un prodotto radioattivo.** Un'importante conseguenza segue dal fatto che l'emissione di calore è una misura dell'energia delle particelle  $\alpha$  espulse. Se ogni atomo di ogni prodotto emette particelle  $\alpha$ , è possibile determinare subito l'emissione totale dell'energia da 1 g del prodotto. Le particelle  $\alpha$  da diversi prodotti sono scagliate con circa la stessa velocità e, di conseguenza, trasportano circa la stessa quantità di energia. È stato mostrato che l'energia di ogni particella  $\alpha$  espulsa dal radio è circa  $5.9 \cdot 10^{-6}$  erg. La maggior parte dei prodotti ha probabilmente un peso atomico

<sup>8</sup>Pegram, Science, 27 maggio 1904.

in un intorno di 200. Poiché vi sono  $3.6 \cdot 10^{19}$  molecole in un  $cm^3$  di idrogeno, si può facilmente calcolare che vi sono circa  $3.6 \cdot 10^{21}$  atomi in un grammo del prodotto.

Se ogni atomo del prodotto espelle una particella  $\alpha$ , l'energia totale emessa da 1 g della materia è circa  $2 \cdot 10^{16}$  erg o  $8 \cdot 10^8$  grammo-calorie. L'emissione totale di energia da un prodotto che emette solo raggi  $\beta$  è probabilmente circa un centesimo della quantità sopra.

In questo caso abbiamo considerato solo l'energia emessa da un singolo prodotto indipendentemente dai prodotti successivi che da esso derivano. Il radio, per esempio, può essere considerato un prodotto radioattivo che si spezza lentamente e produce quattro prodotti successivi emettenti raggi  $\alpha$ . L'emissione totale di calore da un grammo di radio e prodotti è allora circa cinque volte la quantità sopra, o  $4 \cdot 10^9$  grammo-calorie.

L'emissione totale di energia dal radio è discussa nella prossima sezione 266 da un punto di vista un poco differente.

**252. Numero di ioni prodotti da una particella  $\alpha$ .** Nella prima edizione di questo libro venne calcolato con parecchi metodi indipendenti che 1 g di radio emetteva circa  $10^{11}$  particelle  $\alpha$  al secondo. Poiché il numero effettivo è stato più tardi determinato (sezione 93) possiamo, al contrario, usare tale numero per determinare con maggiore precisione alcune delle costanti i cui valori sono assunti nel calcolo iniziale.

Per esempio, il numero totale di ioni prodotti da una particella  $\alpha$  nel gas si può determinare facilmente. Il metodo impiegato è il seguente: 0.484 mg di bromuro di radio furono disciolti in acqua e poi distribuiti uniformemente su una piastra di alluminio. Dopo l'evaporazione, la corrente di ionizzazione di saturazione, dovuta al radio alla sua attività minima, era di  $8.4 \cdot 10^{-6}$  ampere. Le piastre del contenitore di misura erano sufficientemente distanti da assorbire tutti i raggi  $\alpha$  nel gas. Il numero di particelle  $\alpha$  espulso al secondo nel gas fu trovato sperimentalmente essere  $8.7 \cdot 10^4$ . Prendendo la carica su uno ione come  $1.13 \cdot 10^{-19}$  coulomb (sezione 36), il numero totale di ioni prodotti al secondo nel gas era  $7.5 \cdot 10^{11}$ . Pertanto, ogni particella  $\alpha$  in media produceva 86000 ioni nel gas prima di essere assorbita.

Bragg (sezione 104) ha mostrato che le particelle  $\alpha$  dal radio alla loro minima attività sono stoppate in circa 3 cm di aria. I risultati da lui ottenuti indicano che la ionizzazione delle particelle per cm di cammino è minore vicino al radio che lontano da esso. Assumendo, tuttavia, in prima approssimazione che la ionizzazione sia uniforme lungo il cammino, il numero di ioni prodotti per cm di cammino dalla particella  $\alpha$  è 29000. Poiché la ionizzazione varia direttamente con la pressione, ad una pressione di 1 mm di mercurio il numero di ioni per unità di cammino sarà circa 38. Townsend (sezione 103) trovò che il numero massimo di ioni prodotti per unità di cammino in aria ad una pressione di 1 mm da un elettrone in moto era 20, e, in questo caso, era prodotta una nuova coppia di ioni ad ogni urto tra l'elettrone e le molecole. In questo caso la particella  $\alpha$ , che ha una grande massa rispetto a quella dell'elettrone, appare avere una maggiore sfera di influenza dell'elettrone e ionizzare il doppio delle molecole.

Inoltre, la particella  $\alpha$  produce molti più ioni per unità di cammino di un elettrone che si muove con la stessa velocità, perché si è mostrato (sezione 103) che l'elettrone diviene uno ionizzatore meno efficiente dopo aver raggiunto una certa velocità. Come ha sottolineato Bragg (citato), ciò è atteso, poiché la particella  $\alpha$  consiste di un gran numero di elettroni e di conseguenza sarà uno ionizzatore più efficiente dell'elettrone isolato. Un calcolo dell'energia richiesta per produrre uno ione da una particella  $\alpha$  è mostrato nell'Appendice A.

**253. Numero di particelle  $\beta$  espulse da un grammo di radio.** È importante confrontare il numero totale di particelle  $\beta$  espulse da un grammo di radio in equilibrio radioattivo, e come, dal punto di vista teorico, questo numero supporti una data relazione col numero totale di particelle  $\alpha$  emesse. Abbiamo visto che il radio in equilibrio radioattivo contiene quattro prodotti che emettono raggi  $\alpha$ , cioè, lo stesso radio, l'emanazione, il radio A e il radio C. D'altro canto, i raggi  $\beta$  sono espulsi dal solo radio C. Lo stesso numero di atomi di ognuno dei successivi prodotti in equilibrio si spezza ogni secondo. Se la disintegrazione di ogni atomo è accompagnata dall'espulsione di una particella  $\alpha$  e, nel caso del radio C, anche da una particella  $\beta$ , il numero di particelle  $\alpha$  emesse dal radio in equilibrio radioattivo sarà quattro volte il numero delle particelle  $\beta$ .

Il metodo impiegato da Wien per determinare il numero delle particelle  $\beta$  emesse da una quantità nota di radio è già stato discusso nella sezione 80. A causa dell'assorbimento di alcune delle particelle  $\beta$  nell'involuppo del radio e nel radio stesso, il numero da lui trovato è troppo piccolo. Si è mostrato nella sezione 85 che un numero di raggi  $\beta$  facilmente assorbiti sono emessi dal radio, molti dei quali sarà arrestato nel radio stesso o nell'involuppo che lo contiene.

Per eliminare il più possibile l'errore dovuto a questo assorbimento, in alcuni esperimenti fatti da chi scrive, si usava il deposito attivo ottenuto dall'emanazione del radio piuttosto che dal radio stesso come sorgente  $\beta$ . Un'asta di piombo lunga 4 cm e del diametro di 4 mm, era esposta come elettrodo negativo in una grande quantità di emanazione del radio per tre ore. L'asta era poi rimossa e si misurava immediatamente l'effetto dei raggi  $\gamma$  con un elettroscopio confrontandolo con il corrispondente effetto dei raggi  $\gamma$  da un peso noto di bromuro di radio in equilibrio radioattivo. Poiché il deposito attivo contiene il prodotto radio C che emette solo raggi  $\beta$  e, poiché le intensità dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  sono sempre proporzionali tra loro, il numero di particelle  $\beta$  espulse dall'asta di piombo ogni secondo è uguale al corrispondente numero dal peso di bromuro di radio che dà lo stesso effetto  $\gamma$  dell'asta.

Quest'ultima era avvolta con un foglio di alluminio dello spessore di 0.0053 cm, sufficiente ad assorbire i raggi  $\alpha$ , e utilizzato come elettrodo isolato in un contenitore cilindrico di metallo che era rapidamente portato ad una bassa pressione. La corrente nelle due direzioni era misurata a intervalli con un elettrometro e, come abbiamo visto nella sezione 93, la

somma algebrica di queste correnti è proporzionale a  $ne$ , dove  $n$  è il numero di particelle  $\beta$  espulse ogni secondo dall'asta di piombo ed  $e$  la carica su ogni particella. L'attività del radio C decadeva nel tempo, ma, dalla curva di decadimento nota, i risultati potevano essere corretti in termini del valore iniziale immediatamente dopo che l'asta era rimossa dall'emanazione.

Tenendo conto che la metà delle particelle  $\beta$  emesse dal deposito attivo erano assorbite nello stesso radio, e calcolando la carica sulle particelle  $\beta$  come  $1.13 \cdot 10^{-19}$  *coulomb*, due esperimenti diversi danno  $7.6 \cdot 10^{10}$  e  $7.0 \cdot 10^{10}$  come numero totale delle particelle  $\beta$  espulse ogni secondo da un grammo di radio. Prendendo il valore medio, possiamo concludere che il numero totale delle particelle  $\beta$  espulse ogni secondo da un grammo di radio in equilibrio radioattivo è circa  $7.3 \cdot 10^{10}$ .

Il numero totale di particelle  $\alpha$  espulse da un grammo di radio alla sua minima attività è stato mostrato essere  $6.2 \cdot 10^{10}$  (sezione 93). L'accordo approssimato tra questi numeri è una forte indicazione della correttezza dell'ipotesi teorica precedentemente discussa. Ci si può aspettare che il numero di particelle  $\beta$ , dedotto in questo modo, sarà un poco maggiore del valore vero, poiché le particelle  $\beta$  derivano da una radiazione secondaria consistente anche di particelle cariche negativamente che si muovono a grande velocità. Queste particelle  $\beta$  secondarie, derivanti dall'impatto delle particelle  $\beta$  sul piombo, passeranno attraverso lo schermo di alluminio e aggiungeranno il loro effetto ai raggi  $\beta$  primari.

I risultati, tuttavia, indicano che sono espulse quattro particelle  $\alpha$  dal radio in equilibrio radioattivo per ogni particella  $\beta$  confermando la teoria delle trasformazioni successive.

## Processi Radioattivi

**254. Teorie della radioattività.** Nei precedenti capitoli, è stato presentato un resoconto dettagliato della natura e delle proprietà delle radiazioni e dei complessi processi che avvengono nelle sostanze radioattive. I numerosi prodotti derivanti dai radio-elementi sono stati esaminati da vicino e si è mostrato che essi derivano da una trasformazione dell'elemento genitore attraverso un numero di passaggi ben definiti. In questo capitolo, si considererà l'applicazione della teoria della disintegrazione alla spiegazione dei fenomeni radioattivi e saranno brevemente discusse le deduzioni logiche ottenibili da tale teoria.

Per primo verrà presentato un esame delle ipotesi di lavoro che sono servite da guida all'investigazione nel campo della radioattività. Queste teorie di lavoro sono state in molti casi modificate o estese con la crescita delle conoscenze sperimentali.

I primi esperimenti di Madame Curie hanno indicato che la radioattività era un fenomeno atomico e non molecolare. Questo fu ulteriormente precisato da un successivo lavoro e la rivelazione e isolamento del radio dalla pechblenda fu una brillante verifica della veridicità di questa ipotesi.

La scoperta che i raggi  $\beta$  dei radio-elementi erano simili ai raggi catodici prodotti nei tubi a vuoto fu un importante progresso e ha costituito le basi di numerose teorie conseguenti. J. Perrin<sup>1</sup>, nel 1901, seguendo il punto di vista di J. J. Thomson e altri, suggerì che gli atomi dei corpi consistevano di parti e che potevano essere considerati come un sistema planetario in miniatura. Negli atomi dei radio-elementi, le parti componenti gli atomi più distanti dal centro potevano sfuggire dall'attrazione centrale e produrre l'irraggiamento di energia osservato. Nel dicembre del 1901, Becquerel<sup>2</sup>, avanzò la seguente ipotesi, che, affermò, gli era servita da guida nelle sue indagini. In accordo con J. J. Thomson, la materia radioattiva è formata da particelle con carica positiva e negativa. La negativa ha una massa pari a circa  $\frac{1}{1000}$  della massa dell'atomo di idrogeno, mentre la positiva ha una massa circa un migliaio di volte maggiore di quella della particella negativa. Le particelle con carica negativa (i raggi  $\beta$ ) sarebbero espulse con grande velocità, ma quelle più grandi positive con una velocità molto inferiore formando una specie di gas (l'emanazione) che si deposita sulla superficie stessa dei corpi. Questo, a sua volta, si suddividerà originando i raggi (attività eccitata).

In un articolo comunicato alla Royal Society nel giugno 1900, Rutherford e McClung<sup>3</sup> valutarono che l'energia, irradiata sotto forma di raggi ionizzanti nel gas, era di 3000 grammo-calorie per anno per il radio con un'attività 100000 volte superiore a quella dell'uranio. Prendendo l'ultima stima dell'attività di un composto di radio puro come 2000000, questa corrisponderà ad un'emissione di energia nel gas sotto forma di raggi  $\alpha$  di circa 66000 grammo-calorie per grammo per anno. La proposta prevedeva che questa energia potesse derivare da una riaggregazione dei costituenti dell'atomo dei radio-elementi e sottolineò che l'energia possibile derivata da una maggiore concentrazione dei componenti dell'atomo fosse grande rispetto a quella prodotta nelle reazioni molecolari.

Nell'articolo originale<sup>4</sup> che teneva conto della scoperta dell'emanazione del torio e della radioattività prodotta da esso, l'idea assunta era che entrambe queste manifestazioni fossero dovute al materiale radioattivo. L'emanazione si comportava come un gas, mentre la materia che originava l'attività eccitata si attaccava ai solidi e poteva essere disciolta in alcuni acidi, ma non in altri. Rutherford e Miss Brooks mostrarono che l'emanazione del radio si diffondeva attraverso l'aria come un gas di grande peso molecolare. In una data successiva Rutherford e Soddy mostrarono che le emanazioni di radio e torio si comportavano chimicamente come un gas inerte, poiché non erano alterate dal più drastico trattamento fisico e chimico.

D'altro canto, P. Curie che, con Debierne, fece una serie di ricerche sull'emanazione del radio, dissentirono da questa ipotesi. P. Curie<sup>5</sup> riteneva che non vi fosse una sufficiente evidenza del fatto che l'emanazione fosse di natura materiale basandosi sul fatto che non era stata ottenuta alcuna prova spettroscopica della sua presenza, e anche che l'emanazione scompariva se contenuta in un vaso sigillato. Fu sottolineato da chi scrive<sup>6</sup> che la non visibilità delle righe spettroscopiche era dovuta probabilmente alla minuscola quantità di emanazione presente, in condizioni normali, nonostante fosse molto evidente l'azione elettrica e fosforescente da essa prodotta. Questa disputa è nata dall'ultimo lavoro. P. Curie inizialmente

<sup>1</sup>Perrin, Revue Scientifique, 13 aprile 1901.

<sup>2</sup>Becquerel, C. R. 133, p. 979, 1901.

<sup>3</sup>Rutherford e McClung, Phil. Trans. A, p. 25, 1901.

<sup>4</sup>Rutherford, Phil. Mag. gennaio e febbraio 1900.

<sup>5</sup>P. Curie, C. R. 186, p. 228, 1903.

<sup>6</sup>Rutherford, Phil. Mag. aprile 1903.

accettò l'idea che l'emanazione non fosse materiale, ma che consistesse di centri di condensazione dell'energia associata alle molecole gassose e in moto con esse.

M. e M.me Curie hanno assunto un'idea molto generale dei fenomeni della radioattività, e non hanno proposto una specifica teoria. Nel gennaio 1902, tennero conto del lavoro teorico complessivo<sup>7</sup> che li aveva guidati nelle loro ricerche. La radioattività è una proprietà atomica e il riconoscimento di questo fatto ha creato il loro metodo di ricerca. Ogni atomo agisce come una sorgente costante di emissione di energia. Questa energia può derivare o dall'energia potenziale dell'atomo stesso o ogni atomo può agire come un meccanismo che istantaneamente riguadagna l'energia persa. Essi suggerirono che questa energia poteva essere presa in prestito dall'aria circostante in qualche modo non considerato dal principio di Carnot.

Nel corso di uno studio dettagliato della radioattività del torio, Rutherford e Soddy<sup>8</sup> trovarono che era necessario supporre che il torio producesse continuamente un nuovo tipo di materia attiva, che possedeva attività temporanea e differiva nelle proprietà chimiche dal torio stesso. La costante radioattiva del torio era il risultato dell'equilibrio tra i processi di produzione di materia attiva e la trasformazione già prodotta. Nello stesso tempo, avanzarono la teoria che la produzione di materia attiva fosse una conseguenza della disintegrazione dell'atomo. Il lavoro dell'anno successivo fu dedicato ad un esame della radioattività di uranio e radio su linee simili e trovarono che le conclusioni già avanzate per il torio valevano analogamente per uranio e radio<sup>9</sup>. La scoperta di una condensazione delle emanazioni radioattive<sup>10</sup> dava un sostegno aggiuntivo all'ipotesi che le esse avessero caratteristiche gassose. Nel frattempo, l'autore<sup>11</sup> trovò che i raggi consistevano di corpi carichi positivamente di dimensioni atomiche, emessi con grande velocità. La scoperta della natura materiale di questi raggi servì a rafforzare la teoria atomica della disintegrazione e, nello stesso tempo, offrì una spiegazione del collegamento tra i raggi  $\alpha$  e le trasformazioni che avvengono nei radio-elementi. In un articolo intitolato "Radio-active Change", Rutherford e Soddy<sup>12</sup> esposero in dettaglio la teoria della disintegrazione atomica come spiegazione dei fenomeni radioattivi e, nello stesso tempo, alcune delle più importanti conseguenze che ne derivavano.

In un articolo che annunciava la scoperta dell'emissione di calore dal radio, P. Curie e Laborde<sup>13</sup> affermarono che l'energia termica poteva essere ugualmente pensata derivare da una rottura dell'atomo di radio o dall'energia assorbita dal radio da qualche sorgente esterna.

J. J. Thomson in un articolo su "Radium", comunicato a *Nature*<sup>14</sup> avanzò l'ipotesi che l'emissione di energia da parte del radio fosse probabilmente dovuta a qualche cambiamento dentro l'atomo e che dovesse essere rilasciata una grande quantità di energia da una contrazione dell'atomo.

Sir William Crookes<sup>15</sup>, nel 1899, propose la teoria che gli elementi radioattivi avessero la proprietà di estrarre energia dal gas. Se le molecole in movimento, impattassero più rapidamente sulla sostanza, verrebbero rilasciate dalla sostanza ad una velocità molto inferiore e l'energia rilasciata dai radio-elementi sarebbe derivata dall'atmosfera. Questa teoria fu avanzata ancora più tardi per tener conto della grande emissione di calore del radio, scoperta da P. Curie e Laborde.

F. Re<sup>16</sup> recentemente avanzò una teoria molto generale della materia con una speciale applicazione ai corpi radioattivi. Suppose che le parti dell'atomo fossero inizialmente libere, costituendo una nube di estrema esilità. Queste parti si univano successivamente attorno a centri di condensazione e formavano così gli atomi degli elementi. Questa visione dell'atomo può essere paragonata ad un sole spento. Gli atomi radioattivi occupano una fase di transizione tra la nube iniziale e la forma chimica stabile e durante la loro contrazione producono l'emissione di calore osservata.

Lord Kelvin al meeting della British Association del 1903, propose che il radio potesse ottenere la propria energia dalle sorgenti esterne. Se un pezzo di carta bianca è posta in un contenitore e un pezzo di carta nera in uno esattamente simile, esponendo entrambi i contenitori alla luce, quello contenente la carta nera sarà trovato ad una temperatura maggiore. Sugerì che il radio in un modo simile poteva conservare la propria temperatura al di sopra di quella dell'aria circostante a causa del suo potere di assorbimento di radiazioni ignote.

Richarz e Scheneck<sup>17</sup> suggerirono che la radioattività potesse essere dovuta alla produzione e rottura dell'ozono che si sa essere prodotto dai sali di radio.

**255. Discussione delle teorie.** Dall'esame delle ipotesi generali avanzate come possibili spiegazioni della radioattività, si vede che esse possono essere divise in due classi, una delle quali presuppone che l'energia emessa dai radio-elementi sia ottenuta a spese dell'energia interna all'atomo, e l'altra che l'energia derivi da sorgenti esterne, ma che i radio-elementi agiscano come un meccanismo in grado di trasformare questa energia presa in prestito in una forma speciale che si manifesta attraverso i fenomeni della radioattività. Di queste due ipotesi la prima appare essere la più probabile e meglio supportata

<sup>7</sup>M. e M.me Curie, C. R. 134, p. 85, 1902.

<sup>8</sup>Rutherford e Soddy, Trans. Chem. Soc. 81, pp. 821, 837, 1902. Phil. Mag. settembre e novembre 1902.

<sup>9</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. aprile 1903.

<sup>10</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. maggio 1903.

<sup>11</sup>Rutherford, Phys. Zeit. 4, p. 235, 1902. Phil. Mag. febbraio 1903.

<sup>12</sup>Rutherford, Phil. Mag. maggio 1903.

<sup>13</sup>Curie e Laborde, C. R. 136, p. 673, 1903.

<sup>14</sup>J.J. Thomson, Nature, p. 601, 1903.

<sup>15</sup>Crookes, C. R. 128, p. 176. 1899.

<sup>16</sup>F. Re, C. R. p. 136, p. 1393, 1903.

<sup>17</sup>Richarz e Scheneck, Berl. Ber. p. 1102, 1903. Scheneck, Berl. Ber. p. 37, 1904

dalle prove sperimentali. Finora non è stata presentata la più piccola prova sperimentale che indichi che l'energia del radio sia derivata da sorgenti esterne.

J. J. Thomson (citato) ha discusso la questione nel modo seguente:

*“È stato proposto che il radio derivi la propria energia dall'aria circostante, che gli atomi di radio posseggano la facoltà di estrarre l'energia cinetica dalle molecole d'aria in moto più rapido e possano ritenere la loro stessa energia quando collidono con le molecole più lente dell'aria. Non riesco a vedere, tuttavia, come anche il possesso di questa proprietà possa spiegare il comportamento del radio; immaginiamo una porzione di radio posta in una cavità in un blocco di ghiaccio; il ghiaccio attorno al radio viene fuso; da dove viene questa energia? Per ipotesi non vi è una trasformazione nel sistema aria-radio nella cavità, per la quale l'energia guadagnata dal radio è persa dall'aria, mentre il calore non può fluire nella cavità dall'esterno, perché il ghiaccio fuso attorno alla cavità è più caldo di quello attorno ad esso.”*

Chi scrive ha recentemente trovato che l'attività del radio non risulta alterata circondandolo con una grande massa di piombo. Un cilindro di piombo aveva un diametro di 10 cm e un'altezza di 10 cm. Si produceva un foro nel centro della parte inferiore del cilindro e il radio, racchiuso in un piccolo tubo di vetro, era posto nella cavità, che era poi ermeticamente chiusa. L'attività era misurata dal ritmo di scarica di un elettroscopio mediante i raggi  $\gamma$  trasmessi attraverso il piombo, ma non fu osservata alcuna apprezzabile variazione per un periodo di un mese.

M. e Mme Curie avanzarono per primi l'ipotesi che l'emissione di energia dai corpi radioattivi potesse essere spiegata supponendo che lo spazio fosse attraversato da un tipo di raggi Röntgen e che i radio-elementi avessero la proprietà di assorbirli. Recenti esperimenti (sezione 279) hanno mostrato la presenza sulla superficie della terra di molti tipi di raggi penetranti, simili ai raggi  $\gamma$  del radio. Anche se supponessimo che i radio-elementi possono assorbire questa radiazione, l'energia dei raggi è troppo piccola per rendere conto dell'energia irradiata da un elemento di bassa attività come l'uranio. Inoltre, tutte le prove ottenute portano alla conclusione che i corpi radioattivi non assorbono in grande quantità il tipo di raggi da loro emessi come ci si aspetterebbe in base alla loro densità. Si è mostrato (sezione 86) che questo è vero nel caso dell'uranio. Anche se supponessimo che i radio-elementi sono in grado di assorbire l'energia di un tipo sconosciuto di radiazione, rimarrebbe ancora la difficoltà fondamentale di tener conto delle particolari radiazioni dei radio-elementi e delle serie di trasformazioni che in essi hanno luogo. Non è sufficiente per noi giustificare la sola emissione di calore, perché si è mostrato (capitolo XII) che essa è direttamente connessa con la radioattività.

Inoltre, la distribuzione dell'emissione del calore del radio tra i prodotti radioattivi che da esso derivano è estremamente difficile da spiegare nell'ipotesi che l'energia emessa sia presa da sorgenti esterne. È stato mostrato che più dei due terzi del calore emesso dal radio è dovuto all'emanazione insieme con il deposito attivo da essa prodotto. Quando l'emanazione è separata dal radio, il suo potere di emettere calore, dopo aver raggiunto il massimo, decresce nel tempo seguendo una legge esponenziale. Sarebbe, pertanto, necessario nell'ipotesi dell'assorbimento postulare che la maggior parte del calore emesso dal radio, osservato in condizioni normali, non sia dovuto al radio stesso ma a qualcosa prodotto dal radio, il cui potere di assorbimento dell'energia da sorgenti esterne diminuisca nel tempo.

Un argomento simile si applica anche alla variazione nel tempo dell'effetto riscaldante del deposito attivo prodotto dall'emanazione. È stato mostrato nell'ultimo capitolo che la maggior parte dell'effetto riscaldante osservato nel radio e nei suoi prodotti deve essere attribuito al bombardamento delle particelle  $\alpha$  espulse da queste sostanze. È già stato evidenziato (sezione 136) che è difficile immaginare un meccanismo, interno o esterno, per mezzo del quale una tale enorme velocità possa immediatamente essere impressa alle particelle  $\alpha$ . Abbiamo spinto verso la conclusione che la particella  $\alpha$  non acquisti immediatamente questa energia di moto, ma che si trovi inizialmente in moto rapido nell'atomo, e per qualche ragione, venga immediatamente rilasciata con la velocità che è posseduta nella sua orbita.

La più forte evidenza contro l'ipotesi dell'assorbimento di energia esterna è che una tale teoria ignora il fatto che, quando si osserva con continuità la radioattività, è sempre accompagnata da qualche trasformazione che può essere rivelata dalla comparsa di nuovi prodotti aventi proprietà chimiche distinte da quelli delle sostanze originarie. Questo porta ad una qualche forma di teoria “chimica” e altri risultati mostrano che la trasformazione è atomica e non molecolare.

**256. Teoria della trasformazione radioattiva.** I processi che avvengono nei radio-elementi sono di carattere del tutto distinto da ogni precedente osservato in chimica. Sebbene sia stato mostrato che la radioattività è dovuta alla spontanea e continua produzione di nuovi tipi di materia attiva, le leggi che controllano tali produzioni sono diverse dalle leggi delle comuni reazioni chimiche. Non è stato possibile alterare in qualsiasi modo il tasso con il quale la materia è prodotta o il suo tasso di trasformazione una volta prodotta. La temperatura, che è un importante fattore nell'alterazione del ritmo delle reazioni chimiche, è, in questi casi, quasi interamente priva di influenza. Inoltre, non è nota alcuna ordinaria trasformazione chimica che si accompagni all'espulsione di atomi carichi con grandi velocità. È stato suggerito da Armstrong e Lowry<sup>18</sup> che la radioattività possa essere una esagerata forma di fluorescenza o fosforescenza con un tasso di decadimento molto lento. Ma nessuna forma di fosforescenza si è finora vista accompagnata da radiazioni del tipo di quelle emesse dai radio-elementi. Qualsiasi ipotesi venga introdotta per spiegare la radioattività deve tenere conto non solo della produzione di una serie di prodotti attivi, che differiscono nelle proprietà chimiche e fisiche da ogni altro e dall'elemento genitore, ma anche dell'emissione di raggi di un tipo speciale. Oltre a questo, è necessario spiegare la grande quantità di energia continuamente irradiata dai radio-elementi.

<sup>18</sup>Armstrong e Lowry, Proc. Roy. Soc, 1903. Chem. News, 88, p. 89, 1903.

Essi, oltre al loro alto peso atomico, non hanno in comune qualche caratteristica chimica speciale che li differenzia dagli altri elementi, che non hanno la proprietà di essere radioattivi in modo apprezzabile. Di tutti gli elementi noti, uranio, torio e radio hanno i maggiori pesi atomici, cioè: radio 225, torio 232.5 e uranio 240.

Se un alto peso atomico è assunto come prova di una complessa struttura atomica, ci si deve attendere che la disintegrazione avvenga più facilmente in atomi pesanti piuttosto che leggeri. Nello stesso tempo, non vi è motivo di supporre che gli elementi dei più grandi pesi atomici debbano essere per lo più radioattivi; infatti, il radio è assai più attivo dell'uranio, sebbene il suo peso atomico sia minore. Questo è quanto avviene per i prodotti radioattivi; per esempio, l'emanazione del radio è enormemente più attiva a parità di peso dello stesso radio e vi è ragione di credere che l'emanazione sia un atomo più leggero del radio.

Per spiegare i fenomeni di radioattività, Rutherford e Soddy hanno proposto la teoria che gli atomi dei radio-elementi subiscano disintegrazioni spontanee e che ogni atomo disintegrato passi attraverso una successione di trasformazioni ben evidenti, accompagnate nella maggior parte dei casi dall'emissione di raggi  $\alpha$ .

Una illustrazione di questa ipotesi è già stata presentata nella sezione 136, mentre la teoria matematica delle trasformazioni successive, che è basata su di essa, è stata discussa nel capitolo IX. La teoria generale è stata utilizzata nei capitoli X e XI per spiegare le numerose sostanze attive trovate nell'uranio, torio, attinio e radio.

La teoria suppone che, mediamente, una definita piccola porzione di atomi di ogni sostanza radioattiva divenga instabile in un dato tempo. A causa dell'instabilità, l'atomo si spezza. Nella maggior parte dei casi, la disintegrazione è esplosiva ed è accompagnata dall'espulsione di una particella  $\alpha$  a grande velocità; in pochi casi, sono espulse assieme particella  $\alpha$  e  $\beta$ , mentre in altri sfugge solo una particella  $\beta$ . In pochi casi, la trasformazione nell'atomo appare essere meno violenta e non è accompagnata dall'espulsione di una particella  $\alpha$  o  $\beta$ . La spiegazione di queste trasformazioni senza raggi è presentata nella sezione 259. L'espulsione di una particella  $\alpha$ , di massa circa doppia di quella dell'atomo di idrogeno, lascia indietro un nuovo sistema più leggero dell'iniziale e in possesso di proprietà fisiche e chimiche del tutto diverse da quelle dell'elemento originario. Il nuovo sistema diviene ancora instabile ed espelle un'altra particella  $\alpha$ . Il processo di disintegrazione, una volta avviato, procede da una stadio al successivo con ritmo definito e misurabile in ogni caso.

Nel momento in cui inizia la disintegrazione, esiste una porzione della materia originaria, che è invariata, mescolata con la parte che ha subito la trasformazione. Ciò è in accordo con il fatto osservato che lo spettro del radio, per esempio, non cambia progressivamente con il tempo. Il radio si spezza così lentamente che solo una piccola frazione si trasforma nel corso di qualche anno. La parte ancora invariata mostra il proprio spettro caratteristico e continuerà così a lungo finché esisterà il radio. Nello stesso tempo ci si aspetta che, nel vecchio radio, appaia lo spettro di questi prodotti che esistono in una certa quantità.

Il termine "metabolon" è stato suggerito come una conveniente espressione per ognuna di queste trasformazioni atomiche, derivata dalla disintegrazione successiva degli atomi dei radio-elementi. Ogni metabolon, in media, esiste solo per un tempo limitato. In un raggruppamento di metabolon dello stesso tipo il numero  $N$ , che è invariato al tempo  $t$  dopo la produzione, è dato da  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , dove  $N_0$  è il valore iniziale. Ora  $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ , o la frazione dei metaboloni presenti, che cambia nell'unità di tempo, è uguale a  $\lambda$ . Il valore  $\frac{1}{\lambda}$  può essere preso come la *vita media* di ogni metabolon.

Ciò può essere detto semplicemente nel modo seguente: Ad ogni istante  $t$  successivo  $N_0$  metabolon sono presenti, il numero che cambia nel tempo  $dt$  è uguale a  $\lambda N dt$  o  $\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$ . Ognuno di essi ha una vita  $t$ , cosicché la vita media del numero totale è data da

$$\int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

I vari metabolon dai radio-elementi sono distinguibili dalla materia ordinaria per la loro grande instabilità e conseguente rapido tasso di cambiamento. Poiché un corpo che è radioattivo deve *ipso facto* subire cambiamenti, segue che nessuno dei prodotti attivi, per esempio, l'emanazione e *ThX*, possa consistere di un tipo di materia nota; non vi è alcuna prova per mostrare che la materia inattiva possa essere resa radioattiva, o che possano esistere due forme dello stesso elemento, una radioattiva e l'altra no. Per esempio, metà della materia costituente l'emanazione del radio ha subito cambiamenti dopo un intervallo di quattro giorni. Dopo un tempo di circa un mese l'emanazione è quasi scomparsa, essendosi trasformata attraverso parecchie fasi in altri tipi di materia più stabile, che sono, di conseguenza, difficili da rivelare dalla loro radioattività,

La straordinaria differenza nelle proprietà fisiche e chimiche in molti casi tra i vari prodotti e anche tra la sostanza primaria attiva e i suoi prodotti, è già stata delineata attentamente nel capitolo IX. Alcuni dei prodotti mostrano distinti comportamenti elettro-chimici e possono essere rimossi da una soluzione mediante elettrolisi. Altri mostrano differenze di volatilità che sono state utilizzate per ottenere una parziale separazione. Non vi è dubbio che ognuno di questi prodotti è una nuova e definita sostanza chimica, e se è raccolta in quantità sufficiente da poter essere esaminata con i consueti metodi chimici, si comporterà come un elemento chimico distinto. Differirà, tuttavia, dall'elemento chimico ordinario nella brevità della sua vita e per il fatto che si trasforma continuamente in un'altra sostanza. Vedremo in seguito (sezione 261) che vi sono molte ragioni di credere che lo stesso radio è un metabolon nel vero senso del termine, poiché è in continua trasformazione ed è esso stesso prodotta da un'altra sostanza. Il punto principale della differenza tra esso e gli altri prodotti sta nella relativa lentezza del suo tasso di trasformazione.

È per questo motivo che il radio esiste nella pechblenda in maggiori quantità rispetto ad altri prodotti che si trasformano più rapidamente. Lavorando su una grande quantità del minerale, abbiamo visto che una quantità sufficiente del prodotto puro è stata ottenuta per trattamento chimico.

A causa della breve vita dell'emanazione, esiste nella pechblenda in molta minore quantità del radio, ma essa è stata isolata chimicamente e il suo volume misurato. Le straordinarie proprietà di questa emanazione, o gas, sono già state discusse e non vi è dubbio che, mentre esiste, deve essere considerata un nuovo elemento associato per le proprietà chimiche al gruppo dei gas argon-elio.

Non vi è dubbio che nei radio-elementi siamo testimoni della trasformazione spontanea della materia e che i diversi prodotti che ne derivano evidenziano le fasi o le incerte posizioni nel processo di trasformazione, dove gli atomi possono esistere per un breve tempo prima di spezzarsi in un nuovo sistema.

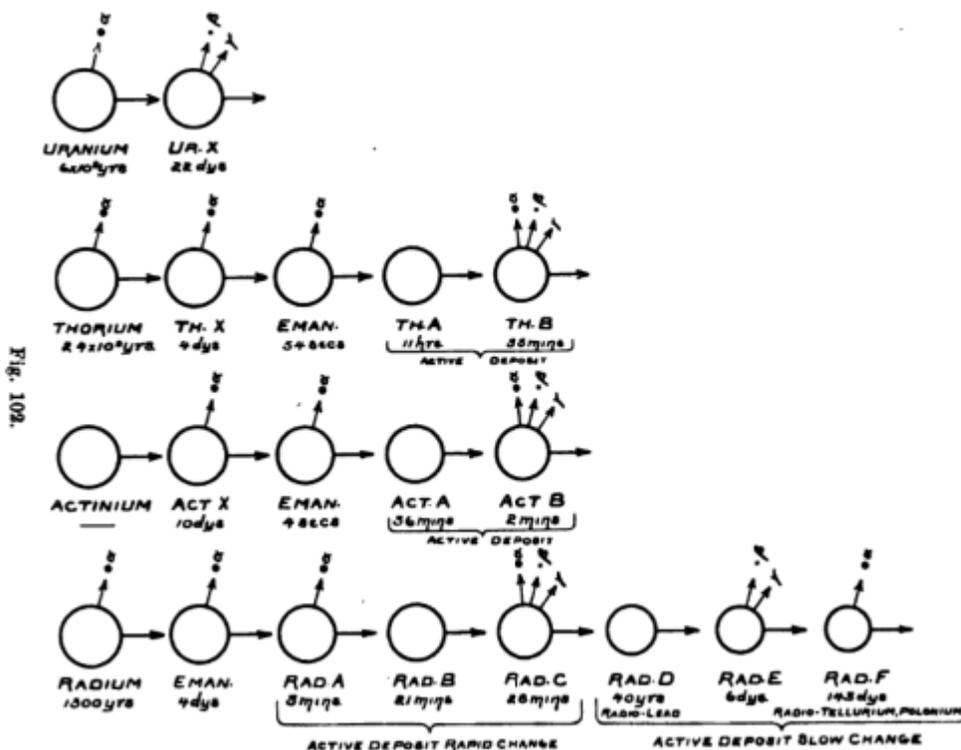
**257. Prodotti radioattivi.** La tabella seguente dà l'elenco dei prodotti attivi o metabolon noti per risultare dalla disintegrazione dei tre radio-elementi. Nella seconda colonna è dato il valore della costante radioattiva  $\lambda$  per ogni prodotto attivo, cioè, la proporzione della materia attiva che ha subito una trasformazione per secondo; nella terza colonna il tempo  $T$  richiesto affinché l'attività dimezzi, cioè il tempo necessario affinché metà del prodotto attivo subisca trasformazione; nella quarta colonna, la natura dei raggi da ogni prodotto attivo, non includendo i raggi dai prodotti che risultano da esso; nella quinta colonna, alcune delle più significative proprietà fisiche e chimiche di ogni metabolon.

I prodotti e le loro radiazioni sono indicate graficamente nella Figura 102.

Un prodotto è stato osservato nell'uranio, quattro nel torio, quattro nell'attinio e sette nel radio. Non è improbabile che un più attento esame dei radio-elementi possa rivelare ulteriori trasformazioni. Se esiste qualche trasformazione molto rapida, essa dovrebbe essere molto difficile da rivelare. Il cambiamento del torio X nell'emanazione, per esempio, non sarebbe probabilmente stata scoperta se il prodotto della trasformazione non avesse avuto caratteristiche gassose.

Prodotti	$\lambda$ ( $s^{-1}$ )	$T$	Tipo di raggi	Proprietà fisiche e chimiche del prodotto
Uranio ↓ Uranio X ↓ ?	— 3.6·10 <sup>-7</sup> —	— 22 giorni —	$\alpha$ $\beta e \gamma$ —	Solubile in eccesso di carbonato di ammonio, solubile in etere. Insolubile in eccesso di carbonato di ammonio solubile in etere o acqua —
Torio ↓ Torio X ↓ Emanazione ↓ Torio A ↓ Torio B ↓ ?	. 2.0·10 <sup>-6</sup> 1.3·10 <sup>-2</sup> 1.74·10 <sup>-5</sup> 2.2·10 <sup>-4</sup> —	. 4 giorni 53 sec. 11 ore 55 min —	$\alpha$ $\alpha$ $\alpha$ senza raggi $\alpha\beta,\gamma$ —	Insolubile in ammoniaca Solubile in ammoniaca e acqua Gas chimicamente inerte di alto peso molecolare. Condensa a -120 °C Depositato sui corpi; concentrato sul catodo in un campo elettrico. Solubile in alcuni acidi; ThA più volatile del ThB; mostra un comportamento elettrochimico definito —
Attinio ↓ Attinio X ↓ Emanazione ↓ Attinio A ↓ Attinio B ↓ ?	. 7.8·10 <sup>-7</sup> 0.17 3.2·10 <sup>-4</sup> 5.4·10 <sup>-3</sup> —	. 10.2 giorni 3.9 sec. 36 min 2.15 min —	senza raggi $\alpha$ (e $\beta$ ?) $\alpha$ senza raggi $\alpha\beta,\gamma$ —	Insolubile in ammoniaca Solubile in ammoniaca e acqua Si comporta come un gas Depositato sui corpi; concentrato sul catodo in un campo elettrico. Solubile in ammoniaca e in forti acidi; volatilizza a una temperatura di 100 °C Insolubile in ammoniaca Solubile in ammoniaca e acqua Gas chimicamente inerte di alto peso molecolare. Condensa a -120 °C Depositato sui corpi; concentrato sul catodo in un campo elettrico. Solubile in alcuni acidi; ThA più volatile del ThB; mostra un comportamento elettrochimico definito A e B si possono separare per elettrolisi —
Radio ↓ Emanazione ↓ Radio A ↓ Radio B ↓ Radio C ↓ Radio D ↓ Radio E ↓ Radio F ↓ ?	— 2.1·10 <sup>-8</sup> 3.85·10 <sup>-3</sup> 5.38·10 <sup>-4</sup> 4.13·10 <sup>-4</sup> — 1.3·10 <sup>-6</sup> 5.6·10 <sup>-8</sup> —	1300 anni 3.8 giorni 3 min. 21 min 28 min circa 40 anni 6 giorni 143 giorni —	$\alpha$ $\alpha$ $\alpha$ no raggi $\alpha\beta,\gamma$ no raggi $\beta e \gamma$ $\alpha$ —	Associato chimicamente al bario Gas chimicamente inerte di alto peso molecolare; condensa a -150 °C Depositato sulla superficie dei corpi; concentrato sul catodo in un campo elettrico; solubile in forti acidi; B volatilizza a circa 700 °C, A e C a circa 1000 °C Solubile in acidi; volatile sotto i 1000 °C Non volatile a 1000 °C Depositato sul bismuto da soluzione; volatile a circa 1000 °C, stesse proprietà del radio tellurio e del polonio —

L'elettrolisi delle soluzioni è, in molti casi, un metodo molto potente per separare i prodotti attivi tra loro e le sue possibilità non sono finora state esaurite. Le principali famiglie delle trasformazioni dei radio-elementi, per come sono note, sono state analizzate da vicino e non è improbabile che sia stato trascurato un prodotto con un tasso di trasformazione molto lento. Vi è una possibilità, tuttavia, che due prodotti radioattivi possano in alcuni casi derivare dalla disintegrazione di una singola sostanza. Questo aspetto è discusso in seguito nella sezione 260.



Il modo eccezionale in cui la teoria della disintegrazione può essere applicata per svelare le complessità della successione delle trasformazioni radioattive è molto ben illustrato nel caso del radio. Senza il suo aiuto, non sarebbe stato possibile districare i complicati processi che si verificano. Abbiamo già visto che questa analisi è stata strumentale nel mostrare che le sostanze polonio, radio-tellurio e radio-piombo sono in realtà prodotti del radio.

Dopo che le sostanze radioattive hanno subito la successione delle trasformazioni sopra esposte, raggiungono uno stadio finale dove gli atomi sono o permanentemente stabili o si trasformano così lentamente che è difficile rivelare la loro presenza per mezzo della loro radioattività. È probabile, tuttavia, che il processo di trasformazione continui ancora attraverso ulteriori fasi.

Vi è ora una significativa prova che gli elementi uranio, radio e attinio sono tra loro intimamente connessi. Gli ultimi due probabilmente risultano dalla rottura dell'uranio. La prova a sostegno di tale idea è data nella sezione 262, ma rimane ancora molto lavoro da fare per coprire la distanza che attualmente sembra separare questi elementi tra loro.

Dopo che la serie delle trasformazioni è giunta al termine, rimarrà probabilmente un prodotto o più prodotti che saranno inattivi o attivi solo in modo assai limitato. Inoltre, poiché le particelle  $\alpha$ , espulse durante la trasformazione, sono di natura materiale e non sono radioattive, esse possono essere raggruppate in una data quantità nella materia radioattiva. La probabilità che le particelle  $\alpha$  consistano di elio, è considerata nella sezione 268.

Il valore di  $T$ , il tempo affinché la metà di un prodotto si trasformi, può essere preso come misura di confronto della stabilità dei diversi metabolon. La stabilità dei prodotti varia entro un ampio intervallo. Per esempio, il valore di  $T$  per il radio D è 40 anni e per l'emanazione dell'attinio 3.9 s. L'intervallo della stabilità è anche più esteso, quando si ricorda che gli atomi degli stessi radio-elementi cambiano molto lentamente.

I due soli metabolon con circa la stessa stabilità sono il torio X e l'emanazione del radio. In ogni caso, la trasformazione è completata a metà in circa quattro giorni. Io considero che l'accordo approssimato dei numeri è una pura coincidenza e che i due tipi di materia sono del tutto distinti tra loro; se i metabolon fossero identici, ci si dovrebbe aspettare che le trasformazioni che seguono abbiano luogo nello stesso modo e allo stesso ritmo, ma così non è. Tuttavia, il  $ThX$  e l'emanazione del radio hanno proprietà fisiche e chimiche del tutto distinte tra loro.

È alquanto significativo che le tre sostanze radioattive, radio, torio e attinio, esibiscano una tale somiglianza nella successione delle trasformazioni che in esse avvengono. Ognuna di esse ad una fase delle loro trasformazioni emette un gas radioattivo e in ogni caso questo gas è trasformato in un solido che è depositato sulla superficie dei corpi. Sembrerebbe che, dopo che la disintegrazione di un atomo di ognuno di questi ha avuto inizio, vi sia una simile successione di trasformazioni

nelle quali il sistema risultante abbia proprietà fisiche e chimiche associate. Un tale legame è importante come indicatore di una possibile origine delle proprietà ricorrenti negli atomi degli elementi, come esemplificato dalla legge periodica. Il legame tra torio e attinio è specialmente stretto sia per il numero che per la natura dei prodotti. Il periodo di trasformazione dei prodotti successivi, sebbene differisca in grandezza, aumenta e diminuisce in un modo analogo. Ciò indica che gli atomi di questi due elementi sono costituiti in modo molto simile.

**258. Quantità dei prodotti.** Dall'applicazione della teoria delle trasformazioni successive, la probabile quantità di ognuno dei prodotti presenti nel radio e negli altri radio-elementi può essere facilmente stimata.

Poiché ogni radio-atomo espelle una particella  $\alpha$  di peso atomico circa quello di idrogeno o elio, gli atomi dei prodotti intermedi non differiranno molto in peso dall'atomo genitore.

Il peso approssimato di ogni prodotto presente in un grammo di radio si può dedurre facilmente. Siano  $N_A, N_B, N_C$  i numeri degli atomi dei prodotti  $A, B, C$  presenti per grammo in equilibrio radioattivo. Siano  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  le corrispondenti costanti di trasformazione. Allora se  $q$  è il numero degli atomi genitori che si spezzano al secondo, per grammo

$$q = \lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C$$

Consideriamo il caso dei prodotti del radio, dove il valore di  $q$  è  $6.2 \cdot 10^{10}$  (sezione 93). Conoscendo il valore di  $\lambda$  e  $q$ , il valore di  $N$  può subito essere calcolato. Il peso corrispondente può essere dedotto, poiché in un grammo di materia di peso atomico circa 200, vi sono circa  $4 \cdot 10^{21}$  atomi (sezione 39). I risultati sono mostrati nella tabella seguente:

Prodotto	Valore di $\lambda$ ( $s^{-1}$ )	N° di atomi, $N$ , presenti per grammo	Peso del prodotto in $mg$ per grammo di radio
Emanazione del radio	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$3.2 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Radio A	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{-6}$
Radio B	$5.4 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Radio C	$4.1 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{-5}$

Con le piccole quantità di radio disponibile, le quantità dei prodotti radio  $A, B, C$  sono troppo piccole per essere pesate. Sarà possibile, tuttavia, rivelare la loro presenza per mezzo dello spettroscopio.

Nel caso del torio, il peso del prodotto  $ThX$ , che è presente in massima quantità, è troppo piccolo per essere rivelato. Poiché il valore di  $\lambda$  per il  $ThX$  è circa lo stesso dell'emanazione del radio, il massimo peso presente per grammo è circa  $4 \cdot 10^{-12}$  di un grammo, ricordando che  $q$  per il radio è circa  $2 \cdot 10^6$  volte il valore del torio. Anche con un chilogrammo di torio, la quantità di  $ThX$  è troppo piccola per poterne rivelare il peso.

Questo metodo può essere usato generalmente per calcolare le quantità relative di ogni prodotto successivo in equilibrio radioattivo, purché sia noto il valore di  $\lambda$  per ogni prodotto. Per esempio, si mostrerà in seguito che l'uranio è il genitore del radio e che si dimezza in  $6 \cdot 10^8$  anni, mentre il radio e il radio D sono per metà trasformati rispettivamente in 1300 e 40 anni. Il peso del radio presente in un grammo di uranio, quando si stabilisce l'equilibrio, è pertanto  $2 \cdot 10^{-6} g$  e il peso del radio D è  $7 \cdot 10^{-8} g$ . In un minerale contenente una tonnellata di uranio vi saranno circa 1.8 g di radio e 0.063 g di radio D. Alcuni recenti esperimenti descritti nella sezione 262 mostrano che queste stime teoriche sono maggiori di circa il doppio.

**259. Trasformazioni senza raggi.** L'esistenza delle ben evidenti trasformazioni nel radio, torio e attinio, che non sono accompagnate dall'espulsione di particelle  $\alpha$  e  $\beta$ , è di grande interesse e importanza.

Poiché le trasformazioni senza raggi non sono accompagnate da una significativa ionizzazione nel gas, la loro presenza non può essere rivelata in modo diretto. Il tasso di trasformazione della sostanza può, tuttavia, essere determinato indirettamente, come abbiamo visto, misurando la variazione nel tempo dell'attività del prodotto che la segue. La legge della trasformazione è la stessa delle trasformazioni che producono i raggi  $\alpha$ . Le trasformazioni prive di raggi sono allora analoghe, per certi aspetti, alle trasformazioni monomolecolari osservate in chimica, con la differenza che le trasformazioni riguardano l'atomo stesso e non sono dovute alla scomposizione di una molecola in molecole più semplici o nei loro atomi costituenti.

Si deve supporre che la trasformazione priva di raggi non ha un carattere così violento come quello che produce l'espulsione di particelle  $\alpha$  e  $\beta$ . La trasformazione può essere spiegata o supponendo che vi sia una redistribuzione dei componenti dell'atomo o che l'atomo si spezzi senza l'espulsione delle sue parti con una velocità sufficiente a produrre ionizzazione mediante collisione con il gas. L'ultimo punto di vista, se corretto, indica la possibilità che trasformazioni non rivelate con caratteristiche simili possa avvenire lentamente negli elementi non radioattivi; o, in altre parole, che tutta la materia possa subire un lento processo di cambiamento. Le trasformazioni che avvengono negli elementi radioattivi sono state osservate solo come conseguenza dell'espulsione a grande velocità delle parti dell'atomo disintegrato. Alcuni esperimenti recenti descritti in Appendice A mostrano che la particella  $\alpha$  dal radio smette di ionizzare il gas quando la sua velocità cade al di sotto di circa  $10^9 \frac{cm}{s}$ . Si vede, pertanto, che le particelle  $\alpha$  possono essere espulse con una velocità molto grande e non riuscire a ionizzare il gas. In un tale caso, sarà difficile seguire le trasformazioni con il metodo elettrico, in quanto gli effetti elettrici saranno molto piccoli in confronto a quelli prodotti dai noti corpi radioattivi.

**260. Radiazioni dai prodotti.** Abbiamo visto che la grande maggioranza dei prodotti radioattivi si spezza con l'espulsione di particelle  $\alpha$  e che la particella  $\beta$  accompagnata dal raggio  $\gamma$  appare nella maggior parte dei casi solo nell'ultima trasformazione rapida. Nel caso del radio, per esempio, che è stato analizzato più approfonditamente a causa della sua grande attività, lo stesso radio, l'emanazione e il radio A emettono solo particelle  $\alpha$ ; il radio B non emette alcun raggio; mentre il radio C emette tutti e tre i tipi di raggi. È difficile stabilire con certezza se i prodotti torio X e attinio X emettono particelle  $\beta$  oppure no, ma i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  certamente appaiono in ogni caso nell'ultima trasformazione rapida nel deposito attivo e, a questo riguardo, si comportano in un modo simile al radio.

Gli elettroni in moto molto lento che accompagnano le particelle emesse dal radio (sezione 93) non sono tenuti in conto, perché essi appaiono essere liberati dall'impatto delle particelle  $\alpha$  con la materia, e sono espulsi con una velocità insignificante rispetto a quella delle particelle  $\beta$  emesse dal radio C.

La comparsa dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  solo nelle ultime trasformazioni rapide dei radio-elementi è degna di nota e non può rappresentare una semplice coincidenza. L'espulsione finale di una particella  $\beta$  determina la comparsa di un prodotto di grande stabilità o, nel caso del radio, di un prodotto (radio D) che ha molta più stabilità di quello che precede. Sembrerà che le trasformazioni iniziali sono accompagnate dall'espulsione di una particella  $\alpha$  e che appena la particella  $\beta$  è espulsa, i componenti dell'atomo rimanente si ricompongono in una distribuzione di equilibrio alquanto stabile, dove il tasso di trasformazione è molto lento. Appare, allora, probabile che la particella  $\beta$ , che è alla fine espulsa, può essere vista come l'agente attivo che promuove la disintegrazione del radio-atomo attraverso i passaggi successivi. Una discussione di ciò sarà data con un ulteriore maggiore beneficio (sezione 270), quando verrà preso in considerazione il problema generale della stabilità dell'atomo.

È significativo che la trasformazione in cui appaiono i tre tipi di raggi ha la caratteristica più violenta delle precedenti. Non solo le particelle  $\alpha$  sono espulse con velocità maggiore delle altre trasformazioni, ma le particelle  $\beta$  sono emesse con una velocità molto vicina a quella della luce.

Vi è sempre la possibilità che, in una tale violenta esplosione nell'atomo, non solo possano essere espulse particelle  $\alpha$  e  $\beta$ , ma che l'atomo stesso possa essere distrutto in parecchi frammenti. Se la proporzione maggiore della materia risultante dalla disintegrazione è di un tipo, sarà difficile rivelare la presenza di una piccola quantità di materia rapidamente cambiante dalle osservazioni del tasso di decadimento; ma, se i prodotti hanno diversi comportamenti elettrochimici, in qualche caso, sarà possibile una parziale separazione mediante l'elettrolisi. È già stato sottolineato che i risultati di Pegram e von Lerch (sezione 207) sull'elettrolisi di soluzioni di torio possono essere spiegati supponendo che il torio A e B abbiano diverso comportamento elettrochimico. Pegram, tuttavia, osservò anche la presenza di un prodotto che si dimezzava in sei minuti. Questo prodotto attivo era ottenuto per elettrolisi di una soluzione di sale di torio puro alla quale era stata aggiunta una piccola quantità di nitrato di rame. Il deposito di rame era leggermente attivo e perdeva metà della sua attività in circa sei minuti.

La presenza di un tale prodotto radioattivo, che non proviene dalla sequenza di trasformazioni, indica che, a un certo stadio della disintegrazione, risulta più di una sostanza. Nella violenta disintegrazione che avviene nel radio C e nel torio B, come risultato atteso, non è improbabile che vi siano parecchie distribuzioni per mezzo delle quali i costituenti dell'atomo formano un sistema di debole stabilità. I due prodotti risultanti dalla disintegrazione saranno probabilmente presenti in proporzione diversa e, a meno che non emettano diversi tipi di raggi, saranno difficili da separare.

**261. Vita del radio.** Poiché gli atomi dei radio-elementi sono continuamente spezzati, si possono anche considerare metabolon, la sola differenza tra essi e i metabolon come le emanazioni, il  $ThX$  e altri è la loro maggiore stabilità e di conseguenza il tasso di trasformazione molto lento. Non vi è alcuna prova che il processo di trasformazione, sopra tracciato, sia reversibile nelle attuali condizioni, e nel corso del tempo una quantità di radio, uranio o torio si trasformerà in altri tipi di materia.

Non sembra si possa sfuggire da tale conclusione. Si consideri, per esempio, il caso del radio. Esso produce continuamente emanazione, con un tasso di produzione sempre proporzionale alla quantità di radio presente. Tutto il radio alla fine sarà trasformato in emanazione, che a sua volta si trasformerà mediante stadi successivi in altri tipi di materia. Non vi è dubbio che l'emanazione è chimicamente del tutto diversa dal radio stesso. La quantità di radio deve diminuire, compensata dall'emanazione che si forma; diversamente è necessario assumere che la materia sotto forma di emanazione è creata da una sorgente sconosciuta.

Una stima approssimata del tasso di trasformazione del radio si può facilmente fare con due metodi diversi dipendenti dal (1) numero degli atomi di radio che si spezzano al secondo, e (2) dalla quantità di emanazione prodotta ogni secondo.

È stato mostrato sperimentalmente (sezione 93) che 1 g di radio alla sua minima attività espelle  $6.2 \cdot 10^{10}$  particelle  $\alpha$  al secondo. L'effetto di riscaldamento del radio e anche il suo volume concordano da vicino con i calcoli, se si suppone che ogni atomo di ogni prodotto nel frazionamento emette una particella  $\alpha$ . Da questa ipotesi si vede che  $6.2 \cdot 10^{10}$  atomi di radio si spezzano ogni secondo.

Si è mostrato sperimentalmente (sezione 39) che 1  $cm^3$  di idrogeno a pressione e temperatura standard contiene  $3.6 \cdot 10^{19}$  molecole. Prendendo il peso atomico del radio pari a 225, il numero di atomi in 1 g di radio è uguale a  $3.6 \cdot 10^{21}$ . La frazione  $\lambda$  di radio che si spezza è pertanto  $1.95 \cdot 10^{-11}$  al secondo, o  $5.4 \cdot 10^{-4}$  ogni anno. Segue che in ogni grammo di radio circa

mezzo milligrammo si spezza ogni anno. La vita media del radio è circa 1800 anni e metà del radio è trasformato in circa 1300 anni.

Considereremo ora il calcolo, basato sul risultato osservato da Ramsay e Soddy, che il volume dell'emanazione ottenibile da un grammo di radio è circa  $1 \text{ mm}^3$ . La prova sperimentale basata sui risultati della diffusione indica che il peso molecolare dell'emanazione è circa 100. Se la teoria della disintegrazione è corretta, l'emanazione è un atomo di radio meno una particella  $e$ , pertanto, deve avere un peso molecolare di almeno 200. Questo alto valore è probabilmente più corretto del valore sperimentale, che è basato su una prova che deve necessariamente essere alquanto incerta. Il tasso di produzione dell'emanazione per secondo è uguale a  $\lambda N_0$ , dove  $N_0$  è la quantità in equilibrio. Assumendo il peso molecolare come 200, il peso dell'emanazione prodotta ogni secondo da 1 g di radio è uguale a  $8.96 \cdot 10^{-6} \lambda = 1.9 \cdot 10^{-11} \text{ g}$ .

Il peso dell'emanazione prodotta ogni secondo è quasi uguale al peso del radio che si spezza ogni secondo. Pertanto, la frazione di radio che si spezza ogni secondo è circa  $1.9 \cdot 10^{-11}$  che è in accordo con il numero precedentemente calcolato con il primo metodo.

Possiamo concludere che il *radio è trasformato per metà in circa 1300 anni*.

Assumendo l'attività del radio puro come circa due milioni di volte quella dell'uranio, e ricordando che nell'uranio si ha una sola trasformazione che dà raggi  $\alpha$ , mentre nel radio ve ne sono quattro, si può facilmente calcolare che la frazione di uranio che si trasforma ogni anno è circa  $10^{-9}$ . Da ciò segue che l'uranio dovrebbe dimezzarsi in circa  $6 \cdot 10^8$  anni.

Se il torio è un vero elemento radioattivo, il tempo per metà trasformazione è circa  $2.4 \cdot 10^9$  anni, poiché il torio ha circa la stessa attività dell'uranio ma contiene quattro prodotti che emettono raggi  $\alpha$ . Se l'attività del torio è dovuta a qualche impurità radioattiva, non si può fare alcuna valutazione della lunghezza della sua vita finché la sostanza attiva primaria non viene isolata e la sua attività misurata.

**262. Origine del radio.** Le trasformazioni nel radio sono, pertanto, piuttosto rapide e una massa di radio e una massa di radio se lasciata a se stessa, perderà nel corso di migliaia di anni gran parte della propria radioattività. Assumendo la stima sopra della vita media del radio, il valore di  $\lambda$  è  $5.4 \cdot 10^{-4}$ , con l'anno come unità di tempo. Una massa di radio lasciata a se stessa si dimezzerà in 1300 anni e solo una milionesima parte rimarrà dopo 26000 anni. Supponendo pertanto, come esempio, che la terra fosse inizialmente composta di radio puro, la sua attività per grammo 26000 anni dopo non sarà maggiore dell'attività osservata oggi in un buon campione di pechblenda. Anche supponendo che questa stima della vita del radio sia troppo piccola, il tempo richiesto affinché il radio scompaia praticamente è breve rispetto alla probabile età della terra. Siamo pertanto obbligati a concludere che il radio essendo continuamente prodotto nella terra, a meno di fare l'ipotesi molto improbabile, che il radio si sia in qualche modo improvvisamente formato ad una data recente rispetto all'età della terra. Fu per la prima volta suggerito da Rutherford e Soddy<sup>19</sup> che il radio rappresenti il prodotto di disintegrazione di uno dei radio-elementi trovati nella pechblenda. Sia l'uranio che il torio soddisfano le condizioni richieste come possibile sorgente di produzione del radio. Entrambi sono presenti nella pechblenda, hanno peso atomico maggiore di quello del radio e hanno tassi di trasformazione che sono lenti rispetto a quello del radio. Per certi aspetti, l'uranio soddisfa tali condizioni meglio del torio; non è stato finora osservato che minerali ricchi di torio contengano molto radio; mentre, d'altra parte, le pechblende contenenti più radio contengono una grande parte di uranio.

Se il radio non è prodotto dall'uranio, è certamente una straordinaria coincidenza che la più grande attività della pechblenda osservata sia di cinque o sei volte quella dell'uranio. Poiché il radio ha una vita breve rispetto a quella dell'uranio, la quantità di radio prodotta dovrebbe raggiungere un massimo valore dopo qualche migliaio di anni, quando il tasso di produzione di nuovo radio - che è anche una misura del tasso di trasformazione dell'uranio - bilancia il tasso di trasformazione di quel prodotto. A questo proposito il processo dovrebbe essere esattamente analogo alla produzione dell'emanazione del radio, con la differenza che il radio si trasforma molto più lentamente dell'emanazione. Ma poiché il radio stesso nella sua disintegrazione dà origine ad almeno cinque trasformazioni con la corrispondente produzione di raggi  $\alpha$ , l'attività dovuta al radio (misurata dai raggi  $\alpha$ ), quando si trova in una condizione di equilibrio radioattivo con l'uranio, dovrà essere circa cinque volte quella dell'uranio che produce; si è, infatti, mostrato che solo una trasformazione è stata finora osservata nell'uranio nel quale sono espulsi raggi  $\alpha$ . Tenendo conto della presenza dell'attinio nella pechblenda, l'attività osservata nella migliore pechblenda è circa la stessa di quella attesa se il radio fosse un prodotto di disintegrazione dell'uranio. Se questa ipotesi è corretta, la quantità di radio in ogni pechblenda dovrà essere proporzionale alla quantità di uranio presente, purché il radio non sia rimosso dal minerale dall'acqua percolante.

Questa questione è stata sperimentalmente affrontata da Boltwood<sup>20</sup>, McCoy<sup>21</sup> e Strutt<sup>22</sup>. McCoy misurò le attività relative dei diversi minerali sotto forma di polveri per mezzo di un elettroscopio e determinò la quantità di uranio presente con analisi chimica. I suoi risultati indicano che l'attività osservata nei minerali era approssimativamente proporzionale al loro contenuto di uranio. Poiché l'attinio è presente oltre all'uranio e ai suoi prodotti, ciò dovrebbe indicare che la quantità di radio e attinio assieme è proporzionale alla quantità di uranio. Questo problema è stato affrontato direttamente da Boltwood e Strutt misurando la quantità relativa dell'emanazione di radio sviluppatasi dai diversi minerali. Sciogliendo il

<sup>19</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. maggio 1903.

<sup>20</sup>Boltwood, Nature, 25 maggio, p. 80, 1904. Phil. Mag. aprile 1905.

<sup>21</sup>McCoy, Ber. d. D. Chem. Ges. No. 11, p. 2642, 1904.

<sup>22</sup>Strutt, Nature, 17 marzo e 7 luglio, 1904. Proc. Roy. Soc. 2 marzo 1905.

minerale e mettendolo da parte in un contenitore chiuso, la quantità di emanazione presente raggiunge un valore massimo dopo circa un mese. L'emanazione è poi introdotta in un contenitore chiuso con un elettroscopio a foglie d'oro simile a quello mostrato in Figura 12. Il ritmo di spostamento delle foglie d'oro è proporzionale alla quantità di emanazione dalla soluzione e questa, a sua volta, è proporzionale alla quantità di radio. Boltwood ha fatto in questo modo un confronto molto completo e accurato del contenuto di radio di diverse varietà di pechblenda e di altri minerali contenenti radio. Ha trovato che molti dei minerali allo stato solido consentivano ad una considerevole parte dell'emanazione di sfuggire nell'aria. La percentuale della quantità totale di emanazione persa in questo modo è mostrata nella colonna II della tabella seguente. La colonna I dà la quantità massima di emanazione presente in 1 g di minerale in unità arbitraria quando non si ha alcuna fuga di emanazione; la colonna III dà il peso in grammi di uranio contenuto in 1 g; e la colonna IV il rapporto ottenuto dividendo la quantità di emanazione con la quantità di uranio. I numeri della colonna IV saranno costanti se la quantità di radio è proporzionale alla quantità di uranio.

Sostanze	Località	I	II	III	IV
Uraninite	Nord Carolina	170.0	11.3	0.7465	228
Uraninite	Colorado	155.1	5.2	0.6961	223
Gummitite	Nord Carolina	147.0	13.7	0.6538	225
Uraninite	Joachimsthal	139.6	5.6	0.6174	226
Uranofane	Nord Carolina	117.7	8.2	0.5168	228
Uraninite	Sassonia	115.6	2.7	0.5064	228
Uranofane	Nord Carolina	113.5	22.8	0.4984	228
Torogummitite	Nord Carolina	72.9	16.2	0.3317	220
Carnotite	Colorado	49.7	16.3	0.2261	220
Uranotorite	Norvegia	25.2	1.3	0.1138	221
Samarskite	Nord Carolina	23.4	0.7	0.1044	224
Orangite	Norvegia	23.1	1.1	0.1034	223
Euxenite	Norvegia	19.9	0.5	0.0871	228
Torite	Norvegia	16.6	6.2	0.0754	220
Fergusonite	Norvegia	12.0	0.5	0.0557	215
Eschinite	Norvegia	10.0	0.2	0.0452	221
Xenotime	Norvegia	1.54	26.0	0.0070	220
Monazite (sabbia)	Nord Carolina	0.88	—	0.0043	205
Monazite (crist.)	Norvegia	0.84	1.2	0.0041	207
Monazite (sabbia)	Brasile	0.76	—	0.0031	245
Monazite (massiva)	Conn.	0.63	—	0.0030	210

Ad l'eccezione di qualche monazite, i numeri mostrano un accordo molto sorprendente e, tenendo in considerazione la grande diversità del contenuto di uranio nei diversi minerali e l'ampio spettro di località dalle quali provengono, i risultati offrono una prova diretta e soddisfacente che la quantità di radio nei minerali è direttamente proporzionale alla quantità di uranio.

In questo collegamento è interessante notare che Boltwood trovò che una considerevole quantità di radio esisteva in varietà di monazite, sebbene la maggior parte delle precedenti analisi siano in accordo con lo stabilire la non presenza di uranio. Un esame attento, di conseguenza, era fatto per testare questo punto e si trovò con un metodo speciale che l'uranio era presente e nella quantità prevista dalla teoria. I metodi consueti di analisi fallivano nel dare risultati corretti a causa della presenza di fosfati.

Risultati con simili caratteristiche sono stati recentemente forniti da Strutt<sup>23</sup>.

Il peso del radio in un minerale per grammo di uranio è una costante definita di notevole importanza pratica. Il suo valore fu recentemente determinato da Boltwood in confronto con l'emanazione, liberata da un peso noto di uraninite, con quella liberata da una quantità nota di bromuro di radio puro, fornito all'autore a tale scopo. Un peso misurato di bromuro di radio fu preso come riserva che emetteva calore ad un tasso di poco sopra i 100 grammo-calorie per ora per grammo ed era, pertanto, probabilmente puro. Questo fu sciolto in acqua e, per successive diluizioni, fu preparata una soluzione standard contenente  $10^{-7}$  g di bromuro di radio per  $cm^3$ . Assumendo la costituzione del bromuro di radio come  $RaBr_2$ , si dedusse che il peso del radio per grammo di uranio in ogni minerale era  $8.0 \cdot 10^{-7}$  g. La quantità di radio in un minerale per tonnellata di uranio è, pertanto, 0.72 g.

Strutt (citato) ottenne un valore quasi doppio, ma non aveva mezzi per accertarsi della purezza del suo bromuro di radio.

Questa quantità di radio per grammo di uranio è dell'esatto ordine di grandezza atteso dalla teoria della disintegrazione, se l'uranio è il genitore del radio. L'attività del radio puro, confrontata con l'uranio, non è nota con una sufficiente precisione tale da determinare la proporzione teorica del radio nell'uranio.

<sup>23</sup>Strutt, Proc. Roy. Soc. 2 marzo 1905.

La produzione di radio dall'uranio, fortemente supportata da questi esperimenti, non si può considerare definitivamente stabilita finché non si otterrà una prova sperimentale diretta della crescita del radio nell'uranio. La frazione di uranio che si spezza per anno è stata calcolata (sezione 261) ed è circa  $10^{-9}$  per anno. Questo numero rappresenta il peso del radio prodotto per anno per 1 g di uranio. L'emanazione, rilasciata dalla quantità di radio prodotta in un anno da 1 g di uranio, dovrebbe produrre una scarica in un comune elettroscopio a foglie d'oro in circa mezzora. Se si usa 1 kg di uranio, la quantità di radio prodotta in un solo giorno sarà facilmente rivelabile.

Esperimenti per rivelare la crescita del radio nell'uranio sono stati eseguiti da parecchi scienziati. Soddy<sup>24</sup> esaminò la quantità di emanazione emesse in tempi diversi da 1 kg di nitrato di uranio in soluzione, che era inizialmente purificato da piccole tracce di radio presenti mediante successivi processi chimici. La soluzione era mantenuta in un contenitore chiuso e la quantità di emanazione che era raccolta nella soluzione era misurata ad intervalli regolari.

Esperimenti preliminari mostrarono che il tasso reale di produzione di radio era ben inferiore alla quantità attesa teoricamente e fu ottenuta una prima piccola indicazione che il radio era prodotto. Dopo che l'uranio era lasciato a riposo per diciotto mesi, Soddy affermò che la quantità di emanazione era significativamente maggiore di quella iniziale. La soluzione dopo questo intervallo conteneva circa  $1.5 \cdot 10^{-9}$  g di radio. Ciò dà il valore di circa  $2 \cdot 10^{-12}$  per la frazione di uranio che si trasforma in un anno, mentre il valore teorico è di circa  $10^{-9}$ .

Whetham<sup>25</sup> trovò pure che una quantità di nitrato di uranio che era stata messa da parte per un anno mostrava un significativo incremento nel contenuto di radio e considerò che il tasso di produzione era più rapido di quello trovato da Soddy. Nel suo caso, all'inizio non era del tutto liberato dal radio.

Osservazioni estese su vari anni sarebbero necessarie prima che la questione possa essere considerata decisa, perché la stima accurata di piccole quantità di radio dalla quantità di emanazione è affrontabile con difficoltà. Questo è specialmente il caso in cui le osservazioni sono fatte su un ampio intervallo di tempo.

Chi scrive ha fatto una verifica per vedere se il radio è prodotto dall'attinio o dal torio. Riteneva possibile che l'attinio si dimostrasse un prodotto intermedio tra l'uranio e il radio. Le soluzioni, purificate dal radio, erano rimaste depositate per un anno, ma non fu osservato alcun certo incremento del contenuto di radio.

Vi è un piccolo dubbio che la produzione di radio dall'uranio proceda soltanto ad una piccola frazione del tasso previsto dalla teoria. Ciò non è sorprendente quando si consideri che probabilmente si verificano parecchie trasformazioni tra il prodotto  $UrX$  e il radio. Nel caso del radio, per esempio, si è mostrato che un numero di lente trasformazioni seguono quelle rapide osservate. A causa della debole attività dell'uranio, non sarà facile rivelare direttamente il verificarsi di tali trasformazioni. Se, per esempio, si hanno uno o più prodotti senza raggi tra l' $UrX$  e il radio, che sono rimossi dall'uranio con lo stesso processo chimico usato per purificare l'uranio dal radio, il tasso di produzione del radio sarà inizialmente molto piccolo, ma ci si aspetta che cresca con il tempo più del prodotto intermedio accumulato nell'uranio. Il fatto che i contenuti di uranio e radio nei minerali radioattivi siano sempre proporzionali tra loro, unito alla definitiva prova sperimentale che il radio è prodotto dall'uranio, permette di dare una prova quasi conclusiva che l'uranio è in qualche modo il genitore del radio.

La prova generale che è stata data per mostrare che il radio deve essere continuamente prodotto da alcune altre sostanze si applica anche all'attinio, che ha un'attività dello stesso ordine di grandezza del radio. La presenza di attinio con il radio nella pechblenda indica che questa sostanza è in qualche modo derivata dall'uranio. È possibile che l'attinio si possa dimostrare prodotto o dal radio oppure essere una sostanza intermedia tra uranio e radio. Si dovrebbe mostrare che la quantità di attinio nei minerali radioattivi è, come il radio, proporzionale alla quantità di uranio e dare una prova indiretta di tale legame. Non è semplice risolvere questo punto per l'attinio come per il radio, poiché l'attinio emette una emanazione con vita molto breve e i metodi adottati per determinare il contenuto di radio nei minerali non si può applicare senza significative modifiche per determinare la quantità di attinio presente.

I dati sperimentali, finora ottenuti, non gettano molta luce sull'origine della primaria materia attiva nel torio. Hofmann e altri (sezione 23) hanno mostrato che il torio separato dai minerali contenenti uranio è sempre più attivo della maggiore quantità di uranio presente. Ciò indicherà che la sostanza attiva nel torio può anche derivare dall'uranio.

Mentre molto lavoro rimane ancora da fare, un inizio promettente è stato fatto per determinare l'origine e la relazione dei radio-elementi. Abbiamo visto che il legame tra polonio, radio-tellurio e radio-piombo con il radio è già ben stabilito. Lo stesso radio è ora aggiunto all'elenco ed è probabile che l'attinio lo segua.

Mentre esperimenti indubitabili mostrano che vi è una definita relazione tra la quantità di uranio e radio presenti nei comuni minerali radioattivi, Danne<sup>26</sup> ha recentemente richiamato l'attenzione su un'apparente e interessante eccezione. Considerevoli quantità di radio furono trovate in certi depositi nelle vicinanze di Issy-l'Évêque nel distretto della Saona e Loira, privi di tracce di uranio. La materia attiva è trovata nella piromorfite (fosfato di piombo), in argilla contenente piombo e nella pegmatite, ma il radio è solitamente presente in maggiori quantità nella prima. La piromorfite è trovata in filoni di rocce di quarzo e feldspato. Le vene sono sempre bagnate a causa della presenza di un numero di sorgenti nelle vicinanze. Il contenuto di uranio nelle piromorfite varia considerevolmente, ma Danne considera che circa un centigrammo di radio sia presente in ogni tonnellata. Sembra probabile che il radio trovato in queste località sia stato depositato

<sup>24</sup>Soddy, Nature, 12 maggio 1904; 19 gennaio 1905.

<sup>25</sup>Whetham, Nature, 5 maggio 1904; 26 gennaio 1905.

<sup>26</sup>Danne, C. R. 23 gennaio 1905.

dall'acqua che scorre attraverso di esse, possibilmente in tempi passati. La presenza di radio non è sorprendente, perché i cristalli di autunite sono stati trovati ad una distanza di circa 40 miglia e probabilmente vi sono depositi contenenti uranio in quella regione. Questo risultato è interessante in quanto suggerisce che il radio possa essere rimosso con l'acqua e depositato mediante azioni chimiche e fisiche anche ad una certa distanza.

Si mostrerà nel prossimo capitolo che il radio è stato trovato distribuito molto ampiamente sulla superficie della terra, ma in genere in quantità molto piccole.

**263. La radioattività del radio dipende dalla concentrazione?** Abbiamo visto che la costante radioattiva di ogni prodotto è indipendente dalla concentrazione dello stesso. Questo risultato è stato stabilito su un ampio spettro di alcune sostanze e specialmente per l'emanazione del radio. Non è stata osservata alcuna differenza certa nel tasso di decadimento dell'emanazione, sebbene la quantità presente nell'unità di volume dell'aria sia stata variata milioni di volte.

J. J. Thomson<sup>27</sup> ha suggerito che il tasso di disintegrazione del radio fosse influenzato dalle proprie radiazioni. Questo, a prima vista, appare molto probabile, perché una piccola massa di composto di radio puro è soggetta ad un intenso bombardamento da parte delle radiazioni che da esso derivano, e le radiazioni sono di un carattere tale che ci si deve aspettare che producano una rottura degli atomi della materia che attraversano. Se così fosse, la radioattività di una data quantità di radio dovrebbe essere una funzione della sua concentrazione e dovrebbe essere maggiore allo stato solido che distribuita in una grande massa di materia.

Chi scrive ha eseguito un esperimento per esaminare questo aspetto. Si presero due tubi di vetro, in uno dei quali era posto qualche milligrammo di bromuro di radio puro in una condizione di equilibrio radioattivo, e nell'altro una soluzione di cloruro di bario. I due tubi furono collegati vicino alla parte superiore con un corto tubo e la parte aperta fu sigillata. L'attività del radio allo stato solido era valutata immediatamente dopo la sua introduzione ponendolo in una data posizione vicino a un elettroscopio fatto di metallo sottile del tipo mostrato in Figura 12. Si osservò l'accresciuto tasso di scarica dell'elettroscopio dovuto ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  dal radio. Quando fu posta una piastra di piombo dello spessore di 6 mm tra il radio e l'elettroscopio, il tasso di scarica osservato era dovuto ai soli raggi  $\gamma$ . Inclinando leggermente l'apparato, la soluzione di bario fluiva nel tubo col radio e lo scioglieva. Il tubo era ben rimescolato, così da distribuire il radio uniformemente nella soluzione. Non fu misurata alcuna apprezzabile attività dei raggi  $\gamma$  nell'arco di un mese. L'attività misurata dai raggi  $\beta$  e  $\gamma$  era alquanto ridotta, ma questo non era dovuto ad una diminuzione della radioattività, ma ad un aumento dell'assorbimento dei raggi  $\beta$  nel loro passaggio attraverso la soluzione. Il volume della soluzione era almeno 1000 volte maggiore di quello del bromuro di radio solido, e, di conseguenza, il radio era soggetto all'azione di una radiazione molto indebolita. Io credo che si possa concludere da questo esperimento che le radiazioni emesse dal radio hanno poca influenza nel causare la disintegrazione degli atomi di radio.

Voller<sup>28</sup> ha recentemente pubblicato alcuni esperimenti che sembrano mostrare che la vita del radio varia enormemente con la sua concentrazione. Nei suoi esperimenti, soluzioni di bromuro di radio di nota intensità erano evaporate in un contenitore di platino di area  $1.2\text{ cm}^2$  e la loro attività misurata nel corso del tempo. L'attività del radio, così depositato, inizialmente mostrava la normale crescita attesa a causa della produzione dell'emanazione, ma dopo aver raggiunto un massimo, rapidamente decadeva. Per un peso di  $10^{-6}\text{ mg}$  di bromuro di radio, l'attività, per esempio, scompariva praticamente in 26 giorni dopo il raggiungimento del massimo. Il tempo necessario affinché l'attività scomparisse cresceva rapidamente con la quantità di radio presente. In un'altra serie di esperimenti, affermò che l'attività osservata nel contenitore non era proporzionale alla quantità di radio presente. Per esempio, l'attività aumentava solo di 24 volte per un aumento di un milione di volte del radio presente, da  $10^{-9}\text{ mg}$  a  $10^{-3}\text{ mg}$ .

Questi risultati, non sono stati confermati da successivi esperimenti fatti da Eve. Egli trovò che, su un ampio range esaminato, l'attività era direttamente proporzionale alla quantità di radio presente, entro i limiti dell'errore sperimentale. La tabella seguente illustra i risultati ottenuti. Il radio era evaporato in un contenitore di platino di area  $4.9\text{ cm}^2$ .

Peso del radio in <i>mg</i>	Attività in unità arbitrarie
$10^{-4}$	1000
$10^{-5}$	106
$10^{-6}$	11.8
$10^{-7}$	1.25

Per un aumento di un migliaio di volte della quantità di radio, l'attività aumentava 800 volte, mentre Voller stabilì che l'attività, nei suoi esperimenti, aumentava solo 3 o 4 volte.

Negli esperimenti di Eve, l'attività era misurata osservando l'aumentato tasso di scarica di un elettroscopio a foglie d'oro quando il contenitore di platino con il deposito attivo era posto dentro l'elettroscopio. L'attività di  $10^{-6}\text{ mg}$  era troppo piccola per essere misurata con precisione nell'elettroscopio impiegato, mentre  $10^{-3}\text{ mg}$  dava un scarica troppo rapida. D'altro canto, il metodo di misura impiegato da Voller era insolito per misure di radioattività molto debole.

<sup>27</sup>J.J. Thomson, Nature, 30 aprile, p. 601, 1903.

<sup>28</sup>Voller, Phys. Zeit. 5, No. 24, p. 781, 1904.

Eve trovò anche che una piccola quantità di radio mantenuta *in un contenitore chiuso* non perdeva nel tempo la propria attività. Un contenitore di vetro argentato conteneva un sistema a foglie d'oro, come è mostrato in Figura 12. Una soluzione contenente  $10^{-6}$  mg di bromuro di radio era evaporata sulla parte bassa del contenitore di area  $76 \text{ cm}^2$ . L'attività, dopo aver raggiunto un massimo, rimaneva costante per 100 giorni durante i quali si facevano le osservazioni.

Questi esperimenti di Eve, a mio avviso, mostrano che l'attività del radio è proporzionale alla quantità di radio presente e che il radio rimasto in un contenitore chiuso, non mostra alcun segno di diminuzione dell'attività. D'altro canto, penso che non vi siano dubbi che una piccola quantità di radio depositato su una piastra e *lasciato all'aria aperta* debba perdere la propria attività rapidamente. Questa perdita di attività non ha nulla a che fare con la brevità della vita del radio, ma è dovuta alla fuga del radio dalla piastra verso il gas circostante. Supponiamo, per esempio, che una soluzione contenente  $10^{-9}$  mg di bromuro di radio evapori in un contenitore di area  $1 \text{ cm}^2$ . Questa quantità di radio troppo piccola per formare anche uno strato di spessore molecolare. Sembra probabile che, durante il processo di evaporazione, il radio tenda a raccogliersi in piccole masse e ad essere depositato sulla superficie del contenitore. Questo sarà molto facilmente removibile da lente correnti d'aria e potrà sfuggire in tal modo dalla piastra. La scomparsa di tali minute quantità di radio è attesa e avverrà probabilmente con tutti i tipi di materia presente in una tale piccola quantità. Un tale effetto non ha nulla a che vedere con l'alterazione della vita del radio e non deve essere confuso con essa.

Il risultato che la radiazione totale da una data quantità di radio dipende solo dalla quantità di radio e non dal suo grado di concentrazione è di grande importanza, perché ci permette di determinare con precisione il contenuto di radio nei minerali e nel suolo nel quale il radio esiste in una condizione molto diffusa.

**264. Costanza delle radiazioni.** Le prime osservazioni sull'uranio e il torio hanno mostrato che la loro radioattività rimaneva costante per un periodo di parecchi anni durante i quali erano esaminati. La possibilità di separare dall'uranio e dal torio i prodotti attivi  $UrX$  e  $ThX$ , l'attività dei quali decadeva nel tempo, sembrava a prima vista contraddire questo. Ulteriori osservazioni, tuttavia, mostrarono che la radioattività totale di questi corpi non era alterata dai processi chimici, perché si trovò che l'uranio e il torio dai quali i prodotti radioattivi erano rimossi, riguadagnavano spontaneamente la loro radioattività. In un dato tempo dopo la rimozione del prodotto attivo, la somma totale della radioattività del prodotto separato insieme con quella della sostanza dalla quale era stato separato era sempre uguale a quella del composto iniziale prima della separazione. Nei casi in cui i prodotti attivi, come  $UrX$  e l'emanazione del radio, decadono nel tempo secondo una legge esponenziale, e ciò segue dai risultati sperimentali. Se  $I_1$  è l'attività del prodotto in ogni istante  $t$  dopo la separazione, e  $I_0$  il valore iniziale, sappiamo che  $\frac{I_1}{I_0} = e^{-\lambda t}$ . Nello stesso tempo l'attività  $I_2$  recuperata durante lo stesso intervallo  $t$  è data da  $\frac{I_2}{I_0} = 1 - e^{-\lambda t}$ , dove  $\lambda$  è la stessa costante di prima. Segue allora che  $I_1 + I_2 = I_0$  che è un'espressione del risultato sopra espresso. Lo stesso è vero anche qualunque sia la legge di decadimento dell'attività del  $ThX$  dopo la separazione dal torio nelle fasi iniziali di aumento con il tempo. Nello stesso tempo, l'attività del composto di torio residuo inizialmente decresce e a un tale ritmo che la somma delle attività del torio e del suo prodotto separato è sempre uguale a quella del torio originario.

Questa evidente costanza della radiazione totale segue dal risultato generale che i processi radioattivi non possono in alcun modo cambiare per l'intervento di forze note. Si può ricordare che la costante di decadimento dell'attività di un prodotto radioattivo ha un valore fisso e definito in tutte le condizioni. È indipendente dalla concentrazione della materia attiva, dalla pressione e dalla natura del gas in cui la sostanza è posta e non è influenzata da un ampio intervallo di temperature. La sola eccezione osservata è il prodotto radio C. Il suo valore di  $\lambda$  aumenta con la temperatura per un intervallo di circa  $1000^\circ\text{C}$ , ma a  $1200^\circ\text{C}$  ritorna quasi al valore normale. Allo stesso modo, non è stato trovato possibile alterare il tasso di produzione della materia attiva dai radio-elementi. Inoltre, non vi è un singolo caso ben identificato in cui la radioattività sia stata alterata o distrutta in un corpo attivo o creata in un elemento inattivo.

Sono stati osservati certi casi, che a prima vista sembrano indicare una distruzione della radioattività. Per esempio, la radioattività eccitata è rimossa da un filo di platino riscaldato sopra il calor rosso. È stato, tuttavia, mostrato da Miss Gates (sezione 187) che la radioattività non è distrutta, ma è depositata in quantità inalterata su corpi più freddi circostanti. L'ossido di torio è stato mostrato perdere una grande parte del suo potere emanante per riscaldamento al calor bianco. Ma un esame più attento mostra che l'emanazione è ancora prodotta allo stesso ritmo, ma è racchiusa nel composto.

La radioattività totale di una data massa di un radio elemento, misurata dalle specifiche radiazioni emesse, è una quantità che non può essere aumentata o diminuita, sebbene si possa manifestare in una serie di prodotti che possono essere separati dal radio-elemento. Il termine "conservazione della radioattività" è, quindi, un'espressione conveniente dei fatti attualmente noti. È del tutto possibile, tuttavia, che ulteriori esperimenti a temperature molto alte o molto basse possano mostrare che la radioattività varia.

Sebbene non si sia osservata alcuna differenza nella radioattività dell'uranio in un intervallo di tempo di cinque anni, si è mostrato (sezione 261) che sulle basi teoriche la radioattività *di una data quantità* di un radio-elemento diminuirà con il tempo. La variazione sarà, tuttavia, così lenta nell'uranio che dovranno trascorrere probabilmente milioni di anni prima che abbia luogo un cambiamento misurabile, mentre la radioattività totale di una data quantità di materia rimasta decrescerà, ma dovrà essere costante *per una massa costante* del radio-elemento. È già stato evidenziato (sezione 238) che l'attività del radio, misurata dai raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , aumenterà probabilmente per parecchie centinaia di anni dopo la sua

separazione. Questo è dovuto alla comparsa di nuovi prodotti nel radio. Infine, tuttavia, l'attività deve diminuire secondo una legge esponenziale con il tempo, dimezzandosi in circa 1300 anni.

La conservazione della radioattività si applica non solo alle radiazioni nel loro insieme, ma anche ad ogni specifico tipo di radiazione. Se viene rimossa l'emanazione da un composto di radio, la quantità di radiazione  $\beta$  del radio inizia da subito a diminuire, ma ciò è compensato dalla comparsa di raggi  $\beta$  nelle radiazioni dal contenitore nel quale viene accumulata l'emanazione separata. In ogni istante la somma totale delle radiazioni  $\beta$  dal radio e dell'emanazione è sempre la stessa come quella dal composto di radio prima che l'emanazione venga rimossa.

Risultati simili sono stati trovati valere anche per i raggi  $\gamma$ . Questo fu misurato da chi scrive nel modo seguente. L'emanazione da un bromuro di radio solido fu rilasciata per riscaldamento e condensata in un piccolo tubo di vetro che era poi sigillato. Il radio così testato e l'emanazione nel tubo erano posti insieme sotto un elettroscopio con uno schermo di piombo spesso 1 cm interposto per far passare solo i raggi  $\gamma$ . Gli esperimenti proseguirono per tre settimane, ma la somma totale dei raggi  $\gamma$  dal radio e dall'emanazione era, in un ampio intervallo, uguale a quella del radio iniziale. Durante questo periodo la quantità di raggi  $\gamma$  dal radio inizialmente diminuiva di soli pochi punti percentuali per poi lentamente crescere ancora, finché alla fine delle tre settimane aveva quasi riguadagnato il suo valore originario, prima della rimozione dell'emanazione. Nello stesso tempo la quantità di raggi  $\gamma$  dall'emanazione crebbe da zero a un massimo e poi diminuì lentamente allo stesso tasso di decadimento dell'attività dell'emanazione nel tubo. Questo risultato mostra che la quantità di raggi  $\gamma$  dal radio era costante sull'intero periodo delle osservazioni, nonostante la quantità di raggi  $\gamma$  dal radio e dall'emanazione passasse attraverso un ciclo di trasformazioni.

Vi è un'interessante possibilità in questo legame da sviluppare. I raggi dalle sostanze attive trasportano energia in una forma molto concentrata e questa energia è dissipata nella materia nell'assorbimento dei raggi. I raggi potranno dare origine a una disintegrazione degli atomi della materia inattiva che viene colpita e produrre un tipo di radioattività. Questo effetto è stato osservato da parecchi sperimentatori. Ramsay e W. T. Cooke<sup>29</sup> affermano di aver notato una tale azione usando un decigrammo di radio come sorgente di radiazione. Il radio, sigillato in un contenitore di vetro, era circondato da un tubo di vetro esterno ed esposto all'azione dei raggi  $\beta$  e  $\gamma$  dal radio per parecchie settimane. Si trovò che la parte interna ed esterna del tubo di vetro risultava attiva, e la materia attiva si poteva rimuovere in una soluzione acquosa. La radioattività osservata era molto bassa, corrispondente a solo circa 1 mg di uranio. Chi scrive ha, in diversi momenti, compiuto esperimenti di questo tipo ma con risultati negativi. In questi esperimenti è necessaria la più grande cura per assicurarsi che la radioattività non sia dovuta ad altre cause diverse dai raggi provenienti dal radio. Questa cura è specialmente necessaria nei laboratori nei quali possono sfuggire nell'aria considerevoli quantità di emanazione del radio. La superficie di ogni sostanza viene rivestita con i prodotti del radio a lenta trasformazione, cioè radio D, E e F. L'attività fornita in questo modo alla originaria materia inattiva è spesso considerevole. Questo contagio da parte dell'emanazione del radio si estende in tutto il laboratorio, a causa della distribuzione dell'emanazione per convezione e diffusione. Per esempio, Eve<sup>30</sup> trovò che ogni sostanza che esaminò nel laboratorio di chi scrive mostrava molta più attività del normale. In questo caso il radio è stato in uso nell'edificio per circa due anni.

**265. Perdita di peso dei radio-elementi.** Poiché i radio-elementi emettono continuamente particelle  $\alpha$  di dimensioni atomiche, una sostanza attiva, racchiusa in un contenitore sufficientemente sottile per consentire alle particelle  $\alpha$  di sfuggire, deve perdere gradualmente peso. Questa perdita sarà piccola in condizioni normali, poiché la maggior parte dei raggi  $\alpha$  prodotti è assorbita nella massa della sostanza stessa. Se uno strato molto sottile di un composto di radio viene distribuito su una lastra molto sottile di sostanza, che non assorbe in modo apprezzabile i raggi  $\alpha$ , sarà rivelabile una perdita di peso dovuta all'espulsione di particelle  $\alpha$ . Poiché per la particella  $\alpha$ ,  $\frac{e}{m} = 6 \cdot 10^3$  ed  $e = 1.1 \cdot 10^{-20}$  unità elettromagnetiche e di queste ne vengono espulse  $2.5 \cdot 10^{11}$  ogni secondo per grammo di radio, la parte di massa espulsa è  $4.8 \cdot 10^{-12}$  per secondo e  $10^{-6}$  per anno. Vi è una condizione, tuttavia, sotto la quale il radio perderà peso abbastanza rapidamente. Se una corrente d'aria è passata lentamente su una soluzione di radio, l'emanazione prodotta sarà rimossa nel momento in cui si forma. Poiché l'atomo dell'emanazione ha una massa probabilmente non molto più piccola di quella dell'atomo di radio, la frazione della massa rimossa per anno sarà quasi uguale a quella del radio che si trasforma ogni anno, cioè un grammo di radio diminuirà in peso di circa mezzo milligrammo (sezione 261) per anno.

Se si suppone che le particelle  $\beta$  abbiano peso, la perdita di peso dovuta alla loro espulsione è molto piccola paragonata a quella dovuta all'emissione delle particelle  $\alpha$ . Chi scrive ha mostrato (sezione 253) che circa  $7 \cdot 10^{10}$  particelle  $\beta$  sono emesse al secondo da 1 g di radio. La conseguente perdita di peso sarà solo circa  $10^{-9}$  g per anno.

Tranne in condizioni sperimentali speciali, sarà, pertanto, difficile rivelare la perdita di peso del radio dovuta all'espulsione delle particelle  $\beta$  dalla sua massa. Vi è, tuttavia, una possibilità che il radio possa cambiare di peso anche se nessun prodotto radioattivo può sfuggire. Per esempio, se si assume l'ipotesi che la gravitazione è il risultato delle forze che hanno origine nell'atomo, è possibile che, se l'atomo risulta disintegrato, il peso delle parti potrà non essere uguale a quello dell'atomo originario.

Un gran numero di esperimenti sono stati fatti per vedere se le preparazioni di radio, lasciate sigillate in un tubo, cambiavano di peso. Con le piccole quantità disponibili allo sperimentatore, non si è finora stabilita alcuna differenza di

<sup>29</sup>Ramsay e W. T. Cooke, Nature, 11 agosto 1904.

<sup>30</sup>Eve, Nature, 16 marzo 1905.

peso delle preparazioni di radio. Heydweiller affermò di aver osservato una perdita di peso del radio e anche Dorn ottenne un debole indicazione di cambiamento di peso. Questi risultati, tuttavia, non sono stati confermati. Forch, in seguito, non fu in grado di osservare un'apprezzabile variazione.

J. J. Thomson<sup>31</sup> ha compiuto esperimenti per vedere se il rapporto tra peso e massa per il radio è lo stesso della materia inattiva. Abbiamo visto nella sezione 48 che una carica in moto possiede una massa che è costante per basse velocità ma che cresce quando la sua velocità si avvicina a quella della luce. Il radio emette alcuni elettroni ad una velocità confrontabile con quella della luce e, presumibilmente, questi elettroni erano in rapido movimento nell'atomo prima della loro espulsione. Sarà possibile che il rapporto per il radio differisca da quello della materia ordinaria. Fu usato il metodo del pendolo e il radio fu racchiuso in un piccolo e leggero tubo sospeso con un filo di seta. Entro i limiti dell'errore sperimentale il rapporto peso-massa era lo stesso di quello della materia ordinaria, cosicché possiamo concludere che il numero di elettroni che si muovono con una velocità vicina a quella della luce è piccolo rispetto al numero totale presente.

**266. Emissione totale di energia dal radio-elemento.** Si è mostrato che 1 g di radio emette energia al ritmo di 100 grammo-calorie per ora o 876000 grammo-calorie per anno. Se si mette da parte 1 g di radio in equilibrio radioattivo, la sua radioattività  $e$ , di conseguenza, l'emissione di calore, è data in un istante  $t$  da  $qe^{-\lambda t}$ , dove  $\lambda$  è la costante di decadimento dell'attività del radio e dell'effetto iniziale di riscaldamento; l'emissione totale di calore da 1 g di radio è data da  $\int_0^{\infty} qe^{-\lambda t} dt = \frac{q}{\lambda}$ .

Per stimare la vita del radio data nella sezione 261 il valore di  $\lambda$  è  $\frac{1}{1850}$  quando si assume come unità di tempo 1 anno. L'emissione totale di calore da 1 g di radio durante la sua vita è, pertanto,  $1.6 \cdot 10^9$  grammo-calorie. Il calore emesso nell'unione di idrogeno e ossigeno per formare 1 g di acqua è circa  $4 \cdot 10^3$  grammo-calorie e in questa reazione è emesso più calore a parità di peso di ogni altra reazione chimica nota. Si vede, pertanto, che l'energia totale emessa da 1 g di radio durante le sue trasformazioni è circa un milione di volte maggiore di ogni altra trasformazione molecolare nota. Quale materia sia in grado, in speciali condizioni, di emettere un'enorme quantità di energia è ben esemplificato dal caso dell'emanazione del radio. Calcoli della quantità di questa energia sono già stati presentati nella sezione 249.

Poiché gli altri radio-elementi differiscono dal radio solo nella lentezza della loro trasformazione, l'emissione totale di calore dall'uranio e dal torio deve essere di un ordine di grandezza simile. Vi è, pertanto, motivo di credere che vi sia un'enorme accumulo di energia latente all'interno degli atomi dei radio-elementi. Questo deposito di energia non sarà riconosciuto finché gli atomi non hanno subito un lento processo di disintegrazione. L'energia emessa nelle trasformazioni radioattive è derivata dall'energia interna degli atomi. L'emissione di questa energia non disobbedisce alla legge della conservazione dell'energia, perché è solo necessario supporre che, quando le trasformazioni radioattive cessano, l'energia accumulata negli atomi dei prodotti finali è minore di quella degli atomi originari dei radio-elementi. La differenza tra l'energia iniziale posseduta dalla materia che ha subito trasformazioni e i prodotti finali inattivi che ne derivano, è una misura della quantità totale di energia emessa.

Sembra esserci ogni ragione per supporre che l'energia atomica di tutti gli elementi è di un simile elevato ordine di grandezza. Con l'eccezione dei loro alti pesi atomici, i radio-elementi non hanno altre speciali caratteristiche chimiche che li differenziano dagli elementi inattivi. L'esistenza di un deposito latente di energia negli atomi è una conseguenza necessaria delle idee moderne sviluppate da J. J. Thomson, Larmor e Lorentz, che descrivono l'atomo come una complessa struttura consistente di parti cariche in rapida oscillazione o moto orbitale una rispetto all'altra. L'energia può essere in parte cinetica e in parte potenziale, ma la semplice concentrazione delle particelle cariche, che probabilmente formano l'atomo, in sé implica un grande accumulo di energia nell'atomo, in confronto del quale l'energia emessa durante le trasformazioni del radio è insignificante.

L'esistenza di questo deposito di energia latente non si manifesta solitamente, poiché gli atomi non possono spezzarsi in forme più semplici grazie ad agenti fisici o chimici a nostra disposizione. La sua esistenza spiega anche l'incapacità dei chimici di trasformare gli atomi e rende anche conto del fatto che il tasso di trasformazione dei processi radioattivi è indipendente da tutti gli agenti esterni. Non è stato possibile alterare in qualsiasi modo il tasso di emissione dell'energia dai radio-elementi. Se si trovasse possibile controllarlo a comando, si otterrebbe un'enorme quantità di energia da una piccola quantità di materia.

**267. Produzione di elio dall'emanazione del radio e del torio.** Poiché i prodotti finali, risultanti da una disintegrazione dei radio-elementi, non sono radioattivi, si saranno accumulati nel corso delle ere geologiche in una certa quantità e saranno sempre associati ai radio-elementi. I prodotti inattivi derivanti dalle trasformazioni radioattive sono le particelle  $\alpha$  espulse ad ogni fase e il prodotto o i prodotti inattivo/i finale/i rimangono, quando il processo di disintegrazione non può essere tracciato a lungo dalla proprietà della radioattività.

La pechblenda, nella quale sono stati principalmente trovati i radio-elementi, contiene in piccole quantità una grande parte di tutti gli elementi noti. Nella ricerca per un possibile prodotto di disintegrazione comune a tutti i radio-elementi, la presenza di elio nei minerali radioattivi è degna di nota; l'elio è il solo trovato nei minerali radioattivi ed è un invariabile compagno dei radio-elementi. Inoltre, la presenza nei minerali di un gas luminoso e inerte simile all'elio è sempre stata oggetto di sorpresa. La produzione da radio e torio delle emanazioni radioattive, che si comportano come gas chimicamente

<sup>31</sup>J. J. Thomson, International Electrical Congress, St. Louis, settembre 1904.

inerti della famiglia elio-argo, suggerisce la possibilità che uno dei prodotti inattivi finali della disintegrazione dei radio-elementi si possa provare essere un gas chimicamente inerte. Le recenti scoperte della natura materiale dei raggi  $\alpha$  aggiungono valore all'ipotesi; infatti, la misura del rapporto  $\frac{e}{m}$  della particella  $\alpha$  indica che se essa consiste di un tipo di materia nota, deve essere o idrogeno o elio. Per questo motivo, fu ipotizzato nel 1902 da Rutherford e Soddy<sup>32</sup> che l'elio potesse essere un prodotto della disintegrazione dei radio-elementi.

Sir William Ramsay e Mr Soddy nel 1903 intrapresero una ricerca sull'emanazione del radio con lo scopo di vedere se fosse possibile ottenere un'evidenza spettroscopica della presenza di una nuova sostanza. Prima di tutto, esposero l'emanazione ad un trattamento molto drastico (sezione 158) e confermarono ed estesero i risultati precedentemente acquisiti da Rutherford e Soddy che l'emanazione si comportava con un gas chimicamente inerte e possedeva proprietà analoghe ai gas del gruppo elio-argo.

Ottenendo 30 *mg* di bromuro di radio puro (preparato in precedenza circa tre mesi prima) Ramsay e Soddy<sup>33</sup> esaminarono i gas, liberati mediante messa in soluzione del bromuro di radio in acqua, per la presenza di elio. La soluzione rilasciò una considerevole quantità di idrogeno e ossigeno (si veda sezione 124). L'idrogeno e l'ossigeno erano rimossi passando i gas liberati su una spirale al calor rosso di un filo di rame parzialmente ossidato e il vapore acqueo derivante fu assorbito in un tubo di pentossido di fosforo.

Il gas passava poi in un piccolo tubo a vuoto che era collegato con un tubo ad U. Ponendo il tubo ad U in aria liquida, la maggior parte dell'emanazione presente si condensava e così pure la maggior parte della  $CO_2$  presente nel gas. Esaminando lo spettro del gas nel tubo a vuoto, fu osservata la caratteristica riga  $D_2$  dell'elio.

Questo esperimento fu ripetuto con 30 *mg* di bromuro di radio circa quattro mesi dopo, prestatato da chi scrive. L'emanazione e la  $CO_2$  erano rimossi passandoli attraverso un tubo a U immerso in aria liquida. Fu osservato uno spettro completo di elio, incluse le righe di lunghezza d'onda 6677, 5876, 5016, 4972, 4713 e 4472. Erano presenti pure altre tre righe della lunghezza d'onda di circa 6180, 5695, 5455 che non sono state finora identificate.

Negli esperimenti successivi, l'emanazione da 50 *mg* di bromuro di radio erano inviati con l'ossigeno in un piccolo tubo a U, raffreddato nell'aria liquida, nella quale l'emanazione condensava. Si aggiungeva nuovo ossigeno e il tubo a U veniva aspirato. Il piccolo tubo a vuoto, collegato con il tubo a U, non mostrava inizialmente alcuna riga dell'elio quando veniva rimossa l'aria liquida. Lo spettro ottenuto era di un tipo nuovo e Ramsay e Soddy lo considerarono proprio quello dell'emanazione. Dopo aver lasciato l'emanazione nel tubo per quattro giorni, apparve lo spettro dell'elio con tutte le righe caratteristiche e, inoltre, erano presenti tre nuove righe nell'elio ottenuto dalla soluzione del radio. Questi risultati sono stati confermati. Gli esperimenti, che hanno portato a tali importanti e significativi risultati, non sono facili da eseguire, perché la quantità di elio e di emanazione rilasciati da 50 *mg* di bromuro di radio è estremamente piccola. Fu necessario, in tutti i casi, rimuovere quasi completamente gli altri gas, che erano presenti in quantità sufficienti a mascherare lo spettro della sostanza in esame. Il successo degli esperimenti è stato in larga parte dovuto all'applicazione, a questa ricerca, dei metodi raffinati di analisi dei gas, in precedenza impiegati da Sir William Ramsay con grande abilità nella separazione dei gas rari xeno e kripton, che sono presenti in quantità molto piccole nell'atmosfera. Il fatto che lo spettro dell'elio non fosse inizialmente presente, ma compariva dopo che l'emanazione era rimasta nel tubo per alcuni giorni, mostra che l'elio deve essere stato prodotto dall'emanazione. Questa non può essere l'elio stesso, perché, nel primo luogo, l'elio non è radioattivo e in secondo luogo, lo spettro dell'elio non era presente all'inizio, quando la quantità di emanazione nel tubo era al suo massimo. Inoltre, gli esperimenti di diffusione già discussi, portano alla conclusione che l'emanazione è di alto peso molecolare. Non vi possono essere, quindi, dubbi che l'elio è derivato dall'emanazione del radio a causa delle trasformazioni di qualche tipo che in esso avvengono.

Questi risultati furono più tardi confermati da altri sperimentatori. Curie e Dewar<sup>34</sup> eseguirono il seguente esperimento: Un peso di circa 42 *gr* di bromuro di radio era posto in un tubo di quarzo che veniva completamente svuotato. Il radio era riscaldato al punto di fusione, e nel processo si liberavano circa 2.6  $cm^3$  di gas. Il tubo era poi sigillato e alcune settimane dopo veniva esaminato lo spettro del gas liberato nel tubo dal radio da parte di Deslandres che trovò l'intero spettro dell'elio. Il gas, liberato durante il riscaldamento iniziale del radio, era raccolto e conteneva una grande quantità di emanazione, sebbene il gas fosse passato attraverso due tubi immersi in aria liquida. Il tubo contenente questi gas era molto luminoso e volgeva rapidamente al violetto, mentre più della metà dei gas era assorbita. Lo spettro della luce fosforescente era discontinua, consistendo di tre bande dell'azoto. Non fu osservato alcun segno di elio, sebbene doveva essere presente.

Himstedt e Meyer<sup>35</sup> posero 50 *mg* di bromuro di radio in un tubo a U collegato con un piccolo tubo a vuoto. Il tubo era attentamente svuotato e poi sigillato. Si osservò lo spettro dell'idrogeno e dell'anidride carbonica per tre mesi, ma dopo quattro mesi comparvero le righe rossa, gialla, verde e blu dello spettro dell'elio. Il lento apparire dello spettro dell'elio era probabilmente dovuto alla presenza nel tubo di una considerevole quantità di idrogeno. In un altro esperimento, un poco di solfato di radio che era riscaldato al calor rosso in un tubo di quarzo era collegato con un piccolo tubo a vuoto. Dopo tre settimane, alcune delle righe dell'elio erano chiaramente visibili e aumentavano di luminosità nel tempo.

<sup>32</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. p. 582, 1902; pp. 453 e 579, 1903.

<sup>33</sup>Ramsay e Soddy, Nature, 16 luglio, p. 246, 1903. Proc. Roy. Soc. 72, p. 204, 1903; 73, p. 346, 1904.

<sup>34</sup>Curie e Dewar, C. R. 188, p. 190, 1904. Chem. News, 89, p. 85, 1904.

<sup>35</sup>Himstedt e Meyer, Ann. d. Phys. 15, p. 184, 1904.

**268. Connessione tra elio e particelle  $\alpha$ .** La comparsa dell'elio in un tubo a vuoto contenente l'emanazione del radio può indicare o che l'elio è uno dei prodotti finali, che appaiono al termine delle serie delle trasformazioni radioattive, o che l'elio è in realtà la particella  $\alpha$  emessa. La seconda opzione è la spiegazione più probabile. In primo luogo, l'emanazione diffonde come un gas di alto peso molecolare e appare probabile che dopo l'espulsione di qualche particella  $\alpha$ , il peso atomico del prodotto finale sia confrontabile con quello dell'emanazione. D'altro canto, il valore di  $\frac{e}{m}$  determinato per la particella  $\alpha$  espulsa porta a concludere che, se essa consiste di un tipo noto di materia, si tratta di idrogeno o di elio.

C'è stata una tendenza ad assumere che l'elio prodotto dall'emanazione del radio sia l'ultimo prodotto di trasformazione della sostanza. Le prove, tuttavia, non supportano questa ipotesi. Abbiamo visto che l'emanazione, dopo le rapide trasformazioni iniziali, si trasforma molto lentamente. Se l'elio fosse il prodotto finale, la quantità presente nel tubo con l'emanazione dopo qualche giorno o settimana sarebbe insignificante, poiché interviene il prodotto radio D che impiega 40 anni per dimezzarsi. Poiché l'elio non può essere il prodotto finale della serie di trasformazioni e poiché tutti gli altri prodotti sono radioattivi e quasi certamente di alto numero atomico, è difficile vedere quale posizione occupi l'atomo di elio nello schema di trasformazione, a meno di essere la particella  $\alpha$  espulsa durante i successivi mutamenti.

È una cosa molto difficile stabilire definitivamente se la particella  $\alpha$  è un atomo di elio emesso oppure no. A causa della deflessione molto piccola dei raggi  $\alpha$  in un campo elettrico, e della natura complessa della radiazione  $\alpha$  dal radio, è ottenibile con difficoltà un'accurata determinazione del valore  $\frac{e}{m}$  per la particella  $\alpha$ .

Sarebbe possibile fissare il problema con accurate misure del volume di gas in un tubo, riempito inizialmente con emanazione del radio. Poiché la stessa emanazione e due dei prodotti rapidamente cambianti che da essa derivano, emettono particelle  $\alpha$ , il volume finale delle particelle  $\alpha$ , se potessero esistere allo stato gassoso, sarebbe tre volte il volume dell'emanazione. Ramsay e Soddy (sezione 172) hanno eseguito esperimenti di questo tipo, ma i risultati ottenuti erano molto contraddittori, dipendendo dal tipo di vetro impiegato. In un caso, il volume dei gas residui si riduceva quasi a zero, in un altro il volume iniziale aumentava fino a circa dieci volte quello iniziale. Nell'ultimo esperimento fu osservato uno spettro brillante di elio nel gas residuo. La differenza di comportamento è probabilmente dovuta al diverso grado di assorbimento dell'elio da parte del vetro dei tubi.

Se le particelle  $\alpha$  sono atomi di elio, possiamo aspettarci che una grande proporzione di elio, che è prodotto in un tubo contenente l'emanazione del radio, sarà occultato nella parete del tubo di vetro; le particelle  $\alpha$  sono, infatti, espulse con velocità sufficiente a penetrare una certa distanza nel vetro. Questo elio può o rimanere nel vetro o, in alcuni casi, diffondere rapidamente. In ogni caso, una parte dell'elio sarà liberata quando si fa passare attraverso il tubo un'intensa scarica elettrica. Ramsay e Soddy hanno in qualche occasione osservato che era liberata una piccola quantità di elio riscaldando le pareti del tubo nel quale l'emanazione si era accumulata per un certo tempo.

Il volume dell'elio prodotto per anno da 1 g di radio si può calcolare facilmente assumendo che la particella  $\alpha$  è in realtà un atomo di elio.

Si è mostrato che  $2.5 \cdot 10^{11}$  particelle  $\alpha$  sono emesse ogni secondo da 1 g di radio. Poiché vi sono  $3.6 \cdot 10^{19}$  molecole in un centimetro cubo di ogni gas a pressione e temperatura standard, il volume delle particelle  $\alpha$  rilasciate per secondo è  $7 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3$  e per anno  $0.24 \text{ cm}^3$ . È già stato evidenziato che, con questa ipotesi, il volume dell'elio rilasciato dall'emanazione è tre volte il volume finale. La quantità di elio ottenuta dall'emanazione emessa da 1 g di radio in equilibrio radioattivo è, pertanto, circa  $3 \text{ mm}^3$ .

Ramsay e Soddy hanno provato a misurare sperimentalmente il probabile volume dell'elio prodotto per secondo per un grammo di radio. L'elio, ottenuto da 50 mg di bromuro di radio, che è stato mantenuto in soluzione in un contenitore chiuso per 60 giorni, fu introdotto in un tubo a vuoto. Un altro tubo simile fu posto in serie con esso, e la quantità di elio nel secondo disposto in modo che passasse una scarica attraverso i due tubi in serie; si osservarono le righe dell'elio con circa la stessa luminosità. In questo modo essi calcolarono che la quantità di elio presente era di  $0.1 \text{ mm}^3$ . Da questa stima, la quantità di elio prodotto per anno per grammo di radio è circa  $20 \text{ mm}^3$ . Abbiamo visto che la quantità calcolata è di circa  $240 \text{ mm}^3$ , dall'ipotesi che la particella  $\alpha$  è un atomo di elio. Ramsay e Soddy considerano che la presenza di argon in uno dei tubi possa avere interferito seriamente sulla precisione della stima. A causa della grande incertezza attribuita alla stima precedente, il valore dedotto da Ramsay e Soddy non esclude la probabilità che il volume calcolato possa essere dell'ordine di grandezza corretto.

Per spiegare la presenza di elio nel radio dalle ordinarie righe chimiche, si è suggerito che il radio non sia proprio un elemento ma un composto molecolare di elio con qualche sostanza nota o sconosciuta. Il composto di elio gradualmente si spezza, dando origine all'elio osservato. È subito ovvio che questo supposto composto di elio è di un tipo interamente diverso da quello di ogni altro composto precedentemente osservato in chimica. A parità di peso, emette durante la sua trasformazione una quantità di energia almeno un milione di volte maggiore di ogni composto molecolare noto (si veda la sezione 249). Inoltre, si deve supporre che il tasso di disintegrazione del composto di elio sia indipendente da un grande intervallo di temperature - un risultato mai prima osservato in ogni trasformazione molecolare. Il composto di elio nella sua disintegrazione deve dare origine a una peculiare radiazione e anche passare attraverso le successive trasformazioni radioattive osservate nel radio.

Per spiegare, pertanto, la produzione di elio e la radioattività in questa ipotesi, si deve postulare un unico tipo di molecola - una molecola, infatti, che è dotata di ogni singola proprietà che è attribuita all'atomo dei radio-elementi nella

teoria della disintegrazione. Ha uno spettro caratteristico ben marcato e non vi è motivo di supporre che non sia un elemento nel senso solitamente accettato del termine.

Nella teoria che i radio-elementi sono sottoposti a disintegrazione atomica, l'elio deve essere considerato come un costituente dell'atomo di radio, in altre parole, l'atomo di radio formato da parti, una delle quali, almeno, è l'atomo di elio. L'ipotesi che gli atomi pesanti sono tutti formati da alcune semplici unità fondamentali della materia è stata avanzata in diversi tempi da molti importanti chimici e fisici. L'ipotesi di Prout che tutti gli elementi sono formati di idrogeno è un esempio di questo punto di vista.

Nella teoria della disintegrazione, le trasformazioni che avvengono nei radio-atomi coinvolgono una reale trasformazione degli atomi attraverso cambiamenti successivi. Questo cambiamento è così lento nell'uranio e nel torio che è necessario un milione di anni prima che la quantità trasformata possa essere misurata con una bilancia. Nel radio è un milione di volte più veloce, ma anche in questo caso è improbabile che una trasformazione sia stata osservata con i metodi chimici tradizionali per molti anni senza essere stata notata.

La somiglianza delle particelle  $\alpha$  dai diversi elementi radioattivi indica che esse sono particelle espulse dello stesso tipo. In questa ipotesi, l'elio dovrà essere prodotto da ognuno dei radio-elementi. La sua presenza nei minerali contenenti torio, per esempio nella monazite sabbiosa e nel minerale di Ceylon descritto da Ramsay, indica che l'elio può essere un prodotto del torio così come del radio. Strutt<sup>36</sup> ha recentemente suggerito che la maggior parte dell'elio osservato nei minerali radioattivi possa essere un prodotto di decomposizione del torio piuttosto che dell'uranio e del radio; egli, infatti, trovò che minerali ricchi di elio contenevano sempre torio, mentre molti minerali uraniferi, quasi privi di torio, ne contenevano poco. La prova a sostegno di tale ipotesi è, tuttavia, non del tutto soddisfacente, perché alcuni dei minerali di uranio in questione sono minerali secondari (si veda l'Appendice B), depositati dall'azione dell'acqua o altri agenti in periodi tardi e sono, pure, in molti casi, altamente emananti e, di conseguenza, non possono ritenere più di una frazione dell'elio prodotto in essi.

Assumendo l'ipotesi che le particelle  $\alpha$  sono atomi di elio emessi, possiamo guardare l'atomo dei radio-elementi come composto di una sostanza nota o sconosciuta con elio. Questi composti si spezzano spontaneamente e, ad un ritmo molto lento anche nel caso del radio. La disintegrazione avviene in fasi successive e al massimo delle fasi un atomo di elio è espulso con grande velocità. Questa disintegrazione è accompagnata da un'enorme emissione di energia. La liberazione di una tale grande quantità di energia nelle trasformazioni radioattive spiega subito la costanza del tasso di trasformazione per l'azione di ognuno degli agenti fisici e chimici a nostra disposizione. Da questo punto di vista, uranio, torio e radio sono in realtà composti di elio. L'elio, tuttavia, è trattenuto in una tale forte combinazione che il composto non si può spezzare con forze chimiche o fisiche e, di conseguenza, questi corpi si comportano come elementi chimici nel senso chimico comunemente accettato.

Appare non improbabile che molti dei cosiddetti elementi chimici possono dimostrare essere composti di elio, o, in altre parole, che l'atomo di elio è una delle unità secondarie di cui gli atomi più pesanti sono costituiti. In questa connessione è interessante notare che molti degli elementi differiscono nel loro peso atomico di quattro unità, il peso atomico dell'elio.

Se la particella  $\alpha$  è un atomo di elio, almeno tre particelle alfa devono essere espulse dall'uranio (238.5) per ridurre il suo peso atomico a quello del radio (225). È noto che cinque particelle  $\alpha$  sono espulse dal radio durante le sue trasformazioni successive. Questo dovrebbe rendere il peso atomico del residuo finale  $225 - 20 = 205$ . Questo valore è alquanto vicino a quello del piombo, 206.5. Ho, per un certo tempo, considerato probabile che il piombo sia il prodotto ultimo o finale del radio. La stessa ipotesi è stata recentemente avanzata da Boltwood<sup>37</sup>. Questo punto di vista è sostenuto dal fatto che il piombo è sempre presente in piccole quantità in tutti i minerali di uranio e che le proporzioni relative di piombo ed elio nei minerali radioattivi sono circa le stesse di quelle attese se piombo ed elio sono entrambi prodotti di decomposizione del radio. Il Dr. Boltwood ha richiamato la mia attenzione sul fatto che la proporzione di piombo in molti minerali radioattivi varia con il contenuto di elio. Un minerale ricco di elio in quasi tutti i casi contiene più piombo di un minerale povero di elio. Questa deve essere considerata, per ora, poco più di una speculazione, ma i fatti esposti sono molto suggestivi.

**269. Età dei minerali radioattivi.** L'elio è trovato solo nei minerali radioattivi e questo fatto, preso assieme alla liberazione di elio dal radio, indica che l'elio deve essere prodotto come un risultato della trasformazione del radio e delle altre sostanze radioattive contenute nei minerali. In un minerale circa la metà di elio è, in molti casi, rilasciata per riscaldamento e nei residui delle soluzioni. Sembra probabile che l'elio prodotto in ogni parte della massa del minerale è meccanicamente imprigionato in esso. Moss<sup>38</sup> trovò che, macinando pechblenda nel vuoto, l'elio si sviluppa, apparentemente mostrando che l'elio esiste nelle cavità del minerale. Travers<sup>39</sup> ha suggerito che, poiché l'elio è liberato per riscaldamento, l'effetto può essere dovuto al calore generato dalla macinazione. La fuga di elio dal minerale riscaldato è probabilmente collegata al fatto osservato da Jaquerod<sup>40</sup> che l'elio passa attraverso le pareti di un tubo di quarzo, riscaldato sopra i 500 °C. La sostanza del minerale probabilmente possiede una proprietà simile. Travers considera che

<sup>36</sup>Strutt, Proc. Ray. Soc. 2 marzo 1905.

<sup>37</sup>Boltwood, Phil Mag. aprile 1905.

<sup>38</sup>Moss, Trans. Roy. soc. Dublino, 1904.

<sup>39</sup>Travers, Nature, p. 248, 12 gennaio 1905

<sup>40</sup>Jaquerod, C. R. p. 789, 1904.

l'elio è presente nel minerale allo stato di soluzione solida supersatura, ma i fatti sono ugualmente ben spiegati assumendo che l'elio è meccanicamente imprigionato nella massa del minerale.

Il rapido aumento di temperatura osservato nel minerale fergusonite, nel momento in cui è rilasciato l'elio, è stato trovato non avere nulla a che fare con la presenza di elio, perché avviene anche in minerali che non contengono elio. La vecchia idea che l'elio è uno stato di combinazione chimica con il minerale deve essere abbandonata alla luce di questi esperimenti più recenti.

Poiché l'elio è rilasciato solo da alcuni minerali per azione delle alte temperature e soluzioni, appare probabile che una grande proporzione di elio trovata nei minerali non possa fuoriuscire in condizioni normali. Pertanto se il tasso di produzione dell'elio da parte delle sostanze radioattive fosse definitivamente conosciuto, sarebbe possibile calcolare l'età del minerale osservando il volume di elio liberato mediante soluzione.

In assenza di una tale definita informazione, si farà un calcolo approssimato per indicare l'ordine di grandezza del tempo trascorso dal momento in cui il minerale si è formato o si trovava ad una temperatura sufficientemente bassa da prevenire la fuga di elio.

Si prenda, per esempio, il minerale fergusonite, che fu trovato da Ramsay e Travers<sup>41</sup> sviluppare  $1.81 \text{ cm}^3$  di elio. La fergusonite conteneva circa il 7% di uranio. L'uranio nei vecchi minerali contiene probabilmente circa  $8 \cdot 10^{-7}$  del suo peso di radio (si veda la sezione 262). Un grammo di minerale conteneva, pertanto, circa  $5.6 \cdot 10^{-8} \text{ g}$  di radio. Se la particella  $\alpha$  è elio, si è mostrato che  $1 \text{ g}$  di radio produce  $0.24 \text{ cm}^3$  di elio per anno. Il volume di elio prodotto per anno in  $1 \text{ g}$  di fergusonite è pertanto  $1.3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3$ . Assumendo che il tasso di produzione di elio sia rimasto uniforme, il tempo necessario per produrre  $1.81 \text{ cm}^3$  per grammo è circa 140 milioni di anni. Se il tasso calcolato di produzione dell'elio dal radio è una sovrastima, il tempo è corrispondentemente dilatato.

Penso che, quando le costanti richieste per questi calcoli saranno definite in modo più preciso, questo metodo probabilmente offrirà informazioni affidabili sulla probabile età di alcuni dei minerali radioattivi della crosta terrestre e, indirettamente, l'età degli strati nei quali sono stati trovati.

In questo contesto è interessante notare che Ramsay<sup>42</sup> trovò che un minerale di Ceylon, torianite, conteneva  $9.5 \text{ cm}^3$  di elio per grammo. Secondo l'analisi di Dunstan, questo minerale contiene circa il 76% di torio e il 12% di uranio. L'insolita grande quantità di elio sviluppata da questo minerale potrebbe indicare che si è formato in un'epoca precedente a quella della fergusonite precedentemente considerata.

**270. Possibili cause di disintegrazione.** Per spiegare i fenomeni di radioattività, si è supposto che una certa piccola frazione dei radio-atomi subisca una disintegrazione per secondo, ma nessuna ipotesi è stata fatta sulla causa che produce questa instabilità con la conseguente disintegrazione. L'instabilità degli atomi si può supporre essere determinata o dall'azione di forze esterne o da quella di forze riguardanti lo stesso atomo. È plausibile, per esempio, che l'applicazione di alcune deboli forze esterne possa causare instabilità con conseguente disintegrazione, in base allo stesso principio che un detonatore è necessario per dare il via ad una esplosione. Si è mostrato che il numero di atomi di un prodotto radioattivo che si spezza al secondo è sempre proporzionale al numero presente. Questa legge di trasformazione non getta piena luce sulla questione, perché ci si aspetterebbe che spiegasse entrambe le ipotesi. Non si è trovato possibile alterare il tasso di trasformazione di ogni prodotto applicando forze chimiche o fisiche conosciute, a meno di assumere che la forza di gravità che non è sotto il nostro controllo influenzi in qualche modo la stabilità dei radio-atomi.

Sembra probabile perciò che la causa della rottura degli atomi dei radio-elementi e dei loro prodotti risieda negli atomi stessi. Secondo il moderno punto di vista sulla struttura dell'atomo, non è così sorprendente che alcuni atomi si disintegrino e che non siano così permanenti come sembrano essere. In accordo con le ipotesi di J. J. Thomson, si può supporre che gli atomi siano formati da un numero di piccole particelle cariche positivamente e negativamente in rapido moto interno che sono tenute in equilibrio dalle reciproche forze. In un atomo complesso, dove le possibili variazioni nel moto relativo delle parti sono molto grandi, l'atomo può giungere ad uno stato in cui una parte acquista sufficiente energia cinetica da sfuggire dal sistema, o che le forze che tengono unite le parti sono momentaneamente neutralizzate, cosicché la parte sfugge dal sistema con la velocità posseduta nell'istante del suo rilascio.

Sir Oliver Lodge<sup>43</sup> ha proposto che l'instabilità dell'atomo sia il risultato di irraggiamento di energia dall'atomo. Larmor ha mostrato che un elettrone accelerato, irradia energia ad un ritmo proporzionale al quadrato della sua accelerazione. Un elettrone in moto rettilineo uniforme non irraggia energia, ma un elettrone, costretto a muoversi su un'orbita circolare con velocità costante, è un potente irradiatore e in tale caso l'elettrone è continuamente accelerato verso il centro. Lodge considerò il semplice caso di un elettrone carico negativamente ruotante attorno a un atomo di massa relativamente grande ma avente una uguale carica positiva che rimane in equilibrio per le forze elettriche. Questo sistema irraggia energia e, poiché la radiazione di energia è equivalente al moto in un mezzo resistente, la particella tende a muoversi verso il centro e la sua velocità, di conseguenza, aumenta. Il tasso di irraggiamento di energia aumenterà rapidamente con la velocità dell'elettrone. Quando tale velocità diviene quasi uguale a quella della luce, secondo Lodge, sopraggiunge un altro effetto. È stato mostrato (sezione 82) che la massa apparente di un elettrone aumenta molto rapidamente quando la sua velocità

<sup>41</sup>Ramsay e Travers, *Zeitsch. Physik. Chem.* 25, p. 568, 1898.

<sup>42</sup>Ramsay, *Nature*, 7 aprile, 1904.

<sup>43</sup>Lodge, *Nature*, 11 giugno, p. 129, 1903.

si avvicina a quella della luce ed è teoricamente infinita alla velocità della luce. Vi sarà in questa condizione un brusco aumento della massa dell'atomo in rivoluzione e, nell'ipotesi che questa condizione si possa raggiungere, si avrà un conseguente disturbo del bilanciamento delle forze che tengono unito il sistema. Lodge considera probabile che, in queste condizioni, le parti del sistema andranno in pezzi e sfuggiranno da un'altra sfera di influenza.

Sembra probabile che la causa primaria della disintegrazione dell'atomo debba essere vista nella perdita di energia del sistema atomico dovuto alla radiazione elettromagnetica (sezione 52). Larmor<sup>44</sup> ha mostrato che, affinché la condizione sia soddisfatta in modo che un sistema con elettroni in rapido movimento possa mantenersi senza perdere energia, è che il vettore somma delle accelerazioni centripete rimanga costantemente uguale a zero. Mentre un singolo elettrone in moto circolare è un potente irradiatore di energia, è sorprendente quanto rapidamente la radiazione di energia diminuisca se a muoversi su orbite sono parecchi elettroni. Questo è stato recentemente mostrato da J. J. Thomson<sup>45</sup>, che esaminò matematicamente il caso di un sistema di corpuscoli carichi negativamente, posti ad intervalli uguali e ruotanti su una circonferenza in un piano con velocità uniforme. Per esempio, trovò che la radiazione da un gruppo di sei particelle in moto con una velocità pari a  $\frac{1}{10}$  di quella della luce è minore di una milionesima parte della radiazione da una singola particella che descrive la stessa orbita con la stessa velocità. Quando la velocità è  $\frac{1}{100}$  di quella della luce la quantità di radiazione è solo  $10^{-16}$  di quella di una singola particella in moto con la stessa velocità sulla stessa orbita.

Risultati di questo tipo indicano che un atomo formato da un grande numero di elettroni ruotanti può irradiare energia molto lentamente, e, alla fine, questa minuscola ma continua perdita di energia può manifestarsi o in una redistribuzione delle sue parti componenti in un nuovo sistema o in una espulsione di elettroni o gruppi di elettroni dall'atomo.

Semplici modelli di atomi in grado di simulare il comportamento del polonio nell'espulsione di particelle  $\alpha$  e del radio nell'emissione di particelle  $\beta$  sono stati discussi da Lord Kelvin<sup>46</sup>. È possibile concepire certe strutture stabili di particelle cariche negativamente e positivamente, supponendo di formare un atomo, che, dall'applicazione di alcune forze perturbanti, si rompa espellendo una parte del sistema con grande velocità.

J. J. Thomson<sup>47</sup> ha studiato matematicamente una possibile struttura stabile di un numero di elettroni in moto dentro una sfera positivamente e uniformemente carica. Le proprietà di un tale modello atomico sono molto impressionanti e, indirettamente, suggeriscono una possibile spiegazione della legge periodica in chimica. Egli ha mostrato che gli elettroni, se in un piano, si distribuiscono in un numero di anelli concentrici; e, in genere, se essi non sono obbligati a muoversi in un piano, in un numero di strati come quelli di una cipolla.

Il problema matematico è molto semplificato se gli elettroni sono supposti ruotare in anelli circolari, con gli elettroni in ogni anello disposti a uguali intervalli angolari. I modi in cui il numero di elettroni si raggruppano, per valori da 60 a 5 a intervalli di 5, sono mostrati nella tabella seguente:

Numero di elettroni	60	55	50	45	40	35
Numero in anelli successivi	20	19	18	17	16	16
	16	16	15	14	13	12
	13	12	11	10	8	6
	8	7	5	4	3	1
	3	1	1			
Numero di elettroni	30	25	20	15	10	5
Numero in anelli successivi	15	13	12	10	8	5
	10	9	7	5	2	
	5	3	1			

Nella tabella successiva è data la possibile serie di distribuzione di elettroni che hanno un anello esterno di 20:

Numero di elettroni	59	60	61	62	63	64	65	66	67
Numero in anelli successivi	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	16	16	16	17	17	17	17	17	17
	13	13	13	13	13	13	14	14	15
	8	8	9	9	10	10	10	10	10
	2	3	3	3	3	4	5	5	5

Il più piccolo numero di elettroni che può avere un anello esterno di 20 è 59, mentre 67 è il maggiore.

Le varie distribuzioni di elettroni si possono classificare in famiglie, nelle quali i raggruppamenti di elettroni hanno alcune caratteristiche in comune. Allora il gruppo di 60 elettroni ha la stessa struttura di elettroni come il gruppo di 40 con l'aggiunta di un anello esterno di 20 elettroni; il gruppo di 40 è lo stesso del gruppo di 24 con l'aggiunta di un ulteriore

<sup>44</sup>Larmor, *Aether and Matter*, p. 233.

<sup>45</sup>J. J. Thomson, *Phil. Mag.* p. 681, dicembre 1903.

<sup>46</sup>Lord Kelvin, *Phil. Mag.* ottobre 1904.

<sup>47</sup>Thomson, *Phil. Mag.* marzo 1904.

anello esterno; e il gruppo di 24 a sua volta è lo stesso del gruppo di 11 con un anello extra. In questo modo di può formare una serie di modelli atomici, nei quali ogni atomo è derivato dal numero precedente con l'aggiunta di un anello di elettroni. Tali atomi ci si attende che possiedano molte proprietà in comune e che corrispondano agli elementi nella stessa colonna verticale della tavola periodica di Mendeléeef.

Diverse distribuzioni di elettroni variano ampiamente in stabilità. Alcune possono acquisire uno o due elettroni extra e rimanere stabili, altri perdere facilmente un elettrone senza alterare la loro stabilità. La prima corrisponderà a un atomo elettronegativo, la seconda ad uno elettropositivo.

Alcune distribuzioni di elettroni sono stabili se essi si muovono con una velocità angolare maggiore di un certo valore, ma diventano instabili quando la velocità cade al di sotto di tale valore. Quattro elettroni in movimento, per esempio, sono stabili in un piano, ma quando la velocità va al di sotto di un certo valore critico, il sistema è instabile e gli elettroni tendono a distribuirsi ai vertici di un tetraedro regolare. J. J. Thomson (citato) applica questa proprietà per spiegare nel modo seguente perché un atomo radioattivo si spezza:

“Consideriamo ora le proprietà di un atomo contenente un sistema di corpuscoli (elettroni) di questo tipo. Supponiamo che i corpuscoli siano inizialmente in movimento con velocità superiori alla velocità critica; a causa della radiazione dai corpuscoli in moto, la loro velocità diminuirà lentamente - molto lentamente; quando dopo un lungo intervallo, la velocità raggiungerà il valore critico, vi sarà come un'esplosione dei corpuscoli; questi si muoveranno lontani dalla loro posizione iniziale, la loro energia potenziale diminuirà, mentre la loro energia cinetica aumenterà. L'energia cinetica guadagnata in questo modo sarà sufficiente a portare il sistema fuori dall'atomo e avremo, come nel caso del radio, una parte dell'atomo espulsa. A causa della dissipazione di energia molto lenta per radiazione la vita dell'atomo sarà molto lunga. Abbiamo preso il caso di quattro corpuscoli come esempio di un sistema che, come massimo, richiede per la sua stabilità una certa quantità di rotazione. Un sistema con questa proprietà, a causa della graduale dissipazione dell'energia per radiazione, darà all'atomo che lo contiene, proprietà radioattive simili a quelle conferite dai quattro corpuscoli.”

**271. Calore del sole e della terra.** È stato evidenziato da Rutherford e Soddy<sup>48</sup> che la costanza del calore del sole per lunghi intervalli di tempo non presenta particolari difficoltà se si suppone che in esso avvenga un processo di disintegrazione come per gli elementi radioattivi. In una lettera a *Nature* (9 luglio 1903) W. E. Wilson mostrò che la presenza di 3.6 g di radio in ogni metro cubo della massa solare era sufficiente a tenere conto dell'attuale tasso di emissione di energia dal sole. Questo calcolo era basato sulla stima di Curie e Laborde che 1 g di radio emette 100 grammo-calorie per ora e sulla osservazione di Langley che ogni centimetro quadrato della superficie solare emette  $8.28 \cdot 10^6$  grammo-calorie per ora. Poiché la densità media del sole è 1.44, la presenza di 2.5 parti su un milione di radio nel sole, potrebbe rendere conto dell'attuale tasso di emissione di energia.

Un esame dello spettro del sole non ha rivelato però righe del radio. È nota, tuttavia, dalle prove spettroscopiche la presenza dell'elio e ciò, indirettamente, suggerisce l'esistenza anche di materia radioattiva. Si può facilmente mostrare che l'assenza di raggi penetranti dal sole verso la superficie della terra non implica l'assenza di radio-elementi nel sole. Anche se il sole fosse composto di solo radio, sarebbe difficile attendersi che i raggi  $\gamma$  emessi divengano osservabili alla superficie della terra, poiché essi potrebbero essere completamente assorbiti nel passaggio attraverso l'atmosfera, che corrisponde ad uno spessore di 76 cm di mercurio.

Nell'Appendice E di Thomson e Tait *Natural Philosophy*, Lord Kelvin ha calcolato l'energia persa nella concentrazione del sole da una condizione di infinita dispersione e ha concluso che sembra “del tutto probabile che il sole non ha illuminato la terra per 100.000.000 di anni e quasi certamente che non lo ha fatto per 500.000.000 di anni. Per il futuro possiamo dire, con uguale certezza, che gli abitanti della terra non possono continuare a godere della luce e del calore essenziali alla loro vita per molti milioni di anni, a meno di sorgenti ora sconosciute preparateci nel grande deposito della creazione.”

La scoperta che tutta la massa di una sostanza come il radio può emettere spontaneamente un'enorme quantità di calore rende possibile che questa stima dell'età del calore del sole possa essere di molto aumentata. In una lettera a *Nature* (24 settembre 1903) G. H. Darwin pose l'attenzione su questa possibilità e nello stesso tempo sottolineò che, sulle ipotesi di Kelvin, questa stima della durata del calore del sole era probabilmente molto maggiore e affermava che, “La perdita di energia del sole, supposto essere una sfera omogenea di massa  $M$  e raggio  $a$ , è  $\frac{3\mu M^2}{5a}$  dove  $\mu$  è la costante di gravitazione. Introducendo i valori numerici per i simboli in questa formula, trovò che la perdita di energia è  $2.7 \cdot 10^7 M$  calorie dove  $M$  è espresso in grammi. Se adottiamo il valore della costante solare di Langley, questo calore basta a sostenerci per 12 milioni di anni. Lord Kelvin usò il valore di Pouillet per quella costante, ma se avesse usato Langley, i suoi 100 milioni si ridurrebbero a 60 milioni. La discrepanza tra il mio risultato di 12 milioni e il suo di 60 milioni è spiegata da un ipotetico aumento della perdita di energia per consentire la concentrazione della massa solare verso la sua parte centrale.” Si è mostrato (sezione 266) che un grammo di radio emette durante la sua vita una quantità di calore corrispondente a  $1.6 \cdot 10^9$  grammo-calorie. Si è pure evidenziato che vi sono molte ragioni di supporre che una simile quantità di energia risieda negli atomi chimici degli elementi inattivi. Non è improbabile che, all'enorme temperatura del sole, la rottura degli elementi in forme più semplici possa avvenire ad un ritmo più rapido che sulla terra. Se l'energia residente negli atomi degli elementi diviene disponibile, il tempo durante il quale il sole può continuare ad emettere calore al tasso attuale può essere almeno 50 volte più grande del valore calcolato dai dati dinamici.

<sup>48</sup>Rutherford e Soddy, Phil. Mag. maggio 1903.

Simili considerazioni si applicano al problema dell'età della terra. Una completa discussione dell'età probabile della terra, calcolata dal raffreddamento secolare della sua massa fusa, è presentata da Lord Kelvin nell'Appendice D di Thomson e Tait *Natural Philosophy*. Egli ha mostrato che circa 100 milioni di anni dopo che la terra era una massa fusa, il graduale raffreddamento dovuto all'irraggiamento dalla sua superficie terrebbe conto del gradiente medio di temperatura di  $\frac{1}{50}^{\circ}F$  per piede, osservato oggi vicino alla superficie terrestre.

Alcune considerazioni saranno ora discusse che guardano alla probabilità che l'attuale gradiente di temperatura osservato non funga da riferimento alla stima del tempo trascorso poiché la terra ha avuto una temperatura capace di supportare la vita animale e vegetale; per questo si mostrerà che probabilmente vi è sufficiente materia radioattiva sulla terra per fornire il calore pari a quello perso per irraggiamento dalla sua superficie. Prendendo la conduttività media  $K$  dei materiali terrestri come 0.004 (in unità CGS) e il gradiente di temperatura  $T$  vicino alla superficie come  $0.00037^{\circ}C$  per  $cm$ , il calore  $Q$  in grammo-calorie condotto verso la superficie della terra per secondo è dato da

$$Q = 4\pi R^2 kT$$

dove  $R$  è il raggio della terra.

Sia  $X$  la quantità media di calore liberato ogni secondo per  $cm^3$  del volume della terra a causa della presenza di materia radioattiva. Se il calore  $Q$  irradiato dalla terra è uguale al calore fornito dalla materia radioattiva nella terra,

$$X \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 = 4\pi R^2 kT$$

o

$$X = \frac{3kT}{R}$$

Sostituendo i valori di queste costanti

$$X = 7 \cdot 10^{-15} \frac{\text{grammo} - \text{calorie}}{\text{secondo}} = 2.2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{grammo} - \text{calorie}}{\text{anno}}$$

Poiché 1  $g$  di radio emette 876000 grammo-calorie per anno, la presenza di  $2.6 \cdot 10^{-13} g$  di radio per unità di volume, o  $4.6 \cdot 10^{-14} g$  per unità di massa, dovrebbe compensare la perdita di energia dalla terra per conduzione.

Si mostrerà nel capitolo successivo che la materia radioattiva sembra essere distribuita quasi uniformemente tra tutta la terra e l'atmosfera. Inoltre, si è trovato che tutte le sostanze sono radioattive in piccola parte, sebbene non sia deciso se questa radioattività sia dovuta principalmente alla presenza di un radio-elemento come impurità. Per esempio, Strutt<sup>49</sup> osservò che una piastra di uranio aveva un'attività di circa  $\frac{1}{3000}$  di quella del nitrato di uranio, o circa  $2 \cdot 10^{-10}$  quella del radio. Ciò corrisponde a una attività molto maggiore di quella necessaria per compensare la perdita di calore della terra. Una deduzione più precisa, tuttavia, si può fare dai dati della radioattività mostrata dalla materia scoperta sulla terra. Elster e Geitel<sup>50</sup> riempirono un piatto di volume  $3.3 \cdot 10^2 cm^3$  con argilla presa dal giardino, e lo posero in un contenitore di 30 litri nel quale era posto un elettroscopio per determinare la conduttività del gas racchiuso. Dopo averla lasciata a riposo per parecchi giorni, trovarono che la conduttività dell'aria raggiungeva un valore massimo costante, corrispondente al triplo del normale. Si mostrerà in seguito (sezione 284) che la normale conduttività osservata in un contenitore sigillato corrisponde alla produzione di circa 30 ioni per  $cm^3$  per secondo. Il numero di ioni prodotto per secondo nel contenitore dalla terra radioattiva era circa  $2 \cdot 10^6$ . Questa darà una corrente di saturazione nel gas di  $2.2 \cdot 10^{-14} u.e.m.$  L'emanazione da un grammo di radio accumulata in un cilindro metallico produce una corrente di saturazione di circa  $3.2 \cdot 10^{-5}$  unità elettromagnetiche. Elster e Geitel considerarono che la maggior parte della conduttività osservata nel gas era dovuta all'emanazione radioattiva, che si diffondeva gradualmente dall'argilla all'aria nel contenitore. L'aumento della conduttività nel gas osservato da Elster e Geitel sarebbe, pertanto, prodotta dall'emanazione da  $7 \cdot 10^{-10} g$  di radio. Prendendo la densità dell'argilla pari a 2, ciò corrisponde a circa  $10^{-13} g$  di radio per grammo di argilla. Ma si è mostrato che se  $4.6 \cdot 10^{-14} g$  di radio fossero presenti in ogni grammo di terra, il calore emesso compenserebbe la perdita di calore della terra per conduzione e irraggiamento. La quantità di attività osservata nella terra è, pertanto, circa dell'ordine di grandezza esatto per tenere conto dell'emissione di calore richiesta. Nella stima precedente, non si è considerata la presenza dei minerali di uranio e torio nella terra. Inoltre, è probabile che la quantità totale di radioattività nell'argilla fosse considerevolmente maggiore di quella calcolata, perché è probabile la presenza di altra materia radioattiva che non produce emanazione.

Se la terra è supposta essere in una condizione di equilibrio termico nel quale la perdita di calore per radiazione è supplita dalla materia radioattiva, ci deve essere in essa una quantità di materia radioattiva corrispondente a circa 270 milioni di tonnellate di radio. Se il radio fosse presente in quantità maggiore, il gradiente di temperatura sarebbe maggiore di quello oggi osservato. Questa può apparire una grande quantità di radio, ma recenti misure (sezione 281) della quantità di emanazione del radio nell'atmosfera sostengono con forza l'ipotesi che debba esistere nel suolo superficiale della terra una grande quantità di radio. Eve trovò, con una stima di minimo, che la quantità di emanazione sempre presente nell'atmosfera è equivalente alla quantità di equilibrio derivata da 100 tonnellate di radio. Vi è ogni motivo di credere che l'emanazione trovata nell'atmosfera sia fornita sia dalla diffusione dal suolo sia dall'azione delle sorgenti. Poiché

<sup>49</sup>Strutt, Phil. Mag. giugno 1903.

<sup>50</sup>Elster e Geitel, Phys. Zeit. 4, No 19, p.522, 1903. Chem. News, 17 luglio, p. 30, 1903.

l'emanazione perde metà della propria attività in quattro giorni, non può diffondere da qualsiasi profondità. Assumendo che il radio sia uniformemente distribuito in tutta la terra, la quantità di emanazione del radio prodotta in uno strato sottile profondo circa tredici metri, è sufficiente a spiegare la quantità comunemente osservata nell'atmosfera.

Penso che si possa concludere che il tasso attuale di perdita di calore dalla terra possa continuare invariato per un lungo periodo di tempo in conseguenza della fornitura di calore da parte della materia radioattiva. Sembra, pertanto, probabile che la terra sia rimasta per un lungo intervallo di tempo a una temperatura non molto diversa da quella odierna, e che, di conseguenza, il tempo durante il quale la terra si è trovata ad una temperatura in grado di sostenere la presenza della vita animale e vegetale possa essere molto più lungo di quello stimato da Lord Kelvin con altri dati.

**272. Evoluzione della materia.** Sebbene l'ipotesi che tutta la materia sia composta di alcune unità elementari materiali sia stata avanzata a livello speculativo in vari periodi di tempo da molti importanti fisici e chimici, la prima definita evidenza sperimentale mostrante che l'atomo chimico non era la più piccola unità di materia fu ottenuta nel 1897 da J. J. Thomson nella sua classica ricerca sulla natura dei raggi catodici prodotti da una scarica elettrica in un tubo a vuoto. Abbiamo visto che Sir William Crookes, che fu il primo a dimostrare le sorprendenti proprietà di questi raggi, aveva suggerito che essi consistessero di un flusso di materia carica espulsa e rappresentassero - come egli li chiamò - un nuovo o "quarto stato della materia".

J. J. Thomson mostrò con due metodi distinti (sezione 50), che i raggi catodici consistevano di un flusso di particelle cariche negativamente espulse con grande velocità. Le particelle si comportavano come se la loro massa fosse solo  $\frac{1}{1000}$  di quella dell'atomo di idrogeno, che è il più leggero atomo conosciuto. Questi corpuscoli, come vennero chiamati da Thomson, furono successivamente trovati essere prodotti da un filamento di carbonio incandescente e da una piastra di zinco esposta all'azione di luce ultravioletta. Essi agivano come unità isolate di elettricità negativa e, come abbiamo visto, si possono identificare con gli elettroni studiati matematicamente da Larmor e Lorentz. Non solo vi erano questi elettroni prodotti dall'azione della luce, del calore e dalla scarica elettrica, ma corpi simili vennero trovati emessi spontaneamente da radio-elementi con una velocità molto maggiore di quella osservata per gli elettroni in un tubo a vuoto.

Gli elettroni prodotti in questi vari modi furono trovati trasportare una carica negativa ed essere apparentemente identici; il rapporto  $\frac{e}{m}$  tra la carica e la massa dell'elettrone era in tutti i casi lo stesso entro i limiti dell'errore sperimentale. Poiché gli elettroni, prodotti da tipi diversi di materia e in diverse condizioni, erano in tutti i casi identici, sembrava probabile che essi fossero una parte costitutiva di tutta la materia. J. J. Thomson suggerì che l'atomo è formato da un numero di questi elettroni carichi negativamente combinati in qualche modo con corrispondenti corpi carichi positivamente.

In questo modello gli atomi degli elementi chimici differiscono tra loro solo nel numero e nella distribuzione degli elettroni.

La rimozione di un elettrone dall'atomo nel caso della ionizzazione non appare influenzare in modo permanente la stabilità del sistema; nessuna prova, infatti, è stata ottenuta per mostrare che il passaggio di una intensa scarica elettrica attraverso un gas produca una modifica permanente della struttura dell'atomo. D'altro canto, nel caso dei corpi radioattivi, una particella carica positivamente di massa circa doppia dell'atomo di idrogeno sfugge dal radio-atomo pesante. Questa perdita mostra di essere una modifica permanente dell'atomo e determina un profondo cambiamento nelle sue proprietà fisiche e chimiche. Inoltre non c'è alcuna prova che il processo sia reversibile.

L'espulsione di una particella  $\beta$  con grande velocità da un atomo di materia radioattiva produce una trasformazione dell'atomo. Per esempio, il radio E emette una particella  $\beta$  e, di conseguenza, dà origine ad una diversa sostanza, il radio F (polonio). Un caso di questo tipo, dove l'espulsione di una particella  $\beta$  con grande velocità causa una completa ridistribuzione delle parti in un atomo, è probabilmente del tutto distinto dal processo che avviene durante la ionizzazione, dove sfugge dall'atomo un elettrone con bassa velocità senza apparentemente influire sulla stabilità dell'atomo rimanente.

La sola diretta prova sperimentale della trasformazione della materia è stata derivata da uno studio dei corpi radioattivi. Se la teoria della disintegrazione, proposta per spiegare i fenomeni della radioattività, è corretta nei suoi aspetti principali, allora i radio-elementi sono sottoposti ad un processo spontaneo e continuo di trasformazione in un altro diverso tipo di materia. Il tasso di trasformazione è lento nell'uranio e nel torio, ma è molto rapido nel radio. È stato mostrato che la frazione di una massa di radio che è trasformata ogni anno è circa  $\frac{1}{200}$  della quantità totale presente. Nel caso dell'uranio e del torio sono necessari circa un milione di anni per produrre una quantità simile di cambiamento. Pertanto, il processo della trasformazione in uranio e torio è troppo lento per essere rivelato senza un tempo ragionevole mediante l'uso di una bilancia o di uno spettroscopio, ma le radiazioni che accompagnano la trasformazione si possono rivelare facilmente. Sebbene il processo di trasformazione sia lento e continuo, nel corso degli anni l'uranio e il torio presenti nella terra si sono trasformati in altri tipi di materia.

Coloro che hanno considerato la possibilità che gli atomi subiscano un processo di trasformazione hanno in genere pensato che la materia intera fosse sottoposta ad un progressivo cambiamento, con una graduale alterazione delle proprietà fisiche e chimiche di tutta la massa della sostanza. Nella teoria della disintegrazione non è così. Solo una piccola parte della materia presente si spezza nell'unità di tempo e in ognuno dei passaggi successivi attraverso i quali passa l'atomo disintegrato, vi è nella maggior parte dei casi una notevole alterazione nelle proprietà chimiche e fisiche della materia. La trasformazione dei radio-elementi è, pertanto, trasformazione di una parte *per saltum*, e non una trasformazione progressiva

del tutto. In ogni istante dopo il processo di trasformazione rimarrà pertanto una parte della materia che è inalterata e, mescolata ad essa, i prodotti che risultano dalla trasformazione del rimanente.

La questione naturalmente nasce se il processo di degradazione della materia è limitato ai radio-elementi oppure se è una proprietà universale della materia. Si mostrerà nel capitolo XIV che tutta la materia, finora esaminata, presenta in piccola parte la proprietà radioattiva. È molto difficile, tuttavia, essere certi che la radioattività osservata non sia dovuta alla presenza nella materia di minuscole tracce di radio-elementi. Se la materia comune è radioattiva, è certo che la sua attività è molto minore di quella dell'uranio e, di conseguenza, che il suo tasso di trasformazione deve essere particolarmente lento. Vi è, tuttavia, un'altra possibilità da considerare. Le trasformazioni che avvengono nei radio elementi non sarebbero mai state rivelate se non fossero accompagnate dall'espulsione di particelle cariche con grande velocità. Non sembra improbabile che un atomo possa subire disintegrazione senza espellere una parte del suo sistema con velocità sufficiente a ionizzare il gas. Infatti, abbiamo visto che, anche nei radio-elementi, parecchie delle serie di trasformazioni nel torio, radio e attinio non sono accompagnate da raggi ionizzanti. I risultati sperimentali dati nell'Appendice A supportano con forza questa ipotesi. È, pertanto, possibile che tutta la materia subisca un lento processo di trasformazione, che finora è stato rivelato solo nei radio-elementi a causa dell'espulsione di particelle cariche con grande velocità durante la trasformazione stessa. Questo processo di degradazione della materia continuando per molto tempo può ridurre i costituenti della terra alle forme di materia più semplici e stabili.

L'idea che l'elio è un prodotto di trasformazione del radio suggerisce la probabilità che esso sia una delle sostanze più elementari delle quali gli atomi più pesanti sono composti. Sir Norman Lockyer, nel suo interessante libro su "Inorganic Evolution", ha sottolineato che gli spettri dell'elio e dell'idrogeno predominano nelle stelle più calde. Nelle stelle più fredde appaiono i tipi di materia più complessi. Sir Norman Lockyer ha basato la sua teoria dell'evoluzione della materia sull'evidenza di un esame spettroscopico delle stelle, e considera che la temperatura è il fattore principale nella frammentazione della materia nelle sue forme più semplici. La trasformazione della materia che avviene nei radio-elementi è, d'altro canto, spontanea e indipendente dalla temperatura nell'intervallo esaminato.

## Radioattività dell'atmosfera e dei materiali ordinari

**273. Radioattività dell'atmosfera.** Gli esperimenti di Geitel<sup>1</sup> e C. T. R. Wilson<sup>2</sup> nel 1900 mostrarono che un conduttore carico negativamente o positivamente posto dentro un contenitore chiuso gradualmente perde la sua carica. Questa perdita di carica fu mostrata essere dovuta a una piccola ionizzazione dell'aria dentro il contenitore. Elster e Geitel trovarono anche che un corpo carico esposto all'aria aperta perdeva rapidamente la sua carica e che il ritmo di scarica dipendeva dalla località e dalle condizioni atmosferiche. Una descrizione e discussione più dettagliata di questi risultati sarà presentata nella prossima sezione 284.

Nel corso di questi esperimenti, Geitel osservò che il ritmo di scarica aumentava leggermente per un certo tempo dopo la chiusura del contenitore. Considerò che ciò era possibilmente dovuto all'esistenza di alcune sostanze radioattive nell'aria, che producevano attività eccitata sulle pareti del contenitore aumentando così il tasso di dissipazione della carica. Nel 1901 Elster e Geitel<sup>3</sup> tentarono un coraggioso esperimento per valutare la possibilità di estrarre una sostanza radioattiva dall'aria. Gli esperimenti di chi scrive avevano mostrato che la radioattività eccitata dall'emanazione del torio poteva essere concentrata sull'elettrodo negativo in un intenso campo elettrico. Questo risultato indicava che i trasportatori della radioattività avevano una carica elettrica positiva. Elster e Geitel, pertanto, provarono un esperimento per testare la presenza di portatori caricati positivamente nell'atmosfera. A questo scopo un cilindro di rete metallica, caricato negativamente a 600 V, fu esposto per parecchie ore all'aria aperta. Il cilindro fu poi rimosso e rapidamente posto in una grande campana di vetro, dentro la quale era collocato un elettroscopio per rivelare il tasso di scarica. Si trovò che il tasso di scarica era aumentato di una piccola entità. Per moltiplicare l'effetto fu esposto un filo lungo circa 20 m alla stessa altezza dal suolo e fu mantenuto carico ad un alto potenziale collegandolo al terminale negativo di una macchina elettrostatica. Dopo un'esposizione di alcune ore, questo filo venne rimosso e posto dentro il contenitore di dissipazione. Si trovò un tasso di scarica aumentato molte volte dalla presenza del filo. Nessun aumento fu osservato quando il filo era caricato positivamente invece che negativamente. I risultati mostrano anche che la materia radioattiva può essere rimossa dal filo allo stesso modo di un filo reso attivo per l'esposizione alla presenza dell'emanazione del torio. Un pezzo di cuoio inumidito con ammoniaca fu strofinato sopra il filo attivo. Il cuoio fu trovato fortemente radioattivo. Quando venne usato un lungo filo, la quantità di attività ottenuta sul cuoio era confrontabile con quella posseduta da un grammo di ossido di uranio.

L'attività prodotta sul filo non era permanente, ma scompariva in larga parte dopo alcune ore. La quantità di attività prodotta su un filo di data dimensione, esposto in condizioni simili, era indipendente dal materiale del filo. Piombo, ferro e rame producevano effetti uguali.

La quantità di attività ottenuta era fortemente aumentata esponendo un filo, carico negativamente, in una massa d'aria rimasta indisturbata per lungo tempo. Furono eseguiti esperimenti nella grande caverna di Wolfenbüttel e si osservò una grande quantità di attività. Trasferendo l'attività a un pezzo di cuoio si trovò che i raggi potevano illuminare uno schermo di platinocianuro di bario attraverso un pezzo di alluminio di spessore 0.1 mm.

Questi importanti esperimenti mostrano che la radioattività eccitata ottenuta dall'atmosfera ha caratteristiche molto simili all'attività eccitata prodotta dall'emanazione di radio e torio. Nessuno sperimentatore più di Elster e Geitel ha contribuito maggiormente alle nostre conoscenze sulla radioattività e ionizzazione dell'atmosfera. Gli esperimenti qui descritti sono stati il punto di partenza di una serie di ricerche condotte da loro e da altri sulle proprietà radioattive dell'atmosfera, che hanno molto ampliato la conoscenza di questo importante aspetto.

Rutherford e Allan<sup>4</sup> determinarono il tasso di decadimento dell'attività eccitata prodotta su un filo carico negativamente esposto all'aria aperta e mantenuto carico da una macchina elettrostatica a un potenziale di circa  $-10000 V$ . Un'esposizione di un'ora bastava per ottenere una grande quantità di attività eccitata sul filo. Esso veniva poi rapidamente rimosso e avvolto su una struttura che formava l'elettrodo centrale in un grande contenitore cilindrico di metallo. La corrente di ionizzazione per una tensione di saturazione era misurata per mezzo di un sensibile elettrometro Dolezalek. La corrente, che è una misura dell'attività del filo, diminuiva secondo una legge esponenziale funzione del tempo, dimezzandosi in circa 45 minuti. Il tasso di decadimento era indipendente dal materiale del filo, dal tempo di esposizione e dal potenziale del filo.

<sup>1</sup>Geitel, Phys. Zeit. 2, p. 116, 1900.

<sup>2</sup>C. T. R. Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. 11, p. 32, 1900. Proc. Roy. soc. 68, p. 151, 1901.

<sup>3</sup>Elster e Geitel, Phys. Zeit. 2, p. 590, 1901.

<sup>4</sup>Rutherford e Allan, Phil. Mag. dicembre 1902.

È stato poi eseguito un esame della natura dei raggi emessi dal filo radioattivo. Per questo scopo venne reso radioattivo nel modo descritto e poi rapidamente avvolto a forma di spirale piatta. Il potere di penetrazione dei raggi era misurato in un contenitore simile a quello mostrato in Figura 17. La maggior parte della ionizzazione era dovuta a raggi molto facilmente assorbibili, che erano un poco più penetranti dei raggi  $\alpha$  emessi da un filo attivato dalle emanazioni di radio e torio. L'intensità dei raggi era poi ridotta a metà con alluminio dello spessore di  $0.001\text{ cm}$ . L'azione fotografica osservata da Elster e Geitel attraverso  $0.1\text{ mm}$  di alluminio mostrava la presenza anche di raggi penetranti. Questo fu più tardi confermato da Allan, che usò il metodo elettrico. Questi raggi penetranti erano probabilmente simili ai raggi  $\beta$  dai radio-elementi.

**274.** L'attività eccitata prodotta su un filo carico negativamente non può essere dovuta ad una azione di un intenso campo elettrico sulla superficie del filo; infatti, è prodotta un'attività eccitata molto debole se il filo è caricato allo stesso potenziale ma dentro un contenitore cilindrico.

Abbiamo visto che l'attività eccitata prodotta sul filo può essere parzialmente rimossa sfregandolo o mettendolo in soluzione in acidi e, a questo proposito, è simile all'attività eccitata prodotta nei corpi dall'emanazione di radio e torio. La stretta somiglianza dell'attività eccitata ottenuta dall'atmosfera con quella ottenuta dalle emanazioni di radio e torio suggerisce la probabilità che esista un'emanazione radioattiva nell'atmosfera. Questa ipotesi è confermata da una grande quantità di prove indirette discusse nelle sezioni 276, 277 e 280.

Assumendo la presenza di una emanazione radioattiva nell'atmosfera, gli effetti radioattivi osservati ricevono una semplice spiegazione. L'emanazione nell'aria gradualmente si spezza, dando origine in qualche modo a portatori radioattivi di carica positiva. Questi sono sospinti verso l'elettrodo negativo dal campo elettrico e subiscono una ulteriore trasformazione, producendo la radiazione osservata alla superficie del filo. La materia che causa l'attività eccitata sarà, pertanto, analoga al deposito attivo di radio e torio.

Poiché la terra ha carica negativa rispetto all'atmosfera superiore, questi portatori radioattivi positivi prodotti nell'aria sono continuamente depositati sulla superficie della terra. Ogni cosa sulla superficie della terra, inclusa la superficie esterna delle costruzioni, l'erba e le foglie degli alberi, devono essere ricoperti con un deposito invisibile di materiale radioattivo. Una collina o un picco montuoso, o ogni altra grande massa di roccia o terra, concentrano il campo elettrico terrestre in quel punto e di conseguenza riceveranno più radioattività eccitata per unità di area della superficie piana. Elster e Geitel hanno evidenziato che la ionizzazione maggiore dell'aria osservata nelle vicinanze di picchi riceve una sufficiente spiegazione con questa ipotesi.

Se i portatori radioattivi sono prodotti ad un tasso uniforme nell'atmosfera, la quantità di attività eccitata  $I_t$ , prodotta su un filo esposto in date condizioni, sarà data, dopo un'esposizione per un certo tempo  $t$ , da  $I_t = I_0 (1 - e^{-\lambda t})$ , dove  $I_0$  è l'attività massima sul filo e  $\lambda$  è la costante di decadimento dell'attività eccitata. Poiché l'attività di un filo dopo la rimozione dimezza il proprio valore in circa 45 minuti, il valore di  $\lambda$  è  $0.92\text{ h}^{-1}$ . Alcuni esperimenti fatti da Allen<sup>5</sup> sono in cattivo accordo con l'equazione sopra. Risultati comparativi accurati sono difficili da ottenere a causa dell'incostanza della radioattività dell'aria aperta. Dopo l'esposizione di un filo per parecchie ore, l'attività raggiungeva un massimo e non cresceva più con ulteriore esposizione.

Abbiamo visto (sezione 191) che i portatori del deposito attivo di radio e torio si muovono in un campo elettrico con circa la stessa velocità degli ioni. Ci si dovrà aspettare, pertanto, che un lungo filo caricato ad un alto potenziale negativo estrarrà i portatori attivi dall'atmosfera da una considerevole distanza. Non sembra essere così, poiché Eve (vedasi sezione 281) ha trovato che i portatori sono estratti dall'aria solo entro un raggio inferiore a un metro con un potenziale del filo di  $-10000\text{ V}$ . Sembra probabile che i portatori di materia attiva siano depositati su numerose particelle di polvere sottile presente nell'aria e poi spostati molto lentamente anche in un intenso campo elettrico.

La quantità di attività eccitata prodotta su un filo, sostenuto ad una certa distanza dalla superficie della terra, dovrebbe aumentare costantemente con la tensione, perché maggiore è il potenziale e maggiore è il volume di aria dal quale sono estratti i portatori radioattivi.

La presenza di portatori radioattivi nell'atmosfera terrà conto di una considerevole parte della ionizzazione dell'aria osservata nelle vicinanze della terra. Questa importante questione è discussa in maggior dettaglio nella sezione 281.

**275. Radioattività dalla caduta di pioggia e neve.** C. T. R. Wilson<sup>6</sup> eseguì esperimenti per vedere se del materiale radioattivo dall'aria era portato in basso dalla pioggia. A questo scopo fu raccolta una quantità di pioggia caduta di recente, rapidamente evaporata a secco in un contenitore di platino e misurando l'attività del residuo ponendo il contenitore in un elettroscopio. In tutti i casi, il tasso di scarica dell'elettroscopio era notevolmente aumentato. Da circa  $50\text{ cm}^3$  di pioggia, fu ottenuta una quantità di attività sufficiente ad aumentare il tasso di scarica dell'elettroscopio di quattro o cinque volte, dopo che i raggi avevano attraversato un sottile strato di alluminio o di foglia d'oro. L'attività scompariva nel corso di qualche ora, dimezzando il proprio valore in circa 30 minuti. Pioggia, che rimaneva ferma per alcune ore, non mostrava alcuna traccia di attività. I rubinetti, dopo l'evaporazione, non mostravano alcun residuo attivo.

<sup>5</sup>Allen, Phil. Mag. febbraio 1904.

<sup>6</sup>C. T. R. Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. 11, p. 428, 1902.

La quantità di attività ottenuta da una data quantità di pioggia era tutta dello stesso ordine di grandezza, sia che la pioggia fosse precipitata in sottili o larghe gocce, di notte o di giorno, o se venisse misurata all'inizio o alla fine di una precipitazione durata parecchie ore.

L'attività ottenuta dalla pioggia non è distrutta riscaldandola in un contenitore di platino al calor rosso. In questo ed in altri aspetti assomiglia all'attività eccitata ottenuta su fili carichi negativamente esposti all'aria aperta.

C. T. R. Wilson<sup>7</sup> ottenne un precipitato radioattivo dalla pioggia aggiungendo un poco di cloruro di bario e precipitando il bario con acido solforico. Fu ottenuto un precipitato attivo anche con l'aggiunta di allume all'acqua, e precipitando poi l'alluminio con ammoniacca. I precipitati ottenuti in questo modo mostravano una grande attività. Il filtrato una volta bollito era del tutto inattivo, mostrando che la materia attiva era stata completamente rimossa dalla precipitazione. Questo effetto è del tutto analogo alla produzione di precipitati attivi da una soluzione contenente il deposito attivo del torio (vedasi sezione 185).

La radioattività di neve fresca fu osservata indipendentemente da C. T. R. Wilson<sup>8</sup>, Allan<sup>9</sup> e McLennan<sup>10</sup> in Canada. Per ottenere una grande quantità di attività, lo strato superficiale di neve era rimosso ed evaporato a secco in un contenitore metallico. Si otteneva un residuo attivo con proprietà radioattive simili a quelle osservate nella pioggia appena caduta. Sia Wilson che Allan trovarono che l'attività di pioggia e neve decadeva circa con lo stesso ritmo, dimezzando il proprio valore in circa 30 minuti. McLennan affermò di aver trovato una quantità più piccola di radioattività nell'aria dopo una nevicata prolungata.

Schmauss<sup>11</sup> ha osservato che gocce di pioggia cadenti attraverso l'aria ionizzate da raggi Röntgen acquistavano una carica negativa. Questo effetto è attribuito al fatto che gli ioni negativi in aria diffondono più velocemente di quelli positivi. In questo modo le gocce d'acqua e i fiocchi di neve acquisterebbero una carica negativa cadendo attraverso l'aria. Agiranno, pertanto, come collettori di portatori di radioattività positiva dall'aria. Evaporando l'acqua la materia radioattiva dovrebbe rimanere.

**276. Emanazioni radioattive dalla terra.** Elster e Geitel osservarono che l'aria in grotte e cantine era, nella maggior parte dei casi, incredibilmente radioattiva e mostrava una ionizzazione molto intensa. Questa azione potrebbe possibilmente essere dovuta a un effetto di aria stagnante, dalla quale è prodotta emanazione radioattiva o a una diffusione dell'emanazione radioattiva dal suolo. Per testare se questa emanazione fosse prodotta dall'aria stessa, Elster e Geitel chiusero l'aria per parecchie settimane in un grande boiler ma non osservarono alcun apprezzabile aumento dell'attività o della ionizzazione. Per vedere se l'aria imprigionata nei capillari del suolo fosse radioattiva, Elster e Geitel<sup>12</sup> misero un tubo nella terra e aspirarono l'aria in un contenitore di misura per mezzo di una pompa idraulica.

Il dispositivo impiegato per misurare la ionizzazione dell'aria è mostrato in Figura 103. C è un elettroscopio collegato con un filo a rete Z. L'aria attiva era introdotta in una grande campana di vetro della capacità di 27 l, l'interno della quale era ricoperto con una rete metallica, MM'. La campana di vetro poggiava su un piatto di ferro AB. L'elettroscopio era caricato dall'asta S. Si annotava il tasso di scarica dell'elettroscopio, prima dell'introduzione dell'aria attiva. Dopo aver fatto entrare l'aria, il tasso di scarica aumentava rapidamente, crescendo nel giro di qualche ora in un esperimento a 30 volte il valore originale. Essi trovarono che l'emanazione produceva attività eccitata sulle pareti del contenitore. L'aria aspirata dalla terra era anche più attiva di quella osservata in grotte o cantine. Vi è, pertanto, solo un piccolo dubbio che l'abnorme attività osservata in grotte o cantine sia dovuta all'emanazione radioattiva, presente nella terra, che gradualmente diffonde verso la superficie e si raccoglie in luoghi dove l'aria non è disturbata.

<sup>7</sup>C. T. R. Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. 11, p. 428, 1902; 12, p. 17, 1903.

<sup>8</sup>C. T. R. Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. 12, p. 85, 1903.

<sup>9</sup>Allan, Phys. Rev. 16, p. 106, 1903.

<sup>10</sup>McLennan, Phys. Rev. 16, 184, 1903.

<sup>11</sup>Schmauss, Annal. d. Phys. 9, p. 224, 1902.

<sup>12</sup>Elster e Geitel, Phys. Zeit. 3, p. 574, 1902.

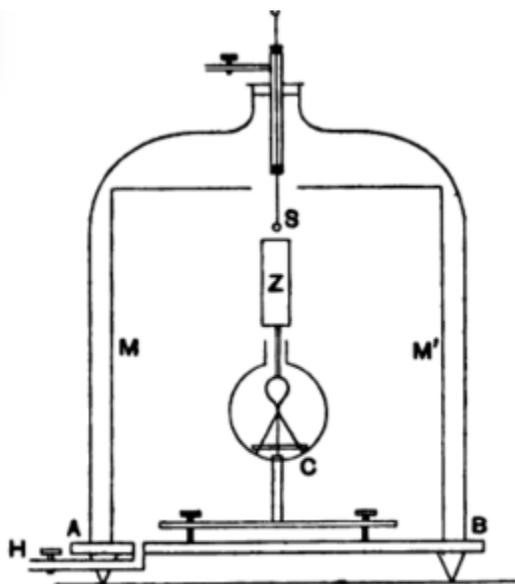


Fig. 103.

Risultati simili a quelli ottenuti da Elster e Geitel per l'aria rimossa dalla terra a Wolfenbüttel furono ottenuti in seguito anche da Ebert e Ewers<sup>13</sup> a Monaco. Essi trovarono una emanazione assai attiva nel suolo e, inoltre, esaminarono la variazione nel tempo dell'attività dovuta all'emanazione in un contenitore sigillato. Dopo l'introduzione dell'aria attiva nel contenitore di misura, l'attività aumentava per parecchie ore per poi decadere secondo una legge esponenziale in funzione del tempo, dimezzando il proprio valore in 3.2 giorni. Questo tasso di decadimento è più rapido di quello osservato dall'emanazione del radio, che si riduce a metà del valore in poco meno di quattro giorni. L'aumento di attività nel tempo è probabilmente dovuto alla produzione di attività eccitata sulle pareti del contenitore da parte dell'emanazione. Esso è analogo all'aumento dell'attività osservata quando l'emanazione del radio è introdotta in un contenitore chiuso. Nessun esperimento definitivo fu eseguito da Ebert e Ewers sul tasso di decadimento di questa attività eccitata. In un esperimento l'emanazione attiva, dopo essere rimasta nel contenitore per 140 ore, fu rimossa aspirando aria normale di piccola attività attraverso il dispositivo. L'attività rapidamente cadeva a metà del proprio valore e questo era seguito da una diminuzione molto lenta dell'attività nel tempo. Questo risultato indica che circa metà del tasso di scarica osservato era dovuto alla radiazione dall'emanazione e l'altra metà all'attività eccitata da essa prodotta.

Il dispositivo impiegato da Ebert e Ewers in questi esperimenti era molto simile a quello impiegato da Elster e Geitel, mostrato in Figura 103. Ebert e Ewers osservarono che, quando il filo a rete attaccato all'elettroscopio era caricato negativamente, il tasso di scarica osservato era sempre maggiore di quando era caricato positivamente. Le differenze osservate tra i due tassi di scarica variavano tra il 10 e il 20%. Un effetto simile è stato osservato da Sarasin, Tommasina e Micheli<sup>14</sup> per un filo reso attivo per esposizione all'aria aperta. Queste differenze nel tasso di scarica per elettricità positiva e negativa è probabilmente collegato con la presenza di particelle di polvere o piccoli globuli d'acqua sospesi nel gas. Gli esperimenti di Miss Brooks (sezione 181) hanno mostrato che le particelle di polvere presenti nell'aria contenente emanazione del torio diventavano radioattive. Una grande parte di queste particelle di polvere acquistano una carica positiva e sono trasportate all'elettrodo negativo in un campo elettrico. Questo effetto dovrebbe aumentare il tasso di scarica dell'elettroscopio quando è caricato negativamente. Nei successivi esperimenti, Ebert e Ewers notarono che, in alcuni casi, quando l'aria era mantenuta nel contenitore per parecchi giorni, l'effetto era invertito e l'elettroscopio mostrava un grande tasso di scarica se caricato positivamente.

J. J. Thomson<sup>15</sup> ha osservato che il valore della corrente di ionizzazione dipende dalla direzione del campo elettrico, se nel gas ionizzato sono sospesi piccolissimi globi acquosi.

Negli esperimenti successivi, Ebert<sup>16</sup> trovò che l'emanazione radioattiva si poteva rimuovere dall'aria per condensazione in aria liquida. Questa proprietà dell'emanazione fu scoperta in modo indipendente da Ebert prima di essere al corrente dei risultati di Rutherford e Soddy sulla condensazione delle emanazioni di radio e torio. Per aumentare la quantità di emanazione radioattiva in un dato volume d'aria, una quantità di aria attiva, ottenuta aspirando l'aria dal suolo, era condensata in aria liquida. L'aria veniva poi in parte fatta evaporare, ma il processo era interrotto prima che fosse raggiunto il punto di volatilizzazione dell'emanazione. Questo processo era ripetuto con un'altra quantità di aria e venivano aggiunti i residui. Procedendo in questo modo, fu in grado di concentrare l'emanazione in un piccolo volume d'aria. Facendo

<sup>13</sup>Ebert e Ewers, Phys. Zeit. 4, p. 162, 1902.

<sup>14</sup>Sarasin, Tommasina e Micheli, C. R. 139, p. 917, 1905.

<sup>15</sup>J. J. Thomson, Phil. Mag. settembre, 1902.

<sup>16</sup>Ebert, Sitz. Akad. d. Wiss. Munich, 33, p. 133, 1903.

evaporare l'aria, la sua ionizzazione nel contenitore di misura aumentava rapidamente per un certo tempo per poi diminuire lentamente. Ebert stabilì che il massimo per l'emanazione che era stata liquefatta per un certo tempo era raggiunto prima che per l'aria nuova. Il tasso di decadimento dell'attività dell'emanazione non era alterato mantenendola alla temperatura dell'aria liquida per un certo tempo. Essa si comporta come le emanazioni di radio e torio.

J. J. Thomson trovò che l'aria che gorgoglia attraverso l'acqua di rubinetto di Cambridge mostrava una maggiore conduttività di quella comune. L'aria era trasportata dall'acqua per mezzo di una pompa idraulica in un grande gasometro, quando la corrente di ionizzazione era misurata con un elettrometro sensibile. Quando si introduceva un'asta carica negativamente in questa aria conduttrice essa si attivava. Dopo un'esposizione per un periodo da 15 a 30 minuti nel gas conduttore, l'asta, quando introdotta in un secondo contenitore di misura, aumentava la corrente di saturazione di circa cinque volte la quantità normale. Si aveva un effetto molto piccolo quando l'asta era scarica o caricata positivamente per lo stesso tempo. L'attività dell'asta decadeva nel tempo, dimezzando il proprio valore in circa 40 minuti. La quantità di attività prodotta su un filo in condizioni costanti era indipendente dal materiale del filo. I raggi dall'asta era facilmente assorbiti in pochi centimetri d'aria.

Si pensava inizialmente che questi effetti fossero dovuti all'azione delle piccole gocce d'acqua sospese nel gas, perché era ben noto che l'aria trasportata rapidamente attraverso l'acqua causa un temporaneo aumento nella sua conduttività. Risultati successivi, tuttavia, mostrarono che vi era un'emanazione radioattiva presente nell'acqua di rubinetto di Cambridge. Questo portava un'emanazione delle acque dai pozzi profondi in varie parti dell'Inghilterra e J. J. Thomson trovò che, in alcuni casi, si poteva ottenere una grande quantità di emanazione dall'acqua dei pozzi. L'emanazione era rilasciata o insufflando aria nell'acqua o bollendo l'acqua. I gas ottenuti dalla bollitura dell'acqua erano fortemente attivi. Si condensava un campione di aria mescolata con l'emanazione radioattiva. Il gas liquefatto veniva fatto evaporare e le prime e successive parti del gas erano raccolte in contenitori separati. La parte finale era circa 30 volte più attiva della prima.

Un esame delle proprietà radioattive dei gas attivi così ottenuti è stato compiuto da Adams<sup>17</sup>. Egli trovò che l'attività dell'emanazione decadeva secondo una legge esponenziale funzione del tempo, dimezzando il proprio valore in circa 3.4 giorni. Questo non è molto diverso dal tasso di decadimento dell'attività dell'emanazione del radio, che si dimezza in poco meno di quattro giorni. L'attività eccitata prodotta dall'emanazione decadeva alla metà in circa 35 minuti. Il decadimento dell'attività eccitata dal radio è inizialmente irregolare, ma dopo un certo tempo si riduce in accordo con una legge esponenziale, dimezzandosi in 28 minuti. Tenendo conto dell'incertezza delle misure di ionizzazioni molto piccole osservate in questi esperimenti, i risultati indicano che l'emanazione ottenuta dall'acqua di rubinetto in Inghilterra è simile, se non identica, a quella dell'emanazione del radio. Adams osservò che l'emanazione era debolmente solubile in acqua. Dopo che l'acqua di pozzo era stata bollita per un certo tempo e poi messa da parte, mostrò di recuperare il proprio potere di emettere un'emanazione. La quantità ottenuta dopo aver riposato per un certo tempo non era più del 10% della quantità prima ottenuta. È, pertanto, probabile che l'acqua di rubinetto, in aggiunta con l'emanazione ad essa mescolata, abbia anche una piccola quantità di una sostanza radioattiva permanente in essa disciolta. L'acqua della pioggia o quella distillata non produce un'emanazione.

Bumstead e Wheeler<sup>18</sup> hanno svolto un esame molto accurato della radioattività dell'emanazione ottenuta dall'acqua superficiale e dal suolo a New Haven, Connecticut. L'emanazione, ottenuta dall'acqua dopo la bollitura, passava attraverso un grande cilindro misuratore e si misurava la corrente per mezzo di un elettrometro sensibile. La corrente cresceva gradualmente fino a un massimo, dopo l'introduzione dell'emanazione, esattamente allo stesso modo in cui la corrente aumenta in un contenitore dopo l'introduzione dell'emanazione del radio. Il decadimento dell'attività delle emanazioni ottenuto dall'acqua e dal terreno era misurato con cura e, entro i limiti dell'errore sperimentale, concordava con il tasso di decadimento dell'attività osservata per l'emanazione del radio. L'identità delle emanazioni dall'acqua e dal terreno con quella del radio fu ulteriormente stabilita dagli esperimenti sul tasso di diffusione dell'emanazione attraverso piastre porose. Mediante test comparativi si trovò che il coefficiente di diffusione delle emanazioni dall'acqua e dal suolo era lo stesso di quello dell'emanazione dal radio. Così, confrontando il tasso di diffusione dell'acido carbonico, si trovò che la densità dell'emanazione era circa quattro volte quella dell'acido carbonico, un risultato in buon accordo con quello trovato per l'emanazione del radio (sezioni 161 e 162).

Bumstead<sup>19</sup> ha trovato che nell'aria di New Haven esiste una considerevole quantità di emanazione di torio e radio. Per un'esposizione di tre ore all'aria aperta, il 3 o 5% dell'attività eccitata sul filo è dovuta al torio. Per un'esposizione di dodici ore, l'attività del torio era intorno al 15% del totale. A causa del lento decadimento dell'attività eccitata del torio, l'attività sul filo dopo la rimozione per tre o quattro ore era dovuta quasi interamente al torio. Il tasso di decadimento poteva allora essere misurato con cura e si trovò lo stesso valore di un filo esposto alla presenza dell'emanazione del torio.

Dadourian<sup>20</sup> ha compiuto un esame dell'aria sotterranea di New Haven e ha trovato che questa contiene una grande quantità di emanazione del torio. Si scavò nel terreno una buca circolare del diametro di circa 50 cm e profonda 2 m. Si avvolse un certo numero di fili su un'intelaiatura isolata e sospesa nella buca, la cui parte superiore fu poi ricoperta. Il

<sup>17</sup>Adams, Phil. Mag. novembre 1903.

<sup>18</sup>Bumstead e Wheeler, Amer. Journ. Science., 17, p. 97, febbraio 1904.

<sup>19</sup>Bumstead, Amer. Journ. Science, 18 luglio 1904.

<sup>20</sup>Dadourian, Amer. Journ. Science, 19 gennaio 1905.

filo era caricato negativamente con una macchina di Wimshurt. Dopo una lunga esposizione l'attività eccitata sul filo diminuiva ad un tasso che mostrava essere una mescolanza delle attività eccitate di torio e radio.

Un quantità molto grande di lavoro è stato fatto per esaminare varie sorgenti minerali calde per la presenza dell'emanazione del radio ed è qui possibile riferire solo alcuni dei numerosi articoli pubblicati su questo tema sia in Europa che in America. H. S. Allen e Lord Blythwood<sup>21</sup> hanno osservato che le sorgenti caldi a Bath e Buxton emettono emanazione radioattiva. Ciò fu confermato da Strutt<sup>22</sup>, che trovò che i gas emessi contenevano l'emanazione del radio e anche che il fango depositato dalle sorgenti conteneva una traccia di sali di radio. Questi risultati sono di notevole interesse, e Lord Rayleigh ha osservato che l'elio è contenuto tra i gas che si sprigionano dalle sorgenti. Appare probabile che l'elio osservato sia prodotto dal radio o dai depositi radioattivi attraverso il quali l'acqua scorre. Molti minerali e sorgenti calde che sono famose per le loro proprietà curative contengono tracce di radio e anche considerevoli quantità di emanazione del radio. Si è suggerito che le proprietà curative possano essere dovute per una certa parte alla presenza di queste minuscole quantità di radio.

Himstedt<sup>23</sup> trovò che le sorgenti termiche a Baden Baden contenevano emanazione del radio, mentre Elster e Geitel<sup>24</sup> esaminarono i depositi formati da queste sorgenti e trovarono una piccola quantità di sali di radio. Risultati simili furono ottenuti da una serie di acqua in Germania da Dorn<sup>25</sup>, Schenk<sup>26</sup> e H. Mache<sup>27</sup>.

Curie e Laborde<sup>28</sup> hanno misurato le acque di un gran numero di sorgenti minerali e hanno trovato che in grande maggioranza contenevano emanazione del radio. A questo proposito, è interessante notare che Curie e Laborde trovarono molto poca emanazione nelle acque di Salins-Moutiers, mentre Blanc<sup>29</sup> osservò che il sedimento dalle sorgenti era molto attivo. Un esame più preciso di questo deposito da parte di Blanc rivelò che conteneva una considerevole quantità di torio. Questo era provato dall'emissione di una emanazione, che perdeva metà della propria attività in un minuto e produceva attività eccitata, che si dimezzava in circa 11 ore. Boltwood<sup>30</sup> ha misurato un certo numero di campioni di acqua di sorgente in diverse parti dell'America e ha trovato che molte di esse contenevano emanazione del radio.

La maggior parte dei risultati sulla quantità di emanazione di radio da diverse sorgenti sono stati espressi in unità arbitrarie senza, in molti casi, l'indicazione di uno standard comparativo. Boltwood (citato) ha descritto un metodo soddisfacente per raccogliere e misurare l'emanazione di diverse acque e ha suggerito che il tasso di scarica osservato dall'elettroscopio o dall'elettrometro poteva essere espresso in termini dell'effetto dovuto all'emanazione liberata in soluzione da un definito peso di minerale di uranite. Poiché in ogni minerale sinora esaminato, la quantità di radio presente è proporzionale alla quantità di uranio, un tale standard dovrebbe essere sufficientemente definito per scopi pratici. L'emanazione liberata da qualche centigrammo del minerale è sufficiente a fornire un apposito tasso di scarica di un elettroscopio. Un tale metodo è preferibile usando una quantità nota di un composto di radio come standard, poiché è difficile conoscere con certezza l'attività delle preparazioni di radio che sono in possesso dei diversi sperimentatori.

**277. Radioattività dei costituenti della terra.** Elster e Geitel<sup>31</sup> osservarono che, sebbene in molti casi la conduttività dell'aria fosse abnormemente elevata nelle parti sotterranee, la conduttività variava fortemente in diversi luoghi. Nella Cava Baumann, per esempio, la conduttività dell'aria era nove volte quella normale, ma in quella Iberg solo tre volte. In una cantina a Clausthal la conduttività era solo di poco maggiore di quella normale, ma la radioattività eccitata ottenuta su un filo carico negativamente esposto in essa era solo  $\frac{1}{11}$  della radioattività eccitata ottenuta con il filo esposto all'aria aperta. Essi conclusero da questi esperimenti che la quantità di radioattività in diverse località probabilmente variava con la natura del suolo. Furono eseguite osservazioni sulla conduttività dell'aria aspirata dalla terra in diverse parti del paese. Il suolo argilloso e calcareo a Wolfenbüttel fu trovato fortemente attivo, variando la conduttività da quattro a sedici volte la quantità normale. Un campione d'aria da uno strato calcareo di Würzburg e dal basalto di Wilhelmhölle mostravano un'attività molto bassa.

Furono eseguiti esperimenti per vedere se ogni sostanza radioattiva poteva essere rivelata nel suolo stesso. A questo proposito un poco di terra fu posta su un piatto e introdotta sotto una campana di vetro, simile a quella mostrata in Figura 103. La conduttività dell'aria nella campana aumentava nel tempo, arrivando a tre volte il valore normale dopo parecchi giorni. Furono osservate piccole differenze con terra secca o umida. L'attività del terreno sembrava essere permanente, in quanto non fu osservato alcun cambiamento nell'attività dopo che la terra venne tenuta da parte per otto mesi.

Si tentò di separare i costituenti radioattivi dal suolo con un trattamento chimico e per questo fu misurato un campione di argilla. Mediante l'estrazione con acido idrocloridrico fu rimosso tutto il carbonato di calcio. Disseccando l'argilla l'attività si riduceva, ma spontaneamente recuperava il valore iniziale nel corso di alcuni giorni. Sembra probabile,

<sup>21</sup>H. S. Allen e Lord Blythwood, *Nature*, 68, p. 343, 1903; 69, p. 247, 1904.

<sup>22</sup>Strutt, *Proc. Roy. Soc.* 73, p. 191, 1904.

<sup>23</sup>Himstedt, *Ann. d. Phys.* 13, p. 573, 1904.

<sup>24</sup>Elster e Geitel, *Phys. Zeit.* 5, No. 12, p. 321, 1904.

<sup>25</sup>Dorn, *Abhandl. d. Natur. Ges. Halle*, 25, p. 107, 1904.

<sup>26</sup>Schenk, *Tesi Università*, Halle, 1904.

<sup>27</sup>Mache, *Wien. Ber.* 113, p. 1329, 1904.

<sup>28</sup>Curie e Laborde, *C. R.* 138, p. 1150, 1904.

<sup>29</sup>Blanc, *Phil. Mag.* gennaio 1905.

<sup>30</sup>Boltwood, *Amer. Journ. Science*, 18 novembre 1904.

<sup>31</sup>Elster e Geitel, *Phys. Zeit.* 4, p. 522, 1903.

pertanto, che sia stato separato dal suolo un prodotto attivo mediante l'acido. Elster e Geitel considerano che sia presente nell'argilla una sostanza attiva, che forma un prodotto più facilmente solubile in acido idrocloridrico dello stesso materiale attivo. Appariva un processo di separazione simile a quello del  $ThX$  dal torio per precipitazione con ammoniaca.

Furono eseguiti esperimenti per vedere se sostanze poste nella terra acquistavano una radioattività. A questo scopo furono posti a 50 cm sotto la superficie terrestre campioni di vasi d'argilla, sbiancati e avvolti con stoffa di lino. Dopo un mese, furono recuperati e venne esaminata la loro attività. L'argilla era la sola sostanza che mostrava attività. Essa diminuiva nel tempo, mostrando di essere stata eccitata dall'emanazione presente nel suolo.

Elster e Geitel<sup>32</sup> hanno trovato che una grande quantità di emanazione radioattiva si poteva ottenere aspirando aria attraverso l'argilla. In alcuni casi, la conduttività dell'aria era aumentata di oltre 100 volte. Trovarono pure che il cosiddetto "fango" - una sottile fanghiglia ottenuta da una sorgente calda a Battaglia nell'Italia del nord - emetteva tre o quattro volte più emanazione dell'argilla. Trattando il fango con acido, la sostanza attiva presente si dissolveva. Aggiungendo cloruro di bario alla soluzione e precipitando il bario come solfato, la sostanza attiva era rimossa e in questo modo si otteneva un precipitato oltre 100 volte più attivo, a parità di peso, del fango originario. Furono fatti confronti del tasso di decadimento dell'attività eccitata, dovuta all'emanazione dal fango, con quella dovuta all'emanazione del radio e, entro i limiti di errore, le curve di decadimento ottenute erano identiche. Non vi possono, quindi, essere dubbi che l'attività osservata nel fango sia dovuta alla presenza di una piccola quantità di radio. Elster e Geitel calcolarono che la quantità di radio in esso contenuta è solo circa un millesimo di quella ottenuta da un uguale peso di pechblend da Joachimsthal.

Vincenti e Levi Da Zara<sup>33</sup> hanno trovato che le acque e i sedimenti di un certo numero di sorgenti calde nel nord Italia contenevano emanazione del radio. Elster e Geitel osservarono che l'acido carbonico naturale ottenuto a grande profondità nell'antico suolo vulcanico era radioattivo, mentre Burton<sup>34</sup> trovò che il petrolio da un pozzo profondo nell'Ontario, Canada, conteneva una grande quantità di emanazione, probabilmente del radio, poiché la sua attività si dimezzava in 3.1 giorni, mentre l'attività eccitata da essa prodotta si dimezzava in circa 35 minuti. Dopo la volatilizzazione dell'olio rimaneva un deposito attivo, indicando la presenza, probabilmente, di uno o più radio-elementi in quantità minute.

Elster e Geitel<sup>35</sup> hanno trovato che i sedimenti radioattivi dalle sorgenti a Nauheim e Baden Baden mostravano anomali tassi di decadimento dell'attività eccitata. Questo indicava la presenza nel deposito di torio e radio. Con opportuni metodi chimici, furono separate le due sostanze attive e misurate separatamente.

**278. Effetto delle condizioni meteorologiche sulla radioattività dell'atmosfera.** Gli esperimenti originari di Elster e Geitel sulla radioattività eccitata derivata dall'atmosfera furono ripetuti da Rutherford e Allan<sup>36</sup> in Canada. Essi trovarono che una grande quantità di radioattività eccitata poteva essere derivata dall'aria e che gli effetti erano simili a quelli osservati da Elster e Geitel in Germania. Così era anche nei giorni invernali più freddi, quando il terreno era ricoperto da neve e spazzato dal vento del nord. I risultati mostrarono che la radioattività presente nell'aria non era molto influenzata dalla presenza dell'umidità, perché l'aria durante l'inverno canadese è estremamente secca. La maggiore quantità di attività eccitata su un filo caricato negativamente era ottenuta con un forte vento. In alcuni casi la quantità prodotta per un dato tempo di esposizione era da dieci a venti volte quella normale. Un giorno freddo e luminoso d'inverno produceva più effetto di un giorno estivo caldo e tranquillo.

Elster e Geitel<sup>37</sup> hanno compiuto un esame dettagliato dell'effetto delle condizioni meteorologiche sulla quantità di radioattività eccitata proveniente dall'atmosfera. Per questo fu da loro ideato un semplice dispositivo portatile che fu usato per una completa serie di esperimenti. Fu acquisito un gran numero di osservazioni per un periodo di dodici mesi. Essi trovarono che la quantità di attività eccitata ottenuta era soggetta a grandi variazioni. I valori estremi ottenuti variavano nel rapporto 16 a 1. Nessun legame diretto fu individuato tra la quantità di ionizzazione nell'atmosfera e quella dell'attività eccitata prodotta. Trovarono che la maggior quantità di attività eccitata era ottenuta durante una nebbia, quando la quantità di ionizzazione nell'aria era piccola. Questo risultato, tuttavia, non contraddice necessariamente l'idea che la ionizzazione e l'attività dell'aria sono per un certo intervallo collegate. Dagli esperimenti di Miss Brooks sull'effetto della polvere come trasportatore di attività eccitata, si dovrebbe ottenere più attività eccitata durante una nebbia che nell'aria pulita. Le particelle di acqua divengono centri per il deposito di materia radioattiva. I portatori positivi sono, pertanto, bloccati e non vengono rimossi dall'aria dal campo terrestre. In un campo elettrico intenso, queste piccole gocce saranno trasportate all'elettrodo negativo e manifesteranno la loro attività sulla superficie del filo. D'altro canto, la distribuzione dei globuli d'acqua attraverso l'aria fa sì che gli ioni nell'aria scompaiano rapidamente in conseguenza della loro diffusione verso la superficie delle gocce (si veda la sezione 31). Per questa ragione più densa è la nebbia, più piccola sarà la conduttività osservata nell'aria.

L'abbassamento della temperatura dell'aria ha un netta influenza. L'attività media osservata sotto i 0 °C era 1.44 volte quella osservata sopra i 0 °C. L'altezza del barometro esercitava una significativa influenza sulla quantità di attività

<sup>32</sup>Elster e Geitel, Phys. Zeit. 5, No. 1, p. 11, 1903.

<sup>33</sup>Vincenti e Levi Da Zara, Atti d. R. Instit. Veneto d. Scienze, 54, p. 95, 1905.

<sup>34</sup>Burton, Phil. Mag. ottobre, 1904.

<sup>35</sup>Elster e Geitel, Phys. Zeit. 6, No. 3, p. 67, 1905.

<sup>36</sup>Rutherford e Allan, Phil. Mag. dicembre 1902.

<sup>37</sup>Elster e Geitel, Phys. Zeit. 4, p. 138, 1902; 4, p. 522, 1903.

eccitata derivata dall'aria. Più basso è il barometro più grande era la quantità di attività eccitata nell'aria. L'effetto della variazione dell'altezza del barometro è comprensibile, quando si considera che, probabilmente, una grande parte della radioattività osservata nell'aria è dovuta alle emanazioni radioattive che sono continuamente diffuse dalla terra verso l'atmosfera. Elster e Geitel suggerirono che un abbassamento della pressione dell'aria poteva portare l'aria dal suolo attraverso la capillarità della terra nell'atmosfera. Questo, tuttavia, non deve necessariamente essere il caso se le condizioni della fuga dell'emanazione nell'atmosfera sono alterate dalla variazione della posizione dell'acqua sotterranea o da una intensa pioggia.

La quantità di attività eccitata derivata dall'aria sulla Costa Baltica era solo un terzo di quella osservata nell'interno a Wolfenbüttel. Esperimenti sulla radioattività dell'aria nell'oceano sarebbero di grande importanza per stabilire se la radioattività osservata nell'aria è dovuta solo alle emanazioni del suolo. È probabile che la radioattività dell'aria in diversi punti della terra possa variare ampiamente e possa dipendere molto dalla natura del suolo.

Saake<sup>38</sup> ha trovato che la quantità di emanazione presente nell'aria a grandi altitudini nella valle di Arosa in Svizzera è molto maggiore di quella normale a basse altitudini. Elster e Geitel hanno osservato che vi è un grande numero di ioni nell'aria a grandi altitudini e suggerirono che l'effetto curativo delle fonti termali e le azioni fisiologiche dell'aria di montagna possono essere collegati alla presenza di una insolita quantità di materia radioattiva nell'atmosfera. Simpson<sup>39</sup> fece esperimenti sulla quantità di attività eccitata a Karasjoh, Norvegia, ad un'altitudine di circa 150 piedi sopra il livello del mare. Il sole non salì al di sopra dell'orizzonte durante il tempo delle osservazioni. La quantità media di attività eccitata ottenuta dall'aria era considerevolmente maggiore di quella normale osservata da Elster e Geitel in Germania. Questo era più sorprendente perché il terreno era fortemente ghiacciato e ricoperto di neve. Allan, lavorando a Montreal, Canada, osservò per primo che la quantità di attività ottenuta dall'aria era circa la stessa sia in estate che in inverno, sebbene, nel secondo caso, tutta la terra fosse ghiacciata e ricoperta di neve e i venti soffiassero da nord su terre ricoperte di neve. In tali condizioni, ci si attendeva una diminuzione della quantità di attività poiché la diffusione dell'emanazione deve essere ritardata, se non del tutto impedita, dal raffreddamento del suolo. D'altro canto, appare difficile sfuggire dalla conclusione di Elster e Geitel che l'emanazione presente nell'atmosfera è sviluppata dalla terra stessa.

Alcuni interessanti esperimenti sono stati fatti da McLennan<sup>40</sup> sulla quantità di radioattività eccitata derivata dall'aria riempita con minuscoli aerosol. Gli esperimenti furono eseguiti ai piedi delle cascate americane del Niagara. Un filo isolato era sospeso vicino ai piedi della cascata e la quantità di attività eccitata era confrontata con la quantità ottenuta sullo stesso filo per la stessa esposizione a Toronto. La quantità di attività ottenuta dall'aria a Toronto era in genere cinque o sei volte quella ottenuta dall'aria alla cascata. In questi esperimenti non fu necessario usare una macchina per caricare il filo negativamente, perché l'aerosol in caduta manteneva elettrificato e negativamente carico il filo. La piccola quantità della radioattività eccitata alla cascata era probabilmente dovuta al fatto che le gocce cariche negativamente attraevano i portatori di carica positivi dall'atmosfera e, cadendo, li trasportavano sotto il fiume. Raccogliendo gli spray ed evaporandoli, non si otteneva alcun residuo attivo. Un tale risultato è, tuttavia, atteso a causa delle minute proporzioni degli spray misurati confrontati con quanto presente nell'aria.

**279. Un radiazione molto penetrante dalla superficie terrestre.** McLennan<sup>41</sup>, Rutherford e Cooke<sup>42</sup> indipendentemente, osservarono la presenza di una radiazione molto penetrante all'interno degli edifici. McLennan misurò la conduttività naturale dell'aria in un grande cilindro metallico chiuso per mezzo di un elettrometro sensibile. Il cilindro era poi posto all'interno di un altro e lo spazio tra i due era riempito con acqua. Per uno spessore di acqua tra i cilindri di 25 cm la conduttività dell'aria nel cilindro interno diminuiva a circa il 63% del suo valore iniziale. Questo risultato mostra che parte della ionizzazione nel cilindro interno era dovuta ad una radiazione penetrante da una sorgente esterna, che era parzialmente o completamente assorbita nell'acqua.

Rutherford e Cooke osservarono che il tasso di scarica di un elettroscopio di ottone sigillato era diminuito ponendo uno schermo di piombo attorno all'elettroscopio. Un'analisi dettagliata della diminuzione del tasso di scarica nell'elettroscopio, se circondato da schermi metallici, venne fatta più tardi da Cooke<sup>43</sup>. Uno spessore di 5 cm di piombo attorno all'elettroscopio diminuiva il tasso di scarica di circa il 30%. Un ulteriore aumento dello spessore dello schermo non aveva alcun effetto. Quando il dispositivo era circondato da 5 ton di piombo grezzo il tasso di scarica era circa lo stesso di quando era circondato da una piastra spessa circa 3 cm. Uno schermo di ferro diminuiva pure il tasso di scarica di circa la stessa quantità del piombo. Disponendo in modo opportuno schermi di piombo si trovò che la radiazione proveniva ugualmente da tutte le direzioni. Era della stessa intensità sia di notte che di giorno. Per assicurarsi che questa radiazione penetrante non derivasse dalla presenza di sostanze radioattive presenti nel laboratorio, gli esperimenti furono ripetuti in edifici nei quali le sostanze radioattive non erano mai state introdotte e anche su terreni aperti lontani da ogni costruzione. In tutti i casi fu osservata una diminuzione del tasso di scarica dell'elettroscopio circondato da schermi di piombo. Questi

<sup>38</sup>Saake, Phys. Zeit. 4, p. 626, 1903.

<sup>39</sup>Simpson, Proc. Roy. Soc. 73, p. 209, 1904.

<sup>40</sup>McLennan, Phys. Rev. 16, p. 184, 1903, e Phil. Mag. 5, p. 419, 1903.

<sup>41</sup>McLennan, Phys. Rev. No. 4, 1903.

<sup>42</sup>Rutherford e Cooke, Americ. Phys. Soc. dicembre 1902.

<sup>43</sup>Cooke, Phil. Mag. ottobre 1903.

risultati mostrano la presenza di una radiazione penetrante alla superficie della terra, derivante in parte dalla terra stessa e in parte dall'atmosfera.

Il risultato non è sorprendente quando si tiene conto la radioattività della terra e dell'atmosfera. Chi scrive ha trovato che corpi resi attivi per esposizione alle emanazioni di torio e radio emettono raggi  $\gamma$ . Possiamo aspettarci allora che la molto simile radioattività eccitata che è presente nella terra e nell'atmosfera emetta pure raggi  $\gamma$  con caratteristiche simili. Lavori più recenti, tuttavia (sezione 286), indicano che questa spiegazione non basta a rendere conto di tutti i fatti osservati.

**280. Confronto della radioattività dell'atmosfera con quella prodotta dai radio-elementi.** I fenomeni radioattivi osservati sulla terra e nell'atmosfera hanno caratteristiche molto simili a quelli prodotti da torio e radio. Sono presenti emanazioni radioattive nell'aria di grotte e cantine, nel naturale acido carbonico e in profondi pozzi d'acqua e queste emanazioni producono radioattività eccitata su tutti i corpi a contatto con essi. Il problema che ora sorge è se questi effetti sono dovuti interamente a radio-elementi noti presenti nella terra o da un tipo di materia radioattiva sconosciuta. Il metodo più semplice per valutare questo punto è confrontare il tasso di decadimento del prodotto radioattivo nell'atmosfera con quello dei prodotti radioattivi noti di torio e radio. Un rapido esame dei fatti mostra subito che la radioattività dell'atmosfera è molto più strettamente connessa agli effetti prodotti dal radio che a quelli del torio. L'attività dell'emanazione emessa dai pozzi d'acqua e anche quella aspirata dalla terra, decade a metà valore in circa 3.3 giorni, mentre l'attività dell'emanazione del radio decade a metà valore in un intervallo da 3.7 a 4 giorni. Considerando la difficoltà di fare determinazioni accurate di queste quantità, i tassi di decadimento dell'attività delle emanazioni dalla terra e dal radio concordano entro i limiti dell'errore sperimentale. Un grande numero di sperimentatori ha trovato che l'emanazione del radio è presente nell'acqua di fonti termali e nei sedimenti da esse depositati. Bumstead e Wheeler hanno mostrato che l'emanazione dal suolo e dalle superfici d'acqua di New Haven è identica a quella dal radio. Se le emanazioni dalla terra e dal radio sono le stesse, le attività eccitate prodotte dovranno avere lo stesso tasso di decadimento. L'emanazione da pozzi d'acqua in Inghilterra approssimativamente verificano questa condizione (sezione 276), ma un'osservazione registrata da Ebert e Ewers (sezione 276) sembra mostrare che l'attività eccitata dovuta all'emanazione aspirata dalla terra decade a un ritmo molto lento rispetto a quello dovuto al radio.

Bumstead ha dato una prova certa che l'emanazione dal torio così come quella dal radio è presente pure nell'atmosfera a New Haven, mentre Dadourian ha mostrato che è emessa dal suolo di New Haven. Blanc e Elster e Geitel hanno pure trovato che il torio è presente nel sedimento di alcune fonti termali.

Se la materia attiva nell'atmosfera consiste principalmente dell'emanazione del radio, il deposito attivo su un filo carico negativamente, esposto all'aria aperta, dovrebbe inizialmente consistere di radio A, B e C. La curva di decadimento dovrebbe essere identica a quella dell'attività eccitata del radio, misurata con i raggi  $\alpha$ , cioè, vi dovrà essere una rapida caduta iniziale corrispondente alla trasformazione iniziale di 3 minuti, poi a un lento tasso di trasformazione, decadendo l'attività alla metà del suo valore in circa 28 minuti (si veda la sezione 222). La rapida caduta iniziale è stata osservata da Bumstead per l'aria di New Haven. Allan<sup>44</sup> non osservò questa diminuzione iniziale a Montreal, ma trovò che l'attività si dimezzava in circa 45 minuti, misurando da un tempo di circa 10 minuti dopo la rimozione del filo attivo. Questo è circa il tasso di decadimento atteso per il deposito attivo del radio sullo stesso intervallo. Allan ottenne prove che vi erano parecchi tipi di materia attiva depositata sul filo. Per esempio, l'attività trasferita dal filo attivo al pezzo di cuoio, inumidito con ammoniaca, si dimezzava in 38 minuti; per un pezzo di assorbitore di feltro trattato allo stesso modo, l'attività si dimezzava in 60 minuti, essendo il tempo normale per un filo non trattato di 45 minuti.

È probabile che questa variazione del tasso di decadimento sia dovuta al fatto che porzioni diverse di radio B e C sono state trasferite dal filo alla gomma. Se fosse rimossa una porzione maggiore di B invece che di C, il decadimento sarebbe più lento e viceversa.

Il fatto che l'attività della pioggia e della neve si dimezzasse in circa 30 minuti è una forte indicazione della presenza dell'emanazione del radio nell'atmosfera. La materia attiva con la pioggia e la neve dopo aver riposato per un certo tempo consiste principalmente di radio C e questo decadrà esponenzialmente con il tempo, dimezzandosi in 28 minuti.

A causa del rapido decadimento dell'emanazione del torio - dimezzamento in un minuto - non è probabile poterle attribuire molta attività dell'atmosfera. I suoi effetti saranno principalmente marcati vicino al superficie del terreno. Vi può essere un qualche dubbio che una grande parte della radioattività dell'atmosfera sia dovuta all'emanazione del radio, che si diffonde continuamente nell'atmosfera dalle porosità della terra. Poiché la radioattività è stata osservata nell'atmosfera in tutti i punti nei quali sono state eseguite osservazioni, la materia radioattiva deve essere distribuita in minute quantità dappertutto nel suolo della terra. Le emanazioni volatili sfuggono nell'atmosfera per diffusione o sono trasportate alla superficie in sorgenti termali o sfugge dai gas sotterranei e causa i fenomeni radioattivi osservati nell'atmosfera. L'osservazione di Elster e Geitel che la radioattività dell'aria è molto minore vicino al mare rispetto alla zone interne è subito spiegata se la radioattività dell'atmosfera è dovuta principalmente alla diffusione delle emanazioni dal suolo nell'aria.

I gas rari come elio e xeno che sono presenti nell'atmosfera sono stati misurati e non si sono mostrati radioattivi. La radioattività dell'aria non può essere attribuita a una debole radioattività posseduta da questi gas.

<sup>44</sup>Allan, Phil. Mag. febbraio 1904.

**281. Quantità di emanazione di radio nell'atmosfera.** È un aspetto di grande interesse avere una stima della quantità di emanazione del radio presente nell'atmosfera, così come quella proveniente dalla terra, perché indirettamente serve come riferimento per la misura della quantità di radio che è distribuita su una sottile crosta terrestre.

Alcuni esperimenti in questa direzione sono stati fatti da Eve nel laboratorio dell'autore. Gli esperimenti non sono completi ma i risultati sinora ottenuti ci permettono di calcolare la probabile quantità di emanazione per chilometro cubo dell'atmosfera vicina alla terra.

Esperimenti inizialmente fatti con un grande serbatoio di ferro di  $154\text{ cm}^2$  e profondo  $730\text{ cm}$  in un edificio nel quale né il radio né altri materiali radioattivi erano stati introdotti. La corrente di ionizzazione di saturazione per l'aria nel serbatoio fu inizialmente misurata con un elettroscopio, collegato con un elettrodo isolato passante per il centro del serbatoio chiuso. Assumendo che la ionizzazione nel serbatoio fosse uniforme, il numero di ioni prodotti per  $\text{cm}^3$  di aria era di 10. Questo è un valore notevolmente più basso di quello solitamente osservato in un piccolo contenitore chiuso (vedi sezione 284). Cooke ottenne il valore 10 per un elettroscopio di ottone ben lucidato, circondato da piombo, mentre Schuster ottenne un valore circa 12 per l'aria nel laboratorio del College Owen, Manchester.

Per misurare la quantità di attività eccitata dal serbatoio, fu caricato un filo centrale isolato con carica negativa a circa 10000 volt con una macchina di Winshurst. Dopo due ore, il filo fu rimosso e avvolto su una struttura isolata collegata con un elettroscopio a lamine d'oro. Il tasso di decadimento dell'attività sul filo era circa la stessa di quella dell'attività eccitata prodotta dall'emanazione del radio. Per stimare la quantità di emanazione del radio presente nel grande serbatoio, furono fatti speciali esperimenti con un piccolo serbatoio nel quale fu introdotta una quantità nota dell'emanazione del radio impiegando una soluzione di bromuro di radio puro di concentrazione nota. Il filo centrale era l'elettrodo negativo come prima, e, dopo la rimozione, fu avvolto su una struttura e ne fu misurata l'attività. In questo modo si trovò che la quantità di emanazione del radio presente nel grande serbatoio, per produrre l'attività eccitata osservata, doveva essere stata uguale alla quantità di equilibrio o a quella massima ottenuta da  $9.5 \cdot 10^{-9}\text{ g}$  di bromuro di radio puro. Il volume del grande serbatoio era di  $17\text{ m}^3$ , cosicché la quantità di emanazione presente per metro cubo era equivalente a quella liberata da  $5.6 \cdot 10^{-10}\text{ g}$  di bromuro di radio in equilibrio radioattivo.

Se la quantità di emanazione nel serbatoio è assunta come quantità media esistente nell'aria esterna, *la quantità di emanazione di radio presente per chilometro cubo di aria è equivalente a quella fornita da  $0.56\text{ g}$  di bromuro di radio.*

Per calcolare, supponiamo che l'emanazione sia uniformemente distribuita su una porzione di terreno ( $\frac{1}{4}$  della superficie totale) e che si estenda per un'altezza media di  $5\text{ km}$ . L'aria sopra il mare non è considerata così siccome la sua radioattività non è stata esaminata. La quantità totale di emanazione presente nell'atmosfera in queste condizioni corrisponde a quella fornita da circa  $400\text{ ton}$  di bromuro di radio. Per mantenere questa quantità di emanazione nell'atmosfera, essa deve essere fornita a un tasso costante dalla superficie terrestre. Poiché la maggior quantità di emanazione probabilmente sfugge nell'aria per traspirazione e diffusione attraverso il suolo, l'emanazione non può raggiungere la superficie tranne da un sottile strato di terra. Lo spessore probabile di questo strato si può stimare se si assume che la perdita di calore dalla terra è integrata dalla materia radioattiva in essa contenuta. Abbiamo visto (sezione 271) che, con questa ipotesi, vi deve essere una quantità di materia attiva nella terra corrispondente a circa 300 milioni di tonnellate di radio. Se questo è uniformemente distribuito, sarà sufficiente uno strato di circa  $13\text{ m}$  per mantenere la quantità di emanazione calcolata nell'atmosfera. Questo spessore dello strato è circa dell'ordine di grandezza atteso dalle considerazioni generali.

Questi risultati portano indirettamente alla conclusione che una grande quantità di emanazione deve necessariamente esistere nella crosta superficiale terrestre.

Esperimenti furono eseguiti da Eve con un grande cilindro di zinco esposto all'aria aperta. A parità di volume, la quantità media di attività eccitata derivata era solo circa un terzo di quella ottenuta con un grande serbatoio di ferro. Questo ridurrà la quantità di emanazione, precedentemente dedotta, a circa un terzo.

Prima di considerare tali calcoli, sarà necessario fare misure comparative della quantità di emanazione nell'atmosfera in varie parti della terra. L'aria a Montreal non è abnormally attiva, cosicché i calcoli probabilmente danno il corretto ordine di grandezza delle quantità.

Eve osservò pure che la quantità di attività ottenuta per unità di lunghezza del filo nel cilindro di zinco del diametro di circa  $70\text{ cm}$  era circa la stessa di quella ottenuta con un filo del diametro di  $5\text{ mm}$  caricato a 10000 volt all'aria aperta, posto a 20 piedi da terra. Questo mostra che un tale potenziale non attrae i portatori di attività eccitata che distano più della metà di mezzo metro e probabilmente l'intervallo è anche inferiore.

È di grande importanza trovare quanto grande sia la parte del numero di ioni prodotti nell'atmosfera dovuti alla materia radioattiva distribuita in essa. I risultati di Eve con il grande serbatoio di ferro, già presentati, indicano che una grande parte della ionizzazione nel serbatoio era dovuta alla materia radioattiva contenuta in esso, essendo il rapporto tra l'attività eccitata sull'elettrodo centrale e la corrente di ionizzazione totale nel serbatoio circa  $\frac{7}{10}$  del corrispondente rapporto per un serbatoio più piccolo nel quale era stata introdotta emanazione del radio.

Tale risultato richiede conferma sperimentale in altre parti della terra, ma esso porta alla conclusione che una grande parte, se non tutta, della ionizzazione alla superficie della terra è dovuta alla materia radioattiva distribuita nell'atmosfera. Un tasso di produzione costante di 30 ioni al secondo per  $\text{cm}^3$  di aria, che è stato osservato all'aria aperta alla superficie della terra in varie località, sarà prodotto dalla presenza in ogni  $\text{cm}^3$  di aria della quantità di emanazione liberata da  $2.4 \cdot 10^{-15}\text{ g}$  di bromuro di radio in equilibrio radioattivo. Non è possibile, tuttavia, che la ionizzazione della parte

superiore dell'atmosfera sia dovuta solo a questa causa. Per spiegare la permanenza della carica positiva, che in genere esiste nell'atmosfera superiore, vi deve essere una forte ionizzazione dell'aria superiore, che può essere dovuta alle radiazioni ionizzanti emesse dal sole.

**282. Ionizzazione dell'aria atmosferica.** Una gran numero di misure è stato fatto durante gli ultimi anni per determinare la quantità relativa di ionizzazione nell'atmosfera in diverse località e a diverse altitudini. Misure di questo tipo furono eseguite la prima volta da Elster e Geitel con uno speciale tipo di elettroscopio. Un corpo carico esposto all'aria era attaccato ad un elettroscopio portatile e il tasso di perdita della carica era osservato dal movimento delle foglie d'oro o di alluminio. I tassi di scarica dell'elettroscopio per elettricità positiva e negativa erano in genere diversi, dipendendo il rapporto dalla località e dall'altitudine e dalle condizioni meteorologiche. Questo dispositivo non è utile per misure quantitative e le deduzioni tratte dalle osservazioni sono di necessità a volte indefinite.

Ebert<sup>45</sup> ha progettato un dispositivo portatile nel quale il numero degli ioni per  $cm^3$  di aria si poteva determinare facilmente. Una corrente costante di aria è condotta tra due cilindri concentrici per mezzo di un ventilatore attivato da un peso in caduta. Il cilindro interno è isolato e collegato all'elettroscopio. Conoscendo la capacità del dispositivo e la velocità della corrente d'aria, il ritmo di movimento delle lamine d'oro permette una misura del numero di ioni presenti nell'unità di volume di aria condotta tra i cilindri.

In questo modo Ebert trovò che il numero di ioni in aria era alquanto variabile, ma in media corrispondeva a circa  $2600\ cm^3$  nella particolare località in cui venivano fatte le misure.

Questo è il numero di equilibrio degli ioni presenti per  $cm^3$  quando il tasso di produzione bilancia il tasso di ricombinazione. Se  $q$  è il numero di ioni prodotti al secondo per unità di volume di aria e  $n$  è il numero all'equilibrio, allora  $q = \alpha n^2$  è la costante di ricombinazione (sezione 30). Tramite una piccola aggiunta al dispositivo di Ebert, Schuster<sup>46</sup> ha mostrato che si poteva determinare la costante di ricombinazione per il particolare campione d'aria analizzato. Il valore così ottenuto per l'aria nei dintorni di Manchester era variabile e due o tre volte quello dell'aria priva di polvere. I risultati di alcune misure preliminari mostrarono che il numero di ioni presenti per  $cm^3$  di aria in diverse località variava da 2370 a 3660, mentre il valore di  $q$ , il numero di ioni prodotti per  $cm^3$  al secondo, variava tra 12 e 38.5.

Rutherford, Allan e Ebert mostrarono che gli ioni nell'aria avevano circa la stessa mobilità di quelli prodotti in aria dai raggi Röntgen e dalle sostanze radioattive. In alcune recenti misure da parte di Mache e Von Schweidler<sup>47</sup>, la velocità dello ione positivo era circa  $1.02\ \frac{cm}{s}$  e quello del negativo di  $1.25\ \frac{cm}{s}$ , per un gradiente di potenziale di un volt per  $cm$ .

Langevin<sup>48</sup> ha recentemente mostrato che oltre a questi ioni in moto rapido, vi sono anche nell'atmosfera alcuni ioni che si muovono molto lentamente in un campo elettrico. Il numero di essi nell'aria di Parigi è circa 40 volte maggiore del numero degli ioni più veloci. Questo risultato è di grande importanza, perché nel dispositivo di Ebert questi ioni sfuggono alla rivelazione, poiché il campo elettrico non è sufficientemente intenso da portarli all'elettrodo durante il tempo del loro passaggio tra i cilindri.

**283. Radioattività di materiali comuni.** È stato mostrato che la materia radioattiva sembra essere distribuita quasi uniformemente sulla superficie della terra e nell'atmosfera. Il problema molto importante sorge se la piccola radioattività osservata è dovuta a radio-elementi noti o sconosciuti presenti nella terra e nell'atmosfera, o a una debole radioattività della materia in generale, che è facilmente rivelabile solo alla presenza di una grande quantità di materia. La prova sperimentale non è per ora sufficiente a rispondere a tale domanda, ma si è ottenuto una prova inconfutabile che molti metalli mostrano una radioattività molto debole. Se questa radioattività è dovuta alla presenza di radio-elementi in traccia o di una effettiva proprietà dei metalli stessi sarà discusso con maggior dettaglio nella sezione 286.

Schuster<sup>49</sup> ha messo in evidenza che ogni proprietà fisica finora scoperta per un elemento è stata trovata essere condivisa da tutti gli elementi in diverso grado. Per esempio, la proprietà del magnetismo è molto più evidente in ferro, nickel e cobalto ma tutte le altre sostanze sono o debolmente magnetiche o diamagnetiche. Ci si potrebbe, pertanto, aspettare sui principi generali che tutta la materia presenti la proprietà della radioattività a vari livelli. In base alle ipotesi sviluppate nel Cap. X, la presenza di questa proprietà è una indicazione che la materia è sottoposta a cambiamenti accompagnati dall'espulsione di particella cariche. Non deve, tuttavia, seguire che, poiché l'atomo di un elemento nel corso del tempo diviene instabile e si spezza, allora, gli atomi di tutti gli altri elementi passino per analoghe fasi di instabilità.

Si è già ricordato (sezione 8) che Madame Curie ha compiuto un ampio esame della maggior parte degli elementi e dei loro composti per radioattività. Usò il metodo elettrico e ogni sostanza in possesso di un'attività pari a  $\frac{1}{10}$  di quella dell'uranio poteva certamente essere rivelata. Ad eccezione dei radio-elementi noti e dei minerali contenenti uranio e torio, nessun'altra sostanza ha mostrato di essere radioattiva.

Certe sostanze come il fosforo<sup>50</sup> possiedono la proprietà di ionizzare un gas in particolari condizioni. L'aria che è attratta dal fosforo è resa conduttrice, ma non si è sinora stabilito se questa conduttività sia dovuta principalmente agli

<sup>45</sup>Ebert, Ohys. Zeit. 2, p. 622, 1901. Zeitschr. f. Luftschiffahrt, 4 ottobre 1902.

<sup>46</sup>Schuster, Proc. Manchester Phil. Soc. p. 488, No 12, 1904.

<sup>47</sup>Mache e Von Schweidler, Phys. Zeit. 6, No. 3, p. 71, 1905.

<sup>48</sup>Langevin, C. R. 140, p. 232, 1905.

<sup>49</sup>Schuster, British. Assoc. 1903.

<sup>50</sup>J. J. Thomson, Conduction of Electricity through Gases, p. 324, 1903.

ioni formati sulla superficie del fosforo o agli ioni prodotti dai nuclei di fosforo o da emanazioni, così come sono state chiamate, che sono trasportate con la corrente d'aria. Non sembra, tuttavia, che la ionizzazione del gas sia in qualche modo dovuta alla presenza di un tipo di radiazione penetrante come quella emessa dai corpi radioattivi. Le Bon (sezione 8) osservò che il solfato di chinino, dopo essere stato riscaldato a una temperatura sotto il punto di fusione e poi raffreddato, mostrava per un tempo un'intensa fosforescenza ed era in grado di scaricare rapidamente un elettroscopio. L'azione di scarica del solfato di chinino in condizioni diverse è stato esaminato con grande precisione da Miss Gates<sup>51</sup>. La ionizzazione non era osservabile attraverso sottili lamine di alluminio o foglie d'oro, ma appariva confinata alla superficie del solfato. La corrente osservata da un elettrometro variava con la direzione del campo elettrico, indicando che gli ioni positivi e negativi avevano una diversa mobilità. L'azione di scarica appariva dovuta o a una ionizzazione del gas molto vicino alla superficie da corte onde luminose ultraviolette, che accompagnavano la fosforescenza, o a un'azione chimica che avveniva sulla superficie.

Tuttavia, né il solfato di chinino né il fosforo possono essere considerati radioattivi, anche in speciali condizioni quando sono in grado di scaricare un corpo carico. Non si è trovata altresì alcuna evidenza che la ionizzazione sia dovuta all'emissione di radiazione penetrante.

Nessuna prova evidente è stata sinora ottenuta che un corpo può essere reso radioattivo per esposizione ai raggi Röntgen o a quelli catodici. Un metallo esposto all'azione dei raggi Röntgen produce una radiazione secondaria che è assorbita molto facilmente in pochi centimetri di aria. È possibile che questa radiazione secondaria possa essere provata analoga per certi aspetti ai raggi  $\alpha$  dai radio-elementi. La radiazione secondaria, tuttavia, cessa immediatamente con la cessazione dei raggi Röntgen. Villard<sup>52</sup> affermò che un pezzo di bismuto produceva una debole azione fotografica dopo un'esposizione per un certo tempo all'azione dei raggi catodici nel vuoto. Non è stato, tuttavia, mostrato che il bismuto produce raggi con caratteristiche simili a quelle dei corpi radioattivi. Gli esperimenti di Ramsay e Cooke sulla produzione di attività apparente nella materia inattiva da radiazioni dal radio sono già stati discussi nella sezione 264.

L'esistenza di una radioattività molto debole della materia ordinaria è stata dedotta dallo studio della conduttività dei gas nei contenitori chiusi. La conduttività è estremamente piccola e sono necessari metodi speciali per determinarla con precisione. Sarà data una breve presentazione della crescita graduale della nostra conoscenza di questa importante questione.

**284. Conduttività dell'aria in contenitori chiusi.** Prima del tempo di Coulomb numerosi sperimentatori avevano creduto che un conduttore carico posto in un contenitore chiuso perdesse la propria carica più rapidamente di quanto si credeva in base alla debole conduzione attraverso un supporto isolante. Matteucci, per primo nel 1850, osservò che il tasso di perdita della carica era indipendente dal potenziale. Boys, usando un isolante di quarzo di diverse lunghezze e diametri, giunse alla conclusione che la dispersione doveva in parte avvenire attraverso l'aria. Questa perdita di carica in un contenitore chiuso si attribuiva in qualche modo alla presenza di particelle di polvere nell'aria.

Dalla scoperta che i gas divengono conduttori temporanei di elettricità sotto l'influenza dei raggi Röntgen e di quelli dalle sostanze radioattive, questa questione fu posta all'attenzione. Geitel<sup>53</sup> e C. T. R. Wilson<sup>54</sup> indipendentemente affrontarono il problema ed entrambi giunsero alla conclusione che la perdita di carica era dovuta ad una ionizzazione costante dell'aria in un contenitore chiuso. Geitel impiegò nei suoi esperimenti un dispositivo simile a quello mostrato in Figura 103. La perdita di carica di un elettroscopio Erner, con il cilindro a filo di rete  $Z$  attaccato, era osservato in un contenitore chiuso contenente circa 30  $l$  di aria. Il sistema elettroscopio diminuiva nel potenziale ad un tasso di circa 40  $V$  per ora e questa diminuzione non era dovuta a una mancanza di isolamento dei supporti.

Wilson, d'altro canto, usò un contenitore di volume molto piccolo per lavorare con aria che poteva essere completamente liberata dalla polvere. Nei primi esperimenti fu usato un contenitore di vetro argentato con un volume di soli 163  $cm^3$ . Il dispositivo sperimentale è mostrato in Figura 104.

<sup>51</sup>Miss Gates, Phys. Rev. 17, p. 499, 1903.

<sup>52</sup>Villard, Societé de Physique, luhlio, 1900.

<sup>53</sup>Geitel, Phys. Zeit. 2, p. 116, 1900.

<sup>54</sup>C. T. R. Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. 11, p. 52, 1900. Proc. Roy. Soc. 68, p. 152, 1901.

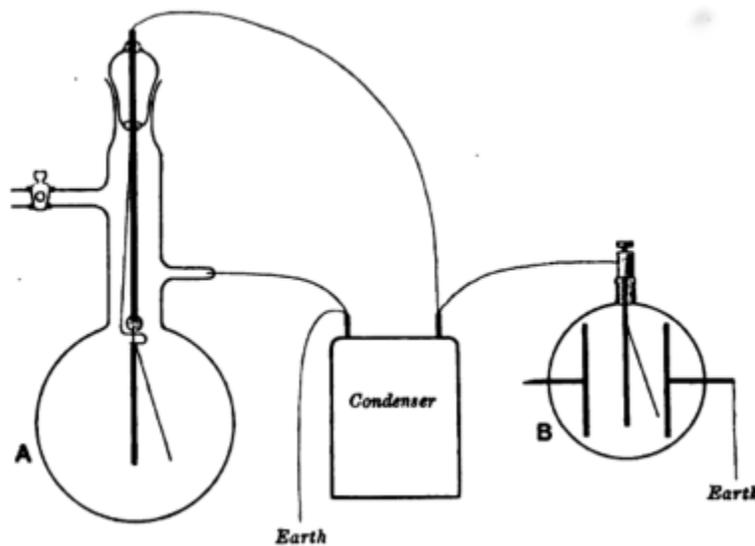


Fig. 104.

Il conduttore, di cui si misurava la perdita di carica, era posto vicino al centro del contenitore A. Consisteva di una stretta striscia di metallo con attaccate delle foglie d'oro. La striscia di metallo era fissata sopra l'asta per mezzo di una goccia di zolfo. L'asta superiore era collegata con un condensatore di zolfo con un elettroscopio Erner B attaccato per indicare il suo potenziale. Il sistema di foglie d'oro era inizialmente caricato allo stesso potenziale dell'asta superiore e del condensatore per mezzo di un sottile filo d'acciaio che doveva toccare il sistema foglie d'oro per attrazione di un magnete posto vicino. Il ritmo di movimento delle foglie d'oro era misurato per mezzo di un microscopio fornito di un micrometro. Mantenendo l'asta superiore a un potenziale leggermente più alto del sistema foglie d'oro, ci si assicurava che la perdita di carica del sistema stessa non fosse dovuta in ogni modo a una perdita di conduzione attraverso la goccia di zolfo.

Il metodo impiegato da Wilson in questi esperimenti è sicuro e conveniente quando si deve osservare un tasso di scarica estremamente piccolo. A tal proposito l'elettroscopio misura con certezza un tasso di perdita della carica molto più piccolo di quello che misurato da un elettrometro sensibile.

Sia Geitel che Wilson trovarono che la perdita del sistema isolato in aria priva di polvere era la stessa per la carica positiva e negativa ed era indipendente dal potenziale entro un considerevole intervallo. La perdita era la stessa al buio o in piena luce. L'indipendenza dal potenziale è una forte prova che la perdita di carica è dovuta a una costante ionizzazione dell'aria. Quando il campo elettrico che agisce sul gas supera un certo valore, tutti gli ioni sono portati all'elettrodo prima che avvenga la ricombinazione. Si raggiunge una corrente di saturazione ed essa sarà indipendente da ulteriori aumenti del campo elettrico, purché, naturalmente, non venga applicato un potenziale sufficientemente elevato da causare una scintilla.

C. T. R. Wilson ha recentemente ideato uno straordinario esperimento per mostrare la presenza di ioni in aria libera dalla polvere non esposta ad agenti ionizzanti esterni. Due grandi piastre metalliche sono poste in un contenitore di vetro collegato con un dispositivo a espansione simile a quello descritto nella sezione 34. Espandendo l'aria, la presenza di ioni è evidenziata dalla comparsa di una debole nube tra le piastre. Questi nuclei di condensazione portano carica elettrica e sono apparentemente simili in tutti gli aspetti agli ioni prodotti nei gas dai raggi X o dai raggi da sostanze attive.

Wilson trovò che la perdita di carica del sistema isolato era indipendente dalla località. Il tasso di scarica era invariato quando l'apparato era posto in un tunnel profondo, così che non apparisse che la perdita di carica fosse dovuta a una radiazione esterna. Dagli esperimenti già descritti, tuttavia (sezione 279), è probabile che circa il 30% del tasso di scarica osservato fosse dovuto a una radiazione molto penetrante. Questo esperimento di Wilson indica che l'intensità della radiazione penetrante era la stessa nel tunnel come sulla superficie della terra. Wilson trovò che la ionizzazione dell'aria era circa la stessa in un contenitore di ottone e di vetro e trasse la conclusione che l'aria era spontaneamente ionizzata.

Usando un contenitore di ottone del volume di circa  $471 \text{ cm}^3$ , Wilson determinò il numero di ioni che doveva essere prodotto nell'aria per unità di volume per secondo, per tener conto della perdita di carica del sistema isolato. Il sistema aveva una capacità di circa 1.1 unità elettrostatiche e perdeva la propria carica al ritmo di  $4.1 \text{ V}$  per ora per un potenziale di  $210 \text{ V}$  e di  $4.0 \text{ V}$  per ora per un potenziale di  $120 \text{ V}$ . Assumendo la carica di uno ione come  $3.4 \cdot 10^{-10}$  unità elettrostatiche, questo corrisponde alla produzione di 26 ioni al secondo.

Rutherford e Allan<sup>55</sup> ripeterono i risultati di Geitel e Wilson, usando un elettrometro. La corrente di saturazione era osservata tra due cilindri concentrici di zinco del diametro di 25.5 e 7.5 cm, rispettivamente, e lunghi 154 cm. Si trovò che la corrente di saturazione poteva essere praticamente ottenuta con un potenziale di pochi volt. Si poteva ottenere la saturazione, tuttavia, con un voltaggio più basso dopo che l'aria era rimasta indisturbata nei cilindri per parecchi giorni. Questo era probabilmente dovuto alla graduale decantazione della polvere inizialmente presente nell'aria.

<sup>55</sup>Rutherford e Allan, Phil. Mag. dicembre 1902.

Osservazioni successive del numero di ioni prodotti nell'aria in contenitori sigillati sono state eseguite da Patterson<sup>56</sup>, Harms<sup>57</sup> e Cooke<sup>58</sup>. I risultati ottenuti da diversi sperimentatori sono mostrati nella tabella seguente. Il valore della carica su uno ione è presa come  $3.4 \cdot 10^{-10}$  unità elettrostatiche:

Materiale del contenitore	N° di ioni prodotti per $cm^3$ per secondo	Sperimentatore
Vetro argentato	36	C. T. R. Wilson
Ottone	26	"
Zinco	27	Rutherford e Allan
Vetro	53 a 63	Harms
Ferro	61	Patterson
Ottone pulito	10	Cooke

Si mostrerà in seguito che le differenze tra questi risultati sono probabilmente dovute a differenze nella radioattività del contenitore.

**285. Effetto della pressione e natura del gas.** C. T. R. Wilson (citato) trovò che il tasso di perdita di un conduttore carico variava approssimativamente con la pressione dell'aria tra le pressioni esaminate, cioè 43 mm e 743 mm di mercurio. Questi risultati portano alla conclusione che, in un buon vuoto, un corpo carico dovrebbe perdere la propria carica molto lentamente. Ciò è in accordo con un'osservazione di Crookes, che trovò che una coppia di foglie d'oro manteneva la propria carica per parecchi mesi in un alto vuoto.

Wilson<sup>59</sup> in un periodo successivo studiò la perdita per diversi gas. I risultati sono racchiusi nella seguente tabella, dove la ionizzazione prodotta nell'aria è assunta come unitaria:

Gas	Ionizzazione relativa	Ionizzazione relativa/densità
Aria	1.00	1.00
Idrogeno	0.184	2.7
Biossido di carbonio	1.69	1.10
Biossido di zolfo	2.64	1.21
Cloroformio	4.7	1.09

Ad eccezione dell'idrogeno, la ionizzazione prodotta in diversi gas è approssimativamente proporzionale alla loro densità. La ionizzazione relativa è molto simile a quella osservata da Strutt (sezione 45) per gas esposti all'influenza dei raggi  $\alpha$  e  $\beta$  da sostanze radioattive e fa concludere che la ionizzazione osservata può essere dovuta o a una radiazione dalle pareti del contenitore o da sorgenti esterne.

Jaffé<sup>60</sup> ha fatto un esame accurato della ionizzazione naturale in un gas molto pesante di nichel-carbonile,  $Ni(CO)_4$ , in un piccolo contenitore di vetro argentato. La ionizzazione di questo gas era 5.1 volte quella dell'aria a pressione normale mentre la sua densità è 5.9 volte quella dell'aria. La perdita dell'elettroscopio era quasi proporzionale alle pressioni tranne a bassa pressione, quando la perdita era a volte maggiore di quanto atteso dalla legge della pressione. Il fatto che un gas di una tale alta densità e struttura complessa si comporti come i gas più semplici e leggeri è una forte indicazione che la ionizzazione stessa è dovuta a una radiazione dalle pareti del contenitore e non da una spontanea ionizzazione del gas.

Patterson<sup>61</sup> esaminò la variazione della ionizzazione dell'aria con la pressione in un contenitore di ferro del diametro di 30 cm e lungo 20 cm. La corrente tra un elettrodo centrale e il cilindro era misurata per mezzo di un elettrometro sensibile Dolezalek. Trovò che la corrente di saturazione era praticamente indipendente dalla pressione per pressioni superiori a 300 mm di mercurio. Al di sotto di una pressione di 80 mm la corrente variava direttamente con la pressione. Per aria alla pressione atmosferica, la corrente era indipendente dalla temperatura fino a 450 °C. Con un ulteriore aumento di temperatura, la corrente iniziava ad aumentare e l'aumento era più rapido quando l'elettrodo centrale era caricato negativamente. Queste differenze erano attribuite alla produzione di ioni positivi sulla superficie del contenitore di ferro. I risultati ottenuti da Patterson rendono molto improbabile che la ionizzazione osservata nell'aria sia dovuta alla ionizzazione spontanea dell'aria racchiusa: ci dovremmo aspettare la quantità di questa ionizzazione dipendere dalla temperatura del gas. D'altro canto, questi risultati sono attesi se la ionizzazione dell'aria racchiusa è principalmente dovuta ad una radiazione facilmente assorbibile dalle pareti del contenitore. Se questa radiazione ha un potere di penetrazione circa uguale a quello osservato per i raggi  $\alpha$  dei radio-elementi, la radiazione sarà assorbita in pochi centimetri di aria. Con la diminuzione della pressione, le radiazioni attraverseranno una distanza maggiore prima di essere completamente assorbite,

<sup>56</sup>Patterson, Phil. Mag. agosto 1903.

<sup>57</sup>Harms, Phys. Zeit. 4, No. 1. p.11, 1902.

<sup>58</sup>Cooke, Phil. Mag. ottobre 1903.

<sup>59</sup>Wilson, Proc. Roy. Soc. 69, p. 277, 1901.

<sup>60</sup>Jaffé, Phil. Mag. ottobre 1904.

<sup>61</sup>Patterson, Phil. Mag. agosto 1903.

ma la ionizzazione totale prodotta dai raggi rimarrà ancora circa la stessa, finché la pressione non si ridurrà al punto da permettere alla radiazione di attraversare lo spazio d'aria nel contenitore senza una ionizzazione completa. Con un'ulteriore diminuzione della pressione, la ionizzazione totale prodotta dalla radiazione e, di conseguenza, la corrente osservata, varierà direttamente con la pressione.

**286. Esame della materia ordinaria per radioattività.** Strutt<sup>62</sup>, McLennan<sup>63</sup>, Burton<sup>64</sup> e Cooke<sup>65</sup> indipendentemente osservarono circa nello stesso tempo che la materia comune è radioattiva in minima parte. Strutt, per mezzo di un elettroscopio, osservò che la ionizzazione prodotta in un contenitore chiuso variava con il materiale dello stesso. Fu impiegato un contenitore di vetro con una base rimovibile e il contenitore era rivestito con il materiale da esaminare. La tabella seguente mostra i risultati relativi ottenuti. La quantità di perdita osservata è espressa in termini del numero delle divisioni di scala dell'oculare passato sopra per ora dalle foglie d'oro:

Materiale di rivestimento del contenitore	Perdita in divisioni di scala per ora
Carta stagnola	3.3
Altro campione di carta stagnola	2.3
Vetro rivestito con acido fosforico	1.3
Argento chimicamente depositato su vetro	1.6
Zinco	1.2
Piombo	2.2
Rame (pulito)	2.3
Rame (ossidato)	1.7
Platino (diversi campioni)	2.0, 2.9, 3.9
Alluminio	1.4

Vi sono, pertanto, marcate differenze nella perdita osservata per diversi materiali e anche considerevoli differenze in diversi campioni dello stesso metallo. Per esempio, un campione di platino provocava quasi il doppio della perdita di un altro campione da un diverso magazzino.

McLennan e Burton, d'altro canto, misurarono per mezzo di un elettrometro sensibile la corrente di ionizzazione prodotta in aria in un cilindro di ferro chiuso del diametro di 25 cm e lungo 130 cm, nel quale era posto un elettrodo centrale isolato. Il cilindro aperto era prima esposto per lo stesso tempo ad una finestra aperta del laboratorio. Era poi rimosso, chiuso alle sue estremità ed era determinata la corrente di saturazione attraverso il gas il più rapidamente possibile. In tutti i casi si osservò che la corrente diminuiva per due o tre ore a un minimo e poi cresceva ancora molto lentamente. In un esperimento, per esempio, la corrente iniziale osservata corrispondeva a 30 su una scala arbitraria. Nel corso di quattro ore la corrente cadeva a un minimo di 6.6 e 44 ore dopo risaliva a un massimo di 24. Il calo iniziale osservato è probabilmente dovuto a una radioattività dell'aria racchiusa o dalle pareti del contenitore, che decadeva rapidamente col tempo. Il decadimento dell'attività eccitata prodotta sulla superficie interna del cilindro esposto all'aria era probabilmente responsabile per una parte della diminuzione osservata. McLennan attribuisce l'aumento della corrente col tempo a una *emanazione* radioattiva che è emessa dal cilindro e che ionizza l'aria racchiusa. Ponendo un rivestimento di piombo, stagno e zinco nel cilindro di ferro, si osservarono considerevoli differenze sia per la corrente minima che per il massimo finale. Il piombo dava circa il doppio della corrente dovuta allo zinco, mentre lo stagno dava un valore intermedio. Questi risultati hanno caratteristiche simili a quelli ottenuti da Strutt.

McLennan e Burton studiarono pure l'effetto della diminuzione della pressione sulla corrente. Il cilindro era riempito d'aria alla pressione di 7 atmosfere che era lasciata riposare finché la corrente raggiungeva un valore costante. L'aria veniva poi fatta uscire e la pressione si riduceva a 44 mm di mercurio. La corrente variava approssimativamente con la pressione sull'intero intervallo. Questi risultati non sono in accordo con quelli di Patterson già descritti né con gli ultimi esperimenti di Strutt. I risultati di McLennan, tuttavia, portano alla conclusione che la ionizzazione era principalmente dovuta ad una emanazione emessa dal metallo. Poiché l'aria era rapidamente rimossa, questo comportava la rimozione di una quantità di emanazione e ci si doveva aspettare, quindi, che la corrente variasse direttamente con la pressione. Se così è la corrente attraverso il gas a basse pressioni aumenterà a un massimo se è concesso il tempo per la formazione di nuova emanazione.

H. L. Cooke<sup>66</sup>, usando un metodo elettroscopico, ottenne risultati molto simili a quelli di Strutt. Cooke osservò che una radiazione penetrante era emessa dai mattoni. Quando un recipiente di ottone contenente un sistema a foglie d'oro era circondato da mattoni, la scarica dell'elettroscopio aumentava dal 40 al 50%. Questa radiazione era di circa lo stesso potere di penetrazione dei raggi provenienti da sostanze radioattive. I raggi erano completamente assorbiti circondando

<sup>62</sup>Strutt, Phil. Mag. giungo 1903. Nature, 19 febbraio 1903.

<sup>63</sup>McLennan e Burton, Phys. Rev. No. 4, 1903. J. J. Thomson, Nature, 26 febbraio 1903.

<sup>64</sup>Burton, Electrical Conductivity of Atmospheric air, Phil. Mag. V, 5, pp. 699-708 (1903).

<sup>65</sup>Cooke, Phil. Mag. 25, pp. 408-411, 1903. Rutherford, Nature, 2 aprile 1903.

<sup>66</sup>H. L. Cooke, Phil. Mag. 6, pp 405.411, 1903)

l'elettroscopio con un foglio di piombo spesso 2 *mm*. Questo risultato è in accordo con l'osservazione di Elster e Geitel, già ricordata, che la materia radioattiva era presente in argilla scavata da poco da terra.

Cooke osservò che la ionizzazione dell'aria in un elettroscopio d'ottone si riduceva a circa un terzo del suo valore usuale se la superficie interna dell'ottone era accuratamente ripulita. Rimuovendo la superficie dell'ottone fu in grado di ridurre la ionizzazione dell'aria racchiusa da 30 a 10 ioni per  $cm^3$  per secondo. Questa è un'osservazione importante e indica che una grande parte della radioattività osservata nella materia è dovuta a un deposito di materia radioattiva sulla sua superficie. È già stato mostrato che corpi che sono stati esposti alla presenza dell'emanazione del radio trattengono un'attività residua che decade molto lentamente. Non vi sono dubbi sulla presenza dell'emanazione del radio nell'atmosfera e la superficie esposta della materia, di conseguenza, si ricoprirà di uno strato invisibile di materia radioattiva, depositata dall'atmosfera. A causa del lento decadimento di questa attività è probabile che l'attività della materia esposta all'aria aperta aumenterà costantemente per un lungo intervallo. Metalli, anche se inizialmente inattivi, acquisiranno, pertanto, una debole attività permanente, ma sarà possibile disfarsene rimuovendo la superficie del metallo o mediante trattamento chimico. Il rapido aumento dell'attività di tutta la materia rimasta in un laboratorio nel quale è stata rilasciata una grande quantità di emanazione è stato portato all'attenzione da Eve<sup>67</sup>. Questa attività superficiale, dovuta ai prodotti radio D, E, F, era perlopiù rimossa ponendo il metallo in un forte acido.

Una serie di esperimenti sono stati fatti da J. J. Thomson, N. R. Campbell e A. Wood al Cavendish Laboratory per esaminare se la radioattività osservata nella materia ordinaria è una proprietà specifica di tale materia o se è dovuta alla presenza di alcune impurezze radioattive. Un resoconto di questi esperimenti fu dato dal Professor J. J. Thomson in una discussione sulla Radioattività della Materia Ordinaria all'incontro della British Association a Cambridge, nel 1904. I risultati<sup>68</sup> supportano l'idea che ogni sostanza emetta un tipo o tipi caratteristico/i di radiazione e che la radiazione sia una proprietà specifica della sostanza. J. J. Thomson<sup>69</sup> ha eseguito esperimenti per osservare l'azione di diverse sostanze per ridurre la radiazione esterna molto penetrante (sezione 279) osservata da Cooke e McLennan. Trovò che alcune sostanze tagliavano questa radiazione esterna, mentre altre avevano poco effetto. Per esempio, la ionizzazione in un contenitore chiuso venne ridotta al 17% circondandolo con un spesso strato di piombo; ma, circondandolo con un equivalente spessore assorbente di acqua, o acqua mista a sabbia, non si osservava una diminuzione. In altri esperimenti Wood<sup>70</sup> trovò che la diminuzione della ionizzazione per un dato schermo dipendeva dal materiale del contenitore. Per esempio, la ionizzazione in un contenitore di piombo, circondato da uno schermo di piombo, era ridotta al 10%, mentre in uno di ferro era ridotta al 24%. Concluse da questi esperimenti che la ionizzazione osservata in un contenitore chiuso ha una soglia. Parte di essa è dovuta a una radiazione esterna penetrante, parte a una radiazione secondaria da essa emessa, mentre la rimanente è dovuta a una radiazione intrinseca dalle pareti, del tutto indipendente dalla radiazione esterna.

In alcuni esperimenti M. R. Campbell<sup>71</sup> osservò la variazione della corrente di ionizzazione tra due piastre parallele per un progressivo aumento della distanza tra di esse. Gli effetti osservati sono mostrati in Figura 105. Le curve inizialmente crescono rapidamente, poi piegano e infine divengono una retta. Il ginocchio della curva è ad una distanza diversa per le diverse sostanze. La loro forma indica che vi sono due tipi di radiazione, una facilmente assorbibile nel gas, l'altra, più penetrante, si estende sull'intera distanza tra le piastre. In un'altra serie di esperimenti, un lato del contenitore era di alluminio sottile, e la corrente di ionizzazione fu osservata quando fu posto uno schermo esterno. Il piombo dava un considerevole aumento, ma la radiazione da esso era facilmente assorbita da uno schermo frapposto. La radiazione emessa dal carbonio e dalla zinco era penetrante più del doppio del piombo.

<sup>67</sup>Eve, *Nature*, 16 marzo 1905.

<sup>68</sup>Si veda l'articolo in *Le Radium*, No. 3, p. 81, 15 settembre 1904.

<sup>69</sup>J. J. Thomson, *Proc. Camb. Phil. soc.* 12, p. 391, 1904.

<sup>70</sup>Wood, *Phil. Mag.* aprile 1905.

<sup>71</sup>Campbell, *Nature*, p. 511, 31 marzo 1904. *Phil. Mag.* aprile 1905.

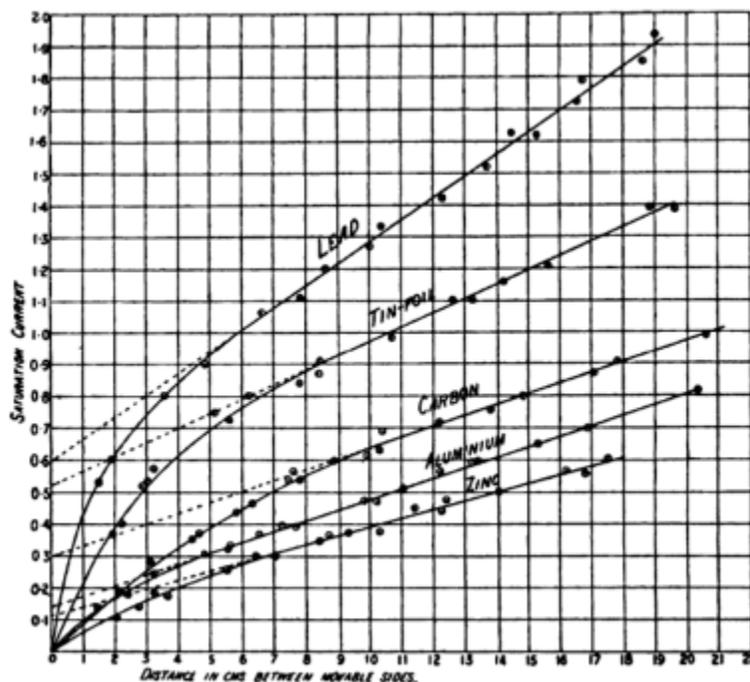


Fig. 105.

Furono fatti tentativi per vedere se era emessa un'emanazione radioattiva sciogliendo sostanze solide e mantenendo poi la soluzione in un contenitore chiuso e misurando in seguito l'attività dell'aria da essa trasportata. In alcuni casi si osservò un'emanazione, ma la quantità variava con diversi campioni dello stesso materiale; in altri non si rivelò alcun effetto.

Quando rivestimenti di diverse sostanze erano posti in un contenitore chiuso, la corrente di ionizzazione nella maggior parte dei casi dapprima si riduceva, passava per un minimo e poi aumentava lentamente fino a un massimo. Per il piombo il massimo era raggiunto in 9 ore, per lo stagno in 14 e per lo zinco in 18 ore. Questi risultati indicano che un'emanazione è prodotta dal metallo e che la quantità raggiunge un valore massimo a diversi intervalli nei vari casi. Questo fu confermato da un esame di un pezzo di piombo che era rimasto in acido nitrico privo di radio. Fu osservato venti volte il normale effetto dopo questo trattamento. Questo è probabilmente dovuto all'aumento della porosità del piombo che permette ad una grande frazione della emanazione prodotta nel metallo di diffondere con il gas.

L'attività osservata nella materia comune è estremamente piccola. Il tasso inferiore di produzione di ioni osservato è di 10 per  $cm^3$  per secondo in un contenitore di ottone. Supponiamo di prendere un contenitore sferico di ottone della capacità di 1 l. L'area della superficie interna sarà circa  $480 cm^2$  e il numero totale di ioni prodotti al secondo sarà circa  $10^4$ . Si è mostrato, nella sezione 252, che una particella  $\alpha$  emessa dal radio produce  $8.6 \cdot 10^4$  ioni prima di essere assorbita nel gas. L'espulsione di una particella  $\alpha$  ogni 8 s dall'intero contenitore, o di una particella  $\alpha$  da ogni centimetro quadrato di superficie per ora terrà conto della minuscola conduttività osservata. Anche se si fosse supposto che questa attività è il risultato della rottura della materia che compone il contenitore, la disintegrazione di un atomo per secondo per grammo, purché accompagnata dall'espulsione di una particella  $\alpha$ , renderà pienamente conto della conduttività osservata.

Mentre gli esperimenti, già riferiti, mostrano con evidenza che la materia comune possiede la proprietà di debole radioattività, non si deve dimenticare che l'attività osservata è eccessivamente minuscola, confrontata con una sostanza debolmente radioattiva come uranio o torio. L'interpretazione dei risultati è complicata dalla presenza dell'emanazione del radio nell'atmosfera, perché abbiamo visto che la superficie di un corpo esposto all'aria aperta viene ricoperta con prodotti a trasformazione lenta dell'emanazione del radio. La distribuzione della materia radioattiva tra i costituenti della terra rende difficile essere certi che ogni sostanza, accuratamente preparata, sia libera da impurità radioattive. Se la materia in generale è radioattiva, deve subire una trasformazione ad un tasso eccessivamente lento, a meno che si supponga (Appendice A) che i cambiamenti di un tipo simile a quello osservato negli elementi radioattivi avvenga senza la comparsa di radiazioni caratteristiche.

## APPENDICE A

### Proprietà dei raggi $\alpha$

Viene dato un breve resoconto di alcune indagini fatte da chi scrive sulle proprietà dei raggi  $\alpha$  dal radio - analisi non completate in tempo per i risultati inseriti nel testo.

Gli esperimenti furono intrapresi principalmente con l'idea di determinare accuratamente il valore di  $\frac{e}{m}$  della particella  $\alpha$  per il radio, per stabilire definitivamente se è un atomo di elio. Nei miei precedenti esperimenti, di Becquerel e Des Coudres, su questo tema (sezioni 89, 90, 91), si è usato uno spesso strato di radio in equilibrio radioattivo come sorgente dei raggi  $\alpha$ . Bragg (sezione 103) ha mostrato che i raggi emessi dal radio in certe condizioni sono complessi e consistono di particelle proiettate con un considerevole intervallo di velocità. Per ottenere un pennello omogeneo di raggi è necessario usare uno strato molto sottile di una semplice sostanza radioattiva come sorgente  $\alpha$ . Negli esperimenti che seguono, questa condizione fu soddisfatta usando un sottile filo che era attivato esponendolo per parecchie ore alla presenza di una grande quantità di emanazione del radio. Caricando il filo negativamente il deposito attivo era concentrato sul filo, che diventava fortemente attivo. Il deposito attivo inizialmente conteneva radio A, B e C. L'attività del radio A scompariva praticamente in circa 15 minuti e allora la radiazione  $\alpha$  era dovuta interamente al solo prodotto C, poiché il radio B non emette radiazione. L'attività del radio C diminuisce a circa il 15% del suo valore iniziale dopo due ore.

**Deflessione magnetica dei raggi  $\alpha$ .** Fu impiegato il metodo fotografico per determinare la deviazione del fascio di raggi in un campo magnetico. Il dispositivo sperimentale è mostrato in Figura 106. I raggi dal filo attivo, che era posto in una fessura, passavano attraverso una stretta fenditura e cadevano perpendicolarmente su una lastra fotografica, posta a una distanza nota sopra la fenditura. Il dispositivo era racchiuso in un tubo di ottone che poteva essere rapidamente svuotato ad una bassa pressione per mezzo di una pompa Fleuss.

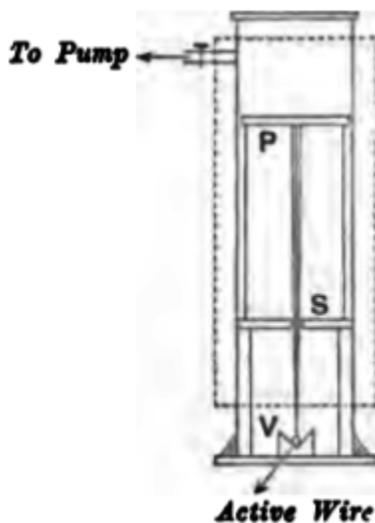


Fig. 106.

Il dispositivo era inserito in un campo magnetico uniforme parallelo al piano della fenditura. Il campo magnetico era invertito ogni dieci minuti cosicché sviluppando le lastre si osservarono due strette bande, la distanza tra le quali rappresentava il doppio della deviazione del normale fascio di raggi dovuta al campo magnetico. La larghezza della banda era la stessa se il campo magnetico era o meno applicato, mostrando che il fascio di raggi era omogeneo e consisteva di particelle  $\alpha$  proiettate a grande velocità.

Ponendo la lastra fotografica a diverse distanze dalla fenditura si trovò che i raggi, dopo essere entrati nel campo magnetico, descrivevano l'arco di un cerchio di raggio  $\rho$  uguale a  $42.0\text{ cm}$ . L'intensità del campo  $H$  era  $9470\text{ unità c.g.s.}$ , così che il valore di  $H\rho$  per le particelle  $\alpha$  espulse dal radio C è  $398000$ . Questo è in buon accordo con i valori massimi di  $H\rho$ , trovati in precedenza per i raggi del radio (si veda la sezione 92).

La deviazione elettrica dei raggi dal radio C non è finora stata accuratamente misurata, ma una determinazione approssimata di  $\frac{e}{m}$  per le particelle  $\alpha$  si può ottenere assumendo che l'effetto di riscaldamento del radio C è una misura dell'energia cinetica di una particella  $\alpha$  da esso emessa. Abbiamo visto nella sezione 246 che l'effetto di riscaldamento del radio C presente in un grammo di radio in equilibrio radioattivo è 31 grammo-calorie per ora, che corrisponde a un'emissione di energia di  $3.6 \cdot 10^5 \text{ erg}$  per secondo. Quando è raggiunto l'equilibrio radioattivo, il numero di particelle  $\alpha$  espulse ogni secondo è uguale al numero di particelle  $\alpha$  espulse per secondo dal radio alla sua minima attività. Questo numero,  $n$ , è  $6.2 \cdot 10^{10}$  (sezione 93).

Allora

$$\frac{1}{2}mv^2 = 3.6 \cdot 10^5$$

o

$$\frac{m}{e}v^2 = 1.03 \cdot 10^{16}$$

sostituendo il valore di  $n$  e il valore della carica ionica  $e$ . Il valore di  $e$  in questo caso non è stato assunto, poiché  $n = \frac{i}{e}$ , dove  $i$  era la corrente misurata dovuta alla carica trasportata dai raggi  $\alpha$ .

Dalla deflessione magnetica, è noto che

$$\frac{m}{e}v = 3.98 \cdot 10^5$$

Da queste due equazioni otteniamo

$$v = 2.6 \cdot 10^9 \frac{cm}{s}$$

$$\frac{e}{m} = 6.5 \cdot 10^3 \text{ uem}$$

Questi valori sono sorprendentemente in buon accordo con i precedenti valori di chi scrive e Des Coudres (sezione 91). A causa dell'incertezza del valore di  $n$ , non si può attribuire molto peso alla determinazione con questo metodo delle costanti delle particelle  $\alpha$ .

**Diminuzione della velocità delle particelle  $\alpha$  nel passaggio attraverso la materia.** Alcuni esperimenti vennero eseguiti per determinare la velocità delle particelle  $\alpha$  dal radio C dopo il loro passaggio attraverso uno spessore noto di alluminio. Fu impiegata la precedente strumentazione e fu osservata la distanza tra le bande fotografiche per successivi strati di fogli di alluminio, ognuno dello spessore di  $0.00031 \text{ cm}$ , posti sopra il filo attivo. La lastra fotografica era posta  $2 \text{ cm}$  sopra la fenditura e il campo magnetico si estendeva  $1 \text{ cm}$  sotto la fenditura. La quantità della deviazione dei raggi è inversamente proporzionale alla loro velocità dopo l'attraversamento degli schermi di alluminio. L'impressione sulla lastra era chiara e distinta e circa la stessa in tutti i casi, mostrando che i raggi erano pressoché omogenei dopo il passaggio attraverso l'alluminio.

Una chiara immagine fotografica fu ottenuta per 12 strati, ma non fu possibile ottenere un effetto attraverso 13 strati. Questo risultato mostra che l'azione fotografica dei raggi, come l'azione ionizzante, cessa molto improvvisamente.

I risultati ottenuti sono mostrati nella seguente tabella. Assumendo che il valore di  $\frac{e}{m}$  sia costante, la terza colonna dà la velocità delle particelle  $\alpha$  dopo l'attraversamento dell'alluminio. Questa è espressa in termini di  $V_0$ , la velocità della particella  $\alpha$  quando gli schermi sono rimossi.

Numero di strati di fogli di alluminio	Distanza tra bande sulla lastra	Velocità delle particelle $\alpha$
0	$1.46 \text{ mm}$	$1.00 V_0$
5	$1.71 \text{ mm}$	$0.85 V_0$
8	$1.91 \text{ mm}$	$0.76 V_0$
10	$2.01 \text{ mm}$	$0.73 V_0$
12	$2.29 \text{ mm}$	$0.64 V_0$
13	nessun effetto fotografico	

La velocità della particella  $\alpha$  è pertanto ridotta solo a circa il 36% del suo valore iniziale quando cessa di produrre ogni azione sulla lastra fotografica.

Bragg ha mostrato (sezione 104) che la particella  $\alpha$  produce circa lo stesso numero di ioni per  $cm$  di percorso in aria. Di conseguenza, la più semplice ipotesi da fare è che l'energia della particella  $\alpha$  è diminuita di una quantità costante attraversando ogni strato. Dopo il passaggio attraverso 12 strati l'energia cinetica è ridotta al 41% del massimo. Ogni foglio, pertanto, assorbe il 4.9% dell'energia massima. L'energia cinetica osservata della particella  $\alpha$  dopo il passaggio attraverso strati successivi e il valore calcolato nell'ipotesi sopra, sono mostrati nella seguente tabella.

Numero di strati di fogli di alluminio	Energia osservata	Energia calcolato
0	100	100
5	73	75
8	58	61
10	53	51
12	41	41

I valori sperimentale e teorico sono in accordo entro i limiti dell'errore sperimentale. Possiamo, pertanto, concludere, in prima approssimazione, che la stessa proporzione dell'energia totale è sottratta alle particelle  $\alpha$  attraverso distanze uguali dello schermo assorbente.

**Range dell'azione ionizzante e fotografica in aria.** L'improvvisa riduzione dell'immagine fotografica dopo il passaggio dei raggi attraverso 12 strati suggerisce che potrebbe essere direttamente collegata all'improvvisa diminuzione della ionizzazione in aria, scoperta così chiaramente da Bragg. Si trovò che effettivamente era così. Si trovò sperimentalmente che l'assorbimento in ogni strato di alluminio era equivalente a quello prodotto da una distanza di  $0.54\text{ cm}$  di aria. Dodici strati corrispondevano, pertanto, a  $6.5\text{ cm}$  di aria. Bragg trovò che i raggi  $\alpha$  dal radio C ionizzano l'aria per una distanza di  $6.7\text{ cm}$  e che la ionizzazione scompare molto rapidamente. Possiamo, allora, concludere che i raggi  $\alpha$  cessano di produrre effetto sulla lastra fotografica alla stessa velocità con cui cessano di ionizzare il gas. Questo è un risultato molto importante e, come vedremo in seguito, suggerisce che l'azione sulla lastra fotografica è dovuta a una ionizzazione dei sali fotografici.

La velocità delle particelle  $\alpha$  da diversi prodotti radioattivi può subito essere calcolata, conoscendo il range massimo in aria dei raggi  $\alpha$  da ogni prodotto. L'ultima è stata determinata sperimentalmente da Bragg. La velocità è espressa in termini di  $V_0$ , la velocità iniziale delle particelle  $\alpha$  dal radio C. I raggi dal radio C sono emessi con una velocità più grande dei raggi da altri prodotti del radio.

Prodotto	Range massimo di particelle $\alpha$ in aria	Velocità delle particelle $\alpha$
Radio	$3\text{ cm}$	$0.82 V_0$
Emanazione	$3.8\text{ o }4.4\text{ cm}$	$0.87\text{ o }0.90 V_0$
Radio A	$4.4\text{ o }3.8\text{ cm}$	$0.90\text{ o }0.87 V_0$
Radio C	$6.7\text{ cm}$	$1.00 V_0$

È difficile determinare dagli esperimenti se il range  $3.8\text{ cm}$  appartiene ai raggi dall'emanazione o dal radio A. La velocità media delle particelle  $\alpha$  è, pertanto,  $0.90 V_0$  e la variazione massima per i prodotti singoli non varia più del 10% dal valore medio.

I risultati di Becquerel, discussi nella sezione 92, ricevono subito una spiegazione dai risultati sopra. Le particelle  $\alpha$ , espulse dal radio in equilibrio radioattivo, hanno tutte range tra 0 e  $6.7\text{ cm}$  di aria. La velocità delle particelle  $\alpha$  che sono in grado di produrre un'immagine fotografica varia tra  $0.64 V_0$  a  $V_0$ . Le particelle che hanno solo un corto range in aria sono proiettate con una velocità inferiore a quella che hanno quelle con un range maggiore. Le prime sono, di conseguenza, più curvate dal campo magnetico. Ci si aspetterà, pertanto, che la curvatura del percorso dei raggi un un campo magnetico uniforme sarà maggiore vicino al radio che a una certa distanza.

**Range dell'azione fosforescente in aria.** Furono eseguiti alcuni esperimenti per vedere se l'azione dei raggi  $\alpha$  nella produzione di luminosità in sostanze con il solfuro di zinco, il platino cianuro di bario e la willemite, cessassero alla stessa distanza dell'azione ionizzante.

Un filo molto attivo fu posto su un piatto removibile, la cui distanza da uno schermo fisso di una sostanza fosforescente poteva essere variata. La distanza alla quale l'azione fosforescente cessava si poteva determinare con buona precisione. Furono poi collocati diversi spessori di alluminio sul filo attivo ed era misurata la corrispondente distanza alla quale la luminosità scompariva. I risultati sono mostrati graficamente in Figura 107, dove le ordinate rappresentano la distanza dello schermo fosforescente dal filo attivo e le ascisse il numero di strati di alluminio, ognuno dello spessore di  $0.00031\text{ cm}$ .

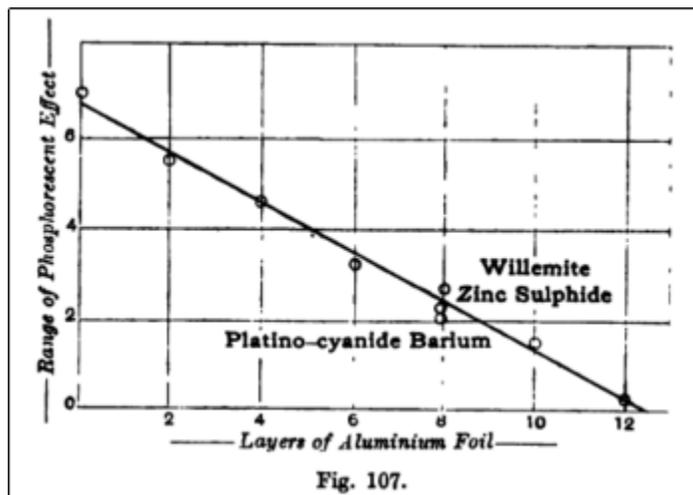


Fig. 107.

Si è visto che la curva che congiunge i punti è una linea retta. Uno spessore di 12.5 assorbita i raggi allo stesso modo di 6.8 cm di aria, cosicché ogni spessore di alluminio corrispondeva a un potere di assorbimento di 54 cm in aria. Per uno schermo di solfuro di zinco, l'azione fosforescente cessava ad una distanza di 6.8 cm in aria, mostrando che i range fotografico e fosforescente dei raggi  $\alpha$  in aria erano praticamente identici.

Gli esperimenti con il platino cianuro di bario e la willemite erano più difficili, perché i raggi  $\beta$  e  $\gamma$  dal filo attivo producevano una luminosità confrontabile con quella prodotta dai raggi  $\alpha$ . Risultati abbastanza concordanti, tuttavia, erano ottenuti introducendo un sottile strato di carta nera tra il filo attivo e lo schermo. Se la luminosità era sensibilmente variata, si concludeva che i raggi  $\alpha$  producevano ancora un effetto e in questo modo il punto di cessazione dell'azione fosforescente poteva essere approssimativamente determinato. Per esempio, con otto spessori sul foglio attivo lo spessore aggiuntivo di aria richiesto per tagliare l'effetto fosforescente dei raggi  $\alpha$  era 2.5 cm per la willemite e 2.1 per il platino cianuro di bario.

La corrispondente distanza per il solfuro di zinco era 2.40 cm, un valore intermedio tra gli altri due.

Poiché otto strati sono equivalenti a 4.3 cm di aria, i range in aria dell'azione fosforescente per solfuro di zinco, platino cianuro di bario e willemite corrispondono rispettivamente a 6.7, 6.8 e 6.4 cm. Le differenze osservate erano probabilmente dovute all'errore sperimentale.

**Discussione dei risultati.** Abbiamo visto che le azioni ionizzante, fosforescente e fotografica dei raggi  $\alpha$  emessi dal radio C cessano dopo l'attraversamento quasi la stessa distanza in aria. Questo è un risultato sorprendente quando si ricorda che la particella  $\alpha$ , dopo il passaggio attraverso questo spessore di aria, possiede ancora una velocità pari almeno al 60% del suo valore iniziale. Assumendo il valore probabile della velocità iniziale della particella  $\alpha$  dal radio C pari a  $2.5 \cdot 10^9 \frac{cm}{s}$ , le azioni ionizzante, fosforescente e fotografica cessano quando la velocità della particella  $\alpha$  va al di sotto di  $1.5 \cdot 10^9 \frac{cm}{s}$ , cioè, una velocità di circa  $\frac{1}{20}$  di quella della luce. La particella possiede ancora quasi il 40% della sua energia iniziale di emissione in questa fase.

Questi risultati mostrano che la proprietà dei raggi  $\alpha$  di produrre ionizzazione nei gas, di produrre luminosità in alcune sostanze e di impressionare una lastra fotografica, cessa quando la velocità della particella  $\alpha$  cade al di sotto di un certo valore fissato che è lo stesso in ogni caso. Sembra ragionevole, tuttavia, supporre che queste tre proprietà dei raggi  $\alpha$  siano attribuibili a una causa comune. L'assorbimento dei raggi  $\alpha$  nei gas è principalmente una conseguenza dell'energia assorbita nella produzione di ioni nel gas. Quando le particelle  $\alpha$  sono completamente assorbite nel gas, è prodotta la stessa quantità totale di ionizzazione, mostrando che l'energia richiesta per produrre ioni è la stessa per tutti i gas. D'altro canto, per una sorgente costante di radiazione, la ionizzazione per unità di volume del gas è approssimativamente proporzionale alla sua densità. Poiché l'assorbimento dei raggi  $\alpha$  nella materia solida è approssimativamente proporzionale alla densità del mezzo assorbente confrontato con l'aria, è probabile che questo assorbimento è pure un risultato dell'energia consumata nella produzione di ioni nella materia solida attraversata e che circa la stessa quantità di energia è richiesta per produrre uno ione nella materia se solida, liquida o gassosa.

È probabile, tuttavia, che la produzione di ioni nel materiale fosforescente e nelle lastre fotografiche cessi a circa la stessa velocità per la quale la particella  $\alpha$  non è più in grado di ionizzare il gas. Da questa ipotesi, allora, i risultati sperimentali ricevono una semplice spiegazione. L'azione dei raggi  $\alpha$  nella produzione dell'effetto fotografico e fosforescente può possibilmente generare radiazione secondaria che influenza gli effetti osservati.

Questa ipotesi è interessante per il collegamento con l'origine della "scintillazione" osservata nel solfuro di zinco e in altre sostanze esposte all'azione dei raggi  $\alpha$ . Questo effetto è attribuito da Becquerel alla frattura dei cristalli per il bombardamento delle particelle  $\alpha$ . Questi risultati, tuttavia, mostrano che dobbiamo guardare più in profondità per la spiegazione di questo fenomeno. L'effetto è principalmente dovuto alla produzione di ioni nel materiale fosforescente e non al bombardamento diretto, perché abbiamo visto che la particella  $\alpha$  non produce alcuna scintillazione anche quando

possiede una grande quantità di energia cinetica. Non sembra improbabile che le scintillazioni prodotte dai raggi  $\alpha$  debbano essere attribuite alla ricombinazione degli ioni che sono prodotti dalla particella  $\alpha$  nella massa cristallina. È difficile mostrare come questa ionizzazione derivi dalla rottura dei cristalli.

Questa stretta connessione tra le azioni fosforescenti e fotografiche dei raggi  $\alpha$  e la loro proprietà di produrre ioni, fa nascere la domanda se le azioni fosforescenti e fotografiche in generale non possano, in primo luogo, essere dovuti alla produzione di ioni nelle sostanze.

**Curva di ionizzazione per i raggi  $\alpha$  dal radio C.** Mr McClung, lavorando nel laboratorio di chi scrive, ha recentemente determinato la ionizzazione relativa per unità di cammino delle particelle  $\alpha$  emesse dal radio C, usando il metodo impiegato da Bragg e discusso nella sezione 104. Un filo attivo, esposto per parecchie ore all'emanazione del radio, fu usato come sorgente di raggi. Le particelle  $\alpha$  erano omogenee, poiché lo strato della materia radioattiva era estremamente sottile.

La relazione tra la ionizzazione osservata sulla sezione d'urto di uno stretto cono di raggi e la distanza dalla sorgente dei raggi è mostrata in Figura 108.

La curva presenta le stesse peculiarità di quella data da Bragg per un sottile strato di materia di un tipo. La ionizzazione della particella  $\alpha$  per unità di percorso aumenta lentamente per circa 4 cm. Vi è poi un più rapido aumento prima che la particella  $\alpha$  cessi di ionizzare il gas per poi rapidamente diminuire. La ionizzazione non appare finire così all'improvviso, poiché vi è una correzione da applicare per l'angolo sotteso dal cono di raggi  $\alpha$ . Il range massimo dei raggi  $\alpha$  in aria era 6.7 cm, un valore in accordo con quello ottenuto da Bragg con misure sul range dei raggi dal radio.

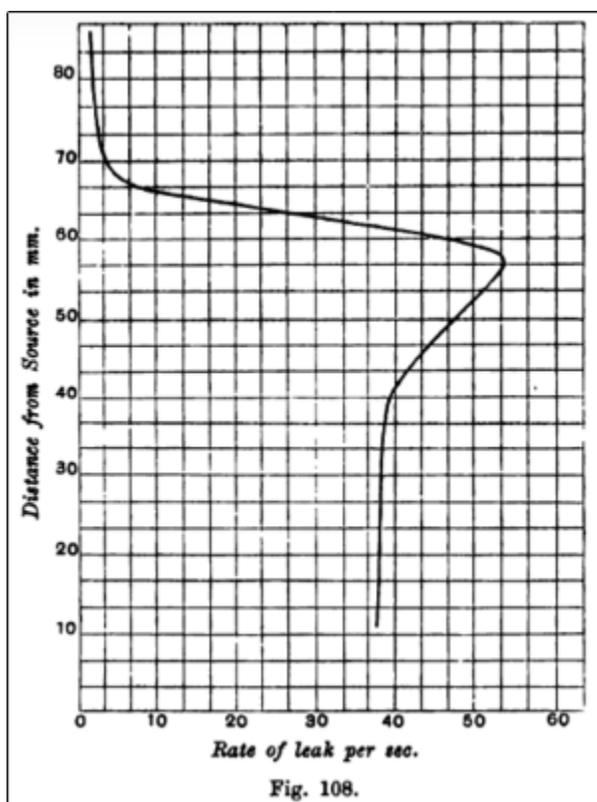


Fig. 108.

Questi risultati mostrano che la ionizzazione per unità di percorso della particella  $\alpha$  aumenta prima lentamente e poi rapidamente al diminuire della velocità finché i raggi cessano di ionizzare il gas.

**Energia richiesta per produrre uno ione.** Dai risultati precedenti si può facilmente dedurre l'energia richiesta per produrre uno ione per collisione della particella  $\alpha$  con le molecole di gas. Le particelle  $\alpha$ , emesse dal radio stesso, sono inizialmente scagliate con una velocità  $0.88V_0$ , dove  $V_0$  è la velocità iniziale di emissione delle particelle  $\alpha$  dal radio C. Le particelle  $\alpha$  cessano di ionizzare il gas a una velocità di  $0.64V_0$ . Da ciò si può subito dedurre che lo 0.48 dell'energia totale della particella  $\alpha$ , sparata dal radio, è assorbita quando cessa di ionizzare il gas. Assumendo che l'effetto di riscaldamento del radio alla sua minima attività - 25 grammo-calorie per ora per grammo - è una misura dell'energia cinetica delle particelle  $\alpha$  emesse, si può calcolare che l'energia cinetica di ogni particella  $\alpha$  è  $4.7 \cdot 10^{-6}$  erg. La quantità di energia assorbita quando la particella  $\alpha$  cessa di ionizzare il gas è  $2.3 \cdot 10^{-6}$  erg. Assumendo che questa energia è utilizzata nella ionizzazione e ricordando che la particella  $\alpha$  dallo stesso radio produce 86000 ioni nel suo cammino (sezione 252), l'energia media richiesta per produrre uno ione è  $2.7 \cdot 10^{-11}$  erg. Ciò è equivalente all'energia acquistata da uno ione in moto libero tra due punti il cui potenziale differisce di 24 V.

Townsend trovò che si producevano nuovi ioni da un elettrone per una corrispondente differenza di potenziale di 10 V. Stark, da altri dati, ottenne un valore di 45 V, mentre Langevin considera come valore medio 60 V. Il valore ottenuto da Rutherford e McClung per ionizzazione da parte dei raggi X era 175 V ed è probabilmente troppo alto.

**Trasformazioni senza raggi.** Abbiamo visto che le particelle  $\alpha$  dalle sostanze radioattive sono emesse con una velocità media non superiore al 30% della velocità minima, al di sotto della quale le particelle  $\alpha$  non sono in grado di produrre azione ionizzante, fotografica o fosforescente. Una tale conclusione suggerisce che la proprietà delle sostanze radioattive di emettere particelle  $\alpha$  è stata rivelata perché esse erano proiettate un poco al di sopra di questa velocità minima. Una simile disintegrazione della materia può avere luogo in altre sostanze ad un tasso molto maggiore che nell'uranio senza produrre effetto elettrico, purché le particelle  $\alpha$  siano emesse al di sotto della velocità critica.

La particella  $\alpha$ , in media, produce circa 100000 ioni nel gas prima di essere assorbita, così che l'effetto elettrico osservato è circa 100000 volte maggiore di quella dovuto alla carica trasportata dalla sola particella  $\alpha$ .

Non è improbabile che i numerosi prodotti senza raggi che sono stati osservati possano subire una disintegrazione con caratteristiche simili ai prodotti che ovviamente emettono raggi  $\alpha$ . Nel prodotto senza raggi la particella  $\alpha$  può essere espulsa con una velocità minore di  $1.5 \cdot 10^9 \frac{cm}{s}$  e non può produrre molto effetto elettrico.

Queste considerazioni hanno un'importante rilevanza sulla questione se la materia è in generale radioattiva. La proprietà di emettere particelle  $\alpha$  al di sopra della velocità critica può essere una proprietà solo di una speciale classe di sostanze e non della materia in generale. Nello stesso tempo i risultati suggeriscono che la materia comune può subire una trasformazione accompagnata dall'espulsione di particelle  $\alpha$  ad un tasso molto maggiore di quello mostrato dall'uranio, senza produrre una apprezzabile azione elettrica o fotografica.

## APPENDICE B

### Minerali radioattivi

Quelle sostanze minerali naturali che possiedono evidenti proprietà radioattive sono state trovate contenere o uranio o torio, essendo uno di questi elementi sempre presente in quantità sufficiente da permettere facilmente la sua separazione e identificazione chimica con i comuni metodi analitici<sup>72</sup>.

Un grande numero di minerali di uranio e torio sono ad oggi conosciuti, ma essi sono per la maggior parte trovati con moderazione e alcuni di essi sono stati osservati solo in singole località. Le principali fonti commerciali di uranio sono l'uranite, la gummite e la carnotite, mentre il torio è ottenuto quasi esclusivamente dalla monazite.

Rutherford e Soddy (*Phil. Mag.* 65, 561, 1903), posero per primi l'attenzione sull'importante fatto che le relazioni tra le varie sostanze radioattive e altri elementi si possono meglio determinare dallo studio dei minerali naturali nei quali questi elementi si trovano, poiché questi minerali rappresentano mescolanze estremamente antiche, che sono rimaste più o meno indisturbate per un tempo quasi infinito. Quanto a questi materiali, tuttavia, è della massima importanza utilizzare i dati forniti dalla geologia e mineralogia, dai quali è spesso possibile determinare l'età relativa delle diverse sostanze con almeno un discreto grado di approssimazione. Allora, per esempio, se un certo minerale è presente come costituente principale di una roccia di antico periodo geologico, si può assumere in modo sicuro che la sua età è maggiore di quella di un minerale simile o diverso che è presente in formazioni successive. È, tuttavia, del tutto evidente che questi minerali che sono ovviamente prodotti dalla decomposizione e alterazione dei minerali originari, attraverso l'azione di acqua percolante e altri agenti che operano dalla superficie verso il basso, sono meno antichi dei minerali originari dai quali sono stati generati. Attraverso l'applicazione di queste considerazioni sarà, in generale, possibile ordinare i vari minerali in ordine alla loro probabile età.

Il minerale di uranio più familiare e ampiamente noto è l'uraninite, comunemente detta pechblenda, che consiste essenzialmente di biossido di uranio ( $UO_2$ ), triossido di uranio ( $UO_3$ ) e ossido di piombo ( $PbO$ ), presente in proporzioni variabili. Le uraninite si possono distinguere come primarie, cioè quelle presenti come costituente primario di pegmatiti e graniti grezzi, e secondarie, quando sono presenti in vene metallifere associate con solfuro di ferro, piombo, rame, nickel, ferro e zinco. Le prime varietà sono frequentemente del tutto cristalline, contengono una grande parte di terre rare e elio e hanno un peso specifico più alto delle ultime, che sono sempre massive e mammellonari.

Le seguenti sono le più note località nelle quali sono presenti le uraninite:

- (1) Nord Carolina, USA (specialmente nelle contee di Mitchell e Yancey). L'uraninite è trovata in un sedimento grezzo di pegmatite che è estratta dalla mica. Il sedimento di feldspato è considerevolmente decomposto dall'azione di acque meteoriche e gas e la stessa uraninite è largamente alterata nei minerali secondari gummite e uranofane dagli stessi agenti naturali. Tra i minerali primari associati vi sono allanite, zirconio, columbite, samarschite, fergusonite e monazite, mentre i minerali secondari includono gummite, torogummite, uranofane, autunite, fosforanilite, hatchettolite e carfolite. Il periodo geologico di questa formazione è difficile da stabilire con certezza, ma è indicato come Archeano, o possibilmente corrispondere con il vicino Ordoviciano o Permiano.
- (2) Connecticut, U.S.A. Le località meglio note sono Glastonbury, dove l'uraninite si trova in cave di feldspato e Branchville, dove è presente in un granito albitico. Entrambe queste località hanno fornito bei cristalli. Il periodo geologico probabilmente corrisponde al vicino Ordoviciano e Carbonifero ed è dichiarato essere certamente Post-Cambriano e Pre-Triassico. Tra i minerali associati vi sono (primario) columbite, (secondario) torbenite e autunite.
- (3) Norvegia meridionale, particolarmente nei dintorni di Moss. Qui è presente l'uraninite nell'augite-sienite e pegmatite. Le varietà trovate sono note come cleveite e broggerite e tra i minerali primari associati vi sono ortite, fergusonite, monazite e torite. Il periodo è dichiarato essere Post-Devoniano.
- (4) Contea di Llano, Texas. La varietà di uraninite nota come nivenite è qui presente in pegmatite quarzosa, associata con i minerali primari gadolinite, allanite e fergusonite e i secondari cirtolite, yttrialite, gummite e torogummite.

L'uraninite secondaria è trovata a Johanngeorgenstadt, Marienberg e Schneeberg in Sassonia, a Joachimsthal e Pribam in Boemia, a Cornwall in Inghilterra e a Black Hawk, Colorado e nelle Black Hills, Sud Dakota, negli Stati Uniti. L'esatto

---

<sup>72</sup>Un'apparente eccezione è stata osservata da Danne nel caso di certi minerali di piombo che si trovano in particolari condizioni a d'Isay-l'Évêque, Francia.

periodo geologico della maggior parte di questi secondari presenti è alquanto incerto, ma essi sono senza dubbio molto posteriori ai primari prima ricordati.

Come questione di interesse generale, l'analisi della tipica uraninite primaria (No. 1) e secondaria (No. 2) è data qui sotto<sup>73</sup>:

Sp. Gr.	No. 1	No. 2
	Glastonbury, Conn.	Johanngeorgenstadt, Sassonia
	9.59	6.89
<i>UO<sub>3</sub></i>	26.48	60.05
<i>UO<sub>2</sub></i>	57.43	22.33
<i>ThO<sub>2</sub></i>	9.79	-
<i>CeO<sub>2</sub></i>	0.25	-
<i>La<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0.13	-
<i>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0.20	-
<i>PbO</i>	3.26	6.39
<i>CaO</i>	0,08	1.00
<i>He</i>	indef.	indef.
<i>He<sub>2</sub>O</i>	0.61	3.17
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0.40	0.21
<i>SiO<sub>2</sub></i>	0.25	0.50
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	-	0.20
<i>Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	-	0.75
<i>CuO</i>	-	0.17
<i>MnO</i>	-	0.09
<i>MgO</i>	-	0.17
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	-	0.31
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	-	0.06
<i>SO<sub>3</sub></i>	-	0.19
<i>As<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	-	2.34
Insolubile	0.70	-

L'elenco seguente comprende i più importanti minerali radioattivi, con le loro approssimate composizioni chimiche e alcune note sulla loro presenza e probabile origine.

<sup>73</sup>Hillebrand, Am. J. Sci. 40, 384 (1890); ibid. 42, 390, (1891)

Nome	Composizione	Note
Uraninite	Ossidi di uranio e piombo. Di solito	Presente come costituente primario di
Cleveite	contengono torio, altre terre rare ed	rocce e secondario in vene con solfuri
Broggerite	elio. Uranio 50 – 80%	metalliferi
Nivenite	Torio 0 – 10%	
Pechblenda		
Gummitte	$(Pb, Ca) U_3SiO_{12} \cdot 6H_2O$ ? Uranio 50 – 65%	Un prodotto alterazione dell'uraninite. Formato dall'azione di acque percolanti
Uranofane	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 6H_2O$ Uranio	Un prodotto alterazione dell'uraninite
Uranotile	44 – 56%	tramite gummitte
Carnotite	Un vanadato di uranio e potassio Uranio 42 – 51%	Presente come minerale secondario che impregna una arenaria porosa e sedimentaria. Trovato in Colorado e Utah
Uranosferite	$Bi_2O_3 \cdot 2UO_3 \cdot 3H_2O$ Uranio 41%	Un prodotto alterazione di altri minerali di uranio
Torbernite	$CuO \cdot 2UO_3 \cdot P_2O_5 \cdot 8H_2O$	“ “
Cuprouranite	Uranio 44 – 51%	“ “
Autunite	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot P_2O_5 \cdot 8H_2O$	“ “
Calciouranite	Uranio 45 – 51%	“ “
Uranocircite	$BaO \cdot 2UO_3 \cdot 2P_2O_5 \cdot 8H_2O$ Uranio 46%	“ “
Fosforuranilite	$3UO_3 \cdot P_2O_5 \cdot 6H_2O$ Uranio 58 – 64%	“ “
Zunerite	$CuO \cdot 2UO_3 \cdot As_2O_5 \cdot 8H_2O$ Uranio 49%	“ “
Uranospinite	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot As_2O_5 \cdot 8H_2O$ Uranio 49%	“ “
Walpurgite	$5Bi_2O_3 \cdot 3UO_3 \cdot As_2O_5 \cdot 12H_2O$ Uranio 16%	“ “
Torogummitte	$UO_3 \cdot 3ThO_2 \cdot 3SiO_2 \cdot 6H_2O$ ? Uranio 41%	Una varietà di gummitte
Torite	$ThSiO_4$	Un costituente primario di sedimenti di pegmatite
Orangite	Uranio 1 – 10%	
Uranotorite	Ossido di Torio 48 – 71%	
Torianite	Ossido di Torio, uranio, terre rare e piombo. Contiene una parte relativamente grande di elio. Uranio 9 – 10%	Presente come costituente primario di un sedimento di pegmatite in Ceylon. Età geologica probabilmente Archeano
Samarskite	Niobato e tantalato di terre rare Uranio 8 – 10%	Costituente primario di sedimenti di pegmatite
Fergusonite	Metaniobato e tantalato di terre rare Uranio 1 – 6%	“ “
Euxenite	Niobato e titanato di terre rare Uranio 3 – 10%	“ “
Monazite	Fosfato di terre rare, soprattutto cerio Uranio 0.3 – 0.4%	“ “