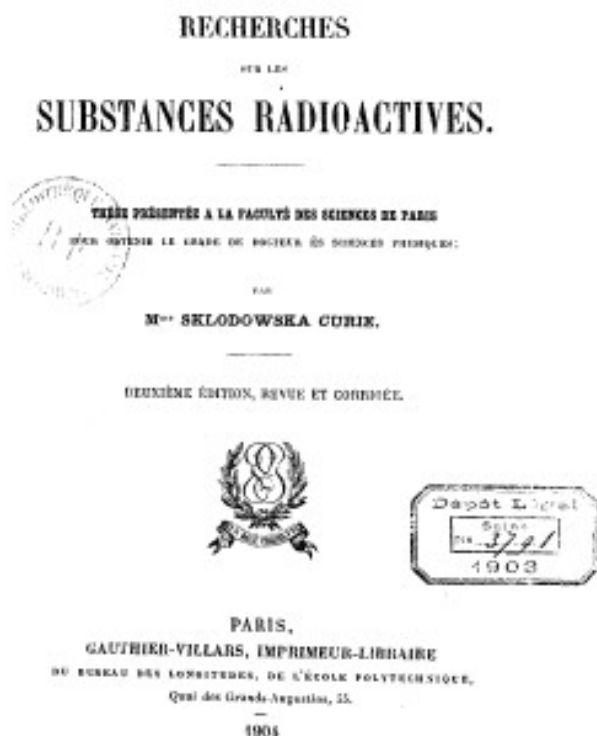


# RICERCHE SULLE SOSTANZE RADIOATTIVE

TESTO PRESENTATO ALLA FACOLTÀ DI SCIENZE DI PARIGI PER L'OTTENIMENTO  
DEL GRADO DI DOTTORE IN SCIENZE FISICHE

di MADAME SKLODOWSKA CURIE  
Parigi - Gauthier-Villar - 1904  
seconda edizione, rivista e corretta



Testo tradotto dal francese (presso BNF Parigi) *Recherches sur les Substances Radioactives* da Gianluigi Trivia:  
gtrivia@scienzaatscuola.it

## INTRODUZIONE

Il presente lavoro ha come scopo quello di esporre le ricerche che compio da più di 4 anni sulle sostanze radioattive. Ho cominciato queste ricerche con uno studio dell'irraggiamento uranico che è stato scoperto da M. Becquerel. I risultati ai quali questo lavoro mi conduce sembrano aprire una via così interessante, che lasciando i suoi lavori in treno M. Curie si unì a me, e riunimmo i nostri sforzi per ottenere un risultato positivo nell'estrazione di nuove sostanze radioattive e continuare i loro studi.

Dall'inizio delle nostre ricerche abbiamo creduto di dover prestare campioni delle sostanze scoperte e da noi preparati a qualche fisico, in primo luogo a M. Becquerel, a colui che è dovuta la scoperta dei raggi uranici.

Abbiamo pure agevolato per noi stessi le ricerche fatte da altri sulle nuove sostanze radioattive. In seguito alle nostre prime pubblicazioni, M. Giesel in Germania si mise pure a preparare queste sostanze e ne prestò dei campioni a numerosi scienziati tedeschi. In seguito tali sostanze furono messe in vendita in Francia e in Germania, e l'argomento, assumendo sempre maggiore importanza, diede luogo a un movimento scientifico, di modo che sono comparse numerose Memorie e appaiono continuamente sui corpi radioattivi, principalmente per gli stranieri. I risultati

dei diversi lavori francesi e stranieri sono necessariamente ingarbugliati, come per tutti i temi di studio nuovi e in via di formazione. L'aspetto della questione si modifica, per così dire, di giorno in giorno.

Tuttavia, dal punto di vista chimico, un punto è definitivamente stabilito: l'esistenza di un nuovo elemento fortemente radioattivo: il radio. La preparazione del cloruro di radio puro e la determinazione del peso atomico del radio costituiscono la parte più importante del mio lavoro personale. Allo stesso tempo questo lavoro aggiunge ai corpi semplici proprietà molto curiose, un nuovo metodo di ricerche chimiche viene stabilito e giustificato. Questo metodo, basato sulla radioattività, considerato come una proprietà atomica della materia, è precisamente quello che ci ha permesso, a M. Curie e a me, di scoprire l'esistenza del radio.

Se, dal punto di vista chimico, la questione che ci siamo inizialmente posti si può considerare come risolta, lo studio delle proprietà fisiche delle sostanze radioattive è in piena evoluzione. Certi punti importanti sono stati stabiliti, ma un gran numero di conclusioni portano ancora il carattere della provvisorietà. Ciò non è sorprendente, se si considera la complessità dei fenomeni ai quali dà luogo la radioattività e le differenze che esistono tra le diverse sostanze radioattive. Le ricerche di diversi fisici che studiano queste sostanze vengono costantemente a incontrarsi e ad accrescersi. Cercando di conformarmi allo scopo preciso di questo lavoro e di esporre soprattutto le mie ricerche, sono stato obbligato ad esporre nello stesso tempo i risultati di altri lavori la cui conoscenza è indispensabile.

Ho d'altronde desiderato fare di questo lavoro una Memoria d'insieme sullo stato attuale della problematica.

Ho eseguito questo Lavoro nei laboratori della Scuola di Fisica e di Chimica industriale della città di Parigi con l'autorizzazione di Shutzenberger, il compianto Direttore di questa Scuola, e di M. Lauth, il Direttore attuale. Tengo a esprimere qui tutta la mia riconoscenza per la benevola ospitalità che ho ricevuto in questa Scuola.

## STORIA

La scoperta dei fenomeni della radioattività si riconduce alle ricerche eseguite dopo la scoperta dei raggi Roentgen sugli effetti fotografici delle sostanze fosforescenti e fluorescenti.

I primi tubi produttori di raggi Roentgen erano tubi senza anticatodo metallico. La sorgente di raggi Roentgen si trovava sulla parete di vetro colpita dai raggi catodici; nello stesso tempo questa parete era fortemente fluorescente. Ci si poteva allora chiedere se l'emissione di raggi Roentgen non accompagnava necessariamente la produzione della fluorescenza, qualunque fosse la causa di quest'ultima. Questa idea è stata enunciata da subito da M. Henri Poincaré<sup>1</sup>.

Poco tempo dopo, M. Henry annunciò di aver ottenuto impressioni fotografiche attraverso della carta nera con solfuro di zinco fosforescente<sup>2</sup>. M. Niewenglowski ottenne lo stesso fenomeno con del solfuro di calcio esposto alla luce<sup>3</sup>. Infine, M. Troost ottenne forti impressioni fotografiche con solfuro di zinco esagonale artificiale fosforescente agente attraverso carta nera e un grosso cartone<sup>4</sup>.

Le esperienze che sono state citate non hanno potuto essere riprodotte malgrado i numerosi tentativi fatti a questo riguardo. Non si può quindi considerare come provato che il solfuro di zinco e il solfuro di calcio siano in grado di emettere, sotto l'azione della luce, radiazioni invisibili che attraversano la carta nera e agiscono sulle lastre fotografiche.

M. Becquerel ha eseguito esperienze analoghe sui sali di uranio alcuni dei quali alcuni sono fluorescenti<sup>5</sup>. Ottenne impressioni fotografiche attraverso carta nera con il bisolfato di uranile e di potassio.

M. Becquerel credette dapprima che questo sale, che è fluorescente, si comportasse come il solfuro di zinco e il solfuro di calcio nelle esperienze di MM. Henry, Niewenglowski e Troost. Ma il seguito delle sue esperienze mostrò che il fenomeno osservato non era per nulla collegato alla fluorescenza. Non è necessario che venga illuminato; inoltre, l'uranio e tutti i suoi composti, fluorescenti o meno, agiscono allo stesso modo, e l'uranio metallico è il più attivo. M. Becquerel

---

1 Revue générale des Sciences, 30 gennaio 1896

2 Comptes rendus, t. CXXII, p. 312

3 Comptes rendus, t. CXXII, p. 386

4 Comptes rendus, t. CXXII, p. 564

5 BECQUEREL, Comptes rendus, 1896 (numerose Note)

trovò poi che ponendo i composti dell'uranio nell'oscurità completa, continuavano ad impressionare le lastre fotografiche attraverso carta nera per anni. M. Becquerel ammise che l'uranio e i suoi composti emettono radiazioni particolari: raggi uranici. Provò che questi raggi possono attraversare schermi metallici sottili e che scaricavano i corpi elettrizzati. Compì anche esperienze dalle quali concluse che i raggi uranici subiscono la riflessione, la rifrazione e la polarizzazione.

I lavori di altri fisici (Elster e Geitel, lord Kelvin, Schmidt, Rutherford, Beattie e Smoluchowski) hanno confermato ed esteso i risultati delle ricerche di M. Becquerel, salvo per quanto attiene la riflessione, la rifrazione e la polarizzazione dei raggi uranici, i quali, da questo punto di vista, si comportano come i raggi Roentgen, come è stato riconosciuto da M. Rutherford dapprima, e in seguito dallo stesso M. Becquerel.

# Capitolo 1

## Radioattività dell'Uranio e del Torio. Minerali Radioattivi.

### Raggi di Becquerel

I raggi uranici, scoperti da M. Becquerel, impressionano le lastre fotografiche al riparo dalla luce; possono attraversare tutte le sostanze solide, liquide e gassose, a condizione che lo spessore sia sufficientemente piccolo; attraversano i gas, li rendono debolmente conduttori di elettricità<sup>1</sup>.

Queste proprietà dei composti d'uranio non sono dovute ad alcuna causa eccitatrice conosciuta. L'irraggiamento sembra spontaneo; non diminuisce di intensità quando si conservano i composti di uranio nella completa oscurità durante gli anni; non si tratta quindi di una fosforescenza particolare prodotta dalla luce.

La spontaneità e la costanza dell'irraggiamento uranico si presentano come un fenomeno fisico del tutto straordinario. M. Becquerel ha conservato un pezzo di uranio per parecchi anni nell'oscurità, e ha constatato che al termine di questo tempo l'azione sulla lastra fotografica non era sensibilmente variata. MM. Elster e Geitel hanno compiuto una analoga esperienza e hanno pure trovato che l'azione era costante<sup>2</sup>.

Ho misurato l'intensità dell'irraggiamento dell'uranio utilizzando l'azione di tale irraggiamento sulla conducibilità dell'aria. Il metodo di misura sarà esposto più avanti. Ho pure ottenuto valori che provano la costanza dell'irraggiamento nei limiti di precisione delle esperienze, cioè entro il 2-3 %<sup>3</sup>.

Si utilizza per queste misure una piastra metallica ricoperta da uno strato di uranio in polvere; questa piastra non era conservata nell'oscurità, in quanto questa condizione si era mostrata priva di importanza secondo gli sperimentatori citati in precedenza. Il numero delle misure effettuate con questa lastra è molto grande, e attualmente queste misure riguardano un intervallo di 5 anni. Furono compiute altre ricerche per riconoscere se altre sostanze potevano agire come i composti dell'uranio.

M. Schmidt pubblicò per primo che il torio e i suoi composti possiedono analoghe proprietà<sup>4</sup>. Un lavoro analogo fatto nello stesso tempo mi ha fornito lo stesso risultato. Ho pubblicato questo lavoro, non conoscendo ancora la pubblicazione di M. Schmidt<sup>5</sup>.

Diremo che l'uranio, il torio e i loro composti emettono raggi di Becquerel. Ho chiamato radioattive le sostanze che danno luogo ad una emissione di questo tipo<sup>6</sup>. Questo nome è stato poi generalmente adottato.

Tramite i loro effetti fotografici ed elettrici i raggi di Becquerel sono confrontabili con i raggi Roentgen. Essi hanno pure, come questi ultimi, la capacità di attraversare tutta la materia. Ma il loro potere di penetrazione è estremamente diverso: i raggi dell'uranio e del torio sono arrestati da qualche millimetro di materia solida e non possono percorrere nell'aria una distanza superiore a qualche centimetro; è così per la maggior parte dell'irraggiamento.

I lavori di diversi fisici, e, in primo luogo, di M. Rutherford, hanno mostrato che i raggi di Becquerel non subiscono né riflessione regolare, né rifrazione, né polarizzazione<sup>7</sup>. Il piccolo potere di penetrazione dei raggi uranici e torici porta ad assimilarli ai raggi secondari che sono prodotti dai raggi Roentgen, il cui studio è stato eseguito da M. Sagnac<sup>8</sup>, piuttosto che agli stessi raggi Roentgen.

D'altra parte, si può cercare di paragonare i raggi di Becquerel ai raggi catodici che si propagano nell'aria (raggi di Lenard). Si sa oggi che questi diversi confronti sono tutti legittimi.

1 BECQUEREL, Comptes rendus, 1896 (numerose Note)

2 Becquerel, Comptes rendus, t. CXXVIII, p. 771. - Elster e Geitel, Beibl., t. XXI, p. 455

3 Madame Curie, Revue générale des Sciences, gennaio 1899

4 Schmidt, Wied. Ann., t. LXV, p. 141

5 Madame Curie, Comptes rendus, aprile 1898

6 Curie e Madame Curie, Comptes rendus, 19 luglio 1898

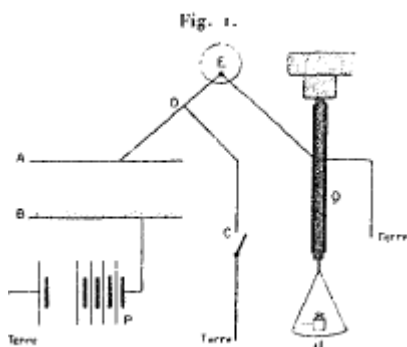
7 Rutherford, Phil. Mag., gennaio 1899

8 Sagnac, Comptes rendus, 1897, 1898, 1899 (parecchie Note)

## Misura dell'intensità dell'irraggiamento.

Il metodo impiegato consiste nel misurare la conducibilità acquisita dall'aria sotto l'azione di sostanze radioattive; questo metodo ha il vantaggio di essere rapido e di fornire dei valori che si possono confrontare tra loro.

L'apparecchiatura che ho utilizzato per questo effetto si compone essenzialmente di un condensatore a piastre AB (fig. 1). La sostanza attiva finemente polverizzata è stesa sulla piastra B; essa rende conduttrice l'aria tra le piastre. Per misurare questa conduttività, si porta la piastra B a un potenziale elevato, collegandola a uno dei poli di una batteria di un piccolo accumulatore P1, il cui altro polo è posto a terra. La piastra A è mantenuta al potenziale di terra dal filo CD, si stabilisce una corrente elettrica tra le due piastre. Il potenziale della piastra A è indicato da un elettrometro E. Se si interrompe in C il contatto con la terra, la piastra A si carica, e questa carica fa deviare l'elettrometro. La velocità della deviazione è proporzionale all'intensità della corrente e può servire a misurarla.



Ma è preferibile fare questa misura compensando la carica assunta dalla piastra A, in modo da mantenere l'elettrometro a zero. Le cariche, che qui si considerano, sono estremamente piccole; esse possono essere compensate per mezzo di un quarzo piezoelettrico Q, la cui armatura è collegata alla piastra A, e l'altra è posta a terra. Si sottopone la lamina di quarzo ad una trazione nota prodotta da pesi posti su una piastra  $\pi$ ; questa trazione è stabilita progressivamente e tende a liberare progressivamente una quantità nota di elettricità durante il tempo di misura. L'operazione può essere regolata in modo da avere in ogni istante una compensazione tra la quantità di elettricità che

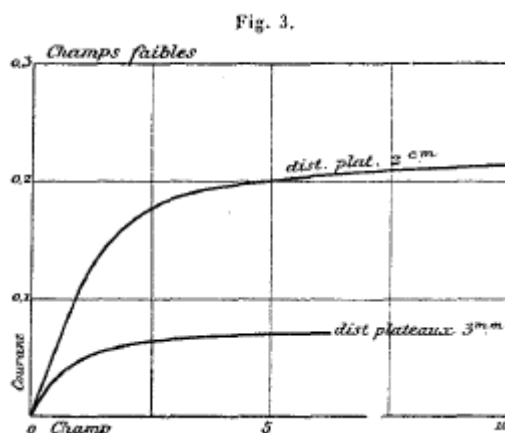
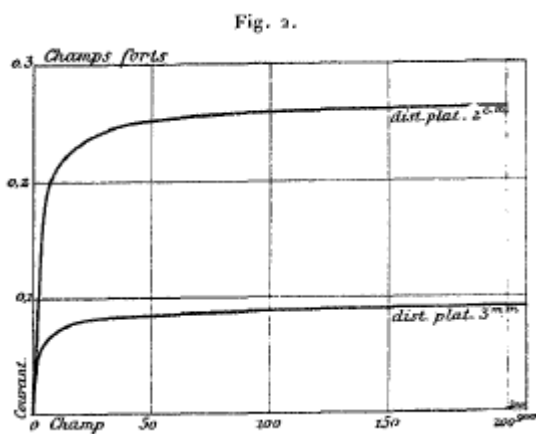
attraversa il condensatore e quella di segno contrario che fornisce il quarzo [Si giunge molto facilmente a questi risultati sostenendo i pesi manualmente e facendoli pesare progressivamente sulla piastra  $\pi$ , e ciò in modo da mantenere l'immagine dell'elettrometro allo zero. Con un poco di abitudine si acquista una manualità che consente una buona precisione necessaria alla riuscita di questa operazione. Questo metodo di misura di deboli correnti è stato descritto da M. J. Curie nella sua tesi.]. Si può così misurare in valore assoluto la quantità di elettricità che attraversa il condensatore per un tempo stabilito, cioè l'intensità di corrente. La misura è indipendente dalla sensibilità dell'elettrometro.

Effettuando un certo numero di misure di questo tipo, si vede che la radioattività è un fenomeno suscettibile di misura con una certa precisione. Essa varia poco con la temperatura ed è appena influenzata dalle oscillazioni della temperatura ambiente; non è influenzata dall'illuminamento della sostanza attiva. L'intensità di corrente che attraversa il condensatore aumenta con la superficie delle piastre. Assegnati un condensatore e una sostanza, la corrente aumenta con la differenza di potenziale tra le piastre, con la pressione del gas che riempie il condensatore e con la distanza delle piastre (purché non sia troppo grande rispetto al diametro). Tuttavia, per grandi differenze di potenziale, la corrente tende verso un valore limite che è praticamente costante.

È la corrente di saturazione o corrente limite. Analogamente per una distanza grande tra le piastre, la corrente non varia più molto con questa distanza. È la corrente ottenuta in queste condizioni che è stata presa come misura di radioattività nelle mie ricerche, essendo il condensatore posto in aria a pressione atmosferica.

Ecco, a titolo d'esempio, delle curve che rappresentano l'intensità di corrente in funzione del campo medio stabilito tra le piastre per due distanze tra di esse differenti. La piastra B era ricoperta di uno strato sottile di uranio metallico polverizzato; la piastra A, collegata all'elettrometro, era munita di un anello di guardia.

La figura 2 mostra che l'intensità di corrente diviene costante per differenze di potenziale elevate tra le piastre. La figura 3 rappresenta le stesse curve su un'altra scala, e comprende solo i risultati relativi a piccole differenze di potenziale. All'inizio, la curva è rettilinea; il quoziente tra l'intensità di corrente e la differenza di potenziale è costante per le basse tensioni, e rappresenta la conduttanza iniziale tra le piastre.



Si possono quindi distinguere due importanti costanti caratteristiche del fenomeno osservato: 1° la conduttanza iniziale per piccole differenze di potenziale; 2° la corrente limite per grandi differenze di potenziale. È la corrente limite che è stata adottata come misura della radioattività.

Oltre alla differenza di potenziale che si stabilisce tra le piastre, esiste tra queste ultime una forza elettromotrice di contatto, e queste due sorgenti di corrente sommano i loro effetti; è per questo che il valore assoluto dell'intensità di corrente cambia con il segno della differenza di potenziale esterna. Tuttavia, per grandi differenze di potenziale, l'effetto della forza elettromotrice di contatto è trascurabile, e l'intensità di corrente è allora la stessa, qualunque sia il verso del campo tra le piastre.

Lo studio della conducibilità dell'aria e di altri gas sottoposti all'azione dei raggi Becquerel è stato effettuato da numerosi fisici<sup>1</sup>. Uno studio molto completo dell'argomento è stato pubblicato da M. Rutherford<sup>2</sup>.

Le leggi della conducibilità prodotta nei gas dai raggi di Becquerel sono le stesse di quelle trovate con i raggi Roentgen. Il meccanismo del fenomeno sembra essere lo stesso in entrambi i casi. La teoria della ionizzazione dei gas per effetto dei raggi Roentgen o Becquerel rende molto bene conto dei fatti osservati. Questa teoria non verrà qui esposta. Ricorderò solo i risultati ai quali essa porta:

1. Il numero di ioni prodotti per secondo nel gas è proporzionale all'energia dell'irraggiamento assorbito dal gas;
2. Per ottenere la corrente limite relativa a un irraggiamento dato, bisogna, da una parte, fare assorbire integralmente questo irraggiamento al gas, impiegando una massa assorbente sufficiente; dall'altra parte, bisogna utilizzare per la produzione della corrente tutti gli ioni creati stabilendo un campo elettrico molto intenso affinché il numero di ioni che si ricombinano divenga una frazione insignificante del numero totale di ioni prodotti nello stesso tempo, che sono quasi tutti trasportati dalla corrente e portati agli elettrodi. Il campo elettrico medio necessario all'ottenimento di questo risultato è tanto più elevato quanto più intensa è la ionizzazione.

Dalle ricerche recenti di M. Townsend, il fenomeno è più complesso quando la pressione del gas è piccola. La corrente sembra dapprima tendere verso un valore limite costante all'aumentare della differenza di potenziale; ma, a partire da una certa differenza di potenziale, la corrente ricomincia a crescere con il campo, e con una rapidità molto grande. M. Townsend ammette che questo accrescimento è dovuto ad una ionizzazione nuova prodotta dagli ioni stessi quando, sotto l'effetto del campo elettrico, assumono una velocità sufficiente affinché una molecola di gas, incontrata da uno di questi proiettili, si trovi divisa tra i suoi ioni costituenti. Un campo elettrico intenso e una pressione debole favoriscono questa ionizzazione dovuta agli ioni già presenti, e, appena questa comincia a prodursi, l'intensità di corrente cresce costantemente con il campo medio tra le piastre<sup>3</sup>. La corrente limite non si potrà ottenere se non con cause ionizzanti, la cui intensità non superi un certo valore, di modo che la saturazione corrisponde a campi per i quali la

<sup>1</sup> Becquerel, Comptes rendus, t. CXXIV, p. 800, 1897. - Kelvin, Brattle e Smolan, Nature, t. LVI, 1897. - Beattie e Smoluchowski, Phil. Mag., t. XLIII, p. 418

<sup>2</sup> Rutherford, Phil. Mag., gennaio 1899

<sup>3</sup> Townsend, Phil. Mag., 6a serie, t. I, p. 198

ionizzazione per urto degli ioni non può ancora avere luogo. Questa condizione si trova realizzata nelle mie esperienze.

L'ordine di grandezza delle correnti di saturazione che si ottengono con i composti dell'uranio è di  $10^{-11}$  ampere per un condensatore le cui piastre abbiano un diametro di 8 cm e distino 3 cm. I composti del torio danno origine a correnti dello stesso ordine di grandezza, e l'attività degli ossidi di uranio e di uranio è molto simile.

## Radioattività di composti dell'uranio e del torio

Ecco i valori che ho ottenuto con diversi composti dell'uranio; indico con  $i$  l'intensità di corrente in ampère:

	$i \times 10^{-11}$
Uranio metallico (contenente un poco di carbone)	2,3
Ossido di uranio nero U <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,6
Ossido di uranio U <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1,8
Acido di uranio idratato	0,6
Uranato di sodio	1,2
Uranato di potassio	1,2
Uranato d'ammonio	1,3
Solfato uranoso	0,7
Solfato di uranile e di potassio	0,7
Azotato di uranile	0,7
Fosfato di rame e di uranio	0,9
Ossisolfuro di uranio	1,2

Lo spessore dello strato del composto di uranio impiegato ha poca influenza, purché lo strato sia continuo. Ecco alcune esperienze a questo riguardo:

	Spessore dello strato (mm)	$i \times 10^{-11}$
Ossido di uranio	0,5	2,7
Ossido di uranio	3,0	3,0
Uranato d'ammonio	0,5	1,3
Uranato d'ammonio	3,0	1,4

Si può concludere che l'assorbimento dei raggi uranici da parte della materia che li emette è molto forte, poiché i raggi provenienti da strati profondi non possono produrre un effetto osservabile.

I valori che ho ottenuto con i composti del torio<sup>1</sup> mi hanno permesso di constatare:

1. Che lo spessore dello strato impiegato ha un'azione considerevole, soprattutto con l'ossido;
2. che il fenomeno non è regolare a meno di impiegare uno strato attivo sottile (0,25 mm per esempio). Al contrario, quando si impiega uno strato di materia spesso (6 mm), si ottengono valori oscillanti tra limiti estesi, soprattutto nel caso dell'ossido:

	Spessore dello strato(mm)	$i \times 10^{-11}$
Ossido di torio	0,25	2,2
Ossido di torio	0,5	2,5
Ossido di torio	2,5	4,7
Ossido di torio	3,0	5,5 in media
Ossido di torio	6,0	5,5 in media
Solfato di torio	0,25	0,8

<sup>1</sup> Madame Curie, Comptes rendus, aprile 1898

Vi è nella natura del fenomeno una causa di irregolarità che non esiste nel caso dei composti di uranio. I valori ottenuti per un secondo strato di ossido di 6 mm di spessore variano tra 3,7 e 7,3.

Le esperienze che ho eseguito sull'assorbimento dei raggi uranici e torici hanno mostrato che i raggi torici sono più penetranti di quelli uranici e che i raggi emessi dall'ossido di torio in strati spessi sono più penetranti di quelli emessi in strati sottili. Ecco, per esempio, i valori che indicano la frazione di irraggiamento che trasmette una lamina di alluminio di spessore 0,01 mm:

Sostanza irraggiante	Frazione di irraggiamento tramesso dalla lamina	
Uranio		0,18
Ossido di Uranio U <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,20
Uranato d'ammonio		0,20
Fosfato di uranio e di rame		0,21
	spessore mm	
Ossido di torio	0,25	0,38
Ossido di torio	0,5	0,47
Ossido di torio	3,0	0,70
Ossido di torio	6,0	0,70
Solfato di torio	0,25	0,38

Con i composti di uranio, l'assorbimento è lo stesso per qualunque composto impiegato, e ciò porta a credere che i raggi emessi dai diversi composti sono della stessa natura.

Le particolarità della radiazione torica sono state l'oggetto di pubblicazioni molto complete. M. Owens<sup>1</sup> ha mostrato che la costanza della corrente non è ottenuta che alla fine di un tempo molto lungo in apparecchi chiusi, e che l'intensità di corrente è fortemente ridotta dall'azione di una corrente d'aria (ciò non avviene per i composti dell'uranio). M. Rutherford ha compiuto esperienze analoghe e le ha interpretate ammettendo che il torio e i suoi composti emettono non solo raggi di Becquerel, ma anche una emanazione, costituita da particelle estremamente deboli, che restano radioattive per qualche tempo dopo la loro emissione e possono essere trascinate da una corrente d'aria<sup>2</sup>.

Le caratteristiche della radiazione torica che sono relative all'influenza dello spessore dello strato impiegato e all'azione delle correnti d'aria hanno un legame stretto con il fenomeno della radioattività indotta e della sua propagazione progressiva. Questo fenomeno è stato osservato per la prima volta con il radio e sarà descritto successivamente.

La radioattività dei composti di uranio e di torio si presenta come una proprietà atomica. M. Becquerel aveva già osservato che tutti i composti di uranio sono attivi e aveva concluso che la loro attività era dovuta alla presenza dell'elemento uranio; ha mostrato anche che l'uranio era più attivo che i suoi sali<sup>3</sup>. Ho studiato da questo punto di vista i composti dell'uranio e del torio e ho eseguito numerose misure della loro attività nelle diverse condizioni. Risulta dall'insieme di queste misure che la radioattività di queste sostanze è proprio una proprietà atomica. Sembra qui legata alla presenza degli atomi dei due elementi considerati e non è eliminata né dai cambiamenti di stato fisico né dalle trasformazioni chimiche. Le combinazioni chimiche e le mescolanze contenenti uranio o torio sono tanto più attive quanto più contengono una maggiore proporzione di questi metalli, tutta materia inattiva agente a sua volta come materia inerte e materia assorbente l'irraggiamento.

## La radioattività atomica è un fenomeno generale?

Come è stato detto prima, ho cercato se altre sostanze oltre i composti di uranio e di torio erano radioattive. Ho intrapreso questa ricerca partendo dall'idea che era molto poco probabile che la radioattività, considerata come proprietà atomica, appartenga a una certa specie di materia, escludendo tutte le altre. Le misure che ho eseguito mi permettono di dire che per gli

1 Owens, Phil. Mag., ottobre 1899

2 Rutherford, Phil. Mag., gennaio 1900

3 Becquerel, Comptes rendus, t. CXXII, p. 1086



elementi chimici attualmente considerati come tali, compresi i più rari e ipotetici, i composti studiati da me sono stati sempre almeno 100 volte meno attivi nella mia strumentazione dell'uranio metallico. Nel caso di elementi diffusi, ho studiato parecchi composti; nel caso di corpi rari, ho analizzato i composti che ho potuto procurarmi.

Ecco l'elenco delle sostanze che hanno fatto parte del mio studio sotto forma di elementi o di combinazioni:

1. Tutti i metalli o metalloidi che si reperiscono facilmente e qualche, più raro, prodotto puro, proveniente dalla collezione di M. Etard, alla Scuola di Fisica e di Chimica industriale della città di Parigi.
2. I seguenti corpi rari: gallio, germanio, neodimio, praseodimio, niobio, scandio, gadolinio, erbio, samario e rubidio (campioni prestati da M. Demarçay); ittrio, itterbio con il nuovo erbio (campioni prestati da M. Urbain<sup>1</sup>);
3. Un gran numero di rocce e di minerali.

Nei limiti di sensibilità della mia apparecchiatura non ho trovato sostanze semplici, eccettuato l'uranio e il torio, che sia dotata di radioattività atomica. Conviene tuttavia aggiungere qualche parola relativa al fosforo. Il fosforo bianco umido, posto tra le piastre del condensatore, rende conduttrice l'aria tra le piastre<sup>2</sup>. Tuttavia, non considero quei corpi come radioattivi alla stregua dell'uranio e del torio.

Il fosforo, in effetti, in queste condizioni, si ossida ed emette raggi luminosi, mentre i composti di uranio e di torio sono radioattivi senza mostrare alcuna modifica chimica apprezzabile con i mezzi noti. Inoltre, il fosforo non è attivo né allo stato di fosforo rosso, né allo stato di combinazione.

In un lavoro recente, M. Bloch mostra che il fosforo, ossidandosi in presenza dell'aria, dà origine a ioni molto poco mobili che rendono l'aria conduttrice e provocano la condensazione del vapore acqueo<sup>3</sup>. Alcuni lavori recenti porterebbero ad ammettere che la radioattività appartiene a tutte le sostanze a un livello estremamente debole<sup>4</sup>. L'identificazione di tali fenomeni molto deboli con quelli della radioattività atomica non si può ancora considerare come stabilita. L'uranio e il torio sono i due elementi che possiedono il maggiore peso atomico (240 e 232), essi si incontrano frequentemente negli stessi minerali.

## Minerali radioattivi

Ho esaminato con la mia apparecchiatura numerosi minerali<sup>5</sup>; alcuni tra di essi si sono mostrati attivi, tra gli altri la pechblenda, la calcolite, l'autunite, la monazite, la torite, l'orangite, la fergusonite, la cleveite, ecc.

Di seguito una Tabella che dà in ampere l'intensità  $i$  di corrente ottenuta con l'uranio metallico e con diversi minerali:

	$i \times 10^{-11}$
Uranio	2,3
Pechblenda di Johanngeorgenstadt	8,3
Pechblenda di Jochimsthal	7,0
Pechblenda di Pzibran	6,5
Pechblenda di Cornwallis	1,6
Cleveite	1,4
Calcolite	5,2
Autunite	2,7
	0,1
	0,3

1 Sono molto riconoscente agli scienziati citati prima, ai quali devo i campioni che mi sono serviti. Ringrazio pure M. Moissan che ha acconsentito a donare uranio metallico per questi studi

2 Elster e Geitel, Wied. Ann., 1890

3 Bloch, Société de Physique, 6 febbraio 1903

4 Mac Lennan e Burton, Phil. Mag., giugno 1903. - Strutt, Phil. Mag., giugno 1903. - Lester Cooke, Phil. Mag., ottobre 1903

5 Parecchi campioni di minerali della raccolta del Museo sono stati gentilmente messi a disposizione da M. Lacroix

Toriti diverse	0,7
	1,3
	1,4
Orangite	2,0
Monazite	0,5
Xenotime	0,03
Aeschinite	0,7
Fergusonite 1° campione	0,4
Fergusonite 2° campione	0,1
Samarskite	1,1
Niobite 1°	0,1
Niobite 2°	0,3
Tantalite	0,02
Carnotite	6,2

La corrente ottenuta con l'orangite (minerale di ossido di torio) variava molto con lo spessore dello strato impiegato. Aumentando questo spessore da 0,25 a 6 mm, si faceva crescere la corrente da 1,8 a 2,3.

Tutti i minerali che mostrano radioattivi contengono uranio o torio; la loro attività non ha quindi nulla di sorprendente, ma l'intensità del fenomeno per certi minerali è inattesa. Così, si trovano pechblende (minerali di ossido di uranio) che sono 4 volte più attive dell'uranio metallico. La calcolite (fosfato di rame e di uranio cristallizzato) è 2 volte più attiva dell'uranio. L'autunite (fosfato di uranio e di calce) è attiva come l'uranio.

Questi fatti erano in disaccordo con le considerazioni precedenti, secondo le quali nessun minerale avrebbe dovuto mostrarsi più attivo dell'uranio o del torio.

Per chiarire questo punto, ho preparato della calcolite artificiale con il procedimento di Debray, partendo dal prodotto puro. Questo procedimento consiste nel dissolvere del fosfato di rame in acido fosforico, e nello scaldare fino a 50 o 60. Dopo un poco di tempo, si formano cristalli di calcolite nella soluzione [Debray, Ann. de Chim. et de Phys., 3a serie, t. LXI, p. 445]. La calcolite così ottenuta possiede una attività del tutto normale, essendo data la sua composizione; essa è due volte e mezzo meno attiva dell'uranio.

Diveniva allora molto probabile che se la pechblenda, la calcolite, l'autunite hanno una attività così forte, contengano in piccola quantità un materiale fortemente radioattivo, diverso dall'uranio, dal torio e dai corpi semplici attualmente conosciuti. Ho pensato che, se questa supposizione fosse corretta, avrei potuto sperare di estrarre questa sostanza dal minerale con i processi consueti dell'analisi chimica.

## Capitolo 2

### Le nuove sostanze radioattive

#### Metodi di ricerca

I risultati dello studio dei minerali radioattivi, enunciati nel precedente Capitolo, ci hanno spinto, M. Curie ed io, a cercare di estrarre dalla pechblenda una nuova sostanza radioattiva. Il nostro metodo di ricerca poteva essere basato solo sulla radioattività, poiché non conosciamo alcuna altra caratteristica della sostanza ipotetica.

Ecco come ci si può servire della radioattività per una ricerca di questo tipo. Si misura la radioattività di un prodotto, si effettua su questo prodotto una separazione chimica; si misura la radioattività di tutti i prodotti ottenuti, e si verifica se la sostanza radioattiva è rimasta integralmente con una delle due, o se è divisa tra le due e in quale proporzione. Si ha in tal modo una indicazione che può essere confrontata, in certa misura, con quella che potrebbe fornire l'analisi spettrale. Per avere valori confrontabili, bisogna misurare l'attività delle sostanze allo stato solido e prive di umidità.

#### Polonio, radio, attinio

L'analisi della pechblenda, con l'ausilio del metodo prima esposto, ci ha portato a stabilire l'esistenza, in questo minerale, di due sostanze fortemente radioattive, chimicamente diverse: il polonio, da noi trovato, e il radio, che abbiamo scoperto in collaborazione con M. Bémont<sup>1</sup>.

Il polonio è una sostanza vicina al bismuto dal punto di vista analitico e lo accompagna nelle separazioni. Si ottiene del bismuto sempre più ricco di polonio mediante il seguente processo di suddivisione:

1. Sublimazione dei solfuri nel vuoto; il solfuro attivo è molto più volatile di quello di bismuto.
2. Precipitazione delle soluzioni azotate mediante acqua; il sotto nitrato precipitato è molto più attivo del sale che rimane disciolto.
3. Precipitazione con solfuro di idrogeno di una soluzione cloridrica estremamente acida; i solfuri precipitati sono notevolmente più attivi del sale che rimane disciolto.

Il radio è una sostanza che accompagna il bario tratto dalla pechblenda; segue il bario nelle sue reazioni e se ne separa per differenza di solubilità dei cloruri nell'acqua, l'acqua alcolizzata o l'acqua addizionata con acido cloridrico. Noi effettuiamo la separazione dei cloruri di bario e del radio, sottoponendo la loro mescolanza a una cristallizzazione frazionata, essendo il cloruro di radio meno solubile di quello del bario.

Una terza sostanza fortemente radioattiva è stata individuata nella pechblenda da M. Debierne, che le ha dato il nome di attinio<sup>2</sup>. L'attinio accompagna certi corpi del gruppo del ferro contenuto nella pechblenda; sembra soprattutto vicino del torio, dal quale non ha potuto ancora essere separato. L'estrazione dell'attinio dalla pechblenda è una operazione molto faticosa, essendo le separazioni generalmente incomplete.

Tutte le tre nuove sostanze radioattive si trovano nella pechblenda in quantità assolutamente infinitesimale. Per ottenerle in uno stato concentrato, siamo stati obbligati al trattamento di parecchie tonnellate di residui del minerale di uranio. Il grande trattamento si fa in una fabbrica; è seguito poi da un lavoro di purificazione e concentrazione. Siamo giunti in tal modo ad estrarre da migliaia di chilogrammi di materia prima alcuni decigrammi di prodotto che sono prodigiosamente attivi rispetto al minerale da cui provengono. È molto evidente che questo lavoro completo è lungo, faticoso e costoso<sup>3</sup>.

1 P. Curie e Madame Curie, Comptes rendus, luglio 1898. - P. Curie, Madame Curie e G. Bemont, Comptes rendus, dicembre 1898

2 Debierne, Comptes rendus, ottobre 1899 e aprile 1900

3 Abbiamo numerosi obblighi nei confronti di tutti coloro che ci hanno aiutato in questo lavoro. Ringraziamo molto sinceramente MM. Mascart e Michel Lévy per il loro gradito sostegno. Grazie all'intervento del M. professor Suess, il governo austriaco ha messo generosamente a disposizione la prima tonnellata di

Altre nuove sostanze radioattive sono segnalate a seguito del nostro lavoro. M. Giesel, da una parte, MM. Homan e Strauss, dall'altra, hanno annunciato la probabile esistenza di una sostanza radioattiva vicina al piombo dalle sue proprietà chimiche. Si possiedono per ora solo poche informazioni su tale sostanza<sup>1</sup>. Tra tutte le nuove sostanze radioattive, il radio è, sinora, la sola che sia stata isolata sotto forma di sale puro.

## Spettro del radio

Era di primaria importanza controllare, con tutti i mezzi possibili, l'ipotesi, avanzata in questo lavoro, dell'esistenza di nuovi elementi radioattivi. L'analisi spettrale è giunta, nel caso del radio, a confermare in modo completo questa ipotesi. M. Demarçay si è sobbarcato l'esame di nuove sostanze radioattive, con metodi rigorosi che egli impiega nello studio degli spettri di scintille fotografiche.

Il concorso di uno scienziato tanto competente è stato assai importante per noi, e a lui esprimiamo una profonda riconoscenza per aver acconsentito a svolgere questo lavoro. I risultati dell'analisi spettrale ci hanno dato la certezza, quando eravamo ancora nel dubbio sull'interpretazione dei risultati delle nostre ricerche [Recentemente, abbiamo avuto il dolore di veder morire questo scienziato, mentre perseguiva le sue ricerche sulle terre rare e sulla spettroscopia, con metodi di cui non ammireremo mai abbastanza la perfezione e la precisione. Conserviamo un ricordo commosso della perfetta cortesia con la quale aveva acconsentito a prendere parte al nostro lavoro].

I primi campioni di cloruro di bario con radio mediocrementemente attivo, esaminati da Demarçay, gli mostrarono, allo stesso tempo dei raggi di bario, una nuova riga di intensità notevole e di lunghezza d'onda  $\lambda = 381,47 \text{ m}\mu$ , nello spettro ultravioletto. Con prodotti più attivi, preparati in seguito, Demarçay vide rafforzarsi la riga  $381,47 \text{ m}\mu$ ; nello stesso tempo apparvero nuove righe, e nello spettro le nuove righe e le righe del bario avevano intensità confrontabili. Una nuova concentrazione ha fornito un prodotto, per il quale il nuovo spettro domina, e le tre righe più intense del bario, le sole visibili, indicano solo la presenza di questo metallo allo stato di impurezza. Questo prodotto può essere considerato come del cloruro di radio quasi puro. Infine, ho potuto, con una ulteriore purificazione, ottenere un cloruro estremamente puro, nello spettro del quale le due righe dominanti del bario sono appena visibili.

Ecco, secondo Demarçay<sup>2</sup>, l'elenco delle principali righe del radio per la parte dello spettro compresa tra  $\lambda = 500,0$  e  $\lambda = 350,0$  millesimi di micron ( $\text{m}\mu$ ). L'intensità di ogni riga è indicata da un numero, indicando con 16 la riga più intensa.

$\lambda$	Intensità	$\lambda$	Intensità
482,63	10	453,35	9
472,69	5	443,61	8
469,98	3	434,06	12
469,21	7	381,47	16
468,30	14	364,96	12
464,19	4		

Tutte le righe sono nette e strette, le tre righe  $381,47$ ,  $468,30$  e  $434,66$  sono intense; esse uguagliano le righe più intense attualmente note. Si colgono nello spettro anche due intense bande nebulose. La prima, simmetrica, si estende da  $463,10$  a  $462,19$  con un massimo a  $462,75$ . La seconda, più intensa, è degradata verso l'ultravioletto; comincia bruscamente a  $446,37$ , passa per un massimo a  $445,52$ ; la regione del massimo si estende fino a  $445,34$  poi una banda nebulosa gradualmente degradata, si estende fino a  $439$ . Nella parte meno rifratta non fotografata dello spettro del campione, la sola riga osservabile è la  $566,5$  (circa), molto più debole tuttavia della  $482,63$ .

L'Accademia delle Scienze di Parigi, la Società di Sostegno per l'Industria Nazionale, un donatore anonimo, ci hanno fornito i mezzi per trattare una certa quantità di prodotto. Il nostro

---

residui trattati (provenienti dalla fabbrica di Stato, a Joachimsthal, in Boemia)

1 Giesel, Ber. deutsch. chem. Gesell. t. XXXIII, 1900, p. 3126

2 Demarçay, Comptes rendus, dicembre 1898, novembre 1899 e luglio 1900

amico, M. Debiegne, ha organizzato il trattamento del minerale, che è stato effettuato nella fabbrica della Società centrale di Prodotti chimici. Questa Società ha acconsentito ad effettuare il trattamento senza trarne beneficio. A tutti inviamo i nostri ringraziamenti più sinceri.

Più recentemente, l'Istituto di Francia ha messo a nostra disposizione una somma di 20000 franchi per l'estrazione delle materie radioattive. Grazie a tale somma, abbiamo potuto mettere in atto il trattamento di 5 tonnellate di minerale.

L'aspetto generale dello spettro è quello del metallo alcalino-terroso; si sa che questi metalli hanno spettri di righe intense con qualche banda nebulosa.

Secondo Demarçay, il radio può figurare tra i corpi aventi la reazione spettrale più sensibile. Ho, d'altronde, potuto concludere, dal mio lavoro di concentrazione, che, nel primo campione esaminato che mostra nettamente la riga 381,47, la proporzione del radio deve essere molto piccola (circa dello 0,02%). Tuttavia, serve un'attività 50 volte maggiore di quella dell'uranio metallico per distinguere nettamente la riga principale del radio negli spettri fotografici. Con un elettrometro sensibile, si può scoprire la radioattività di un prodotto quando essa è di 1/100 di quella dell'uranio metallico. Si vede che, per scoprire la presenza del radio, la radioattività è una caratteristica molte migliaia di volte più evidente della reazione spettrale.

Il bismuto con polonio molto attivo e il torio con attinio molto attivo, esaminati da Demarçay, hanno ancora rispettivamente solo le righe del bismuto e del torio. In una recente pubblicazione, M. Giesel<sup>1</sup>, che si è occupato della preparazione del radio, annuncia che il bromuro di radio origina una colorazione carminio della fiamma. Lo spettro della fiamma del radio contiene due belle bande rosse, una riga nel blu verde e due linee deboli nel violetto.

## **Estrazione delle nuove sostanze radioattive**

La prima parte dell'operazione consiste nell'estrarre dai minerali d'uranio il bario radifero, il bismuto polonifero e le terre rare contenenti l'attinio. Dopo aver ottenuto questi tre primi prodotti, si cerca, per ognuno di essi, di isolare la nuova sostanza radioattiva. Questa seconda parte del trattamento si fa con un metodo di frazionamento. Si sa che è difficile trovare un metodo di separazione molto perfetto tra elementi molto vicini; i metodi di frazionamento sono quindi tutti indicati. Quando un elemento si trova mescolato a un altro allo stato di traccia, non si può applicare alla miscela un metodo di separazione perfetto, anche ammettendo che ne si conosca uno; si rischia, in effetti, di perdere le tracce di materia che avrebbero potuto essere separate nell'operazione.

Mi sono occupata in particolare del lavoro avente come scopo l'isolamento del radio e del polonio. Dopo un lavoro durato qualche anno, sono riuscita solo nel caso del primo di questi due corpi.

Essendo la pechblenda un minerale costoso, abbiamo rinunciato a trattarne grandi quantità. In Europa, l'estrazione di questo minerale avviene nella miniera di Joachimsthal, in Boemia. Il minerale triturato è bruciato con carbonato di sodio, e la materia risultante da questo trattamento è lavata prima con acqua calda, e poi con acido solforico diluito. La soluzione contiene l'uranio che dà alla pechblenda il suo valore. Il residuo insolubile è eliminato.

Questo residuo contiene sostanze radioattive; la sua attività è 4 volte e mezzo maggiore di quella dell'uranio metallico. Il governo austriaco, al quale appartiene la miniera, ci ha gentilmente dato una tonnellata di questo residuo per le nostre ricerche, ed ha autorizzato la miniera a fornirci parecchie altre tonnellate di questo materiale.

Non è stato molto facile fare il primo trattamento del residuo in fabbrica tramite gli stessi procedimenti del laboratorio. M. Debiegne ha voluto studiare questo problema e organizzare il trattamento in fabbrica. Il punto principale del metodo che ha indicato consiste nell'ottenere la trasformazione dei solfati in carbonati per ebollizione della materia con una soluzione concentrata di carbonato di soda. Il residuo contiene principalmente solfati di piombo e di calce, di silice, di ossido di alluminio e di ferro.

Vi si trovano, inoltre, una quantità più o meno grande, quasi tutti i metalli (rame, bismuto, zinco, cobalto, manganese, nickel, vanadio, antimonio, tallio, terre rare, niobio, tantalio, arsenico, bario, ecc.). Il radio si trova, in questa miscela, allo stato di solfato e ne costituisce il solfato meno solubile. Per metterlo in soluzione, basta eliminare il più possibile l'acido solforico. Perciò, si comincia col trattare il residuo con una soluzione concentrata e bollente di soda ordinaria. L'acido

---

1 Giesel, Phys. Zeitschrift, 15 settembre 1902

solforico combinato al piombo, all'alluminio, alla calce, passa, in gran parte, in soluzione allo stato di solfato di soda che si toglie con lavaggi nell'acqua. La soluzione alcalina elimina nello stesso tempo del piombo, la silice, l'alluminio. La parte insolubile lavata in acqua è attaccata dall'acido cloridrico comune. Questa operazione disgrega completamente la materia e la dissolve in gran parte.

Da questa soluzione si può ricavare il polonio e l'attinio: il primo è precipitato dall'idrogeno solforato, il secondo si trova negli idrati precipitati con ammoniaca nella soluzione separata di solfuri e perossidi. Quanto al radio, resta nella parte insolubile. Questa parte è lavata con l'acqua, poi trattata con una soluzione concentrata e bollente di carbonato di soda. Se restano solo solfati non attaccati, questa operazione ha come effetto quello di trasformare completamente i solfati di bario e di radio in carbonati. Si lava allora la materia molto accuratamente con l'acqua, poi la si attacca con l'acido cloridrico privo di acido solforico. La soluzione contiene il radio, così come il polonio e l'attinio. La si filtra e la si precipita con l'acido solforico. Si ottengono così solfati grezzi di bario radifero contenenti anche calce, piombo, ferro e anche un poco di attinio. La soluzione contiene ancora un poco di attinio e di polonio che possono essere ricavati come nella prima soluzione cloridrica.

Si trae da una tonnellata di residui dai 10 kg ai 20 kg di solfati grezzi, la cui attività è da 30 a 60 volte maggiore di quella dell'uranio metallico. Si procede alla loro purificazione. Per questo, li si fa bollire con del carbonato di soda e li si trasforma in cloruri. La soluzione è trattata con idrogeno solforato, e ciò dà una piccola quantità di solfuri attivi contenenti polonio. Si filtra la soluzione, la si perossida con del cloro e la si precipita con ammoniaca pura.

Gli ossidi e gli idrati precipitati sono molto attivi, e l'attività è dovuta all'attinio. La soluzione filtrata è precipitata mediante il carbonato di soda. I carbonati alcalini-terrosi precipitati sono lavati e trasformati in cloruri. Questi cloruri sono evaporati a secco e lavati con acido cloridrico puro concentrato. Il cloruro di calcio si dissolve quasi interamente, mentre il cloruro di bario radifero resta insolubile. Si ottiene così, da una tonnellata di materia, circa 8 kg di cloruro di bario radifero, la cui attività è circa 60 volte maggiore di quella dell'uranio metallico. Questo cloruro è pronto per il frazionamento.

## **Polonio**

Come è stato detto prima, facendo passare l'idrogeno solforato nelle diverse soluzioni cloridriche ottenute nel corso del trattamento, si precipitano solfuri attivi la cui attività è dovuta al polonio.

Questi solfuri contengono principalmente bismuto, un poco di rame e di piombo; quest'ultimo metallo non è presente in grande proporzione, poiché è stato in gran parte eliminato dalla soluzione sodica, e perché il suo cloruro è poco solubile. L'antimonio e l'arsenico non si trovano negli ossidi se non in minime quantità, essendo stati i loro ossidi disciolti dalla soda. Per avere nuovamente solfuri molto attivi, si impiega il seguente procedimento: essendo le soluzioni cloridriche molto acide precipitate dall'idrogeno solforato, i solfuri che si precipitano in queste condizioni sono molto attivi, li si impiega per la preparazione del polonio; nella soluzione rimangono sostanze la cui precipitazione è incompleta in presenza di un eccesso di acido cloridrico (bismuto, piombo, antimonio). Per ottenere la precipitazione, si allunga la soluzione con acqua, la si tratta di nuovo con idrogeno solforato e si ottiene una seconda porzione di solfuri molto meno attivi dei primi, e che, generalmente, sono stati rigettati. Per l'ulteriore purificazione dei solfuri, li si lava con solfuro di ammonio, e ciò toglie le tracce restanti di antimonio e arsenico. Poi li si lava con acqua addizionata di ammonio azotato e li si tratta con acido azotico diluito.

La soluzione non è mai completa; si ottiene sempre un residuo insolubile più o meno importante che si tratta nuovamente se lo si ritiene utile. La soluzione è ridotta a un piccolo volume e precipitata sia con ammoniaca, sia con molta acqua. Nei due casi il piombo e il rame restano nella soluzione; nel secondo caso rimane pure un poco di bismuto appena attivo.

Il precipitato di ossidi o di sotto azotati è sottoposto a un frazionamento della materia nel modo seguente: si dissolve il precipitato nell'acido azotico, si aggiunge acqua alla soluzione, no alla formazione di una quantità sufficiente di precipitato; per questa operazione bisogna tener conto che il precipitato, qualche volta, si forma solo alla ne di un certo tempo. Si separa il precipitato dal liquido rimasto, lo si ridistilla nell'acido azotico; sulle due parti di liquido in tal modo ottenute si rifà una precipitazione con acqua, e così di seguito. Si riuniscono le diverse parti basandosi sulla loro

attività, e si cerca di spingere la concentrazione più avanti possibile. Si ottiene così una quantità molto piccola di materia la cui attività è enorme, ma che, tuttavia, ha solo dato allo spettroscopio raggi di bismuto.

Si hanno sfortunatamente poche possibilità di ottenere un esito positivo isolando il polonio per questa strada. Il metodo di frazionamento descritto presenta grandi difficoltà, e lo stesso si ha per altri processi di frazionamento per via umida. Qualunque sia il procedimento impiegato si formano con la massima facilità composti assolutamente insolubili negli acidi diluiti o concentrati. Questi composti non possono essere ridistillati se non riportando prima allo stato metallico, tramite fusione con il cianuro di potassio, per esempio.

Dato il numero considerevole di operazioni da svolgere, questa circostanza costituisce una difficoltà enorme per lo sviluppo del frazionamento. Questo inconveniente è tanto più grave in quanto il polonio è una sostanza che, una volta tratto dalla pechblenda, diminuisce la propria attività. Questa bassa attività è d'altronde lenta; è così che un campione di nitrato di bismuto con polonio ha perso la metà della propria attività in undici mesi.

Difficoltà analoghe non si presentano per il radio. La radioattività resta una guida fedele per la concentrazione; questa stessa concentrazione non presenta alcuna difficoltà, e i progressi del lavoro hanno potuto, dopo la fase iniziale, essere costantemente controllati dall'analisi spettrale.

Quando i fenomeni della radioattività indotta, di cui si tratterà poi, sono stati conosciuti, è parso naturale ammettere che il polonio, che dà solo le righe del bismuto e la cui attività diminuisce con tempo, non è un nuovo elemento, ma del bismuto attivato dalla vicinanza del radio nella pechblenda. Non sono ancora convinta che questa spiegazione sia esatta. Nel corso del mio lavoro prolungato sul polonio, ho constatato effetti chimici che non ho mai osservato né con il bismuto ordinario, né con il bismuto attivato dal radio. Questi effetti chimici sono, in primo luogo, la formazione estremamente facile di composti insolubili di cui ho prima parlato (specialmente sotto nitrati), in secondo luogo, il colore e l'aspetto dei precipitati ottenuti aggiungendo dell'acqua alla soluzione azotica del bismuto polonifero. Questi precipitati sono a volte bianchi, ma generalmente di un giallo più o meno vivo, tendente al rosso scuro.

L'assenza di righe, oltre a quelle del bismuto, non provano in modo perentorio che la sostanza contiene solo bismuto, poiché esistono corpi la cui reazione spettrale è poco sensibile. Sarebbe necessario preparare una piccola quantità di bismuto polonifero ad uno stato di concentrazione più elevato possibile, e di farne lo studio chimico, in primo luogo, la determinazione del peso atomico del metallo. Questa ricerca non si è potuta ancora fare a causa delle difficoltà del lavoro chimico segnalate in precedenza.

È già stato dimostrato che il polonio è un nuovo elemento, e non sarà meno vero che questo elemento non può esistere indefinitamente allo stato fortemente radioattivo, almeno quando è tolto dal materiale. Si può allora considerare la questione in due modi diversi: 1° tutta l'attività del polonio è della radioattività indotta dalla vicinanza di sostanze anch'esse radioattive; il polonio avrebbe allora la capacità di attivarsi atomicamente in modo duraturo, facoltà che non sembra appartenere a una qualsiasi sostanza; 2° l'attività del polonio è una attività propria che si distrugge spontaneamente in certe condizioni e può persistere in certe altre condizioni che si trovano realizzate nel minerale. Il fenomeno dell'attivazione atomica al contatto è ancora così mal conosciuta, che manca la base per formarsi una opinione coerente su quanto riguarda questa questione.

Recentemente è apparso un lavoro di M. Marckwald, sul polonio<sup>1</sup>. M. Marckwald immerge una bacchetta di bismuto puro in una soluzione cloridrica del bismuto estratto dal residuo del trattamento della pechblenda. Dopo qualche tempo la bacchetta si ricopre di un deposito molto attivo, e la soluzione contiene solo bismuto inattivo. M. Marckwald ottiene così un deposito molto attivo aggiungendo cloruro di stagno a una soluzione cloridrica di bismuto radioattivo. M. Marckwald conclude che l'elemento attivo è analogo al tellurio e gli dà il nome di radiotellurio. La materia attiva di M. Marckwald sembra identica al polonio, per la sua provenienza e per i raggi molto assorbibili che emette. La scelta di un nome nuovo per questo materiale è certamente inutile allo stato attuale della questione.

## Preparazione del cloruro di radio puro

Il procedimento che ho adottato per estrarre il cloruro di radio puro dal cloruro di bario radifero

---

1 Berichte d. deutsch. chem. Gesell., giugno 1902 e dicembre 1902

consiste nel sottoporre dapprima la miscela dei cloruri a una cristallizzazione frazionata nell'acqua pura, e poi nell'acqua addizionata con acido cloridrico. Si utilizza così la differenza di solubilità dei due cloruri, essendo quella del radio meno solubile di quella del bario. All'inizio del frazionamento si impiega l'acqua pura distillata. Si dissolve il cloruro e si porta la soluzione a saturazione alla temperatura di ebollizione, poi si lascia cristallizzare per raffreddamento in una capsula coperta.

Si formano sul fondo dell'acqua cristalli aderenti, e la soluzione satura, galleggiante, può essere facilmente decantata. Si si evapora a secco un campione di questa soluzione, si trova che il cloruro ottenuto è circa cinque volte meno attivo di quello cristallizzato. Si è in tal modo diviso il cloruro in due parti: A e B, essendo la parte A molto più attiva della parte B. Si riprende su ciascuno dei cloruri A e B la stessa operazione, e si ottiene, con ciascuno di essi, due nuove parti. Quando la cristallizzazione è conclusa, si riunisce la frazione meno attiva del cloruro A e la frazione più attiva del cloruro B, avendo questi due materiali la stessa attività. Ci si trova allora ad avere tre parti che si sottopongono di nuovo allo stesso trattamento.

Non si può aumentare costantemente il numero delle parti. All'aumentare di questo numero, l'attività della parte più solubile va diminuendo. Quando questa parte non possiede più una attività significativa, la si elimina dal frazionamento. Quando si è ottenuto il numero di parti desiderato, si termina il frazionamento della parte meno solubile (la più ricca di radio), e la si elimina dal frazionamento.

Si opera con un numero costante di parti. Dopo ogni serie di operazioni, la soluzione satura proveniente da una porzione è versata sui cristalli provenienti dalla porzione successiva; ma se, dopo una delle serie, si è eliminata la frazione più solubile, dopo la serie successiva si farà, al contrario, una nuova parte con la frazione più solubile e si eliminerà i cristalli che costituiscono la parte più attiva. Dalla sua successione alternata di queste due modalità operative si ottiene un meccanismo di frazionamento molto regolare, nel quale il numero delle parti e l'attività di ciascuna restano costanti, essendo ogni parte circa cinque volte più attiva della seguente, e nel quale si elimina da un lato (alla fine) un prodotto pressoché inattivo, mentre dall'altro si raccoglie (all'inizio) un cloruro arricchito in radio. La quantità di materiale contenuta nelle parti va, d'altronde, necessariamente diminuendo, e le parti diverse contengono tanto meno materiale quanto sono più attivi.

Si opera all'inizio con sei porzioni, e l'attività del cloruro eliminato alla fine era solo dello 0,1 di quella dell'uranio.

Quando si è eliminata una gran parte della materia inattiva e quando le parti sono divenute assai piccole, non si ha più interesse ad eliminare a un grado di attività molto debole; si sopprime allora una parte alla fine del frazionamento e si aggiunge all'inizio una parte formata con il cloruro attivo precedentemente raccolto. Si raccoglierà quindi ora un cloruro più ricco di radio del precedente. Si continua ad applicare questo sistema fino a che i cristalli iniziali rappresentano cloruro di radio puro. Se il frazionamento è stato fatto in modo completo, rimangono soltanto piccole quantità di tutti i prodotti intermedi.

Quando il frazionamento è progredito e la quantità di materiale è divenuta piccola in ogni parte, la separazione per cristallizzazione è meno efficace, essendo il raffreddamento troppo rapido e il volume della soluzione da decantare troppo piccolo. Si è allora interessati ad aggiungere l'acqua ad una determinata proporzione di acido cloridrico; questa proporzione dovrà crescere col progredire del frazionamento.

Il vantaggio di questa aggiunta consiste nell'aumentare la quantità di soluzione, essendo la solubilità dei cloruri minore nell'acqua cloridrica che nell'acqua pura. Inoltre, il frazionamento è molto efficace; la differenza tra le due frazioni provenienti da uno stesso prodotto è considerevole; impiegando acqua con molto acido, si ottengono eccellenti separazioni, e si può operare con solo tre o quattro parti. Vi è pieno vantaggio nell'impiego di questo procedimento prima che la quantità di materiale sia divenuta molto piccola perché la si possa trattare senza inconvenienti.

I cristalli, che si depositano in soluzione molto acida, hanno la forma di aghi molto allungati, che hanno assolutamente lo stesso aspetto del cloruro di bario e del cloruro di radio. Gli uni e gli altri sono birifrangenti. I cristalli di cloruro di bario radifero si depositano incolori, ma, quando la proporzione di radio diviene sufficiente, assumono dopo qualche ora una colorazione gialla, tendente all'arancio, qualche volta una bella colorazione rosa.

Questa colorazione scompare con la soluzione. I cristalli di cloruro radio puri non si colorano, o almeno non così rapidamente, di modo che la colorazione sembra dovuta alla presenza simultanea del bario e del radio. La colorazione massima è ottenuta per una data concentrazione



in radio, e si può, basandosi su questa proprietà, controllare il progresso del frazionamento. Quando la porzione più attiva si colora, essa contiene una notevole quantità di bario; quando non si colora, e le parti seguenti si colorano, significa che la prima è praticamente del cloruro di radio puro.

Ho notato a volte la formazione di un deposito composto di cristalli di cui una parte resta incolore, mentre l'altra si colora. Sembra possibile separare i cristalli incolori mediante selezione, anche se non l'abbiamo sperimentato. Al termine del frazionamento, il rapporto delle attività delle parti successive non è né lo stesso, né così regolare come all'inizio; tuttavia, non si produce alcun disturbo serio nella prosecuzione del frazionamento.

La precipitazione frazionata di una soluzione acquosa di cloruro di bario radifero mediante alcool porta all'isolamento del cloruro di radio che si precipita per primo. Questo metodo che ho impiegato è stato in seguito abbandonato per quello che sarà esposto e che ore più regolarità. Tuttavia, ho ancora qualche volta impiegato la precipitazione con alcool per purificare il cloruro di radio contenente una piccola quantità di cloruro di bario. Quest'ultimo rimane nella soluzione alcolica leggermente acquosa e può così essere eliminato.

M. Giesel, che, dalla pubblicazione delle nostre prime ricerche, si è occupato della preparazione dei corpi radioattivi, raccomanda la separazione del bario e del radio mediante la cristallizzazione frazionata nell'acqua della miscela di bromuri. Ho potuto constatare che questo procedimento è in effetti molto vantaggioso, soprattutto all'inizio del frazionamento. Qualunque sia il procedimento di frazionamento di cui ci serve, è utile controllarlo con misure di attività.

È necessario notare che un composto di radio che era disciolto, e che si vuole riportare allo stato solido, sia per precipitazione, sia per cristallizzazione possiede all'inizio un'attività tanto minore quanto più a lungo rimane in soluzione. L'attività aumenta poi per parecchi mesi fino a raggiungere un dato limite, sempre uguale.

L'attività finale è cinque o sei volte maggiore di quella iniziale. Queste variazioni, sulle quali ritornerò in seguito, devono essere prese in considerazione per la misura dell'attività. Benché l'attività finale sia meglio definita, è più pratico, nel corso del trattamento chimico, misurare l'attività iniziale del prodotto solido.

L'attività delle sostanze fortemente radioattive è di tutt'altro ordine di grandezza rispetto a quella del minerale dal quale proviene (essa è 106 volte maggiore). Quando si misura questa radioattività con il metodo che è stato esposto all'inizio di questo lavoro (apparecchio in fig.1), non si può aumentare, oltre un certo limite, la carica che si mette nel piatto di quarzo. Questa carica, nelle nostre esperienze, era di 4000 g al massimo, corrispondente a una quantità di elettricità liberata uguale a 25 unità elettrostatiche. Possiamo misurare attività che variano, nel rapporto 1 a 4000, impiegando sempre la stessa superficie per la sostanza attiva. Per estendere i limiti delle misure, facciamo variare questa superficie in un rapporto noto. La sostanza attiva occupa allora sulla piastra B una zona circolare centrale di raggio noto. In queste condizioni, non essendo l'attività esattamente proporzionale alla superficie, si determinano sperimentalmente dei coefficienti che permettono di confrontare le attività con superfici attive diseguali.

Quando questa risorsa è esaurita, si è obbligati a fare ricorso a schermi assorbenti e ad altri procedimenti equivalenti sui quali qui non insisterò. Tutti questi procedimenti, più o meno imperfetti, bastano tuttavia a guidare le ricerche. Abbiamo pure misurato la corrente che attraversa il condensatore quando è messo in circuito con una batteria di piccoli accumulatori e un galvanometro sensibile. La necessità di verificare frequentemente la sensibilità del galvanometro ci ha impedito di utilizzare questo metodo per le misure correnti.

## **Determinazione del peso atomico del radio**

Nel corso del mio lavoro, ho, a più riprese, determinato il peso atomico del metallo contenuto nei campioni di cloruro di bario radifero. Ogni volta che a seguito di un nuovo trattamento avevo una nuova scorta di cloruro di bario radifero da trattare, portavo la concentrazione il più avanti possibile, in modo da ottenere da 0,1 g a 0,5 g di materiale contenente quasi tutta l'attività della miscela. Da questa piccola quantità di materia precipitavo con alcool o acido cloridrico alcuni milligrammi di cloruro che erano destinati all'analisi spettrale. Grazie al suo metodo eccellente, Demarçay aveva bisogno solo di questa quantità minima di materia per ottenere la fotografia dello spettro della scintilla. Usavo il prodotto rimanente per una determinazione del peso atomico.

Ho impiegato il metodo classico che consiste nel dosare, allo stato di cloruro d'argento, il

cloruro contenuto in un peso noto di cloruro anidro. Come esperienza di controllo, ho determinato il peso atomico del bario con lo stesso metodo, nelle stesse condizioni e con la stessa quantità di materia, 0,5 g dapprima, solo 0,1 g poi. I valori trovati erano sempre compresi tra 137 e 138. Ho osservato così che questo metodo dà risultati soddisfacenti, anche con una così piccola quantità di materia.

Le prime due determinazioni sono state fatte con cloruri, di cui uno era 230 volte e l'altro 600 volte più attivo dell'uranio. Queste due esperienze hanno fornito, con la precisione legata alle misure, lo stesso valore dell'esperienza fatta con il cloruro di bario puro. Non si poteva quindi sperare di trovare una differenza se non impiegando un prodotto molto più attivo. L'esperienza successiva è stata fatta con un cloruro la cui attività era 3500 volte maggiore di quella dell'uranio; questa esperienza permise, per la prima volta, di cogliere una piccola differenza, ma sicura; ho trovato, per il peso atomico medio del metallo contenuto in questo cloruro, il valore 140, che indicava che il peso atomico del radio doveva essere più alto di quello del bario. Impiegando prodotti sempre più attivi e con l'intensità dello spettro del radio crescente, ho constatato che i valori ottenuti andavano pure crescendo, come si può vedere nella Tabella seguente (A indica l'attività del cloruro, presa come unitaria quella dell'uranio; M il peso trovato):

A	M
3500	140 lo spettro del radio è debole
4700	141 lo spettro del radio è forte, ma quello del bario domina di molto
4700	145,8
Ordine di grandezza di $10^6$	173,8 i due spettri hanno una importanza quasi uguale
	225 il bario è presente solo allo stato di traccia

I valori della colonna A devono essere considerati solo come una indicazione grossolana. La valutazione dell'attività dei corpi fortemente radioattivi è, in effetti, difficile, per diverse ragioni di cui si parlerà in seguito. A seguito dei trattamenti descritti prima ho ottenuto, nel marzo 1902, 0,12 g di un cloruro di radio, del quale Demarçay ha voluto eseguire l'analisi spettrale.

Questo cloruro di radio, secondo l'opinione di Demarçay, era sensibilmente pura; tuttavia il suo spettro presentava ancora le tre righe principali del bario con una intensità notevole. Ho fatto con del cloruro quattro determinazioni successive di cui presento i risultati:

	Cloruro di radio anidro	Cloruro d'argento	M.
I	0,1150	0,1130	220,7
II	0,1148	0,1119	223,0
III	0,11135	0,1086	222,8
IV	0,10925	0,10645	223,1

Ho intrapreso allora una nuova purificazione di questo cloruro, e sono giunta ad ottenere una materia ancora più pura, nel cui spettro le due righe più forti del bario sono molto deboli. Data la sensibilità della reazione spettrale del bario, Demarçay stima che il cloruro purificato contenga solo tracce minime di bario incapaci di influenzare in modo apprezzabile il peso atomico. Ho fatto tre determinazioni con questo cloruro di radio perfettamente puro. Ecco i risultati:

	Cloruro di radio anidro	Cloruro d'argento	M.
I	0,09192	0,08890	225,3
II	0,08936	0,08627	225,8
III	0,08839	0,08589	224,0

Questi valori danno una media di 225. Sono stati calcolati, come i precedenti, considerando il radio come elemento bivalente, il cui cloruro ha la formula [mancante], e adottando per l'argento e il cloro i valori  $Ag = 107,8$ ;  $Cl = 35,4$ . Risulta da queste esperienze che il peso atomico del radio è  $Ra = 225$ . Ho considerato questo valore come esatto a meno di una unità.

Le pesate erano effettuate con una bilancia aperiodica Curie, perfettamente regolata, precisa al

ventesimo di milligrammo. Questa bilancia, a lettura diretta, permette di fare pesate molto rapide, condizione essenziale per la pesata dei cloruri anidri di radio e di bario, che assorbono lentamente acqua, malgrado la presenza del corpo disseccante nella bilancia. I materiali da pesare erano posti in un crogiolo di platino; questo crogiolo era in uso da lungo tempo, e ho verificato che il suo peso non variava di un decimo di milligrammo nel corso di una operazione.

Il cloruro idrato ottenuto per cristallizzazione era introdotto nel crogiolo e scaldato al forno per essere trasformato in cloruro anidro. L'esperienza mostra che, quando il cloruro è stato mantenuto per qualche ora a 100, il suo peso non varia più, anche quando si fa salire la temperatura a 200 e lo si mantiene in tale condizione per alcune ore. Il cloruro anidro così ottenuto costituisce quindi un corpo perfettamente definito.

Ecco una serie di misure relative a questo argomento: il cloruro (1 dg) è essiccato al forno a 55 e posto in un essiccatore su acido fosforico anidro; perde in tal caso peso molto lentamente, e ciò dimostra che contiene ancora acqua; durante 12 h, la perdita è stata di 3 mg. Si riporta il cloruro nel forno e si fa salire la temperatura a 100. Durante questa operazione, il cloruro perde 6,3 mg. Lasciato in forno per 3 ore e 15 minuti, perde ancora 2,5 mg. Si mantiene la temperatura per 45 minuti tra 100 e 120, ciò comporta una perdita di peso di 0,1 mg. Infine, scaldato per 4 ore a 200, subisce una perdita di peso di 0,15 mg. Durante tutte queste operazioni, il crogiolo è variato di 0,05 mg.

Dopo ogni determinazione di peso atomico, il radio era riportato allo stato di cloruro nel modo seguente: il liquido contenente dopo il dosaggio l'azotato di radio e l'azotato d'argento in eccesso era addizionato con acido cloridrico puro; si separava il cloruro d'argento per filtrazione; il liquido era evaporato a secco parecchie volte con un eccesso di acido cloridrico puro. L'esperienza mostra che si può così eliminare completamente l'acido azotico.

Il cloruro d'argento del dosaggio era sempre radioattivo e luminoso. Mi sono assicurata che non avesse trattenuto quantità pesabili di radio, determinando la quantità di argento presente. A questo effetto, il cloruro d'argento fuso contenuto nel crogiolo era ridotto dall'idrogeno risultante dalla decomposizione dell'acido cloridrico diluito con zinco; dopo il lavaggio, il crogiolo era pesato con l'argento metallico che vi era contenuto.

Ho constatato anche, in una esperienza, che il peso del cloruro di radio rigenerato era lo stesso di prima dell'operazione. In altre esperienze, non aspettavo, per iniziare una nuova operazione, che tutte le acque di lavaggio fossero evaporate. Queste verifiche non richiedono la stessa precisione delle esperienze dirette; esse hanno permesso tuttavia di accertarsi che non erano stati commessi errori significativi. Secondo il suo peso atomico, il radio si colloca, nella Tavola di Mendeleeff, dopo il bario nella colonna dei metalli alcalino-terrosi e sulla fila che contiene già l'uranio e il torio.

## Caratteristiche dei sali di radio

I sali di radio: cloruro, azotato, carbonato, solfato, hanno lo stesso aspetto del bario, quando sono preparati allo stato solido, ma tutti i sali di radio si colorano con il tempo. I sali di radio sono tutti luminosi nell'oscurità. Per le loro proprietà chimiche, i sali di radio sono assolutamente analoghi ai corrispondenti sali di bario.

Tuttavia il cloruro di radio è meno solubile di quello del bario; la solubilità degli azotati in acqua sembra essere significativamente la stessa. I sali di radio emanano spontaneamente e continuamente calore.

Il cloruro di radio puro è paramagnetico. Il suo coefficiente di magnetizzazione specifico  $K$  (rapporto del momento magnetico dell'unità di massa con l'intensità del campo) è stato misurato da MM. P. Curie e C. Chéveneau per mezzo di un'apparecchiatura predisposta da questi due fisici<sup>1</sup>. Questo coefficiente è stato misurato per confronto con quello dell'acqua e corretto dall'azione del magnetismo dell'aria. Si è così trovato

$$K = 1,05 \times 10^{-6}$$

Il cloruro di bario puro è diamagnetico, il suo coefficiente di magnetizzazione specifico è

$$K = -0,40 \times 10^{-6}$$

Si trova, conformemente ai risultati precedenti, che un cloruro di bario radifero contenente circa

---

1 Société de Physique, 3 aprile 1903

il 17 % di cloruro di radio è diamagnetico e possiede un coefficiente specifico<sup>1</sup>

$$K = -0,20 \times 10^{-6}$$

### **Frazionamento del cloruro di bario ordinario**

Abbiamo cercato di assicurarci se il cloruro di bario in commercio contenesse piccole quantità di cloruro di radio non rilevabili dal nostro apparato di misura. Per questo, abbiamo avviato il frazionamento di una grande quantità di cloruro di bario commerciale, sperando di concentrare con questo procedimento la traccia di cloruro di radio eventualmente presente.

50 kg di cloruro di bario commerciale sono stati dissolti in acqua; la soluzione è stata precipitata con acido cloridrico privo di acido solforico, ottenendo 20 kg di cloruro precipitato. Questo è stato disciolto in acqua e precipitato parzialmente con acido cloridrico, ottenendo 8,5 kg di cloruro precipitato. Questo cloruro è stato sottoposto al metodo di frazionamento impiegato per il cloruro di bario radifero, e ha eliminato all'inizio del frazionamento 10 g di cloruro corrispondente alla porzione meno solubile. Questo cloruro non mostrava alcuna radioattività nel nostro apparato di misura; non conteneva quindi radio; questa sostanza è, di conseguenza, assente dai minerali che formano il bario.

---

<sup>1</sup> Nel 1899, M. St. Meyer ha detto che il carbonato di bario radifero era paramagnetico (Wied. Ann., t. LXVIII). Tuttavia M. Meyer aveva operato con un prodotto molto poco ricco di radio, e contenente probabilmente solo 1/1000 di sale di radio. Questo prodotto avrebbe dovuto mostrarsi diamagnetico. È probabile che questo corpo contenesse una piccola impurità di ferro

## Capitolo 3

### Irraggiamento delle nuove sostanze radioattive

#### Processi di studio dell'irraggiamento

Per studiare l'irraggiamento emesso dalle sostanze radioattive, ci si può servire di una qualsiasi proprietà di questo irraggiamento. Si può quindi utilizzare sia l'azione dei raggi sulle lastre fotografiche sia la loro proprietà di ionizzare l'aria e di renderla conduttrice, sia ancora la loro facoltà di provocare la fluorescenza di certe sostanze. Parlando d'ora in poi di questi diversi modi di operare, impiegherò, come abbreviazione, le espressioni: metodo radiografico, metodo elettrico, metodo fluoroscopico.

I primi due sono stati impiegati sin dall'inizio per lo studio dei raggi uranici; il metodo fluoroscopico si può applicare solo alle nuove sostanze, fortemente radioattive, poiché le sostanze debolmente radioattive come l'uranio e il torio non producono fluorescenza apprezzabile. Il metodo elettrico è il solo che comporta misure precise di intensità; gli altri due sono soprattutto in grado di dare da questo punto di vista risultati qualitativi e possono fornire solo misure grossolane di intensità. I risultati ottenuti con i tre metodi considerati sono solo grossolanamente confrontabili tra loro e non possono essere del tutto paragonabili. La lastra sensibile, il gas che si ionizza, lo schermo fluorescente sono altrettanti recettori ai quali si chiede di assorbire l'energia dell'irraggiamento e di trasformarla in un'altra forma di energia: energia chimica, energia ionica o energia luminosa. Ogni recettore assorbe una frazione dell'irraggiamento che dipende essenzialmente dalla sua natura.

Si vedrà poi che l'irraggiamento è complesso; le parti di irraggiamento assorbito dai diversi recettori possono differire tra loro qualitativamente e quantitativamente. Infine, non è meno evidente, né meno probabile, che l'energia assorbita sia interamente trasformata dal recettore nella forma che desideriamo osservare; una parte di questa energia può trovarsi trasformata in calore, in emissione di irraggiamento secondario che, secondo i casi, saranno o meno utilizzati per la produzione del fenomeno osservato, ecc., e, ancora, l'effetto utile del recettore per lo scopo presso, dipende essenzialmente dalla natura di questo recettore.

Confrontiamo due campioni radioattivi di cui l'uno contiene radio e l'altro polonio, e che sono ugualmente attivi nell'apparecchio a piastre della figura 1. Se si ricopre ognuno di essi con un sottile foglio di alluminio, il secondo apparirà considerevolmente meno attivo del primo, e così sarà se li si pone sullo stesso schermo fluorescente, quando quest'ultimo è molto spesso, o quando è posto ad una certa distanza dalle due sostanze radioattive.

#### Energia di irraggiamento

Qualunque sia il metodo di ricerca impiegato, si trova sempre che l'energia dell'irraggiamento delle nuove sostanze radioattive è considerevolmente maggiore di quella dell'uranio e del torio. È così che, a piccola distanza, una lastra fotografica è impressionata, per così dire, istantaneamente, anche se serve una posa di 24 ore quando si opera con l'uranio e il torio. Uno schermo fluorescente è fortemente illuminato a contatto con nuove sostanze radioattive, quando con l'uranio e il torio non si vede alcuna traccia di luminosità. Infine, l'azione ionizzante sull'aria è pure notevolmente più intensa, in un rapporto pari a circa 106. Ma, a dire il vero, non è più possibile valutare l'intensità totale dell'irraggiamento, come per l'uranio, con il metodo elettrico descritto all'inizio (fig. 1). Infatti, nel caso dell'uranio, per esempio, l'irraggiamento è molto approssimativamente assorbito nello strato d'aria che separa le piastre, e la corrente limite è raggiunta per una tensione di 100 volt.

Ma non è più così per le sostanze fortemente radioattive. Una parte dell'irraggiamento del radio è costituita da raggi molto penetranti che attraversano il condensatore e le piastre metalliche, e non sono per nulla utilizzate nella ionizzazione dell'aria posta tra le piastre. Inoltre, la corrente limite non si può sempre ottenere con le tensioni a disposizione; è così che, per il polonio molto attivo, la corrente è proporzionale alla tensione tra 100 e 500 volt. Le condizioni sperimentali che danno alla misura un significato semplice non sono quindi realizzate, e, di conseguenza, i valori

ottenuti non possono essere considerati come fornenti la misura dell'irraggiamento totale; essi non costituiscono, da questo punto di vista, che una grossolana approssimazione.

## Natura complessa dell'irraggiamento

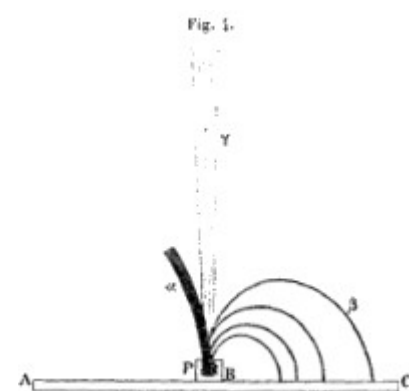
I lavori di diversi fisici (MM: Becquerel, Meyer e von Schweidler, Giesel, Villard, Rutherford, M. e Madame Curie) hanno mostrato che l'irraggiamento delle sostanze radioattive è un irraggiamento molto complesso. Conviene distinguere tre specie di raggi che indicherò, seguendo la notazione adottata da M. Rutherford, dalle lettere  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

1. I raggi  $\alpha$  sono raggi molto poco penetranti che sembrano costituire la maggior parte dell'irraggiamento. Questi raggi sono caratterizzati dalle leggi secondo le quali sono assorbiti dalla materia. Il campo magnetico agisce molto debolmente su questi raggi, e li si è considerati come insensibili all'azione di questo campo. Tuttavia, in un campo magnetico intenso, i raggi  $\alpha$  sono leggermente deviati; la deviazione si produce nello stesso modo dei raggi catodici, ma con verso opposto di deviazione; è lo stesso per i raggi canale dei tubi di Crookes.

2. I raggi  $\beta$  sono raggi meno assorbibili nel loro insieme dei precedenti. Sono deviati da un campo magnetico allo stesso modo e nello stesso senso dei raggi catodici.

3. I raggi  $\gamma$  sono raggi penetranti insensibili all'azione del campo magnetico e confrontabili con i raggi Roentgen.

I raggi di uno stesso gruppo possono avere un potere di penetrazione che varia entro limiti molto estesi, come è stato provato per i raggi  $\beta$ .



Immaginiamo la seguente esperienza: il radio R è posto sul fondo di una piccola cavità profonda scavata in un blocco di piombo P (fig. 4). Un fascio di raggi rettilinei e poco dispersi fuoriesce dal contenitore. Supponiamo che, nella regione che circonda il contenitore, si stabilisca un campo magnetico uniforme, molto intenso, normale al piano della figura e diretto verso il retro di questo piano. I tre gruppi di raggi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  si trovano separati. I raggi  $\gamma$  poco intensi continuano la loro traiettoria rettilinea senza traccia di deviazione. I raggi  $\beta$  sono deviati alla stregua dei raggi catodici e descrivono nel piano della figura traiettorie circolari il cui raggio varia entro limiti estesi. Se il contenitore è posto su una lastra fotografica AC, la porzione BC della lastra che riceve i raggi

$\beta$  è impressionata. Infine, i raggi  $\alpha$  formano un fascio molto intenso che è leggermente deviato e che assai rapidamente assorbito dall'aria. Questi raggi descrivono, nel piano della figura, una traiettoria il cui raggio di curvatura è molto grande, e il verso della deviazione è l'inverso di quello che si verifica per i raggi  $\beta$ .

Se si ricopre il contenitore con uno schermo sottile in alluminio, (0,1 mm di spessore), i raggi  $\alpha$  sono in larga parte soppressi, i raggi  $\beta$  lo sono molto meno e i raggi  $\gamma$  non sembrano significativamente assorbiti.

L'esperienza che ho descritto non è stata realizzata in questa forma, e si vedrà in seguito quali sono le esperienze che mostrano l'azione del campo magnetico sui diversi tipi di raggi.

## Azione del campo magnetico

Si è visto che i raggi emessi dalle sostanze radioattive hanno un grande numero di proprietà comuni ai raggi catodici e a quelli Roentgen. Così come i raggi catodici e Roentgen ionizzano l'aria, agiscono sulle lastre fotografiche, eccitano la fluorescenza, non subiscono riflessioni regolari. Ma i raggi catodici differiscono da quelli Roentgen in quanto sono deviati dalla loro traiettoria rettilinea dall'azione di un campo magnetico e per il fatto che trasportano cariche elettriche negative.

Il fatto che il campo magnetico agisce sui raggi emessi dalle sostanze radioattive è stato scoperto quasi contemporaneamente da MM. Giesel, Meyer e von Schweidler e Becquerel<sup>1</sup>. Questi fisici hanno riconosciuto che i raggi delle sostanze radioattive sono deviati dal campo magnetico allo stesso modo e nello stesso verso dei raggi catodici; le loro osservazioni si

<sup>1</sup> Giesel, Wied. Ann., 2 novembre 1899. Meyer e von Schweidler, Acad. Anzeiger Wien, 3 e 9 novembre 1899. Becquerel, Comptes rendus, 11 dicembre 1899

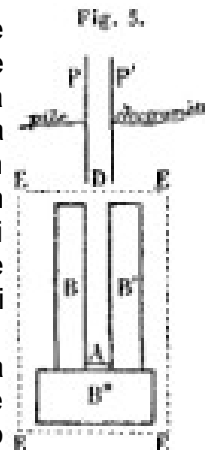
riferiscono ai raggi  $\beta$ .

M. Curie ha mostrato che l'irraggiamento del radio comporta due gruppi di raggi ben distinti, di cui l'uno è facilmente deviato dal campo magnetico (raggi  $\beta$ ) mentre l'altro sembra insensibile all'azione di questo campo (raggi  $\alpha$  e  $\gamma$  il cui raggruppamento è identificato con il nome di raggi non deviabili)<sup>1</sup>. M. Becquerel non ha osservato emissione di raggi di tipo catodico per i campioni di polonio preparati da noi.

É, invece, su un campione di polonio, da lui preparato, che M. Giesel ha osservato per la prima volta l'effetto del campo magnetico. Tra tutti i campioni di polonio, preparati da noi, nessuno ha mai dato luogo ad una emissione di raggi di tipo catodico. Il polonio di M. Giesel non emette raggi di tipo catodico se non quando è preparato da poco, ed è probabile che l'emissione sia dovuta al fenomeno di radioattività indotta di cui tratteremo poi.

Ecco le esperienze che provano come una parte dell'irraggiamento del radio e una parte sola è costituita da raggi facilmente deviabili (raggi  $\beta$ ). Queste esperienze sono state fatte con il metodo elettrico<sup>2</sup>.

La sostanza radioattiva A (fig. 5) invia radiazioni lungo la direzione AD tra le piastre P e P'. Il piatto P è mantenuto al potenziale di 500 volt, il piatto P' è collegato ad un elettrometro e a un quarzo piezoelettrico. Si misura l'intensità della corrente che passa nell'aria sotto l'influsso della radiazione. Si può stabilire a piacere il campo magnetico di un elettrocalamita normale al piano della figura in tutta la regione EEEE. Se i raggi sono deviati, anche debolmente, essi non penetrano più nelle piastre, e la corrente scompare. La regione in cui passano i raggi è circondata dalle masse di piombo B, B', B'' e dalle armature dell'elettrocalamita; quando i raggi sono deviati, essi sono assorbiti dalle masse di piombo B e B'.



I risultati ottenuti dipendono essenzialmente dalla distanza AD tra la sostanza radiante A e l'ingresso del condensatore in D. Se la distanza AD è molto grande (superiore a 7 cm), la maggior parte (circa il 90%) dei raggi del radio che giungono al condensatore sono deviati e soppressi da un campo di 2500 unità. Questi sono raggi  $\beta$ . Se la distanza AD è minore di 65 mm, una parte meno importante dei raggi è deviata dal campo; questa parte è già completamente deviata da un campo di 2500 unità, e la proporzione di raggi soppressi non aumenta quando si fa crescere il campo da 2500 a 7000 unità.

La proporzione di raggi non soppressi dal campo è tanto maggiore quanto la distanza AD tra la sostanza radiante e il condensatore è più piccola. Per le distanze minuscole i raggi che possono essere deviati facilmente costituiscono solo una piccola frazione dell'irraggiamento totale. I raggi penetranti sono quindi, in maggior parte, raggi deviabili di tipo catodico (raggi  $\beta$ ).

Con il dispositivo sperimentale descritto, l'azione del campo magnetico sui raggi  $\alpha$  non poteva essere osservato per i campi impiegati. L'irraggiamento molto importante, in apparenza non deviabile, osservato a piccole distanze dalla sorgente radiante, era costituito dai raggi  $\alpha$ ; l'irraggiamento non deviabile osservato a grande distanza era costituito dai raggi  $\gamma$ .

Quando si analizza il fascio attraverso una lamina assorbente (alluminio o carta nera), i raggi che passano sono quasi tutti deviati dal campo, di modo che grazie allo schermo e al campo magnetico quasi tutto l'irraggiamento è soppresso nel condensatore, e rimanendo allora solo raggi  $\gamma$ , la cui proporzione è piccola. Quanto ai raggi  $\alpha$ , essi sono assorbiti dallo schermo.

Una lamina di alluminio di 1/100 di millimetro di spessore basta a sopprimere quasi tutti i raggi difficilmente 100 deviabili, quando la sostanza è assai lontana dal condensatore; per distanze inferiori (34mm e 51mm), sono necessari due fogli di alluminio da 1 per ottenere lo stesso risultato. Si eseguono misure simili su quattro sostanze radifere (cloruri o carbonati) di attività assai diversa; i risultati ottenuti sono stati molto simili.

Si può osservare che, per tutti i campioni, i raggi penetranti deviabili con magnete (raggi  $\beta$ ) sono solo una debole parte dell'irraggiamento totale; essi intervengono solo per una per una piccola parte nelle misure in cui si utilizza l'irraggiamento totale per produrre conducibilità dell'aria.

Si può studiare la radiazione emessa dal polonio con il metodo elettrico. Quando si fa variare la distanza AD dal polonio al condensatore, non si osserva dapprima alcuna corrente fintanto che la distanza rimane molto grande; quando si avvicina il polonio, si osserva che, per una certa distanza che era di 4 cm per il campione analizzato, l'irraggiamento si fa bruscamente sentire con una

1 P. Curie, Comptes rendus, 8 gennaio 1900

2 P. Curie, Comptes rendus, 8 gennaio 1900

grande intensità; la corrente aumenta con regolarità se si continua ad avvicinare il polonio, ma il campo magnetico non produce un effetto apprezzabile in queste condizioni. Sembra che l'irraggiamento del polonio sia delimitato nello spazio e superi appena nell'aria una specie di guaina che circonda la sostanza per uno spessore di qualche centimetro.

Conviene avanzare importanti riserve generali sul significato delle esperienze che ho descritto. Quando indico la proporzione dei raggi deviati dal magnete, si tratta solo di radiazioni in grado di generare una corrente nel condensatore. Impiegando come reagente raggi di Becquerel la fluorescenza o l'azione sulle lastre fotografiche, la proporzione sarà probabilmente diversa, non avendo una misura di intensità generalmente un senso che rispetto al metodo impiegato.

I raggi del polonio sono raggi di tipo  $\alpha$ . Nelle esperienze descritte, non si è osservato alcun effetto del campo magnetico su questi raggi, ma il dispositivo sperimentale era tale che una piccola deviazione passava inosservata. Esperienze fatte con il metodo radiografico hanno confermato i risultati di quelle precedenti. Impiegando il radio come sorgente radiante, e ricevendone l'immagine su una lastra parallela al fascio originario e normale al campo, si ottiene la traccia molto netta dei due fasci separati dall'azione del campo, l'uno deviato, l'altro no. I raggi  $\beta$  costituiscono il fascio deviato; essendo i raggi  $\alpha$  molto poco deviati si confondono con il fascio non deviato dei raggi  $\gamma$ .

## Raggi $\beta$ deviabili

Il risultato delle esperienze di M. Giesel e di MM. Meyer e von Schweidler indicano che l'irraggiamento dei corpi radioattivi è almeno in parte deviato da un campo magnetico, e che la deviazione avviene come per i raggi catodici. M. Becquerel ha studiato l'azione del campo sui raggi con il metodo radiografico<sup>1</sup> []. Il dispositivo sperimentale impiegato era quello della figura 4. Il radio era posto nella vaschetta in piombo P, e questo contenitore era posto sulla faccia sensibile di una lastra fotografica AC avvolta da carta annerita. Il tutto era posto tra i poli di una elettrocalamita, con il campo magnetico normale al piano della figura.

Se il campo è diretto verso la parte posteriore di questo piano, la parte BC della lastra si trova impressionata dai raggi che, avendo descritto traiettorie circolari, sono ripiegate sulla lastra e la intersecano ad angolo retto. Questi sono raggi  $\beta$ .

M. Becquerel ha mostrato che l'impressione forma una grande banda diffusa, un effettivo spettro continuo, mostrante che il fascio di raggi deviabili emesso dalla sorgente è costituito da una infinità di radiazioni diversamente deviabili. Se si ricopre la gelatina della lastra con diversi schermi assorbenti (carta, vetro, metallo), una parte dello spettro si trova soppressa, e si constata che i raggi maggiormente deviati dal campo magnetico, cioè quelli che danno il più piccolo valore del raggio della traiettoria circolare, sono i più fortemente assorbiti. Per ogni schermo l'impressione sulla lastra inizia dopo una certa distanza dalla sorgente radiante, essendo questa distanza tanto maggiore quanto più assorbente è lo schermo.

## Carica dei raggi deviabili

I raggi catodici sono, come ha mostrato M. Perrin, caricati di elettricità negativa<sup>2</sup>. Inoltre possono, dalle esperienze di M. Perrin e di M. Lenard<sup>3</sup> trasportare la loro carica attraverso avvolgimenti metallici collegati a terra e attraverso lamine isolanti. In tutti i punti, dove sono assorbiti i raggi catodici, si ha una continua liberazione di elettricità negativa. Abbiamo constatato che non è lo stesso per i raggi deviabili  $\beta$  del radio. I raggi deviabili  $\beta$  del radio sono carichi di elettricità negativa<sup>4</sup>.

Stendiamo la sostanza radioattiva su uno dei piatti di un condensatore collegato con un conduttore metallico a terra; il secondo piatto è collegato a un elettrometro e riceve ed assorbe i raggi emessi dalla sostanza. Se i raggi portano carica negativa, si deve osservare un flusso continuo di elettricità all'elettrometro. Questa esperienza, realizzata in aria, non ci ha permesso di rivelare una carica dei raggi, ma l'esperienza così fatta non è sensibile. L'aria tra i piatti resa conduttrice dai raggi, non isola più l'elettrometro e può rivelare solo cariche molto grandi.

Anche i raggi  $\alpha$  non creano turbamenti nell'esperienza, li si può sopprimere ricoprendo la

---

1 Becquerel, Comptes rendus, t. CXXX, p. 206, 372, 810

2 Comptes rendus, t. CXXI, p. 1130. annales de Chimie et de Physique, t. II, 1897

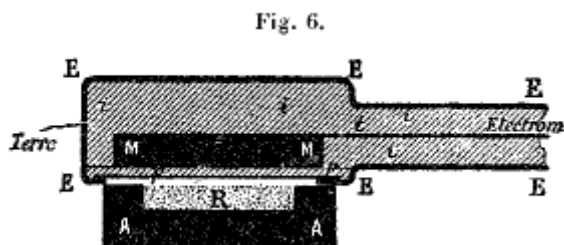
3 Lenard, Wied. Ann., t. LXIV, p. 379

4 M. e Madame Curie, Comptes rendus, 5 marzo 1900



sorgente radioattiva con un sottile schermo metallico; il risultato dell'esperienza non è modificato<sup>5</sup>. Abbiamo senza successo ripetuto questa esperienza in aria facendo penetrare i raggi all'interno di un cilindro di Faraday in collegamento con l'elettrometro [A dire il vero, in queste esperienze, si osserva sempre una deviazione all'elettrometro, ma è facile rendersi conto che questo spostamento è un effetto della forza elettromotrice di contatto che esiste tra il piatto collegato all'elettrometro e il conduttore vicino; questa forza elettromotrice fa deviare l'elettrometro, grazie alla conducibilità dell'aria sottoposta all'irraggiamento del radio].

Ci si poteva già rendere conto, secondo le esperienze precedenti, che la carica dei raggi del prodotto radiante impiegato era piccola.



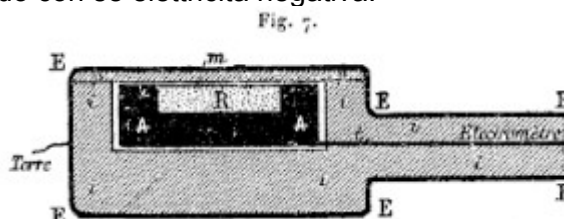
Per constatare un debole spostamento di elettricità sul condensatore che assorbe i raggi, è necessario che questo conduttore sia elettricamente ben isolato; per ottenere tale risultato, è necessario metterlo al riparo dell'aria, sia ponendolo in un tubo con un vuoto perfetto, sia circondandolo con un buon dielettrico solido. È quest'ultimo dispositivo che abbiamo impiegato.

Un disco condensatore MM (fig. 6) è collegato con un'asta metallica t all'elettrometro; disco e asta sono completamente circondati da materiale isolante iiiii; il tutto è ricoperto da un rivestimento metallico EEEE che è in contatto elettrico con la terra. Su una delle facce del disco, l'isolante pp e il rivestimento metallico sono molto sottili. È questa faccia ad essere esposta all'irraggiamento del sale di bario radifero R, posto all'interno in una vaschetta di piombo [Il rivestimento isolante deve essere perfettamente continuo. Tutte le fessure riempite d'aria che vanno dal condensatore interno no al rivestimento metallico sono una causa di corrente dovuta alle forze elettromotrici di contatto utilizzando la conducibilità dell'aria sotto l'azione del radio]. I raggi emessi dal radio attraversano il rivestimento metallico e la lamina isolante pp, e sono assorbiti dal disco metallico M M . Questo è allora sede di una emissione continua e costante di elettricità negativa che si osserva all'elettrometro e che si misura con l'aiuto del quarzo piezoelettrico.

La corrente così generata è molto piccola. Con cloruro di bario radifero molto attivo formante uno strato di 2,5 cm di superficie e di 0,2 cm di spessore, si ottiene una corrente dell'ordine di grandezza di  $10^{-11}$  ampère, avendo i raggi utilizzato attraversato, prima di essere assorbiti dal disco MM, uno spessore di alluminio di 0,01 mm e uno spessore di ebanite di 0,3 mm. Abbiamo poi impiegato del piombo, del rame e dello zinco per il disco MM, dell'ebanite e della paraffina come isolante; i risultati ottenuti sono stati gli stessi.

La corrente diminuisce quando si allontana la sorgente radiante R, o quando si impiega un prodotto meno attivo. Abbiamo ancora ottenuto gli stessi risultati sostituendo il disco MM con un cilindro di Faraday riempito d'aria, ma avvolto all'esterno da un materiale isolante. L'apertura del cilindro, chiusa dalla sottile piastra isolante pp, era in tal caso di fronte alla sorgente radiante.

Abbiamo infine eseguito l'esperienza inversa, che consiste nel porre dentro il contenitore piombo con il radio nel mezzo del materiale isolante e a contatto con l'elettrometro (fig. 7), avvolgendo il tutto con una cassa metallica messa a terra. In queste condizioni, si osserva all'elettrometro che il radio assume una carica positiva e uguale in grandezza alla carica negativa della prima esperienza. I raggi del radio attraversano la sottile piastra dielettrica pp e abbandonano il conduttore interno portando con sé elettricità negativa.



5 M. e Madame Curie, Comptes rendus, 5 marzo 1900

I raggi  $\alpha$  del radio non intervengono in queste esperienze, essendo assorbiti quasi totalmente da uno spessore di materia molto piccolo. Il metodo descritto non conviene per lo studio della carica dei raggi del polonio, essendo questi raggi ugualmente poco penetranti. Non abbiamo osservato alcun indice di carica con il polonio, che emette solo raggi  $\alpha$ ; ma, per il motivo precedente, non si può trarre alcuna conclusione da questa esperienza. Così, nel caso dei raggi deviabili  $\beta$  del radio, come nel caso dei raggi catodici, i raggi trasportano elettricità.

Fin qui non si è mai riconosciuta l'esistenza di cariche elettriche non legate alla materia. Si è quindi portati a servirsi, nello studio dell'emissione dei raggi deviabili  $\beta$  del radio, della stessa teoria attualmente in uso per lo studio dei raggi catodici. In questa teoria balistica, che è stata formulata da Sir W. Crookes, poi sviluppata e completata da M. J.J. Thomson, i raggi catodici sono composti da particelle estremamente leggere che sono lanciate a partire dal catodo con grande velocità, e che possiedono carica elettrica negativa. Si può analogamente supporre che il radio emetta nello spazio particelle cariche negativamente.

Un campione di radio racchiuso in un rivestimento solido, sottile, perfettamente isolante, si deve caricare spontaneamente a un potenziale molto elevato. Nell'ipotesi balistica il potenziale aumenterà, fino a che la differenza di potenziale con i conduttori circostanti diviene sufficiente ad impedire l'allontanamento delle particelle elettrizzate emesse e riportate alla sorgente radiante.

Abbiamo realizzato per caso l'esperienza di cui si tratta qui. Un campione di radio molto attivo era racchiuso da lungo tempo in un'ampolla di vetro. Per aprire l'ampolla, abbiamo tracciato con un coltello un tratto sul vetro. In quel momento abbiamo udito nettamente il rumore di una scintilla, e osservando poi l'ampolla con la lente d'ingrandimento, abbiamo notato che il vetro era stato perforato da una scintilla nel posto in cui si era trovato assottigliato dal tratto. Il fenomeno che si è prodotto è esattamente confrontabile con la rottura del vetro di una bottiglia di Leida troppo carica.

Lo stesso fenomeno si è riprodotto con un'altra ampolla. Inoltre, nel momento in cui è scoccata la scintilla, M. Curie che teneva l'ampolla percepì nelle dita la scossa elettrica dovuta alla scarica. Certi vetri hanno buone proprietà isolanti. Se si racchiude il radio in un'ampolla di vetro sigillata e ben isolata, ci si può aspettare che questa ampolla in un dato momento si fori spontaneamente. Il radio è il primo esempio di un corpo che si carica spontaneamente di elettricità.

## Azione del campo elettrico sui raggi deviabili $\beta$ del radio

I raggi deviabili  $\beta$  del radio essendo assimilati a raggi catodici devono essere deviati da un campo elettrico allo stesso modo di questi ultimi, cioè come sarebbe per una particella materiale carica negativamente e lanciata nello spazio con grande velocità. L'esistenza di questa deviazione è stata mostrata, da un lato, da M. Dorn<sup>1</sup>.

Consideriamo un raggio che attraversa lo spazio tra due piastre di un condensatore. Supponiamo la direzione del raggio parallela alle piastre. Quando si stabilisce tra queste ultime un campo elettrico, il raggio è sottoposto all'azione di questo campo uniforme per l'intera lunghezza della traiettoria nel condensatore, sia  $l$ . In virtù di questa azione il raggio è deviato verso la piastra positiva e descrive un arco di parabola; uscendo dal campo continua il suo cammino in linea retta lungo la tangente all'arco di parabola nel punto di uscita. Si può ricevere il raggio su una lastra fotografica normale alla sua direzione originaria. Si osserva l'impressione prodotta sulla lastra quando il campo è nullo e quando il campo ha un valore noto, e lo si deduce dal valore della deviazione  $\delta$ , che è la distanza dei punti, dove la nuova direzione del raggio e la sua direzione iniziale incontrano uno stesso piano normale alla direzione iniziale. Se  $h$  è la distanza di questo piano dal condensatore, cioè al limite del campo, si ha, con un semplice calcolo,

$$\delta = \frac{eFl \left( \frac{1}{2} + h \right)}{mv^2}$$

essendo  $m$  la massa della particella in moto,  $e$  la sua carica,  $v$  la sua velocità e  $F$  il valore del campo. Le esperienze di M. Becquerel gli hanno permesso di dare un valore approssimato di  $\delta$ .

<sup>1</sup> Dorn, Abh, Halle, marzo 1900], dall'altro, da M. Becquerel [Becquerel, Comptes rendus, t. CXXX, p. 819

## Rapporto tra la carica e la massa per una particella, caricata negativamente, emessa dal radio.

Quando una particella materiale, di massa  $m$  e carica negativa  $e$ , è lanciata con una velocità  $v$  in un campo magnetico uniforme normale alla sua velocità iniziale, questa particella descrive in un piano normale al campo e passante per la sua velocità iniziale un arco di cerchio di raggio  $\rho$  tale che, essendo  $H$  il valore del campo, si ha la relazione

$$H\rho = mv/e$$

Se si è misurato per uno stesso raggio la deviazione elettrica  $\delta$  e il raggio di curvatura  $\rho$  in un campo magnetico, si potrà, da queste due esperienze, ricavare il valore del rapporto  $e/m$  e della velocità  $v$ . Le esperienze di M. Becquerel hanno fornito una prima indicazione a tale proposito. Esse hanno dato per il rapporto  $e/m$  un valore circa uguale a  $10^7$  unità elettromagnetiche assolute, e per  $v$  un valore uguale a  $1,6 \cdot 10^{10}$ . Questi valori sono dello stesso ordine di grandezza dei raggi catodici.

Esperienze precise sono state eseguite sullo stesso soggetto da M. Kaufmann<sup>1</sup>. Questo fisico ha sottoposto un fascio molto collimato di raggi del radio all'azione simultanea di un campo elettrico e di un campo magnetico, entrambi uniformi e aventi la stessa direzione, normale alla direzione iniziale del fascio. L'immagine prodotta su una lastra normale al fascio iniziale e posta oltre i limiti del campo rispetto alla sorgente prende la forma di una curva, nella quale ogni punto corrisponde a uno dei raggi del fascio originario eterogeneo. I raggi più penetranti e meno deviabili sono quelli la cui velocità è maggiore.

Il risultato delle esperienze di M. Kaufmann è che per i raggi del radio, la cui velocità è notevolmente superiore a quella dei raggi catodici, il rapporto  $e/m$  diminuisce al crescere della velocità.

Dai lavori di J. J. Thomson e di Townsend<sup>2</sup> dobbiamo ammettere che la particella in movimento, che costituisce il raggio, possiede una carica uguale a quella trasportata da un atomo di idrogeno nell'elettrolisi, essendo tale carica la stessa per tutti i raggi. Si è quindi portati a concludere che la massa della particelle  $m$  aumenta al crescere della velocità.

Considerazioni teoriche portano a pensare che l'inerzia della particella è precisamente dovuta al suo stato di carica in movimento, non potendo essere modificata la velocità di una carica elettrica in movimento senza dispendio di energia. Detto in altri termini, l'inerzia della particella è di origine elettromagnetica, e la massa della particella è almeno in parte una massa apparente o massa elettromagnetica. M. Abraham<sup>3</sup> si spinge oltre e suppone che la massa della particella sia interamente una massa elettromagnetica. Se in questa ipotesi si calcola il valore di questa massa  $m$  per una velocità nota  $v$ , si trova che  $m$  tende verso l'infinito al tendere di  $v$  alla velocità della luce. Le esperienze di Kaufmann sono in accordo con i risultati di questa teoria la cui importanza è grande, poiché permette di prevedere la possibilità di stabilire le basi della meccanica sulla dinamica di piccoli centri materiali carichi in movimento<sup>4</sup>.

Ecco i valori ottenuti da M. Kaufmann per  $e/m$  e  $v$ :

$e/m$ unità elettromagnetiche	$v$ (cm/sec)	
$1,865 \cdot 10^7$	$0,7 \cdot 10^{10}$	per i raggi catodici (Simon)
$1,31 \cdot 10^7$	$2,36 \cdot 10^{10}$	
$1,17 \cdot 10^7$	$2,48 \cdot 10^{10}$	
$0,97 \cdot 10^7$	$2,59 \cdot 10^{10}$	per i raggi del radio (Kaufmann)
$0,77 \cdot 10^7$	$2,72 \cdot 10^{10}$	
$0,63 \cdot 10^7$	$2,83 \cdot 10^{10}$	

M. Kaufmann conclude dal confronto tra sue esperienze e la teoria, che il valore limite del rapporto  $e/m$  per i raggi del radio di velocità relativamente bassa sarebbe lo stesso del valore  $e/m$

1 Kaufmann, Nachrichte d. k. Gesell. d. Wiss. zu Goettingen, 1901, Heft 2

2 Thomson, Phil. Mag., t. XLVI, 1898. Townsend, Phil. Trans., t. CXCIV, 1901

3 Abraham, Nachrichten d. k. Gesell. d. Wiss. zu Goettingen, 1902, Heft 1

4 Qualche sviluppo su questa questione così come uno studio molto completo dei centri materiali carichi (elettroni o corpuscoli) e i relativi riferimenti dei lavori si trovano nella tesi di M. Langevin)

dei raggi catodici. Le esperienze più complete di M. Kaufmann sono state fatte con un minuscolo granello di cloruro di radio puro, che noi abbiamo messo a sua disposizione.

Secondo le esperienze di M. Kaufmann certi raggi  $\beta$  del radio possiedono una velocità molto vicina a quella della luce. Si comprende che questi raggi così rapidi possono godere di un potere di penetrazione molto grande nei confronti della materia.

### **Azione del campo magnetico sui raggi $\alpha$**

In un recente lavoro, M. Rutherford ha annunciato<sup>1</sup> che in un campo magnetico o elettrico potente, i raggi  $\alpha$  del radio sono leggermente deviati come le particelle elettrizzate positivamente e dotate di una grande velocità. M. Rutherford conclude dalle sue esperienze che la velocità dei raggi  $\alpha$  è dell'ordine di grandezza  $2,5 \cdot 10^9$  cm/sec e che il rapporto e per questi raggi è dell'ordine di grandezza  $6 \cdot 10^3$ , cioè 104 volte più grande dei raggi deviabili  $\beta$ . Si vedrà poi che queste conclusioni di M. Rutherford sono in accordo con le proprietà precedentemente note dell'irraggiamento  $\alpha$ , e che esse rendono conto, almeno in parte, della legge di assorbimento di questo irraggiamento.

Le esperienze di M. Rutherford sono state confermate da M. Becquerel, il quale ha mostrato, inoltre, che i raggi del polonio si comportano in un campo magnetico come i raggi  $\alpha$  del radio e che sembrano prendere, a parità di campo, la stessa curvatura di questi ultimi. Risulta pure dalle esperienze di M. Becquerel che i raggi  $\alpha$  non sembrano formare spettri magnetici, ma che si comportino piuttosto come un irraggiamento omogeneo, essendo i raggi ugualmente deviati<sup>2</sup>.

M. Des Coudres ha eseguito una misura della deviazione elettrica e della deviazione magnetica dei raggi  $\alpha$  del radio nel vuoto. Ha trovato per la velocità di questi raggi  $v = 1,65 \cdot 10^9$  cm/sec e per il rapporto tra la carica e la massa  $e/m = 6400$  in unità elettromagnetiche<sup>3</sup>. La velocità dei raggi  $\alpha$  è quindi circa 20 volte più piccola di quella della luce. Il rapporto e è dello stesso ordine di grandezza di quello trovato per l'idrogeno nell'elettrolisi:  $e/m = 9650$ . Se quindi si ammette che la carica di ogni proiettile è la stessa di quella di un atomo di idrogeno nell'elettrolisi, se ne conclude che la massa di questo proiettile è dello stesso ordine di grandezza di quella di un atomo di idrogeno.

Vediamo ora che, per i raggi catodici e per i raggi  $\beta$  del radio più lenti, il rapporto  $e/m$  è uguale a  $1,865 \cdot 10^7$ ; questo rapporto è quindi circa 2000 volte maggiore di quello ottenuto nell'elettrolisi. Se la carica della particella carica negativamente è supposta uguale a quella di un atomo di idrogeno, allora la sua massa limite per le velocità relativamente piccole sarà quindi circa 2000 minore di quella di un atomo di idrogeno.

I proiettili che costituiscono i raggi  $\beta$  sono quindi a loro volta molto più piccoli e dotati di una velocità maggiore di quella dei raggi  $\alpha$ . Si comprende allora facilmente perché i primi possiedono un potere penetrante ben superiore ai secondi.

### **Azione del campo magnetico sui raggi delle altre sostanze radioattive**

Si vede che il radio emette raggi  $\alpha$  simili ai raggi canale, raggi  $\beta$  simili ai raggi catodici e raggi penetranti e non deviabili  $\gamma$ . Il polonio emette solo raggi  $\alpha$ . Tra le altre sostanze radioattive, l'attinio sembra comportarsi come il radio, ma lo studio dell'irraggiamento di questa sostanza non è ancora così progredito come per l'irraggiamento del radio. Quanto alle sostanze debolmente radioattive, si sa che l'uranio e il torio emettono pure raggi  $\alpha$  e raggi deviabili  $\beta$  (Becquerel, Rutherford).

### **Proporzione dei raggi deviabili $\beta$ nell'irraggiamento del radio**

Come ho già detto, la proporzione dei raggi  $\beta$  cresce, allontanandosi dalla sorgente radiante. Tuttavia, questi raggi non si presentano mai soli, e sulle grandi distanze si osserva sempre la presenza dei raggi  $\gamma$ . La presenza di raggi non deviabili molto penetranti nell'irraggiamento del radio è stata, per la prima volta, osservata da M. Villard<sup>4</sup>. Questi raggi costituiscono solo una piccola parte dell'irraggiamento misurato con il metodo elettrico, e la loro presenza ci era sfuggita nelle nostre prime esperienze, per cui credevamo allora che l'irraggiamento a grande distanze contenesse solo raggi deviabili.

Ecco i risultati numerici ottenuti in esperienze fatte con il metodo elettrico con un

---

1 Rutherford, Physik. Zeitschrift, 15 gennaio 1903

2 Becquerel, Comptes rendus del 26 gennaio e 16 febbraio 1903

3 Des Coudres, Physik. Zeitschrift, 1 giugno 1903

4 Villard, Comptes rendus, t. CXXX, p. 1010

apparecchiatura analoga a quella della figura 5. Il radio era separato dal condensatore solo dall'aria ambiente. Indico con  $d$  la distanza tra la sorgente radiante e il condensatore. Supponendo uguale a 100 la corrente ottenuta senza campo magnetico per ogni distanza, i valori della seconda riga indicano la corrente che esiste quando il campo agisce. Questi valori possono essere considerati come fornenti la percentuale dell'insieme dei raggi  $\alpha$  e  $\gamma$ , non avendo potuto osservare pienamente la deviazione dei raggi  $\alpha$  con il dispositivo impiegato. Alle grandi distanze non si trovano più raggi  $\alpha$ , e l'irraggiamento non deviato è allora soltanto del tipo  $\gamma$ .

Esperienze fatte a piccole distanze:

d in centimetri	3,4	5,1	6,6	6,5
Percentuale dei raggi non devianti	74	56	33	11

Esperienze fatte alle grandi distanze, con un prodotto considerevolmente più attivo di quello usato per la serie precedente:

d in centimetri	14	30	53	80	98	124	157
Percentuale dei raggi devianti	12	14	17	14	16	14	11

Si vede, che a partire da una certa distanza, la proporzione dei raggi non devianti nell'irraggiamento è approssimativamente costante. Questi raggi appartengono probabilmente tutti al tipo  $\gamma$ . Non si deve tenere conto oltre misura delle irregolarità nei valori della seconda riga, se si considera che l'intensità totale della corrente nelle due esperienze estreme stava in un rapporto di 660 a 10. Le misure hanno potuto essere svolte fino a una distanza di 1,57 m dalla sorgente radiante, e si potrebbe eseguire ancora più da lontano.

Ecco un'altra serie di esperienze, nelle quali il radio era racchiuso in un tubo di vetro molto stretto, posto al di sotto del condensatore e parallelamente ai piatti. I raggi emessi attraversavano un dato spessore di vetro e di aria, prima di entrare nel condensatore.

d in centimetri	2,5	3,3	4,1	5,9	7,5	9,6	11,3	13,9
Percentuale dei raggi non devianti	33	33	21	16	14	10	9	9

Come nelle esperienze precedenti, i valori della seconda riga tendono verso un valore costante quando  $d$  cresce, ma il limite è raggiunto per distanze più piccole delle serie precedenti, poiché i raggi  $\alpha$  sono stati maggiormente assorbiti dal vetro rispetto ai raggi  $\beta$  e  $\gamma$ .

Ecco un'altra esperienza che mostra che una lamina di alluminio sottile (spessore 0,01 mm) assorbe principalmente i raggi  $\alpha$ . Essendo il prodotto posto a 5 cm dal condensatore, si trova facendo agire il campo magnetico che la proporzione dei raggi diversi da  $\beta$  è del 71%. Ricoprendo il prodotto con una lamina di alluminio, e mantenendo uguale la distanza, si trova che l'irraggiamento trasmesso è quasi totalmente deviato dal campo magnetico, essendo i raggi  $\alpha$  stati assorbiti dalla lamina. Si ottiene lo stesso risultato impiegando la carta come schermo assorbente.

La maggior parte dell'irraggiamento del radio è formato da raggi  $\alpha$  che sono probabilmente emessi soprattutto dallo strato superficiale della materia radiante. Quando si varia lo spessore dello strato della materia radiante, l'intensità della corrente aumenta con questo spessore; l'aumento non è proporzionale all'incremento dello spessore per la totalità dell'irraggiamento; è d'altra parte più evidente sui raggi  $\beta$  che sugli  $\alpha$ , di modo che la proporzione di raggi  $\beta$  va aumentando con lo spessore dello strato attivo. La sorgente radiante essendo posta a una distanza di 5 cm dal condensatore, si trova che, per uno spessore uguale a 0,4 mm dello strato attivo, l'irraggiamento totale è dato dal valore 28 e la proporzione dei raggi  $\beta$  è del 29%. Assegnando allo strato attivo lo spessore di 2 mm, cioè 5 volte maggiore, si ottiene un irraggiamento totale uguale a 102 e una proporzione di raggi devianti  $\beta$  uguale al 45%. L'irraggiamento totale che rimane a questa distanza è pertanto aumentato nel rapporto 3,6 e l'irraggiamento deviante  $\beta$  è diventato circa 5 volte maggiore.

Le precedenti esperienze sono state eseguite con il metodo elettrico. Quando si opera con il metodo radiografico, certi risultati sembrano, in apparenza, essere in contraddizione con quelli precedenti. Nelle esperienze di M. Villard, un fascio di raggi del radio sottoposti all'azione di un campo magnetico era raccolto su una pila di lastre fotografiche. Il fascio non deviante e penetrante

y attraversava tutte le lastre e lasciava la sua traccia su ognuna di esse. Il fascio deviato  $\beta$  produceva una impressione sulla prima lastra soltanto. Questo fascio mostrava di non contenere raggi di grande penetrazione.

Al contrario, nelle nostre esperienze, un fascio che si propaga nell'aria contiene alle maggiori distanze accessibili all'osservazione circa i 9/10 di raggi deviabili  $\beta$ , e rimane così, quando la sorgente radiante è racchiusa in una piccola ampolla di vetro sigillato. Nelle esperienze di M. Villard, questi raggi deviabili e penetranti  $\beta$  non impressionavano le lastre fotografiche poste oltre la prima, poiché essi sono in larga parte diffusi in tutte le direzioni dal primo ostacolo solido incontrato e cessano di formare un fascio. Nelle nostre esperienze, i raggi emessi dal radio e trasmessi dal vetro dell'ampolla erano probabilmente diffusi anche dal vetro, ma essendo l'ampolla molto piccola, funzionava essa stessa come una sorgente di raggi deviabili  $\beta$  uscenti dalla sua superficie, e noi abbiamo potuto osservare questi ultimi fino ad una grande distanza dall'ampolla.

I raggi catodici dei tubi di Crookes possono attraversare solo schermi molto sottili (schermi di alluminio fino a 0,01 mm di spessore). Un fascio di raggi che arriva perpendicolarmente sullo schermo è diffuso in tutte le direzioni; ma la diffusione è tanto meno importante quanto lo schermo è più sottile, e per schermi molto sottili esiste un fascio uscente che è individuabile come il prolungamento del fascio incidente<sup>1</sup>.

I raggi deviabili  $\beta$  del radio si comportano in modo analogo, ma il fascio deviabile trasmesso subisce, a parità di spessore dello schermo, una modifica molto meno importante. Dalle esperienze di M. Becquerel, i raggi  $\beta$  deviabili molto fortemente del radio (quelli la cui velocità è relativamente debole) sono fortemente diffusi da uno schermo di alluminio dello spessore di 0,1 mm; ma i raggi penetranti e poco deviabili (raggi di tipo catodico di grande velocità) attraversano questo stesso schermo senza alcuna diffusione osservabile, e senza che il fascio che esso costituiscono sia deformato, e per qualunque inclinazione dello schermo rispetto al fascio. I raggi  $\beta$  di grande velocità attraversano senza diffusione uno spessore ben più grande della paraffina (alcuni centimetri), e se ne può seguire la curvatura prodotta dal campo magnetico. Più lo schermo è spesso e più la sua materia è assorbente, più il fascio deviabile primario è alterato, poiché, al crescere dello spessore, la diffusione inizia a farsi sentire sui nuovi gruppi di raggi sempre più penetranti.

L'aria produce sui raggi  $\beta$  del radio che la attraversano una diffusione, che è molto evidente per i raggi fortemente deviabili, ma che è tuttavia molto meno importante di quella dovuta a uguali spessori di materia solida attraversata. Ciò perché i raggi deviabili  $\beta$  del radio si propagano nell'aria a grandi distanze.

## Potere penetrante dell'irraggiamento dei corpi radioattivi

Dall'inizio delle ricerche sui corpi radioattivi, ci si è preoccupati dell'assorbimento prodotto da diversi schermi sui raggi emessi da queste sostanze. Ho dato in una prima Nota relativa a questo argomento<sup>2</sup> numerosi valori citati all'inizio di questo lavoro, indicando la penetrazione relativa dei raggi uranici e torici. M. Rutherford ha studiato in modo speciale la radiazione dell'uranio<sup>3</sup> e mostrato che essa era eterogenea. M. Owens ha tratto la stessa conclusione per i raggi torici<sup>4</sup>. Quando venne in seguito la scoperta delle sostanze fortemente radioattive, il potere penetrante dei loro raggi fu subito studiato da diversi fisici (Becquerel, Meyer e von Schweidler, Curie, Rutherford). Le prime osservazioni misero in evidenza l'eterogeneità dell'irraggiamento che sembra essere un fenomeno generale e comune alle sostanze radioattive<sup>5</sup>.

Ci si trova in presenza di sorgenti, che emettono un insieme di radiazioni, di cui ognuna ha un potere penetrante specifico. La questione si complica ancora per il fatto che bisogna ricercare in quale misura la natura della radiazione può trovarsi modificata dal passaggio attraverso le sostanze materiali e, di conseguenza, che ogni insieme di misure ha un significato preciso solo per il dispositivo sperimentale impiegato. Fatte queste riserve, si può cercare di coordinare le diverse esperienze e di esporre l'insieme dei risultati acquisiti.

I corpi radioattivi emettono raggi che si propagano nell'aria e nel vuoto. La propagazione è

1 Des Coudres, Physik. Zeitschrift, novembre 1902

2 Madame Curie, Comptes rendus, aprile 1898

3 Rutherford, Phil. Mag., gennaio 1899

4 Owens, Phil. Mag., ottobre 1899

5 Becquerel, Rapports au Congrès de Physique, 1900. - Meyer e von Schweidler, Comptes rendus de l'Acad. de Vienne, marzo 1900 (Physik. Zeitschrift, t. I, p. 209)

rettilenea; questo fatto dimostrato dalla nitidezza e forma delle ombre fornite dall'interposizione di corpi, opachi all'irraggiamento, tra la sorgente e la lastra sensibile o lo schermo fluorescente che funge da recettore, avendo la sorgente dimensioni piccole rispetto alla sua distanza dal ricettore. Diverse esperienze che mostrano la propagazione rettilinea dei raggi emessi dall'uranio, il radio e il polonio sono state eseguite da M. Becquerel<sup>1</sup>.

La distanza alla quale i raggi possono propagarsi nell'aria a partire dalla sorgente è interessante da conoscere. Abbiamo constatato che il radio emette raggi che possono essere osservati nell'aria a parecchi metri di distanza.

In alcune delle nostre misure elettriche, l'azione della sorgente sull'aria del condensatore si esercitava ad una distanza compresa tra 2 m e 3 m. Abbiamo pure ottenuto effetti di fluorescenza e impressioni fotografiche a distanze dello stesso ordine di grandezza.

Queste esperienze non possono essere eseguite facilmente se non con sorgenti radioattive molto intense, poiché, indipendentemente dall'assorbimento esercitato dall'aria, l'azione su un recettore dato varia in ragione inversa del quadrato della distanza da una sorgenti di piccole dimensioni.

Questo irraggiamento, che si propaga a grande distanza dal radio, comprende pure raggi di tipo catodico e raggi non deviabili; tuttavia, i raggi deviabili predominano, in base alle esperienze che ho citato prima. Quanto alla grande parte dell'irraggiamento (raggi  $\alpha$ ), essa è, al contrario, limitata nell'aria a una distanza di circa 7 cm dalla sorgente.

Ho fatto alcune esperienze con radio racchiuso in una piccola ampolla di vetro. I raggi che uscivano da questa ampolla superano un certo tratto di aria ed erano raccolti in un condensatore, che serve a misurare il loro potere ionizzante con il metodo elettrico consueto. Si faceva variare la distanza  $d$  tra la sorgente e il condensatore e si misurava la corrente di saturazione  $i$  ottenuta nel condensatore. Ecco i risultati di una delle serie di misure:

$d$ (cm)	$i$	$(i \times d^2) \times 10^{-3}$
10	127	13
20	38	13
30	17,4	16
40	10,5	17
50	6,9	17
60	4,7	17
70	3,8	19
100	1,65	17

A partire da una certa distanza, l'intensità dell'irraggiamento varia sensibilmente in ragione inversa del quadrato della distanza dal condensatore. L'irraggiamento del polonio si propaga nell'aria solo ad una distanza di qualche centimetro (4 cm a 6 cm) dalla sorgente radiante.

Se si considera l'assorbimento delle radiazioni da schermi solidi, si constata ancora una differenza fondamentale tra il radio e il polonio. Il radio emette raggi in grado di attraversare un grande spessore di materia solida, per esempio alcuni centimetri di piombo o di vetro<sup>2</sup>. I raggi che hanno attraversato un grande spessore di un corpo solido sono estremamente penetranti, e, praticamente, non si riesce più, per così dire, a farli assorbire completamente per quanto si sa. Ma questi raggi costituiscono solo una piccola frazione dell'irraggiamento totale, la cui gran parte è, al contrario, assorbita da un piccolo spessore di materia solida.

Il polonio emette raggi estremamente assorbibili che possono attraversare solo schermi solidi alquanto sottili. Ecco, a titolo di esempio, alcuni valori relativi all'assorbimento prodotto da una lamina di alluminio di spessore uguale a 0,01 mm. Questa lamina era posta al di sopra e quasi a contatto con la sostanza. L'irraggiamento diretto e quello trasmesso dalla lamina erano misurati con il metodo elettrico (apparecchiatura fig. 1); la corrente di saturazione era sensibilmente raggiunta in tutti i casi. Indico con  $a$  l'attività della sostanza radiante, prendendo come unitaria quella dell'uranio.

1 Becquerel, Comptes rendus, t. CXXX, p. 979 e 1154

2 M. Madame Curie, Rapports au Congrès 1900

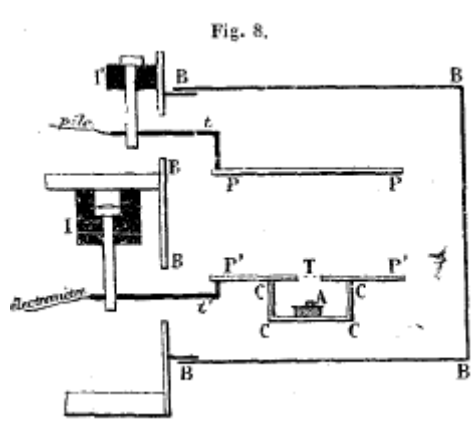
	a	Frazione dell'irraggiamento trasmesso dalla lamina
Cloruro di bario radifero	57	0,32
Bromuro "	43	0,30
Cloruro "	1200	0,30
Solfato "	5000	0,29
Solfato "	10000	0,32
Bismuto a polonio metallico		0,22
Composti dell'uranio		0,20
Composti del torio in strato sottile		0,38

Si vede che composti radiferi di natura e attività diversa danno risultati molto simili, così come ho già indicato per i composti dell'uranio e del torio all'inizio di questo lavoro. Si vede pure, che se si considera tutta la quantità di irraggiamento, e per la lamina assorbente considerata, le diverse sostanze radianti vengono a disporsi nell'ordine di penetrazione decrescente dei loro raggi: torio, radio, polonio, uranio. Questi risultati sono analoghi a quelli pubblicati da M. Rutherford in una Memoria relativa a questo argomento<sup>1</sup>.

M. Rutherford trova, d'altra parte, che l'ordine è lo stesso quando la sostanza assorbente è costituita dall'aria. Ma è probabile che questo ordine non abbia nulla di assoluto e che non si mantenga indipendentemente dalla natura e dallo spessore dello schermo considerato. L'esperienza mostra, in effetti, che la legge di assorbimento è molto diversa per il polonio e per il radio e che, per quest'ultimo, bi è da considerare separatamente l'assorbimento dei raggi di ognuno dei tre gruppi.

Il polonio si presta particolarmente allo studio dei raggi  $\alpha$ , poiché i campioni che possediamo non emettono altri raggi. Ho eseguito una prima serie di esperienze con campioni di polonio estremamente attivi e preparati di recente. Ho trovato che i raggi del polonio sono tanto più assorbenti quanto maggiore è lo spessore della materia che hanno attraversato<sup>2</sup>. Questa legge di assorbimento singolare è contraria a quella che si conosce per gli altri irraggiamenti.

Ho impiegato per questa indagine il nostro apparecchio di misura della conducibilità elettrica con il dispositivo seguente:



Le due piastre di un condensatore P P e P' P' (fig. 8) sono orizzontali e disposte in una scatola metallica BBBB messa a terra. Il corpo attivo A, posto in una scatola metallica spessa CCCC facente corpo con il piatto P' P', agisce sull'aria del condensatore attraverso una tela metallica T; i raggi che attraversano la tela metallica sono utilizzati solo per la produzione di corrente, limitandosi il campo elettrico alla tela. Si può far variare la distanza AT tra il corpo attivo e la tela. Il campo tra le piastre è stabilito tramite una batteria; la misura della corrente è effettuata per mezzo di un elettrometro e di un quarzo piezoelettrico.

Ponendo in A sul corpo attivo diversi schermi e modificando la distanza AT, si può misurare l'assorbimento dei raggi che hanno nell'aria percorsi più o meno grandi. Ecco i risultati ottenuti con

1 Rutherford, Phil. Mag., luglio 1902

2 Madame Curie, Comptes rendus, 8 gennaio 1900



il polonio:

Per un certo valore della distanza AT (4 cm e oltre), non passa corrente: i raggi non penetrano nel condensatore. Quando si diminuisce la distanza AT, la comparsa dei raggi nel condensatore avviene in modo quasi brusco, di modo che, per una piccola diminuzione della distanza, si passa da una corrente molto debole a una corrente molto intensa; poi la corrente cresce con regolarità quando si continua ad avvicinare il corpo radiante a T.

Quando si ricopre la sostanza radiante con una lamina di alluminio laminato dello spessore di 1/100 di millimetro, l'assorbimento prodotto dalla lamina stessa è tanto maggiore quanto maggiore è la distanza AT. Se si pone sulla prima lamina di alluminio una seconda lamina simile, ogni lamina assorbe una frazione dell'irraggiamento che riceve, e questa frazione è maggiore per la seconda lamina, di modo che la seconda lamina appare la più assorbente.

Nella Tabella che segue, ho messo: nella prima riga, le distanze in centimetri tra il polonio e la tela T; nella seconda riga, la percentuale dei raggi trasmessi da una lamina di alluminio; nella terza riga, la percentuale dei raggi trasmessi da due lamine dello stesso alluminio.

Distanza AT	3,5	2,5	1,9	1,45	0,5
Percentuale dei raggi trasmessi da una lamina	0	0	5	10	25
Percentuale dei raggi trasmessi da due lamine	0	0	0	0	0,7

In queste esperienze, la distanza delle piastre P e P' era di 3 cm. Si vede che l'interposizione della lamina di alluminio diminuisce l'intensità dell'irraggiamento in proporzione maggiore nelle regioni lontane che in quelle vicine.

Questo effetto è ancora più evidente di quanto indichino i valori precedenti. La penetrazione del 25%, per la distanza 0,5 cm, rappresenta la penetrazione media per tutti i raggi che superano questa distanza, avendo agli estremi una penetrazione molto debole. Se si raccolgono solo i raggi compresi tra 0,5 cm e 1 cm, per esempio, si avrebbe ancora una penetrazione maggiore. E, infatti, se si avvicina la piastra P a una distanza di 0,5 cm da P', la frazione di irraggiamento trasmesso dalla lamina di alluminio (per AT = 0,5 cm) è del 47% e, attraverso le due lamine, è del 5% dell'irraggiamento iniziale.

Ho eseguito recentemente una seconda serie di esperienze con questi stessi campioni di polonio la cui attività era notevolmente diminuita, essendo di 3 anni l'intervallo di tempo che separa le due serie di esperienze. Nelle esperienze passate, il polonio era allo stato di sotto-nitrato; in quelle recenti, era in grani metallici, ottenuti per fusione del sotto-nitrato con il cianuro di potassio.

Ho constatato che l'irraggiamento del polonio aveva conservato le stesse caratteristiche essenziali, e ho trovato alcuni nuovi risultati. Ecco, per diversi valori della distanza AT, la frazione dell'irraggiamento trasmesso da uno schermo formato da 4 fogli molto sottili di alluminio battuto sovrapposti:

Distanza AT in cm	0	1,5	2,6
% di raggi trasmessi dallo schermo	78	66	39

Ho pure constatato, che la frazione dell'irraggiamento assorbita da uno schermo dato cresce con lo spessore della materia che è già stata attraversata dall'irraggiamento, ma ciò avviene solo a partire da un certo valore della distanza AT. Quando questa distanza è nulla (trovandosi il polonio tutto contro la tela, all'esterno o all'interno del condensatore), si osserva che, ognuno dei numerosi schermi sovrapposti assorbe la stessa frazione dell'irraggiamento ricevuto, cioè, l'intensità dell'irraggiamento diminuisce secondo una legge esponenziale in funzione dello spessore di materia attraversata, come avverrebbe per un irraggiamento omogeneo e trasmesso dalla lamina senza cambiamento di natura.

Ecco alcuni risultati numerici relativi a queste esperienze: Per una distanza AT uguale a 1,5 cm, uno schermo in alluminio sottile trasmette la frazione 0,51 dell'irraggiamento ricevuto quando si trova da solo, e la frazione 0,34 dell'irraggiamento ricevuto quando è preceduto da un altro schermo di uguali caratteristiche.

Al contrario, per una distanza AT uguale a 0, questo stesso schermo trasmette nei due casi considerati la stessa frazione dell'irraggiamento ricevuto e questa frazione è uguale a 0,71; essa è pertanto maggiore del caso precedente.

Ecco, per una distanza AT uguale a 0 e per una successione di schermi molto sottili sovrapposti, valori che indicano per ogni schermo il rapporto tra l'irraggiamento trasmesso e quello ricevuto:

Serie di 9 fogli di rame molto sottili	Serie di 7 fogli di alluminio molto sottili
0,72	0,69
0,78	0,94
0,75	0,95
0,77	0,91
0,70	0,92
0,77	0,93
0,69	0,91
0,79	0,68

Viste le difficoltà di impiego degli schermi molto sottili e nella sovrapposizione degli schermi a contatto, i valori di ogni colonna di possono considerare come costanti; solo, il primo valore della colonna relativa all'alluminio indica un assorbimento maggiore di quello indicato dai valori successivi.

I raggi  $\alpha$  del radio si comportano come i raggi del polonio. Si possono studiare questi raggi solo mandando i raggi  $\beta$  più deviabili di lato mediante un campo magnetico; i raggi  $\gamma$  sembrano, in effetti, poco importanti rispetto ai raggi  $\alpha$ . Tuttavia, si può operare così solo a partire da una certa distanza dalla sorgente radiante.

Ecco i risultati di una esperienza di questo tipo. Si è misurata la frazione dell'irraggiamento trasmesso da una lamina di alluminio dello spessore di 0,01 mm; questa lamina era posta sempre nello stesso luogo, al di sopra e a una piccola distanza dalla sorgente radiante. Si è misurata, per mezzo dell'apparecchiatura della fig.5, la corrente prodotta nel condensatore per diversi valori della distanza AD, in presenza in assenza della lamina.

Distanza AD	6,0	5,1	3,4
% dei raggi trasmessi dall'alluminio	3	7	24

Questi sono ancora i raggi che percorrono le distanze maggiori nell'aria che sono i più assorbiti dall'alluminio. Vi è quindi una grande analogia tra le particelle assorbibili  $\alpha$  dell'irraggiamento del radio e i raggi del polonio.

I raggi deviabili  $\beta$  e i raggi non deviabili penetranti  $\gamma$  sono, al contrario, di diversa natura. Le esperienze di diversi fisici, in particolare MM. Meyer e von Schweidler<sup>1</sup>, mostrano chiaramente che, se si considera l'insieme dell'irraggiamento del radio, il potere di penetrazione di questo irraggiamento aumenta con lo spessore della materia attraversata, come avviene per i raggi Roentgen. In queste esperienze, i raggi  $\alpha$  intervengono appena, poiché questi raggi sono praticamente soppressi dagli schermi assorbenti molto sottili. Quelli che attraversano, sono da una parte, i raggi  $\beta$  più o meno diffusi, dall'altra parte, i raggi  $\gamma$ , che sembrano analoghi ai raggi Roentgen.

Ecco i risultati di alcune delle mie esperienze al riguardo: Il radio è racchiuso in un'ampolla di vetro. I raggi che fuoriescono dall'ampolla attraversano 3cm d'aria e sono raccolti su una serie di lastre di vetro di spessore 1,3 mm ciascuna; la prima lastra trasmette il 49% dell'irraggiamento ricevuto, la seconda trasmette l'84% dell'irraggiamento ricevuto, la terza trasmette l'85% dell'irraggiamento ricevuto.

In un'altra serie di esperienze, il radio era racchiuso in un'ampolla di vetro posta a 10 cm dal condensatore che riceveva i raggi. Si poneva sull'ampolla una serie di schermi di piombo identici dello spessore ciascuno di 0,115 mm. Il rapporto tra l'irraggiamento trasmesso e quello ricevuto è dato per ogni lamina successiva dalla serie di valori seguenti:

0,40      0,60   0,72   0,79   0,89   0,92   0,94   0,94   0,97

<sup>1</sup> Meyer e von Schweidler, Physik. Zeitschrift, t. I, pag. 209

Per una serie di 4 schermi di piombo di cui ciascuno aveva uno spessore di 1,5 mm, il rapporto tra l'irraggiamento trasmesso e ricevuto era dato per le lamine successive dai valori seguenti:

0,09      0,78   0,84   0,82

Da queste esperienze risulta che, quando lo spessore del piombo attraversato cresce da 0mm, 1 a 6mm, il potere penetrante dell'irraggiamento va crescendo. Ho constatato che, nelle condizioni sperimentali indicate, uno schermo di piombo di 1,8 cm di spessore trasmette il 2% dell'irraggiamento ricevuto; uno schermo di piombo di 5,3 cm trasmette ancora lo 0,4% dell'irraggiamento ricevuto. Ho constatato analogamente che che l'irraggiamento trasmesso da uno spessore di piombo uguale a 1,5 mm comprende una grande parte di raggi deviabili (di tipo catodico). Questi ultimi sono quindi in grado di attraversare non solo grandi distanze nell'aria, ma anche spessori notevoli di sostanze solide molto assorbenti come il piombo.

Quando si studia con l'apparecchiatura della figura 2 l'assorbimento esercitato da una lamina di alluminio spessa 0,01 mm sull'insieme dell'irraggiamento del radio, essendo la lamina sempre posta alla stessa distanza dalla sostanza radiante, e il condensatore posto a una distanza variabile Ad, i risultati ottenuti sono la sovrapposizione di quelli dovuti ai tre gruppi dell'irraggiamento. Se si osserva a grande distanza, i raggi penetranti dominano e l'assorbimento è piccolo; se si osserva a piccola distanza, dominano i raggi  $\alpha$  e l'assorbimento è tanto più debole quanto più ci si avvicina alla sostanza; per una distanza intermedia, l'assorbimento passa per un massimo e la penetrazione per un minimo.

Distanza AD	7, 1	6, 5	6, 0	5, 1	3, 4
% di raggi trasmessi dall'alluminio	91	82	58	41	48

Tuttavia, certe esperienze relative all'assorbimento mettono in evidenza una certa analogia tra i raggi  $\alpha$  e i raggi  $\beta$  deviabili. É così che M. Becquerel ha trovato che l'azione assorbente di uno schermo solido sui raggi  $\beta$  aumenta con la distanza dello schermo dalla sorgente, di modo che, se i raggi sono sottoposti a un campo magnetico come nella figura 4, uno schermo posto contro la sorgente radiante lascia sussistere una parte più grande dello spettro magnetico rispetto al caso dello stesso schermo posto sulla lastra fotografica. Questa variazione dell'effetto assorbente dello schermo con la distanza dalla sorgente è analoga a quanto avviene per i raggi  $\alpha$ ; essa è stata verificata da MM. Meyer e von Schweidler, che operarono con il metodo fluoroscopico; M. Curie ed io abbiamo osservato lo stesso fatto servendoci del metodo elettrico. Le condizioni della produzione di questo fenomeno non sono state ancora studiate. Tuttavia, quando il radio è racchiuso in un tubo di vetro e posto a distanza molto grande dal condensatore che è pure racchiuso in una scatola di alluminio sottile, è indifferente porre lo schermo contro la sorgente o contro il condensatore; la corrente ottenuta è allora la stessa nei due casi.

Lo studio dei raggi  $\alpha$  mi ha portato a considerare che questi raggi si comportano come proiettili lanciati con una grande velocità e che perdono la loro forza viva nell'incontro con ostacoli<sup>1</sup>. Questi raggi pertanto si propagano in modo rettilineo come ha mostrato M. Becquerel nell'esperienza seguente. Il polonio emettente i raggi era posto in una cavità lineare molto stretta, scavata in un foglio di cartone. Si aveva così una sorgente lineare di raggi. Un lo di rame del diametro di 1,5 mm era posto parallelamente di fronte alla sorgente a una distanza di 4,9 mm. Una lastra fotografica era posta parallelamente ad una distanza di 8,65 mm. Dopo una posa di 10 minuti, l'ombra geometrica del lo era riprodotta in modo perfetto, con le dimensioni previste e una penombra molto stretta da ogni parte ben corrispondente alla larghezza della sorgente. La stessa esperienza riesce pure ugualmente ponendo contro il filo un doppio foglio di alluminio battuto che i raggi sono obbligati ad attraversare.

Si tratta pertanto di raggi un grado di formare ombre geometriche perfette. L'esperienza con l'alluminio mostra che questi raggi non solo diffusi attraversando la lamina, e che questa lamina non emette, almeno per quantità importanti, raggi secondari analoghi a quelli dei raggi Roentgen.

I raggi  $\alpha$  sono quelli che appaiono attivi nella esperienza molto bella realizzata nello spintariscopio di Crookes<sup>2</sup>. Questo strumento è fatto essenzialmente da un grano di sale di radio mantenuto all'estremità di un lo metallico di fronte ad uno schermo di solfuro di zinco fosforescente. Il granello di radio si trova ad una distanza molto piccola dallo schermo (0,5 mm,

1 Madame Curie, Comptes rendus, 8 gennaio 1900

2 Chem. news, 3 aprile 1903

per esempio), e si rivolge per mezzo di un anello allo schermo ruotato verso il radio. In queste condizioni l'occhio percepisce sullo schermo una reale pioggia di punti luminosi che appaiono e scompaiono in continuazione.

Lo schermo presenta l'aspetto di un cielo stellato.

I punti brillanti sono più ravvicinati nelle regioni dello schermo vicine al radio, e nelle immediate vicinanze di quello la luce sembra continua. Il fenomeno non sembra alterato dalle correnti d'aria; si forma nel vuoto; uno schermo uguale molto sottile posto tra il radio e lo schermo fosforescente li sopprime; sembra quindi che il fenomeno sia dovuto all'azione dei raggi  $\alpha$  più assorbibili del radio.

Si può immaginare che la comparsa di uno dei punti luminosi sullo schermo fosforescente sia provocata dall'urto di un proiettile isolato. Da questo punto di vista, ci si troverebbe di fronte, per la prima volta, a un fenomeno che permette di distinguere l'azione individuale di una particella le cui dimensioni sono dello stesso ordine di grandezza di quelle di un atomo.

L'aspetto dei punti luminosi è lo stesso di quello delle stelle o degli oggetti ultra-microscopici fortemente illuminati che non producono sulla retina immagini nette, ma macchie di diffrazione; e è ciò che è in accordo con l'idea che ogni punto luminoso estremamente piccolo è prodotto dall'urto di un solo atomo.

I raggi penetranti non deviabili y sembrano essere di tutt'altra natura e sembrano analoghi ai raggi Roentgen.

Nulla prova, d'altra parte, che raggi poco penetranti della stessa natura non possano esistere nell'irraggiamento del radio, poiché questi potrebbero essere mascherati dall'irraggiamento corpuscolare.

Si tratta di vedere quanto l'irraggiamento dei corpi radioattivi è un fenomeno complesso. Le difficoltà del suo studio crescono per queste circostanze, che si devono indagare, se questo irraggiamento mostra dalla parte della materia solo un assorbimento selettivo, o anche una trasformazione più o meno profonda.

Si sanno per ora solo poche cose riguardo a tale questione. Tuttavia, se si ammette che l'irraggiamento del radio comporta a sua volta raggi di tipo catodico e raggi di tipo Roentgen, ci si può aspettare che questo irraggiamento mostri delle trasformazioni attraversando gli schermi. Si sa, infatti:

1. che i raggi catodici che escono dal tubo di Crookes attraverso una finestra di alluminio (esperienza di Lenard) sono fortemente diffusi dall'alluminio, e che, inoltre, l'attraversamento dello schermo comporta una diminuzione della loro velocità; è così che i raggi catodici di velocità uguale a  $1,4 \times 10^{10}$  centimetri perdono il 10% della loro velocità attraversando 0,01 mm di alluminio<sup>1</sup>;
2. i raggi catodici, incontrando un ostacolo, danno luogo a una produzione di raggi secondari, che sono in parte raggi catodici<sup>2</sup>.

Si può quindi, per analogia, prevedere l'esistenza di tutti fenomeni precedenti per i raggi delle sostanze radioattive. Studiando la trasmissione dei raggi del polonio attraverso uno schermo di alluminio, M. Becquerel non ha osservato né alcuna produzione di raggi secondari né trasformazioni di tipo catodico<sup>3</sup>.

Ho cercato di mettere in evidenza una trasformazione dei raggi del polonio, impiegando il metodo dell'inversione degli schermi: due schermi sovrapposti E1 ed E2 erano attraversati dai raggi, dove l'ordine di attraversamento deve essere indifferente, se il passaggio attraverso degli schermi non trasforma i raggi; se, al contrario, ogni schermo trasforma i raggi trasmettendoli, l'ordine degli schermi non è più indifferente.

Se, per esempio, i raggi si trasformano in raggi più assorbibili attraversando del piombo, e l'alluminio non produce un effetto simile con la stessa importanza, allora il sistema piombo-alluminio apparirà più opaco del sistema alluminio-piombo; ciò che avviene per i raggi Roentgen.

Le mie esperienze indicano che questo fenomeno si produce con i raggi del polonio.

L'apparecchio impiegato era quello della figura 8. Il polonio era posto in una scatola CCCC e gli schermi assorbenti, necessariamente molto piccoli, erano posti sulla tela metallica T.

---

1 Des Coudres, Physik. Zeitschrift, novembre 1902

2 Sagnac, Thèse de doctorat. - Curie e Sagnac, Comptes rendus, aprile 1900

3 Becquerel, Rapports au Congrès de Physique, 1900

Schermi impiegati	Spessore (mm)	Corrente osservata
Alluminio	0,01	17,9
Ottone	0,005	17,9
Ottone	0,005	6,7
Alluminio	0,01	6,7
Alluminio	0,01	150
Stagno	0,005	150
Stagno	0,005	125
Alluminio	0,01	125
Stagno	0,005	13,9
Ottone	0,005	13,9
Ottone	0,005	4,4
Stagno	0,005	4,4

I risultati ottenuti provano che l'irraggiamento è modificato attraversando uno schermo solido. Questa conclusione è in accordo con le esperienze nelle quali, di due lamine metalliche identiche e sovrapposte, la prima si mostra meno assorbente della successiva. È probabile, da ciò, che l'azione trasformatrice di uno schermo sia tanto maggiore quanto questo schermo è più lontano dalla sorgente. Questo punto non è stato verificato, e la natura della trasformazione non è ancora stata studiata nel dettaglio.

Ho ripetuto le stesse esperienze con un sale di radio molto attivo. Il risultato è stato negativo. Ho osservato solo variazioni insignificanti nell'intensità della radiazione trasmessa nel momento dell'inversione dell'ordine degli schermi. I sistemi di schermi provati sono stati i seguenti:

Schermo	Spessore mm	Schermo	Spessore mm
Alluminio	0,55	Platino	0,01
Alluminio	0,55	Piombo	0,1
Alluminio	0,55	Stagno	0,005
Alluminio	1,07	Rame	0,05
Alluminio	0,55	Ottone	0,005
Alluminio	1,07	Ottone	0,005
Alluminio	0,15	Platino	0,01
Alluminio	0,15	Zinco	0,05
Alluminio	0,15	Piombo	0,1

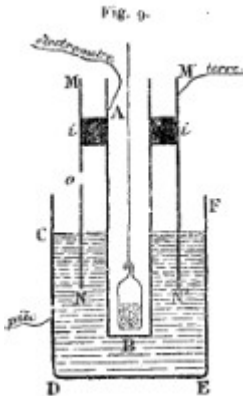
Il sistema piombo-alluminio si è mostrato leggermente più opaco di quello alluminio-piombo, ma la differenza non è grande. Non ho potuto così mettere in evidenza una trasformazione significativa dei raggi del radio. Tuttavia, nelle diverse esperienze radiografiche, M. Becquerel ha osservato effetti molto intensi dovuti ai raggi diffusi o secondari, emessi dagli schermi solidi che ricevevano i raggi del radio. La sostanza più attiva, dal punto di vista di queste emissioni secondarie, sembra essere il piombo.

### **Azione ionizzante dei raggi del radio sui liquidi isolanti**

M. Curie ha mostrato che i raggi del radio e i raggi di Roentgen agiscono sui liquidi dielettrici come sull'aria, comunicando loro una certa conducibilità elettrica<sup>1</sup>. Ecco come era predisposta l'esperienza (fig. 9). Il liquido da sperimentare è posto in un vaso metallico CDEF, nel quale è immerso un tubo di rame sottile AB; queste due parti metalliche fungono da elettrodi. Il vaso è mantenuto a un potenziale noto, per mezzo di una batteria di piccoli accumulatori, con un polo a terra. Il tubo AB è collegato all'elettrometro. Quando una corrente attraversa il liquido, si mantiene l'elettrometro a zero con l'aiuto di un quarzo piezoelettrico che dà la misura della corrente.

<sup>1</sup> P. Curie, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 17 febbraio 1902

Il tubo di rame MNM'N', collegato a terra, serve come tubo di guardia per impedire il passaggio della corrente attraverso l'aria. Un'ampolla contenente il sale di bario radifero può essere posta nel fondo del tubo AB; i raggi agiscono sul liquido dopo aver attraversato il vetro dell'ampolla e le pareti del tubo metallico. Si può ancora far agire il radio ponendo l'ampolla al di sotto della parete DE. Per operare con i raggi Roentgen, si fanno arrivare tali raggi attraverso la parete DE.



L'aumento della conducibilità per l'azione dei raggi del radio o dei raggi Roentgen sembra prodursi per tutti i dielettrici liquidi; ma, per constatare tale aumento, è necessario che la conducibilità propria del liquido sia molto piccola per non nascondere l'effetto dei raggi. Operando con il radio e i raggi di Roentgen, M. Curie ha ottenuto effetti dello stesso ordine di grandezza.

Quando si studia con lo stesso dispositivo la conducibilità dell'aria o di un altro gas sotto l'azione dei raggi di Becquerel, si trova che l'intensità di corrente ottenuta è proporzionale alla differenza di potenziale tra gli elettrodi, fintanto che quella non supera alcuni volt; ma per tensioni più alte, l'intensità di corrente cresce con sempre minore velocità, e la corrente di saturazione è raggiunta per una tensione di 100 volt.

I liquidi studiati con lo stesso apparecchio e con lo stesso prodotto radiante molto attivo si comportano in modo differente; l'intensità di corrente è proporzionale alla tensione quando questa varia tra 0 e 450 volt, e lo stesso quando la distanza tra gli elettrodi non supera i 6 mm. Si può allora considerare la conduttività prodotta nei diversi liquidi dall'irraggiamento di un sale di radio che agisce nelle medesime condizioni. I valori della Tabella seguente moltiplicati per  $10^{-14}$  danno la conduttività in mohs (inverso di ohm) per  $1 \text{ cm}^3$ :

Solfuro di carbonio	20
Etere di petrolio	15
Amilene	14
Cloruro di carbonio	3
Benzina	4
Aria liquida	1,3
Olio di vaselina	1,6

Si può tuttavia supporre che i liquidi e i gas si comportano in modo analogo, ma che, per i liquidi, la corrente rimane proporzionale alla tensione no a un limite ben più elevato dei gas. Si poteva, per analogia con ciò che avviene per i gas, cercare di abbassare il limite di proporzionalità impiegando un irraggiamento molto più debole. L'esperienza ha verificato questa previsione; il prodotto radiante impiegato era 150 volte meno attivo di quello che era servito per le prime esperienze. Per tensioni di 50, 100, 200, 400 volt, le intensità di corrente erano rappresentate dai valori 109, 185, 255, 335. La proporzionalità non si mantiene più, ma la corrente varia ancora fortemente quando si raddoppia la differenza di potenziale.

Alcuni dei liquidi esaminati sono isolanti quasi perfetti, quando sono mantenuti a temperatura costante, e quando sono al riparo dall'azione dei raggi. Questi sono: l'aria liquida, l'etere di petrolio, l'olio di vaselina, l'amilene. É allora molto facile studiare l'effetto dei raggi. L'olio di vaselina è molto meno sensibile all'azione dei raggi rispetto all'etere di petrolio. Conviene forse associare questo fatto alla differenza di volatilità che esiste tra questi due idrocarburi. L'aria liquida che ha ribollito per qualche tempo nel contenitore dell'esperienza è più sensibile all'azione dei raggi rispetto a quanto viene versato al suo interno; la conduttività prodotta dai raggi è di 1 maggiore nel primo caso. M. Curie ha studiato sull'amilene e sull'etere di petrolio l'azione dei raggi alle 4 temperature di +10 e di -17. La conduttività dovuta all'irraggiamento diminuisce solo di 1 del suo valore, 10 quando si passa da 10 a -17.

Nelle esperienze dove di è fatta variare la temperatura del liquido si può, sia mantenere il radio a temperatura ambiente, sia portarlo alla stessa temperatura del liquido; si ottiene lo stesso risultato in entrambi i casi. Ciò riguarda il fatto che l'irraggiamento del radio non varia con la temperatura, e conserva ancora lo stesso valore anche alla temperatura dell'aria liquida. Questo fatto è stato verificato direttamente mediante misure.

## **Diversi effetti e applicazioni dell'azione ionizzante dei raggi emessi dalle sostanze radioattive.**

I raggi delle nuove sostanze radioattive ionizzano fortemente l'aria. Si può, tramite il radio, provocare facilmente la condensazione del vapore acqueo supersaturo, così come avviene per effetto dei raggi catodici e dei raggi Roentgen.

Sotto l'influenza dei raggi emessi dalle nuove sostanze radioattive, la distanza esplosiva tra due conduttori metallici per una differenza di potenziale data si trova aumentata; cioè, il passaggio della scintilla è facilitato dall'azione dei raggi. Questo fenomeno è dovuto all'azione dei raggi più penetranti. Se, infatti, si circonda il radio con del piombo di 2 cm, l'azione del radio sulla scintilla non è molto indebolita, anche se l'irraggiamento che attraversa è solo una piccola frazione dell'irraggiamento totale.

Rendendo conduttrice, mediante le sostanze radioattive, l'aria nelle vicinanze dei due conduttori metallici, di cui uno è collegato a terra e l'altro a un elettrometro ben isolato, si vede l'elettrometro prendere una deviazione permanente, che permette di misurare la forza elettromotrice della pila formata dall'aria e dai due metalli (forza elettromotrice di contatto tra i due metalli, quando sono separati dall'aria). Questo metodo di misura è stato impiegato da lord Kelvin e dai suoi allievi, usando l'uranio come sostanza radiante<sup>1</sup>; un metodo analogo era stato in precedenza impiegato da M. Perrin che utilizzava l'azione ionizzante dei raggi Roentgen<sup>2</sup>.

Ci si può servire di sostanze radioattive nello studio dell'elettricità atmosferica. La sostanza attiva è racchiusa in una piccola scatola in alluminio sottile, fissata all'estremità da uno stelo metallico collegato all'elettrometro. L'aria è resa conduttrice nelle vicinanze dell'estremità dello stelo, e questo assume il potenziale dell'aria che lo circonda. Il radio sostituisce così con vantaggio la fiamma o gli apparecchi a scorrimento d'acqua di Lord Kelvin, in genere impiegati sinora nello studio della elettricità atmosferica<sup>3</sup>.

## **Effetti di fluorescenza, effetti luminosi**

I raggi emessi dalle nuove sostanze radioattive provocano la fluorescenza in certi corpi. M. Curie ed io, abbiamo dapprima scoperto questo fenomeno facendo agire sul polonio mediante un foglio di alluminio su uno strato di platinocianuro di bario. La stessa esperienza riuscì ancora più facilmente con bario radifero sufficientemente attivo. Quando la sostanza è fortemente radioattiva, la fluorescenza prodotta è molto bella.

Molte sostanze sono suscettibili di divenire fosforescenti o fluorescenti mediante l'azione dei raggi Becquerel. M. Becquerel ha studiato l'azione sui sali di uranio, sul diamante, sulla blenda, ecc. M. Bary ha mostrato che i sali dei metalli alcalini e alcalino-terrosi, che sono tutti fluorescenti sotto l'effetto dei raggi luminosi e Roentgen, sono ugualmente fluorescenti sotto l'azione dei raggi del radio<sup>4</sup>. Si può ugualmente osservare la fluorescenza della carta, del cotone, del vetro, ecc., nelle vicinanze del radio. Tra le diverse specie di vetro, quello di Turingia è particolarmente luminoso. I metalli non sembrano divenire luminosi.

Il platinocianuro di bario è più conveniente quando si vuole studiare l'irraggiamento dei corpi radioattivi con il metodo fluoroscopico. Si può seguire l'effetto dei raggi del radio a distanze superiori a 2 m. Il solfuro di zinco fosforescente è reso estremamente luminoso, ma questa sostanza ha l'inconveniente di conservare luminosità per qualche tempo, dopo che l'azione dei raggi è stata eliminata.

Si può osservare la fluorescenza prodotta dal radio quando lo schermo fluorescente è separato dal radio mediante schermi assorbenti. Abbiamo potuto osservare l'illuminamento di uno schermo al platinocianuro di bario attraverso il corpo umano. Tuttavia, l'azione è incomparabilmente più intensa, quando lo schermo è posto del tutto contro il radio e non è separato da alcuno schermo solido. Tutti i gruppi di raggi sembrano in grado di produrre la fluorescenza. Per osservare l'azione del polonio è necessario mettere la sostanza assai vicina allo schermo fluorescente senza interposizione di uno schermo solido, o tutt'al più con l'interposizione solo di uno schermo sottile.

La luminosità delle sostanze fluorescenti esposte all'azione delle sostanze radioattive cala con il

1 Lord Kelvin, Beattie e Smolan, Nature, 1897

2 Perrin, Tesi di dottorato

3 Paulsen, Rapports au Congrès de Physique, 1900. Witrowski, Bulletin de l'Académie des Sciences de Cracovia, gennaio 1902

4 Bary, Comptes rendus, t. CXXX, 1900, p. 776

tempo. Nello stesso tempo la sostanza fluorescente subisce una trasformazione. Eccone alcuni esempi: I raggi del radio trasformano il platinocianuro di bario in una varietà bruna meno luminosa (azione analoga a quella prodotta dai raggi Roentgen e descritta da M. Villard). Alterano allo stesso modo il solfato di uranile e di potassio facendoli ingiallire. Il platinocianuro di bario trasformato è rigenerato parzialmente dall'azione della luce. Ponendo il radio al di sotto di uno strato di platinocianuro di bario steso su della carta, il platinocianuro diviene luminoso; se si mantiene il sistema nell'oscurità, il platinocianuro si altera, e la sua luminosità cala considerevolmente. Ma, esponiamo il tutto alla luce; il platinocianuro è parzialmente rigenerato, e se si riporta il tutto nell'oscurità, la luminosità ridiviene assai intensa. Si è quindi, per mezzo di un corpo fluorescente e di un corpo radioattivo, realizzato un sistema che funziona come un corpo fosforescente a lunga durata.

Il vetro, che è reso fluorescente dall'azione del radio, si colora di bruno o di violetto. Nello stesso tempo, diviene meno fluorescente. Se si scalda questo vetro così alterato, si decolora, e nello stesso tempo in cui si ha la decolorazione, il vetro emette luce. Poi, il vetro riprende la sua proprietà di essere fluorescente come prima della trasformazione. Il solfuro di zinco che è stato esposto all'azione del radio per un tempo sufficiente si esaurisce a poco a poco e perde la facoltà di essere fosforescente, sia sotto l'azione del radio, che della luce. Il diamante è reso fosforescente dall'azione del radio, e si possono distinguere in tal modo le imitazioni, la cui luminosità è molto debole.

Tutti i composti del bario radifero sono spontaneamente luminosi<sup>1</sup>. I soli aloidi, anidri e secchi, emettono una luce particolarmente intensa. Questa luminosità non può essere vista alla luce del giorno, ma la si osserva facilmente nella semi oscurità o in una zona illuminata dalla luce del gas. La luce emessa può essere assai forte, tanto che si può leggere illuminando con un poco di prodotto nell'oscurità. La luce emessa emana da tutta la massa del prodotto, mentre, per un corpo fosforescente ordinario, la luce emana soprattutto dalla parte della superficie che è stata illuminata. All'aria umida i prodotti radiferi perdono gran parte della loro luminosità, ma la recuperano per disseccamento (Giesel). La luminosità sembra conservarsi. Dopo molti anni alcune modificazioni sensibili non sembrano prodursi nella luminosità dei prodotti debolmente attivi, visti in tubi sigillati all'oscurità. Con del cloruro di bario radifero, molto attivo e molto luminoso, la luce cambia di colore dopo qualche mese; diviene più violacea e si indebolisce molto; nello stesso tempo il prodotto subisce alcune trasformazioni; ridissolvendo il sale nell'acqua e seccandolo di nuovo, si ottiene la luminosità originaria.

Anche le soluzioni di sale di bario radifero, che contengono una forte proporzione di radio, sono luminose; si può osservare questo fatto ponendo la soluzione in una capsula di platino che, non essendo di per sé luminosa, permette di cogliere la debole luminosità della soluzione. Quando una soluzione di sale di bario radifero contiene cristalli che si sono depositati, questi cristalli sono luminosi all'interno della soluzione, e lo sono molto più della soluzione stessa, di modo che, in queste condizioni, sembrano essere i soli luminosi.

M. Giesel ha preparato del platinocianuro di bario radifero. Quando questo sale cristallizza, ha l'aspetto del platinocianuro di bario ordinario, ed è molto luminoso. Ma poco a poco il sale si colora spontaneamente e assume un colore bruno, nello stesso tempo in cui i cristalli divengono dicroici. In questa condizione, il sale è molto meno luminoso, sebbene la sua radioattività sia aumentata<sup>2</sup>. Il platinocianuro di radio, preparato da M. Giesel, si altera ancora assai più rapidamente. I composti del radio costituiscono il primo esempio di sostanze spontaneamente luminose.

## **Emissione di calore dai sali di radio**

Recentemente MM. Curie e Laborde hanno trovato che i sali di radio sono sede di emissione di calore spontaneo e continuo<sup>3</sup>. Questa emissione di calore ha come effetto quello di mantenere i sali di radio ad una temperatura più alta di quella ambiente; l'eccesso di temperatura dipende dall'isolamento termico della sostanza. Questo eccesso di temperatura può essere evidenziato con una esperienza grossolana eseguita per mezzo di due termometri a mercurio ordinari. Si utilizzano due vasi isolanti termici a vuoto, identici tra loro. In uno si pone un'ampolla di vetro contenente 7 dg di bromuro di radio puro; nell'altro, si pone un'altra ampolla di vetro identica che contiene una

1 Curie, Société de Physique, 3 marzo 1899. - Giesel, Wied. Ann., t. LXIX, p. 91

2 Giesel, Wied. Ann., t. LXIX, p. 91

3 Curie e Laborde, Comptes rendus, 16 marzo 1903

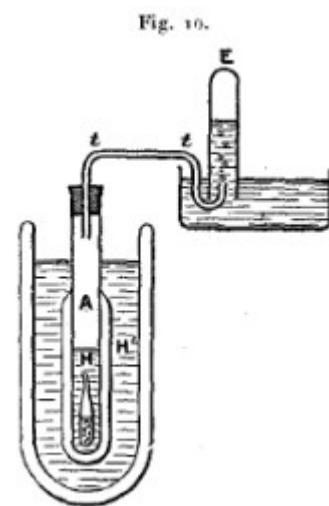


sostanza inattiva qualsiasi, per esempio cloruro di bario. La temperatura di ogni scatola è indicata da un termometro il cui bulbo è posto nelle immediate vicinanze dell'ampolla. L'apertura degli isolatori è chiusa con del cotone. Quando si stabilisce l'equilibrio fra le temperature, il termometro che si trova nello stesso vaso del radio indica costantemente una temperatura superiore a quella dell'altro termometro; l'eccesso di temperatura osservato era di 3.

Si può valutare la quantità di calore emessa dal radio con un calorimetro a ghiaccio di Bunsen. Ponendo in questo calorimetro un'ampolla di vetro contenente sali di radio, si constata un apporto continuo di calore che si ferma allontanando il radio. La misura fatta con un sale di radio preparato da tempo indica che ogni grammo di radio emette circa 80 piccole calorie all'ora. Il radio emette quindi in un'ora una quantità di calore sufficiente a fondere il suo peso in ghiaccio, e un grammo atomo (225 g) di radio cederà in un'ora 18000 cal, cioè una quantità di calore confrontabile a quella prodotta dalla combustione di un grammo atomo (1 g) di idrogeno.

Una emissione di calore così considerevole non si può spiegare con alcuna reazione chimica consueta, e tanto più che lo stato del radio sembra rimanere lo stesso negli anni. Si potrebbe pensare che la liberazione di calore è dovuta ad una trasformazione dello stesso atomo di radio, trasformazione necessariamente molto lenta. Si è portati a concludere che le quantità di energia messe in gioco nella formazione e nella trasformazione degli atomi siano considerevoli e superino tutte quelle a noi note.

Si può ancora valutare il calore emesso dal radio a diverse temperature utilizzandolo per far bollire un gas liquefatto e misurando il volume di gas che si sprigiona. Si può fare questa esperienza con del cloruro di metile (a  $-21$ ). L'esperienza è stata fatta da MM. Dewar e Curie con l'ossigeno liquido (a  $-180$ ) e con idrogeno liquido (a  $-252$ ). Quest'ultima sostanza è particolarmente utile per la realizzazione dell'esperienza. Una provetta A, circondata da un isolatore termico sotto vuoto, contiene idrogeno liquido H (fig. 10); essa è munita di un tubo di scolo t che permette di raccogliere il gas in una provetta graduata E riempita di acqua. La provetta A e il suo isolatore sono immersi in un bagno di idrogeno liquido H'. In queste condizioni non si ha alcuna fuoriuscita gassosa nella provetta A. quando si introduce, nell'idrogeno liquido contenuto in questa provetta, un'ampolla contenente 7 dg di bromuro di radio, si ha una continua liberazione di gas, e se ne raccolgono  $73 \text{ cm}^3$  al minuto.



Un sale di radio solido preparato libera una quantità di calore relativamente piccola; ma questa emissione di calore aumenta continuamente e tende ad un valore determinato che non è ancora raggiunto alla fine di un mese. Quando si scioglie nell'acqua un sale di radio e si racchiude la soluzione in un tubo sigillato, la quantità di calore liberata dalla soluzione è debole; aumenta in seguito e tende a divenire costante dopo un mese; l'emissione di calore è allora la stessa dovuta al sale allo stato solido.

Quando si misura con un calorimetro Bunsen il calore liberato da un sale di radio contenuto in un'ampolla di vetro, alcuni raggi penetranti del radio attraversano l'ampolla e il calorimetro senza essere assorbiti. Per vedere se questi raggi trasportano una apprezzabile quantità di energia, si può rifare una misura circondando l'ampolla con una lamina di piombo di 2 mm di spessore; si trova che, in queste condizioni, l'emissione di calore è aumentata del 4% circa del suo valore; l'energia emessa dal radio sotto forma di raggi penetranti non è quindi per nulla trascurabile.

## Effetti chimici prodotti dalle nuove sostanze radioattive. Colorazione

Le radiazioni emesse dalle sostanze fortemente radioattive possono provocare certe trasformazioni, e reazioni chimiche. I raggi emessi dai prodotti radiferi esercitano azioni coloranti sul vetro e la porcellana<sup>1</sup>.

La colorazione del vetro, in genere bruno o violetto, è molto intensa; si produce nella massa stessa del vetro, persiste anche dopo l'allontanamento del radio. Tutti i vetri si colorano in un tempo più o meno lungo, e non è necessaria la presenza del piombo. Conviene associare questo fatto a quello, da poco osservato, della colorazione dei vetri dei tubi a vuoto che producono raggi Roentgen dopo il loro utilizzo.

<sup>1</sup> M. e Madame Curie, Comptes rendus, t. CXXIX, novembre 1899, p. 823

M. Giesel ha mostrato che i sali aloidi cristallizzati dei metalli alcalini (salgemma, silvina) si colorano sotto l'influenza del radio, così come sotto l'azione dei raggi catodici. M. Giesel mostra che si ottengono colorazioni dello stesso genere facendo rimanere i sali alcalini nel vapore di sodio<sup>1</sup>.

Ho studiato la colorazione di un insieme di vetri di composizione nota, prestatami gentilmente per tale scopo da M. Le Chatelier. Non ho osservato grandi varietà nella colorazione. Si presenta in genere come violetta, gialla, bruna o grigia. Sembra legata alla presenza di metalli alcalini. Con i sali alcalini puri cristallizzati si ottengono colorazioni più variate e vive; il sale, inizialmente bianco, diviene blu, verde, giallo bruno, ecc.

M. Becquerel ha mostrato che il fosforo bianco è trasformato in fosforo rosso dall'azione del radio. La carta è alterata e colorata dall'azione del radio. Diviene fragile, si sgretola e assomiglia infine a un colino pieno di buchi.

In alcune circostanze vi è una produzione di ozono nelle vicinanze dei composti molto attivi. I raggi che escono da un'ampolla sigillata, racchiudente radio, non producono ozono nell'aria che attraversano. Al contrario, un forte odore di ozono si libera quando si apre l'ampolla. In modo generale si produce ozono nell'aria, quando vi è un collegamento diretto tra questa e il radio. È sufficiente anche la comunicazione mediante un condotto stretto; sembra che la produzione di ozono sia legata alla propagazione della radioattività indotta, di cui parleremo più avanti.

I composti radiferi sembrano alterarsi con il tempo, senza dubbio sotto l'azione delle loro stesse radiazioni. Si è visto in precedenza che i cristalli di cloruro di bario radifero che sono incolori al momento in cui si depositano, assumono poco alla volta una colorazione a volte gialla o arancio, a volte rosa; questa colorazione scompare per dissoluzione. Il cloruro di bario radifero libera composti ossigenati di cloro: il bromuro emesso dal bromo.

Queste lente trasformazioni si manifestano in genere qualche tempo dopo la preparazione del prodotto solido, il quale, nel medesimo tempo, cambia aspetto e colore, assumendo una tinta gialla o violacea. La luce emessa diviene così più violacea. I sali di radio puro sembrano mostrare le stesse trasformazioni dei sali di contenenti bario. Tuttavia i cristalli di cloruro, depositati in soluzione acida, non si colorano in modo significativo durante un tempo che è sufficiente, perché i cristalli di cloruro di bario radifero, ricchi di uranio, assumano una colorazione intensa.

## **Liberazione di gas in presenza di sali di radio**

Una soluzione di bromuro di radio libera gas in modo continuo<sup>2</sup>. Questi gas sono principalmente l'idrogeno e l'ossigeno, e la composizione della miscela è vicina a quella dell'acqua; si può ammettere che vi sia una scomposizione dell'acqua in presenza del sale di radio.

I sali solidi di radio (cloruro, bromuro) danno pure origine ad una continua liberazione di gas. Questi gas riempiono i pori del sale solido e si sprigionano in modo assai abbondante quando il sale si scioglie. Si trova nella miscela gassosa idrogeno, ossigeno, anidride carbonica, elio; lo spettro dei gas presenta anche alcune righe sconosciute<sup>3</sup>.

Si possono attribuire ad emissioni gassose due eventi che sono prodotti nelle esperienze di M. Curie. Una sottile ampolla di vetro sigillata, riempita quasi completamente di bromuro di radio solido e secco, è esplosa due mesi dopo la chiusura sotto l'effetto di un debole riscaldamento; l'esplosione era probabilmente dovuta alla pressione dell'aria all'interno. In un'altra esperienza un'ampolla contenente cloruro di radio preparato da tempo era in comunicazione con un bulbo di grande volume nel quale era mantenuto un vuoto quasi perfetto.

L'ampolla essendo stata sottoposta ad un riscaldamento molto rapido no a 300, il sale fece esplosione; l'ampolla fu spezzata, e il sale scagliato a distanza; vi doveva essere una pressione notevole dentro l'ampolla al momento dell'esplosione. L'apparecchiatura era d'altronde stata collaudata per il riscaldamento nelle stesse condizioni in assenza di sale di radio, e non si era verificato alcun incidente. Queste esperienze mostrano che vi è pericolo nel riscaldare del sale di radio preparato da tempo e che è pericolo anche nel conservare a lungo il radio in un tubo sigillato.

## **Produzione di termoluminescenza**

Alcune sostanze come la fluorite, divengono luminose se scaldate; sono termoluminescenti; la

1 Giesel, Soc. de Phys. allemande; gennaio 1900

2 Giesel., 1903, p. 347. - Ramsay e Soddy, Phys. Zeitschr., 15 settembre 1903

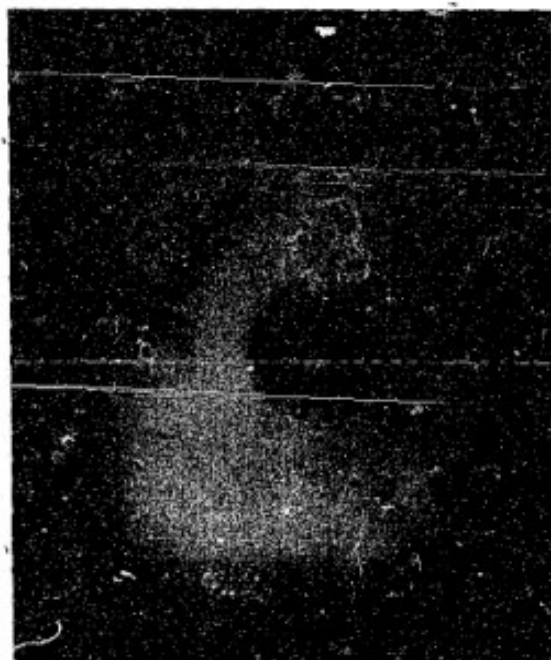
3 Ramsay e Soddy, loc. cit Ramsay e Soddy, loc. cit

loro luminosità si esaurisce dopo qualche tempo; ma la capacità di divenire nuovamente luminosa per riscaldamento è restituita a questi corpi per effetto di una scintilla e anche per il radio. Il radio può quindi restituire a questi corpi le loro proprietà termoluminescenti<sup>1</sup>. Al momento del riscaldamento la fluorite subisce una trasformazione accompagnata da una emissione luminosa. Quando la fluorite è poi sottoposta all'azione del radio, si ha una trasformazione in senso inverso, scompare la colorazione, e questo fenomeno è accompagnato dalla produzione di luce. Sembra assai probabile che vi sia una modifica di natura chimica, e che la produzione di luce sia legata a tale modifica. Questo fenomeno potrebbe essere generale. Potrebbe essere che la produzione di fluorescenza per effetto del radio e che la luminosità delle sostanze radifere fossero necessariamente legate a un fenomeno di trasformazione chimica o fisica della sostanza che emette la luce.

## Radiografie

L'azione radiografica delle nuove sostanze radioattive è molto intensa. Tuttavia il modo di operare deve essere assai diverso con il polonio e il radio. Il polonio agisce solo a piccola distanza, e la sua azione è considerevolmente indebolita da schermi solidi; è facile sopprimerla praticamente per mezzo di uno schermo di piccolo spessore (1 mm di vetro). Il radio agisce a distanze

Fig. 11.



Radiographie obtenue avec les rayons du radium.

notevolmente maggiori. L'azione radiografica dei raggi del radio si osserva a oltre 2 m di distanza in aria, e ciò anche quando il prodotto radiante è racchiuso in un'ampolla di vetro.

I raggi che intervengono in queste condizioni appartengono ai gruppi  $\beta$  e  $\gamma$ . Grazie alle differenze che esistono tra la trasparenza di diverse sostanze per i raggi, si può, come con i raggi Roentgen, ottenere radiografie di diversi oggetti. I metalli sono, in generale, opachi, tranne l'alluminio che è molto trasparente. Non esiste differenza significativa nella trasparenza tra la carne e le ossa. Si può operare a grande distanza e con sorgenti di dimensioni molto piccole, ottenendo così radiografie molto precise. È molto vantaggioso, per la bellezza delle radiografie, inviare i raggi  $\beta$  di lato, per mezzo di un campo magnetico, senza utilizzare i raggi  $\gamma$ . I raggi  $\beta$ , attraversando l'oggetto da radiografare, provano, infatti, una certa diffusione e causano una certa sfocatura. Sopprimendoli, si è obbligati ad impiegare tempi di posa più lunghi, ma con risultati migliori. La radiografia di un oggetto, come un portamonete, richiede un giorno con una sorgente radiante costituita da qualche centigrammo di sale di radio, racchiuso in un'ampolla di vetro posta a 1 m

<sup>1</sup> Becquerel, Rapports au Congrès de Physique, 1900

della lastra sensibile, davanti alla quale si trova l'oggetto. Se la sorgente è alla distanza di 20 cm dalla lastra, lo stesso risultato si ottiene in un'ora. Nelle immediate vicinanze della sorgente radiante, una lastra sensibile è impressionata istantaneamente.

## Effetti fisiologici

I raggi del radio esercitano un'azione sull'epidermide. Questa azione è stata osservata da M. Walkho e confermata da M. Giesel, poi da MM. Becquerel e Curie<sup>1</sup>.

Se si pone sulla pelle una capsula in celluloido o in caucciù sottile che racchiudono un sale di radio molto attivo e se la si lascia per qualche tempo, si produce un rossore sulla pelle, sia nell'immediato, sia alla fine di un tempo che è tanto maggiore quanto l'azione è stata più debole e meno prolungata; questa macchia rossa appare nel posto che è stato esposto all'azione; l'alterazione locale della pelle si manifesta ed evolve come una ustione. In certi casi si forma una vescica. Se l'esposizione è stata prolungata, si forma una ulcerazione a guarigione lenta. In una esperienza, M. Curie ha fatto agire sul suo braccio un prodotto radiante relativamente poco attivo per 10 ore. Il rossore si manifesta nell'immediato, e si forma più tardi una piaga che guarisce in 4 mesi. L'epidermide viene localmente distrutta, e si è ricostruita lentamente e a fatica con la formazione di una cicatrice molto evidente. Una ustione con radio con un'esposizione di mezz'ora apparsa al termine di 15 giorni, formò una vescica e guarì in 15 giorni. Un'altra scottatura, fatta con una esposizione di soli 8 minuti, produsse una macchia rossa che apparve alla fine di un solo mese, e il suo effetto fu insignificante.

L'azione del radio sulla pelle può prodursi attraverso i metalli, ma molto indebolita. Per salvaguardarsi dall'azione, bisogna evitare di tenere il radio a lungo su di sé e di, quantomeno, avvolgerlo in un foglio di piombo. L'azione del radio sulla pelle è stata studiata da M. Dr Danlos, presso l'ospedale Saint-Louis, come procedura per il trattamento di certe malattie della pelle, processo confrontabile al trattamento con raggi Roentgen o con luce ultravioletta. Il radio ore da questo punto di vista risultati incoraggianti; l'epidermide parzialmente distrutta dall'azione del radio si riforma allo stato sano. L'azione del radio è più profonda di quella della luce, e il suo impiego è più facile rispetto a quello della luce o dei raggi Roentgen. Lo studio delle condizioni di applicazione è necessariamente un poco lungo, poiché non si può rendersi immediatamente conto dell'effetto dell'applicazione.

M. Giesel ha osservato l'azione del radio sulle foglie delle piante. Le foglie sottoposte all'azione ingiallivano e si sfaldavano. M. Giesel ha pure scoperto l'azione dei raggi del radio sull'occhio<sup>2</sup>. Quando si pone nell'oscurità un prodotto radiante nelle vicinanze della palpebra chiusa o della tempia, si ha la sensazione di una luce che riempie l'occhio.

Questo fenomeno è stato studiato da MM. Himstedt e Nagel<sup>3</sup>. Questi fisici hanno mostrato che tutte le sostanze dell'occhio divengono fluorescenti per effetto del radio, ed è ciò che spiega la sensazione di luce percepita. I ciechi, che hanno la retina intatta, sono sensibili all'azione del radio, mentre quelli la cui retina è malata non avvertono la sensazione luminosa dovuta ai raggi. I raggi del radio impediscono od ostacolano lo sviluppo delle colonie di micobatteri, ma questa azione non è molto intensa<sup>4</sup>. Recentemente, M. Danysz ha mostrato che i raggi del radio agiscono energeticamente sul midollo e sul cervello. Dopo l'azione di un'ora, si producono paralisi in animali sottoposti alle esperienze, e questi muoiono in genere dopo qualche ora<sup>5</sup>.

## Azione della temperatura sull'irraggiamento

Vi sono ancora solo poche informazioni sul modo in cui varia l'emissione dei corpi radioattivi con la temperatura. Sappiamo tuttavia che l'emissione permane alle basse temperature. M. Curie ha posto nell'aria liquida un tubo di vetro contenente cloruro di bario radifero<sup>6</sup>. La luminosità del prodotto radiante persiste in queste condizioni. Al momento in cui si toglie il tubo dall'ambiente freddo, sembra ancora più luminoso della temperatura ambiente.

1 Walkho, Phot. Rundschau, ottobre 1900. - Giesel, Berichte d. deutsch. chem. Gesell., t. XXIII. - Becquerel e Curie, Comptes rendus, t. CXXXII, p. 1289

2 Giesel, Naturforscherrersammlung, Monaco, 1899

3 Himstedt e Nagel, Ann. der Physik, t. IV, 1901

4 Aschkinass e Caspari, Ann. der Physik, t. VI, 1901, p. 57

5 Danysz, Comptes rendus, 16 febbraio 1903

6 Curie, Société de Physique, 2 marzo 1900

Alla temperatura dell'aria liquida, il radio continua ad esercitare la fluorescenza del solfato di uranile e di potassio. M. Curie ha verificato con misure elettriche che l'irraggiamento, misurato ad una data distanza dalla sorgente radiante, possiede la stessa intensità quando il radio si trova alla temperatura ambiente, o quando è in un ambiente alla temperatura dell'aria liquida. In queste esperienze, il radio era posto al fondo di un tubo chiuso in fondo. I raggi provenienti dal tubo dalla parte aperta, attraversavano un certo strato d'aria ed erano raccolti in un condensatore. Si misurava l'azione dei raggi sull'aria del condensatore, sia lasciando il tubo in aria, sia circondandolo con aria liquida fino ad una certa altezza. Il risultato ottenuto era lo stesso nei due casi.

Quando si porta il radio ad una temperatura elevata, la sua radioattività rimane. Il cloruro di bario radifero vicino alla temperatura di fusione (intorno agli 800) è radioattivo e luminoso. Tuttavia, un riscaldamento prolungato a temperatura elevata fa abbassare temporaneamente la radioattività del prodotto. La diminuzione è molto importante, può arrivare no al 75% dell'irraggiamento totale. La diminuzione proporzionale è minore sui raggi assorbibili rispetto ai raggi penetranti, che sono alquanto soppressi dal riscaldamento. Con il tempo, l'irraggiamento del prodotto riprende l'intensità e la composizione che aveva prima del riscaldamento; questo risultato è raggiunto dopo 2 mesi a partire dal riscaldamento.

## Capitolo 4

### La Radioattività Indotta

#### Comunicazione della radioattività a sostanze originariamente inattive

Nel corso delle nostre ricerche sulle sostanze radioattive, abbiamo osservato, M. Curie ed io, che tutte le sostanze che rimangono per un certo tempo nelle vicinanze di un sale radifero divengono essi stessi radioattivi<sup>1</sup>. Nella nostra prima pubblicazione su questo argomento, ci siamo impegnati a mostrare che la radioattività, così acquisita dalle sostanze inizialmente inattive, non è dovuta a un trasporto di polveri radioattive che potrebbero posarsi sulla superficie di queste sostanze.

Questo fatto, ora certo, è mostrato in tutta evidenza dall'insieme delle esperienze qui descritte, e in particolare dalle leggi secondo le quali la radioattività prodotta nelle sostanze naturalmente inattive scompare quando si tolgono queste sostanze dall'azione del radio.

Abbiamo dato al fenomeno nuovo scoperto il nome di radioattività indotta.

Nella stessa pubblicazione, abbiamo indicato le caratteristiche essenziali della radioattività indotta. Abbiamo attivato lamine di diverse sostanze, ponendole nelle vicinanze di sali radiferi solidi e abbiamo studiato la radioattività di queste lamine con il metodo elettrico. Abbiamo così osservato i seguenti fatti:

1. L'attività di una lamina esposta all'azione del radio aumenta con il tempo di esposizione e tende ad un limite, secondo una legge asintotica.
2. L'attività di una lamina che è stata attivata dall'azione del radio e che è stata poi sottratta a questa azione scompare in qualche giorno. Questa attività indotta tende a zero in funzione del tempo, secondo una legge asintotica.
3. In condizioni uguali, la radioattività indotta da uno stesso prodotto radifero su diverse lamine è indipendente dalla natura della lamina. Il vetro, la carta, i metalli si attivano con la stessa intensità.
4. La radioattività indotta su una stessa lamina da diverse sostanze radifere ha un valore limite tanto più elevato quanto il prodotto è attivo.

Poco tempo dopo, M. Rutherford pubblicò un lavoro, dal quale risulta che i composti di torio sono in grado di produrre il fenomeno della radioattività indotta<sup>2</sup>. M. Rutherford trovò per questo fenomeno le stesse leggi che sono state espone, e scoprì inoltre questo importante fatto, che i corpi carichi con elettricità negativa si attivano maggiormente degli altri. M. Rutherford osservò che l'aria che è passata sull'ossido di torio conserva per circa 10 minuti una notevole conducibilità. L'aria che si trova in questa condizione comunica la radioattività indotta a sostanze inattive, soprattutto a quelle caricate negativamente.

M. Rutherford interpreta le sue esperienze ammettendo che i composti del torio, e soprattutto l'ossido, emettono una emanazione radioattiva particolare, suscettibile di essere portata dalle correnti d'aria e caricata di elettricità positiva. Questa emanazione sarebbe la causa della radioattività indotta. M. Dorn ha riprodotto, con i sali di bario radifero, le esperienze fatte da M. Rutherford con l'ossido di torio<sup>3</sup>.

M. Debiere ha mostrato che l'attinio provoca, in forma estremamente intensa, l'attività indotta dei corpi posti nelle sue vicinanze. Come per il torio, si produce una trasmissione considerevole dell'attività da parte delle correnti d'aria<sup>4</sup>. La radioattività indotta si presenta sotto aspetti molti vari, e quando si produce l'attivazione di una sostanza nelle vicinanze del radio all'aria libera, si ottengono risultati irregolari. MM. Curie e Debiere hanno osservato che il fenomeno è, al contrario, molto regolare quando si opera in contenitori chiusi; hanno pertanto studiato l'attivazione in luoghi chiusi<sup>5</sup>.

---

1 M. e Madame Curie, Comptes rendus, 6 novembre 1899

2 Rutherford, Phil. Mag., gennaio e febbraio 1900

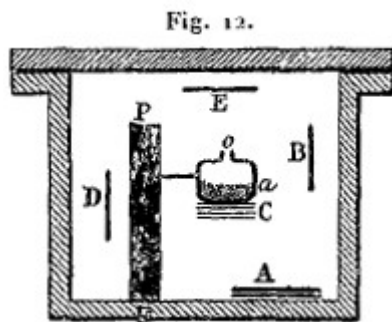
3 Dorn, Abh. Naturforsch. Gesell. Halle, giugno 1900

4 Debiere, Comptes rendus, 30 luglio 1900; 16 febbraio 1903

5 Curie e Debiere, Comptes rendus, 4 marzo 1901

## Attivazione in spazi chiusi

La radioattività indotta è a sua volta più intensa e regolare quando si opera in un contenitore chiuso. La materia attiva è posta in una piccola ampolla in vetro a aperta in o (fig. 11) nel mezzo di una cassa chiusa. Diverse lastre A, B, C, D, E poste nella cassa divengono radioattive dopo l'esposizione di un giorno. L'attività è la stessa, indipendentemente dalla natura della lastra, a parità di dimensioni (piombo, rame, alluminio, vetro, ebanite, cera, cartone, parana). L'attività di una faccia di una delle piastre è tanto maggiore quanto lo spazio libero verso questa faccia è maggiore.



Se si ripete l'esperienza precedente con l'ampolla a completamente chiusa, non si ottiene alcuna attività indotta. L'irraggiamento del radio non interviene direttamente nella produzione della radioattività indotta. È così che, nella precedente esperienza, la lamina D, protetta dall'irraggiamento dallo schermo di piombo spesso P P', è attivata tanto quanto B e E.

La radioattività si trasmette tramite l'aria avvicinandosi progressivamente dalla materia radiante fino al corpo da attivare. Essa può anche trasmettersi in lontananza tramite tubi capillari molto stretti. La radioattività indotta è a sua volta più intensa e più regolare, se si sostituisce il sale radifero attivante solido con una sua soluzione acquosa.

I liquidi sono più pronti ad acquisire la radioattività indotta. Si può, per esempio, rendere radioattiva l'acqua pura, ponendola in un contenitore all'interno di una cassa chiusa che contiene pure una soluzione di un sale radifero.

Certe sostanze divengono luminose, quando le si pone in un contenitore attivante (corpi fosforescenti e fluorescenti, vetro, carta, cotone, acqua, soluzioni saline). Il solfuro di zinco fosforescente è particolarmente brillante in queste condizioni. La radioattività di questi corpi luminosi è tuttavia la stessa di quella di un pezzo di metallo o altro corpo che si attiva nelle stesse condizioni senza divenire luminoso.

Qualunque sia la sostanza che si attiva in un contenitore chiuso, questa sostanza acquista una attività che aumenta con il tempo e finisce per raggiungere un valore limite, sempre lo stesso, quando si opera con la stessa materia attivante e lo stesso dispositivo sperimentale.

La radioattività indotta limite è indipendente dalla natura e dalla pressione del gas che si trova nel mezzo attivante (aria, idrogeno, anidride carbonica). La radioattività indotta limite in uno stesso mezzo dipende solamente dalla quantità di radio che vi si trova allo stato di soluzione, e sembra essergli proporzionale.

## Ruolo dei gas nei fenomeni di radioattività indotta. Emanazione

I gas presentano in un contenitore che racchiude un sale solido o una soluzione di sale di radio sono radioattivi. Questa radioattività persiste se si aspira il gas con un tubo e lo si raccoglie in una provetta. Le pareti stesse della provetta divengono allora radioattive, e il vetro della provetta è luminoso nell'oscurità. L'attività e la luminosità della provetta scompaiono poi completamente, ma molto lentamente, e dopo un mese si può osservare ancora la presenza di radioattività.

Dall'inizio delle nostre ricerche, abbiamo, M. Curie ed io, estratto scaldando la pechblenda un gas fortemente radioattivo, ma, come nella precedente esperienza, l'attività di questo gas aveva nito per svanire completamente [P. Curie e Madame Curie, Rapports au Congrès de Physique, 1900].

Così, per il torio, il radio, l'attinio, la radioattività indotta si propaga progressivamente attraverso il gas, dal corpo attivo no alle pareti del contenitore che li racchiude, e la proprietà attivante è trasportata con il gas stesso, quando si estrae quest'ultimo dal contenitore.

Quando si misura la radioattività di sostanze radifere con il metodo elettrico per mezzo dell'apparecchiatura descritta in fig.1, l'aria tra le piastre diviene pure radioattiva; tuttavia, mandando una corrente d'aria tra le piastre, non si osserva una notevole diminuzione nell'intensità della corrente, dimostrando che la radioattività diffusa nello spazio tra le piastre è poco importante rispetto a quella dello stesso radio allo stato solido.

Comportamento del tutto diverso si osserva nel caso del torio. Le irregolarità che avevo osservato misurando la radioattività dei composti del torio, derivavano dal fatto che in quel periodo

lavoravo con un condensatore esposto all'aria; ora la minore corrente d'aria produce un significativo cambiamento nell'intensità della corrente, perché la radioattività diffusa nello spazio nelle vicinanze del torio è importante rispetto alla radioattività della sostanza. Questo effetto è ancora più marcato per l'attinio. Un composto molto attivo dell'attinio sembra molto meno attivo quando si invia una corrente d'aria sulla sostanza.

L'energia radioattiva è pertanto contenuta nel gas sotto una forma speciale. M. Rutherford suppone che certe sostanze radioattive liberano costantemente un gas materiale radioattivo detto emanazione. Questo gas avrebbe la proprietà di rendere radioattivi i corpi che si trovano nello spazio in cui si diffonde. Le sostanze che emettono emanazioni sono il radio, il torio e l'attinio.

## Disattivazione all'aria aperta di corpi solidi attivati

Un corpo solido, che è stato attivato dal radio in un contenitore attivante per un tempo sufficiente, e che è stato poi tolto dal contenitore, si disattiva all'aria aperta secondo una legge di tipo esponenziale che è la stessa per tutti i corpi e che è rappresentata dalla seguente formula<sup>1</sup>

$$I = I_0 \left( a \frac{e^{-t}}{\theta_1} - (a-1) \frac{e^{-t}}{\theta_2} \right)$$

essendo  $I_0$  l'intensità iniziale dell'irraggiamento nel momento in cui si ritira la lamina dal contenitore,  $I$  l'intensità al tempo  $t$ ;  $a$  è un coefficiente numerico  $a = 4.20$ ;  $\theta_1$  e  $\theta_2$  sono delle costanti di tempo;  $\theta_1 = 2420$  sec,  $\theta_2 = 1860$  sec. Dopo 2 o 3 ore questa legge si riduce a un esponenziale semplice, e l'influenza del secondo esponenziale sul valore di  $I$  non si fa più sentire. La legge di disattivazione è allora tale che l'intensità dell'irraggiamento diminuisce della metà del suo valore in 28 minuti. Questa legge finale si può considerare come caratteristica della disattivazione nell'aria aperta dei corpi solidi attivati dal radio.

I corpi solidi attivati dall'attinio si disattivano all'aria aperta secondo una legge esponenziale simile alla precedente, ma tuttavia la disattivazione è un poco più lenta<sup>2</sup>. I corpi solidi attivati dal torio si disattivano molto più lentamente; l'intensità dell'irraggiamento diminuisce della metà in 11 ore<sup>3</sup>.

## Disattivazione in ambiente chiuso. Velocità di distruzione dell'emanazione

Un contenitore chiuso attivato dal radio e poi tolto al suo effetto, si disattiva secondo una legge molto meno rapida di quella valida all'aria aperta. Si può, per esempio, fare l'esperienza con un tubo di vetro che si attiva all'interno, mettendolo per un certo tempo in comunicazione con una soluzione di un sale di radio. Si salda poi il tubo, e si misura l'intensità dell'irraggiamento emesso all'esterno dalle pareti del tubo, nella fase di disattivazione.

La legge di disattivazione è una legge esponenziale. Essa è espressa con grande esattezza dalla formula

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\Theta}}$$

$I_0$ , intensità dell'irraggiamento iniziale;

$I$ , intensità dell'irraggiamento dopo un tempo  $t$ ;

$\Theta$ , una costante temporale  $\Theta = 4.970 \times 10^5$  secondi.

L'intensità dell'irraggiamento diminuisce della metà in 4 giorni.

Questa legge di disattivazione è assolutamente invariabile, per qualsiasi condizione sperimentale (dimensione del contenitore, natura delle pareti, natura del gas interno, durata dell'attivazione, ecc.). La legge di disattivazione rimane la stessa, per ogni temperatura tra  $-180$  e  $+450$ . Questa legge di disattivazione è quindi del tutto caratteristica e potrebbe servire a definire un *campione di tempo* assolutamente indipendente.

In queste esperienze, è l'energia radioattiva accumulata nel gas che mantiene l'attività delle

1 Curie e Danne, Comptes rendus, 9 febbraio 1903

2 Debierne, Comptes rendus, 16 febbraio 1903

3 Rutherford, Phil. Mag., febbraio 1900



pareti. Se, infatti, si elimina il gas facendo il vuoto nel contenitore, si constata che le pareti si disattivano seguendo la modalità rapida di disattivazione, diminuendo l'intensità dell'irraggiamento della metà in 28 minuti. Questo stesso risultato è ottenuto sostituendo nel contenitore dell'aria comune con aria attivata.

La legge di disattivazione con riduzione a metà in 4 giorni e quindi caratteristica della scomparsa dell'energia radioattiva accumulata nel gas. Se ci si serve dell'espressione adottata da M. Rutherford, si può dire che l'emanazione del radio scompare spontaneamente in funzione del tempo con riduzione a metà in 4 giorni. L'emanazione del torio è di un altro tipo e scompare molto più rapidamente. Il potere di attivazione diminuisce della metà in circa 1 minuto e 10 secondi.

MM: Elster e Geitel hanno mostrato che esiste sempre nell'aria atmosferica, in proporzione molto piccola, una emanazione radioattiva analoga a quelle emesse dai corpi radioattivi. Fili metallici tesi in aria mantenuti a un potenziale negativo si attivano sotto l'influsso di questa emanazione. L'aria che si aspira per mezzo di un tubo infisso nel suolo è particolarmente carico di emanazione. L'origine di questa emanazione è ancora sconosciuta. L'aria estratta da certe acque minerali contiene l'emanazione mentre l'aria contenuta nell'acqua del mare e di fiume ne è quasi del tutto esente.

## Natura delle emanazioni

Secondo M. Rutherford l'emanazione di un corpo radioattivo è un gas materiale radioattivo che sfugge da questi corpi. Infatti, da un certo punto di vista l'emanazione si comporta come un gas ordinario.

Quando si mettono in comunicazione due serbatoi in vetro di cui uno contiene dell'emanazione mentre l'altro è vuoto, l'emanazione passa diffondendosi nel secondo serbatoio, e quando l'equilibrio è stabilito, si constata che l'emanazione si è suddivisa tra i due serbatoi come farebbe un gas ordinario: se i due serbatoi si trovano alla stessa temperatura, l'emanazione si suddivide tra loro nel rapporto dei loro volumi; se sono a temperatura diverse, si suddivide come un gas perfetto obbedendo alle leggi di Mariotte e di Gay-Lussac. Per stabilire questo risultato basta misurare l'irraggiamento del primo serbatoio prima e dopo la distribuzione; questo irraggiamento è proporzionale alla quantità di emanazione contenuta nel serbatoio. Ma, poiché la diffusione dell'emanazione richiede un certo tempo, fino al ristabilimento dell'equilibrio, è necessario, per l'esattezza del calcolo relativo all'esperienza, tenere conto della distruzione spontanea dell'emanazione con il tempo<sup>1</sup>.

L'emanazione del radio si diffonde lungo uno stretto tubo secondo la legge di diffusione dei gas, e il suo coefficiente di diffusione è confrontabile con quello dell'anidride carbonica<sup>2</sup>.

MM. Rutherford e Soddy hanno mostrato che le emanazioni del radio e del torio si condensano alla temperatura dell'aria liquida, come farebbero gas che si liquefano a questa temperatura. Una corrente d'aria carica di emanazione perde le sue proprietà radioattive attraversando una serpentina immersa nell'aria liquida; l'emanazione rimane condensata nella serpentina, e si ritrova allo stato gassoso quando la si riscalda. L'emanazione del radio si condensa a  $-150$ , quella del torio a una temperatura compresa tra  $-100$  e  $-150$ <sup>3</sup>.

Si può fare la seguente esperienza: due serbatoi di vetro chiusi, l'uno grande, l'altro piccolo, comunicano tra loro mediante un tubo corto munito di un rubinetto; sono riempiti di gas attivato dal radio e sono di conseguenza entrambi luminosi. Si immerge il piccolo serbatoio nell'aria liquida, tutta l'emanazione si condensa; dopo un certo tempo si separano i due serbatoi chiudendo il rubinetto, e si toglie poi quello piccolo dall'aria liquida. Si constata che il serbatoio piccolo contiene tutta l'attività. Per assicurarsene basta osservare la fosforescenza del vetro dei due serbatoi. Quello più grande non è più luminoso, mentre quello piccolo è più luminoso che all'inizio dell'esperienza. L'esperienza è particolarmente brillante se si ha cura di rivestire le pareti dei due contenitori di solfuro di zinco fosforescente.

Tuttavia, se l'emanazione del radio fosse del tutto confrontabile con quella di un gas liquefatto, la temperatura di condensazione per raffreddamento dovrebbe essere funzione della quantità di emanazione contenuta in un dato volume d'aria; e questo non è stato osservato.

Si deve pure sottolineare che l'emanazione passa con una grande facilità attraverso i buchi e le

---

1 P. Curie e J. Danne, Comptes rendus, 2 luglio 1903

2 P. Curie e J. Danne, Comptes rendus, 2 giugno 1903

3 Rutherford e Soddy, Phil. Mag., maggio 1903

fessure più piccole dei corpi solidi, nelle condizioni in cui i gas materiali ordinari possono circolare solo con estrema lentezza.

Infine, l'emanazione del radio si distingue da un gas materiale ordinario nel fatto che si distrugge spontaneamente quando è racchiusa in un tubo di vetro sigillato; per lo meno, in queste condizioni, si osserva la scomparsa della proprietà radioattiva. Questa proprietà radioattiva è ancora realmente la sola che caratterizza l'emanazione a nostra conoscenza, poiché finora non si è ancora stabilita con certezza né l'esistenza di uno spettro caratteristico dell'emanazione, né una pressione dovuta all'emanazione.

Tuttavia di recente MM Ramsay e Soddy hanno osservato nello spettro dei gas estratti dal radio nuove righe che potrebbero, a loro avviso, appartenere all'emanazione del radio. Essi hanno pure constatato che i gas estratti del radio contengono elio, e che quest'ultimo gas si forma spontaneamente in presenza dell'emanazione del radio<sup>1</sup>. Se questi risultati, la cui importanza è considerevole, si confermano, si potrà essere portati a considerare l'emanazione come un gas materiale instabile, e l'elio sarebbe forse uno dei prodotti della disaggregazione spontanea di questo gas.

Le emanazioni del radio e del torio non sembrano essere alterate da diversi agenti chimici molto energici, e per questo motivo MM. Rutherford e Soddy li assimilano a gas della famiglia dell'argon<sup>2</sup>.

## **Variazione dell'attività dei liquidi attivati e delle soluzioni radifere**

Un liquido qualunque diviene radioattivo quando è posto in un contenitore attivante. Se lo si toglie dal contenitore e lo si lascia all'aria aperta, si disattiva rapidamente trasmettendo la propria attività al gas e ai corpi solidi che lo circondano. Se si racchiude un liquido attivato in una boccetta chiusa, si disattiva assai più lentamente e l'attività diviene la metà in 4 giorni, come avverrebbe per un gas attivato racchiuso in un vaso chiuso. Si può spiegare questo fatto ammettendo che l'energia radioattiva è immagazzinata nei liquidi sotto una forma identica a quella sotto la quale è immagazzinata nei gas (sotto forma di emanazione).

Una soluzione di un sale radifero si comporta in parte in modo analogo. Dapprima, è assai notevole che la soluzione di un sale di radio, che posto dopo un certo tempo in un ambiente chiuso, non è più attiva dell'acqua pura in vaso contenuto nello stesso ambiente, quando l'equilibrio di attività è stabilito. Se si toglie dal contenitore la soluzione radifera e la si espone all'aria in un vaso molto aperto, l'attività si espande nello spazio, e la soluzione diviene quasi inattiva, benché contenga sempre il radio. Se allora si racchiude questa soluzione disattivata in una boccetta chiusa, riprende un poco alla volta, in una quindicina di giorni, un'attività limite che può essere considerevole. Al contrario, un liquido attivato che non racchiude radio e che è stato disattivato all'aria aperta, non recupera la propria attività quando lo si mette nella boccetta chiusa.

## **Teoria della radioattività**

Ecco, secondo MM. Curie e Debièrne, una teoria molto generale che permette di coordinare i risultati dello studio della radioattività indotta, risultati esposti e che rappresentano fatti indipendenti da tutte le ipotesi<sup>3</sup>.

Si può ammettere che ogni atomo di radio funzioni come una sorgente continua e costante di energia, senza che sia, d'altra parte, necessario precisare da dove tale energia proviene. L'energia radioattiva che si accumula nel radio tende a dissiparsi in due modi diversi:

1. per irraggiamento (raggi carichi e non carichi di elettricità);
2. per conduzione, cioè per trasmissione successiva ai corpi vicini, con l'intermediazione dei gas e dei liquidi (liberazione di emanazione e trasformazione in radioattività indotta).

La perdita di energia radioattiva, sia per irraggiamento sia per conduzione, cresce con la quantità di energia accumulata nei corpi radioattivi. Un equilibrio di regime si deve necessariamente stabilire, quando la doppia perdita, di cui si è detto, compensa l'apporto continuo fatto dal radio. Questo modo di vedere è analogo a quello usato nei fenomeni calorici. Se, all'interno di un corpo, si ha, per un motivo qualsiasi, una emissione continua e costante di calore, il calore si accumula nel corpo, e la temperatura si innalza, nonché la perdita di calore per

1 Ramsay e Soddy, *Physikalische Zeitschrift*, 15 settembre 1903

2 *Phil. Mag.*, p. 580; 1903, p. 457

3 Curie e Debièrne, *Comptes rendus*, 29 luglio 1901

irraggiamento e per conduzione equilibra l'apporto continuo di calore.

In generale, tranne in certe condizioni speciali, l'attività non si trasmette in successione attraverso i corpi solidi. Quando si conserva una soluzione in un tubo sigillato, la perdita è solo per irraggiamento, e l'attività radiante della soluzione assume un valore elevato.

Se, invece, la soluzione si trova in un vaso aperto, la perdita di attività in successione, per conduzione, diviene significativa, e, quando la condizione di regime è raggiunta, l'attività radiante della soluzione è alquanto debole.

L'attività radiante di un sale radifero solido, lasciato all'aria aperta, non diminuisce sensibilmente, poiché, la propagazione della radioattività indotta per conduzione non avvenendo tra corpi solidi, è dovuta solo ad uno strato superficiale molto sottile. Si constata, in effetti, che la soluzione dello stesso sale produce fenomeni di radioattività indotta molto più intensi. Con un sale solido l'energia radioattiva si accumula nel sale e si dissipa soprattutto per irraggiamento. Al contrario, quando il sale è in soluzione nell'acqua dopo qualche ora, l'energia radioattiva è suddivisa tra l'acqua e il sale, e se li si separa mediante distillazione, l'acqua porta gran parte della attività, e il sale solido è molto meno attivo (10 o 15 volte) che in soluzione. In seguito il sale riprende poco a poco la sua attività originaria.

Si può cercare di precisare ulteriormente i vantaggi della precedente teoria, immaginando che la radioattività del radio si produca almeno in larga parte con l'intermediazione dell'energia radioattiva emessa sotto forma di emanazione.

Si può ammettere che ogni atomo di radio è una sorgente continua e costante di emanazione. Nello stesso tempo che questa forma di energia si produce, subisce progressivamente una trasformazione in energia radioattiva di irraggiamento Becquerel; la rapidità di tale trasformazione è proporzionale alla quantità di emanazione accumulata.

Quando una soluzione radifera è racchiusa in un contenitore, l'emanazione si può diffondere nell'interno e sulle pareti. È a questo punto che è trasformata in irraggiamento, mentre la soluzione emette solo pochi raggi Becquerel, - l'irraggiamento è, in qualche caso, esteriorizzato. Al contrario, nel radio solido, l'emanazione, non potendo sfuggire facilmente, si accumula e si trasforma sul posto in irraggiamento Becquerel; questo irraggiamento raggiunge pertanto un valore elevato<sup>1</sup>.

Se questa teoria della radioattività fosse generale, basterebbe ammettere che tutti i corpi radioattivi liberano emanazione. Ora, questa emissione è stata verificata per il radio, il torio e l'attinio; quest'ultimo ne emette in quantità enorme, anche allo stato solido. L'uranio e il polonio non sembrano emettere emanazione, benché emettano raggi Becquerel. Questi elementi non producono la radioattività indotta in vasi chiusi come i corpi radioattivi citati in precedenza. Questo fatto non è in contraddizione assoluta con la teoria precedente. Se, infatti, l'uranio e il polonio emettessero emanazioni che si distruggono con grande rapidità, sarebbe assai difficile osservare la trasmissione di queste emanazioni tramite l'aria e gli effetti della radioattività indotta prodotta da essi sui corpi vicini. Una tale ipotesi non è per nulla inverosimile, poiché i tempi durante i quali le quantità di emanazione del radio e del torio diminuiscono della metà stanno tra loro come 5000 a 1. Si vedrà che in certe condizioni l'uranio può provocare radioattività indotta.

## **Altre forme di radioattività indotta**

Secondo la legge di disattivazione all'aria aperta per corpi solidi attivati dal radio, l'attività radiante dopo un giorno è pressoché insensibile.

Certi corpi fanno tuttavia eccezione: sono la celluloidoide, la parana, il caucciù, ecc. Quando questi corpi sono stati attivati per lungo tempo, si disattivano più lentamente di quanto prevede la legge, e servono spesso quindici o venti giorni prima che l'attività divenga non misurabile. Sembra che questi corpi abbiano la proprietà di impregnarsi di energia radioattiva sotto forma di emanazione; la perdono poi poco alla volta producendo la radioattività indotta nelle loro vicinanze.

## **Radioattività indotta ad evoluzione lenta**

Si osserva ancora una forma diversa di radioattività indotta, che sembra prodursi su tutti i corpi, quando sono rimasti per mesi in un ambiente attivante. Quando questi corpi vengono tolti, la loro attività diminuisce fino ad un valore molto piccolo secondo la consueta legge (diminuzione della metà in mezz'ora); ma quando l'attività è caduta a 1 circa del valore iniziale, non diminuisce più o

---

1 Curie, Comptes rendus, 26 gennaio 1903

almeno evolve con una lentezza estrema, a volte 20000 pure aumentando. Abbiamo delle lamine di rame, di alluminio, di vetro che conservano una attività residua dopo più di sei mesi. Questi fenomeni di attività indotta sembrano essere di diversa natura rispetto a quelle ordinarie, e offrono una evoluzione molto più lenta. È necessario un tempo considerevole più per la produzione che la scomparsa di questa forma di radioattività indotta.

## Radioattività indotta su sostanze che rimangono in soluzione con il radio

Quando si tratta un minerale radioattivo contenente radio, per la sua estrazione, e finché il lavoro non è portato avanti, si realizzano separazioni chimiche, in base alle quali la radioattività si trova interamente con uno dei prodotti della reazione, mentre l'altro prodotto è interamente inattivo. Si separano da un lato prodotti radianti che possono essere parecchie centinaia di volte più attivi dell'uranio, dall'altro lato del rame, dell'antimonio, dell'arsenico, ecc., del tutto inattivi. Certi altri elementi (il ferro, il piombo) non si trovano mai separati ad uno stato completamente inattivo. Al concentrarsi delle sostanze radianti, non è più la stessa cosa; nessuna separazione chimica fornisce prodotti assolutamente inattivi; tutte le porzioni risultanti da una separazione sono sempre attivi a livelli variabili.

Dopo la scoperta della radioattività indotta, M. Giesel provò per primo ad attivare il bismuto inattivo ordinario mantenendolo in soluzione con il radio molto attivo. Ottenne così del bismuto radioattivo<sup>1</sup>, e ne concluse che il polonio estratto dalla pechblenda era probabilmente bismuto attivato dalla vicinanza del radio contenuto nella pechblenda.

Anch'io ho preparato del bismuto attivato mantenendolo in soluzione con un sale radifero molto attivo. Le difficoltà di questa esperienza consistono nella cura estrema necessaria alla eliminazione del radio dalla soluzione. Se si pensa alla quantità infinitesimale di radio che basta a produrre in un grammo di materia una radioattività assai notevole, non si crede mai di aver dilavato e purificato il prodotto attivato. Ogni purificazione comporta una riduzione di attività del prodotto attivato, sia che si tolgano realmente tracce di radio, sia che la radioattività indotta in queste condizioni non resista alle trasformazioni chimiche.

I risultati che ho ottenuto sembrano tuttavia stabilire con certezza che l'attivazione si produce e permane anche dopo la separazione dal radio. Frazionando il nitrato del mio bismuto attivato mediante precipitazione della soluzione azotata con acqua, trovo che, dopo purificazioni molto accurate, si fraziona come il polonio, essendo la parte più attiva precipitata per prima.

Se la purificazione è insufficiente, avviene il contrario, indicando che tracce di radio si trovano ancora con il bismuto attivato. Ho ottenuto pure del bismuto attivato per il quale il grado di frazionamento indicava una grande purezza e che era 2000 volte più attivo dell'uranio. Questo bismuto diminuisce in attività con il tempo.

Ma un'altra porzione dello stesso prodotto, preparato con le stesse precauzioni e frazionato nello stesso grado, conserva la propria attività senza diminuzione significativa dopo un tempo che è di circa tre anni. Questa attività è 150 volte maggiore di quella dell'uranio.

Ho anche attivato del piombo e dell'argento lasciandoli in soluzione con il radio. Nella maggior parte dei casi la radioattività indotta così ottenuta non diminuisce molto con il tempo, ma non resiste a parecchie trasformazioni chimiche successive del corpo attivato.

M. Debierne<sup>2</sup> ha attivato del bario lasciandolo in soluzione con l'attinio. Questo bario attivato rimane attivo dopo diverse trasformazioni chimiche, la sua attività è quindi una proprietà atomica assai stabile. Il cloruro di bario attivato si fraziona come il cloruro di bario radifero, essendo le parti più attive le meno solubili nell'acqua e nell'acido cloridrico puro. Il cloruro secco è spontaneamente luminoso; il suo irraggiamento Becquerel è analogo a quello del cloruro di bario radifero. M. Debierne ha ottenuto del cloruro di bario attivato 1000 volte più attivo dell'uranio. Questo bario non aveva tuttavia acquisito tutte le caratteristiche del radio, poiché non mostrava allo spettroscopio alcuna delle righe più forti del radio. Inoltre la sua attività diminuiva con il tempo, e alla ne di tre settimane era divenuto tre volte più debole che all'inizio.

Vi è tutto uno studio da fare sull'attivazione delle sostanze in soluzione con i corpi radioattivi. Sembra che, secondo le condizioni sperimentali, si possano ottenere forme di radioattività atomica indotta più o meno stabile. La radioattività indotta in queste condizioni è forse la stessa della forma ad evoluzione lenta che si ottiene per attivazione prolungata a distanza in un ambiente attivante. Vi

---

1 Giesel, Société de Physique de Berlin, gennaio 1900

2 Debierne, Comptes rendus, luglio 1900

è motivo di chiedersi no a quale grado la radioattività atomica indotta riguarda la natura chimica dell'atomo, e se essa può modificare le proprietà chimiche di quello, sia in modo passeggero, sia in forma stabile.

L'analisi chimica dei corpi attivati a distanza è resa difficile dal fatto che l'attivazione è limitata a uno strato superficiale molto sottile, e che, di conseguenza, la proporzione di materia che ha potuto essere raggiunta dalla trasformazione è estremamente piccola.

La radioattività indotta si può anche ottenere lasciando certe sostanze in soluzione con l'uranio. L'esperienza riesce con il bario. Se, come ha fatto M. Debièrne, si aggiunge dell'acido solforico a una soluzione che contiene uranio e bario, il solfato di bario precipitato aziona dell'attività; nello stesso tempo il sale di uranio perde una parte della sua. M. Becquerel ha trovato che ripetendo questa operazione parecchie volte, si ottiene uranio poco attivo. Si potrebbe credere, da questo, che in questa operazione si è riusciti a separare dall'uranio un corpo radioattivo diverso da tale metallo e la cui presenza produrrebbe la radioattività dell'uranio. Tuttavia non è così, poiché dopo qualche mese l'uranio riprende la sua attività originaria; al contrario, il solfato di bario precipitato perde quella che aveva acquisito.

Un fenomeno analogo si produce con il torio. M. Rutherford precipita una soluzione di sale di torio con ammoniaca; separa la soluzione e l'evapora a secco. Ottiene così un piccolo residuo molto attivo, e il torio precipitato si mostra meno attivo di prima. Questo residuo attivo, al quale M. Rutherford dà il nome di torio x, perde la propria attività con in tempo, mentre il torio riprende la sua originaria attività<sup>1</sup>. Sembra che per quanto riguarda la radioattività indotta in soluzione, i diversi corpi non si comportino allo stesso modo, e che alcuni tra loro siano più inclini ad attivarsi di altri.

## **Disseminazione di polveri radioattive e radioattività indotta del laboratorio**

Quando si studiano sostanze fortemente radioattive, bisogna prendere particolari precauzioni, se si vuole continuare ad eseguire misure scrupolose. I diversi oggetti impiegati nel laboratorio di chimica, e quelli che servono per le esperienze di sica, non tardano a divenire radioattivi e ad agire sulle lastre fotografiche attraverso fogli anneriti. Le polveri, l'aria della stanza, i vestiti sono radioattivi. L'aria della stanza è conduttrice. Nel laboratorio, dove lavoriamo, il disturbo è giunto allo stadio acuto, e non possiamo più avere un apparecchio ben isolato. Vi è quindi la necessità di prendere delle precauzioni particolari per evitare il più possibile la disseminazione di polveri attive, e per evitare pure i fenomeni di attività indotta.

Gli oggetti impiegati in chimica non devono mai essere portati nell'aula di sica, e per quanto possibile bisogna evitare di lasciare inutilmente in questa aula le sostanze attive. Prima di cominciare questi studi siamo usi, nei lavori di elettricità statica, stabilire il contatto tra i diversi apparecchi con li metallici isolati protetti da cilindri metallici messi a terra, che preservano i li da tutte le influenze elettriche esterne. Negli studi sui corpi radioattivi, questa disposizione è del tutto inadeguata; essendo l'aria un buon conduttore, l'isolamento tra il lo e il cilindro è cattivo, e la forza elettromotrice di contatto inevitabile tra il lo e il cilindro tende a produrre una corrente attraverso l'aria e a far deviare l'elettrometro. Mettiamo ora tutti i li di comunicazione al riparo dell'aria ponendoli, per esempio, dentro cilindri riempiti di parana o di un altro materiale isolante. Vi sarà pure vantaggio, in questi studi, dall'uso di elettrometri rigorosamente chiusi.

## **Attivazione al di fuori dell'azione di sostanze radioattive**

Sono state fatte prove allo scopo di produrre radioattività indotta al di fuori dell'azione delle sostanze radioattive. M. Villard<sup>2</sup> ha sottoposto all'azione dei raggi catodici un pezzo di bismuto posto come anticatodo in un tubo di Crookes; questo bismuto è stato poi reso attivo, a dire il vero, in un modo estremamente debole, poiché servivano 8 giorni di posa per ottenere un'impressione fotografica.

M. Mac Lennan espose diversi sali all'azione dei raggi catodici e poi li scaldò un poco. Questi sali acquisirono allora la proprietà di scaricare i corpi caricati positivamente<sup>3</sup>. Gli studi di questo tipo presentano un grande interesse. Se, servendosi di agenti fisici noti, fosse possibile creare in un corpo inizialmente inattivo una notevole radioattività, potremmo sperare di trovare la causa della radioattività spontanea di certi materiali.

1 Rutherford e Soddy, Zeitschr. physik. Chemic. t. XLII, 902, p. 81

2 Villard, Société de Physique, luglio 1900

3 Mac Lennan, Phil. Mag., febbraio 1902

## Variazioni di attività dei corpi radioattivi. Effetti di dissoluzione

Il polonio, come ho detto prima, diminuisce di attività col tempo. Questa riduzione è lenta, non sembra avvenire con la stessa rapidità per tutti i campioni. Un campione di nitrato di bismuto con polonio ha perso la metà della propria attività in 11 mesi e il 95% della propria attività in 33 mesi. Altri campioni hanno mostrato riduzioni analoghe. Un campione di bismuto con polonio metallico fu preparato con un sotto-nitrato, il quale, dopo la sua preparazione, era 100000 volte più attivo dell'uranio. Questo metallo non è ora più che un corpo mediamente radioattivo (2000 volte più attivo dell'uranio). La sua radioattività è misurata ad intervalli di tempo. In 6 mesi questo metallo ha perso il 67% della sua attività. La perdita di attività non sembra essere facilitata dalle reazioni chimiche. Nelle operazioni chimiche rapide non si constata in genere perdita considerevole di attività. Contrariamente a ciò che avviene per il polonio, i sali radiferi possiedono una radioattività permanente che non presenta riduzioni apprezzabili dopo alcuni anni.

Quando si deve preparare un sale di radio allo stato solido, questo sale non ha innanzitutto un'attività costante. La sua attività va aumentando a partire dalla preparazione e raggiunge un valore limite sensibilmente costante dopo circa un mese. Il contrario avviene per la soluzione. Quando la si prepara, essa è dapprima molto attiva, ma lasciata all'aria aperta si disattiva rapidamente, e assume alla fine una attività limite che può essere considerevolmente più debole del valore iniziale. Queste variazioni di attività sono state innanzitutto osservate da M. Giesel<sup>1</sup>. Esse si manifestano molto bene ponendosi dal punto di vista dell'emanazione. La diminuzione dell'attività della soluzione corrisponde alla perdita dell'emanazione che sfugge nello spazio; questa riduzione è ben minore se la soluzione è in un tubo sigillato. Una soluzione disattivata all'aria aperta riprende la sua attività più grande quando la si racchiude in un tubo sigillato. Il periodo dell'accrescimento dell'attività del sale che, dopo la soluzione, deve essere riportato allo stato solido, è quella durante la quale l'emanazione si immagazzina di nuovo nel radio solido.

Ecco alcuni esempi a proposito:

Una soluzione di cloruro di bario radifero lasciato all'aria aperta per 2 giorni diviene 300 volte meno attiva. Una soluzione è racchiusa in una boccia chiusa; la si apre, si versa la soluzione in una vaschetta e se ne misura l'attività:

Attività misurata immediatamente	67
dopo 2 ore	20
dopo 2 giorni	0,25

Una soluzione di cloruro di bario radifero che è rimasta all'aria aperta è racchiusa in un tubo di vetro sigillato, e si misura l'irraggiamento di questo tubo. Si trovano i seguenti risultati:

Attività misurata immediatamente	27
dopo 2 giorni	61
dopo 3 giorni	70
dopo 4 giorni	81
dopo 7 giorni	100
dopo 11 giorni	100

L'attività iniziale di un sale solido dopo la sua preparazione è tanto più debole quanto il tempo in soluzione è stato più lungo. Una proporzione maggiore dell'attività è allora trasmessa al solvente. Ecco le attività iniziali ottenute con un cloruro la cui attività limite è 800 e che si è mantenuta in soluzione per un tempo dato; poi si seccava il sale e se ne misurava immediatamente la sua attività:

Attività limite	800
Attività iniziale dopo soluzione e dissecazione immediata	440
Attività iniziale dopo che il sale è rimasto disciolto 5 giorni	120
18 giorni	130
dopo 32 giorni	114

In questa esperienza il sale disciolto si trovava in un contenitore coperto semplicemente con un

<sup>1</sup> Giesel, Wied. Ann., t. LXIX, p. 91

vetro da orologio. Ho fatto con lo stesso sale due soluzioni che ho conservato in un tubo sigillato per 13 mesi; una di queste soluzioni era 8 volte più concentrata dell'altra:

Attività iniziale del sale della soluzione concentrata dopo essiccazione	200
Attività iniziale del sale della soluzione pura dopo essiccazione	100

La disattivazione del sale è quindi tanto più grande quanto maggiore è la proporzione del solvente, l'energia radioattiva trasmessa al liquido avente allora un volume maggiore di quello da saturare e uno spazio maggiore da riempire. I due campioni dello stesso sale, che avevano un'attività iniziale diversa, hanno aumentato di attività con una rapidità molto diversa all'inizio; dopo un giorno avevano la stessa attività, e l'aumento di attività continuò esattamente allo stesso modo per tutti i due giorni no al valore limite.

Quando la soluzione è pura, la disattivazione del sale è molto rapida; è ciò che mostrano le esperienze seguenti: tre parti uguali di uno stesso sale radifero sono disciolti in uguali quantità di acqua. La prima soluzione a è lasciata all'aria aperta per un'ora, poi seccata. La seconda soluzione b è attraversata per un'ora da una corrente d'aria, poi seccata. La terza soluzione c è lasciata per 13 giorni all'aria aperta, poi seccata. Le attività iniziali dei tre sali sono:

Per la porzione a	145, 2
Per la porzione b	141, 6
Per la porzione c	102, 6

L'attività limite dello stesso sale è di circa 470. Si vede quindi che dopo un'ora la maggior parte dell'effetto era prodotto. Inoltre, la corrente d'aria che ha agito per un'ora sulla soluzione b non ha prodotto alcun effetto. La proporzione di sale nella soluzione era di circa lo 0,5%. L'energia radioattiva sotto forma di emanazione si propaga con difficoltà dal radio solido nell'aria; essa subisce pure una resistenza al passaggio dal radio solido in un liquido. Quando si agita del solfato radifero con dell'acqua per un'intera giornata, la sua attività dopo questa operazione è praticamente la stessa di quella di una parte dello stesso solfato lasciato all'aria aperta.

Facendo il vuoto su del sale radifero si toglie tutta l'emanazione disponibile. Tuttavia la radioattività di un cloruro radifero sul quale abbiamo creato il vuoto per 6 giorni non fu significativamente modificata da questa operazione. Questa esperienza mostra che la radioattività del sale è dovuta principalmente all'energia radioattiva utilizzata all'interno dei grani, la quale non può essere eliminata facendo il vuoto.

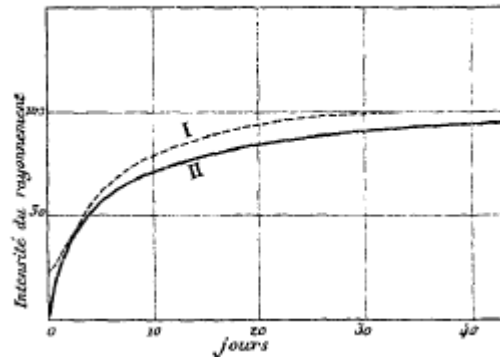
La perdita di attività che il radio subisce quando lo si fa passare per lo stato disciolto è relativamente maggiore per i raggi penetranti che per i raggi assorbibili. Ecco qualche esempio: Un cloruro radifero, che aveva raggiunto la sua attività limite 470, è disciolto e resta in soluzione per un'ora; poi lo si secca e si misura la sua radioattività iniziale con il metodo elettrico. Si trova che l'irraggiamento iniziale totale è uguale alla frazione 0,3 dell'irraggiamento totale limite. Se si esegue la misura dell'intensità di irraggiamento ricoprendo la sostanza attiva con uno schermo di alluminio dello spessore di 0,01 mm, si trova che l'irraggiamento iniziale che attraversa questo schermo è solo la frazione 0,17 dell'irraggiamento limite che attraversa lo stesso schermo.

Quando il sale è rimasto in soluzione per 13 giorni, si trova per l'irraggiamento iniziale totale la frazione 0,22 dell'irraggiamento limite totale e per l'irraggiamento che attraversa 0,01 mm di alluminio la frazione 0,13 dell'irraggiamento limite. Nei due casi il rapporto dell'irraggiamento iniziale dopo lo scioglimento e l'irraggiamento limite è 1,7 volte maggiore per l'irraggiamento totale rispetto a quello che attraversa 0,01 mm di alluminio.

Bisogna d'altronde sottolineare che, seccando il prodotto dopo lo scioglimento, non si può evitare un periodo di tempo durante il quale il prodotto si trova ad uno stato mal definito, né interamente solido, né interamente liquido. Non si può più evitare di scaldare il prodotto per togliere rapidamente l'acqua.

Per questi due motivi non è molto possibile determinare la vera attività iniziale del prodotto che passa dallo stato disciolto allo stato solido. Nelle esperienze che sono state citate quantità uguali di sostanze radianti erano disciolte nella stessa quantità di acqua, e poi le soluzioni erano evaporate a secco in condizioni le più identiche possibili e senza riscaldare al di sopra di 120 o 130.

Fig. 13.



Ho studiato la legge secondo la quale aumenta l'attività di un sale radifero solido, a partire dal momento in cui il sale è essiccato dopo lo scioglimento, fino al momento in cui raggiunge la sua attività limite. Nelle Tabelle che seguono ho indicato l'intensità dell'irraggiamento I in funzione del tempo, essendo l'intensità limite supposta uguale a 100, ed essendo il tempo contato a partire dal momento in cui il prodotto è stato seccato.

La Tabella I (fig. 13, curva I) è relativa all'irraggiamento totale. La Tabella II (fig. 13, curva II) è relativa solo ai raggi penetranti (raggi che hanno attraversato 3 cm d'aria e 0,01 mm di alluminio).

Tabella I		Tabella II	
Tempo	I.	Tempo	I.
0	21	0	1,3
1 giorno	25	1 giorno	19
3 giorni	44	3 giorni	43
5 giorni	60	5 giorni	60
10 giorni	78	10 giorni	70
19 giorni	93	19 giorni	86
33 giorni	100	33 giorni	94
67 giorni	100		

Ho compiuto numerose altre serie di misure dello stesso tipo, ma esse non sono assolutamente in accordo tra loro, benché la caratteristica generale delle curve ottenute rimanga la stessa. È difficile ottenere risultati regolari. Si può tuttavia notare che la ripresa di attività richiede oltre un mese, e che i raggi più penetranti sono quelli più profondamente interessati dall'effetto dovuto alla soluzione.

L'intensità iniziale dell'irraggiamento che può attraversare 3 cm di aria e 0,01 mm di alluminio è solo l'1% dell'intensità limite, allorché l'intensità iniziale dell'irraggiamento totale è il 21% dell'irraggiamento totale limite.

Un sale radifero, prima disciolto e poi essiccato, possiede lo stessa capacità di provocare l'attività indotta (e, di conseguenza, lascia sfuggire all'esterno altrettanta emanazione) di un campione dello stesso sale che, dopo essere stato preparato allo stato solido, è rimasto in questo stato per un tempo sufficiente a raggiungere la radioattività limite. Eppure l'attività radiante di questi due prodotti è estremamente diversa; il primo è, per esempio, 5 volte meno attivo del secondo.

### Variazioni di attività di sali di radio per riscaldamento

Quando si riscalda un composto radifero, esso libera emanazione e perde attività. Tale perdita è tanto maggiore quanto il riscaldamento è a sua volta più intenso e prolungato. Si ha inoltre che riscaldando un sale radifero per 1 ora a 130 gli si fa perdere il 10% del suo irraggiamento totale; al contrario, un riscaldamento di 10 minuti a 400 non produce effetti valutabili. Un arroventamento di qualche ora distrugge il 77% dell'irraggiamento totale. La perdita di attività per riscaldamento è più importante per i raggi penetranti che per quelli assorbibili.

Un riscaldamento della durata di alcune ore elimina il 77% dell'irraggiamento totale, ma lo



stesso riscaldamento elimina la quasi totalità (99%) dell'irraggiamento che è in grado di attraversare 3cm di aria e 0mm, 01 di alluminio.

Il cloruro di bario radifero in fusione per alcune ore (intorno a 800), perde il 98% dell'irraggiamento capace di attraversare 0mm, 3 di alluminio. Si può dire che i raggi penetranti scompaiono quasi interamente dopo un riscaldamento intenso e prolungato.

Quando un sale radifero ha perso una parte della sua attività per riscaldamento, questo calo di attività non persiste; l'attività del sale è rigenerata spontaneamente alla temperatura ordinaria e tende verso un certo valore limite. Ho osservato il fatto molto curioso che questo limite è alto dell'attività limite del sale prima del riscaldamento, minore per il cloruro. Ecco alcuni esempi: un campione di cloruro di bario radifero che, dopo essere stato preparato allo stato solido, ha raggiunto dopo lungo tempo la sua attività limite, possiede un irraggiamento totale rappresentato dal valore 470, e un irraggiamento in grado di attraversare 0,01 mm di alluminio, rappresentato dal valore 157. Questo campione è sottoposto a un arroventamento per alcune ore.

Due mesi dopo il riscaldamento, raggiunge una attività limite con un irraggiamento totale uguale a 690, e un irraggiamento attraverso 0mm, 01 di alluminio uguale a 227. L'irraggiamento totale e l'irraggiamento che attraversa l'alluminio sono pertanto aumentati rispettivamente nel rapporto 690/470 e 227/156. Questi due rapporti sono uguali tra loro e uguali a 1,45.

Un campione di cloruro di bario radifero che, dopo essere stato preparato allo stato solido, ha raggiunto un'attività limite uguale a 62, è mantenuto in fusione per qualche ora; poi il prodotto fuso viene polverizzato. Questo prodotto riprende una nuova attività limite uguale a 140, cioè oltre 2 volte maggiore di quella che poteva raggiungere, quando era stato preparato allo stato solido senza avere subito un significativo riscaldamento durante la essiccazione.

Ho analizzato la legge dell'aumento dell'attività dei composti radiferi dopo il riscaldamento. Ecco, a titolo di esempio, i risultati di due serie di valori. I valori delle Tabelle I e II indicano l'intensità dell'irraggiamento I in funzione del tempo, essendo l'intensità limite supposta uguale a 100, ed il tempo contato a partire dalla fine del riscaldamento. La tabella I (fig. 14, curva I) è relativa all'irraggiamento totale di un campione di cloruro di bario radifero. La Tabella II (fig. 3, curva II) è relativa all'irraggiamento penetrante di un campione di solfato di bario radifero, quando si misurava l'intensità dell'irraggiamento che attraversava 3 cm d'aria e 0,01 mm di alluminio. I due prodotti hanno subito un riscaldamento al rosso ciliegia per 7 ore.

Fig. 14.

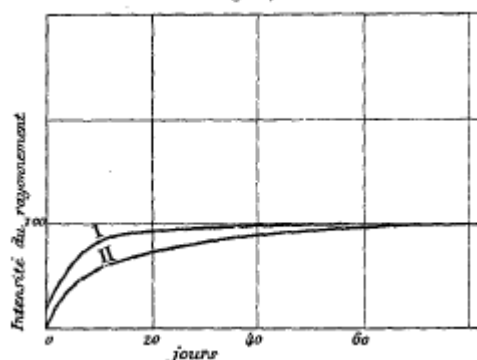


Tabella I		Tabella II	
Tempo	I.	Tempo	I.
0	16,2	0	0,8
0,6 giorni	25,4	0,7 giorni	13
1 giorno	27,4	1 giorno	18
2 giorni	38	1,9 giorni	26,4
3 giorni	46,3	6 giorni	46,2
4 giorni	54	10 giorni	55,3
6 giorni	67,5	14 giorni	64
10 giorni	84	18 giorni	71,8
24 giorni	95	27 giorni	81
57 giorni	100	36 giorni	91
		50 giorni	95,5
		57 giorni	99
		84 giorni	100

Ho compiuto numerose altre serie di determinazioni, ma, come per la ripresa di attività dopo la

scioglimento, i risultati di diverse serie non sono ben concordanti. L'effetto del riscaldamento non persiste quando si discioglie la sostanza radifera scaldata. Di due campioni di una stessa sostanza radifera di attività 1800, uno è stato fortemente riscaldato, e la sua attività è stata ridotta dal riscaldamento a 670. I due campioni sono stati poi disciolti e lasciati in soluzione per 20 ore, e le loro attività iniziali allo stato solido erano 460 per il prodotto non riscaldato e 420 per quello riscaldato; non vi sono quindi differenze considerevoli tra l'attività di questi due prodotti. Ma, se i due prodotti non rimangono in soluzione per un tempo sufficiente, se, per esempio, li si dissecca immediatamente dopo averli disciolti, il prodotto non riscaldato è molto più attivo del prodotto riscaldato; è necessario un certo tempo anche la condizione di soluto faccia sparire l'effetto del riscaldamento. Un prodotto di attività 3200 è stato riscaldato e dopo aveva solo un'attività pari a 1030. Questo prodotto è stato disciolto nello stesso tempo in cui una sua parte non riscaldata, e queste due parti sono state disseccate immediatamente. L'attività iniziale era 1450 per il prodotto non riscaldato e di 760 per quello riscaldato.

Per i sali radiferi solidi, la capacità di provocare la radioattività indotta è fortemente influenzata dal riscaldamento. Mentre si riscaldano i composti radiferi, essi sprigionano più emanazione che alla temperatura ordinaria; ma, quando sono poi riportati alla temperatura ordinaria, non solo la loro radioattività è ben inferiore è ben inferiore a quella che avevano prima del riscaldamento, ma anche il loro potere attivante è notevolmente diminuito. Durante il tempo che segue il riscaldamento, la radioattività del prodotto va aumentando e può pure superare il valore primitivo. Il potere attivante si ristabilisce anche parzialmente; tuttavia, dopo un riscaldamento prolungato al colore rosso, la quasi totalità del potere attivante si trova soppressa, senza essere suscettibile di ricomparire spontaneamente con il tempo. Si può restituire al sale radifero il suo potere attivante iniziale dissolvendolo nell'acqua e essiccandolo al forno a una temperatura di 120. Sembra quindi che la calcinazione produca l'effetto di mettere il sale in uno stato sico particolare, nel quale l'emanazione si libera ben più difficilmente che non per lo stesso prodotto solido che non è stato riscaldato ad una temperatura elevata, e ne risulta del tutto naturalmente che il sale raggiunge una radioattività limite più alta di quella che aveva prima del riscaldamento. Per riportare il sale allo stato fisico pre riscaldamento, basta discioglierlo ed essiccarlo, senza riscaldarlo, al di sopra di 150.

Ecco alcuni esempi numerici a tale proposito:

Indico con  $a$  l'attività indotta limite provocata in contenitore chiuso su una lamina di rame da un campione di carbonato di bario radifero di attività 1600. Poniamo per il prodotto non riscaldato:  $a = 100$ . Si trova:

1 giorno dopo il riscaldamento	$a = 3, 3$
4 giorni dopo il riscaldamento	$a = 7, 1$
10 giorni dopo il riscaldamento	$a = 15$
20 giorni dopo il riscaldamento	$a = 15$
37 giorni dopo il riscaldamento	$a = 15$

La radioattività del prodotto era diminuita del 90% causa riscaldamento, ma, dopo un mese, aveva già ripreso il suo valore originario. Ecco un'esperienza dello stesso tipo fatta con un cloruro di bario radifero di attività 3000. Il potere attivante è determinato nello stesso modo della precedente esperienza.

Potere attivante del prodotto non riscaldato:  $a = 100$

Potere attivante del prodotto dopo un riscaldamento al color rosso di tre ore:

2 giorni dopo il riscaldamento	2, 3
5 giorni dopo il riscaldamento	7, 0
11 giorni dopo il riscaldamento	8, 2
18 giorni dopo il riscaldamento	8, 2

Potere attivante del prodotto non riscaldato che è stato disciolto, poi essiccato a 150

92

Potere attivante del prodotto scaldato che è stato disciolto, poi essiccato a 150

105

## Interpretazione teorica delle cause delle variazioni di attività dei sali radiferi, dopo la messa in soluzione e il riscaldamento

I fatti esposti possono essere, in parte, spiegati dalla teoria secondo la quale il radio produce l'energia sotto forma di emanazione, che si trasforma poi in energia di irraggiamento. Quando si scioglie un sale di radio, l'emanazione che esso produce si diffonde al di fuori della soluzione e provoca la radioattività all'esterno della sorgente dalla quale proviene; quando si evapora la soluzione, il sale solido ottenuto è poco attivo, poiché contiene solo poca emanazione. Poco a poco l'emanazione si accumula nel sale, la cui attività aumenta fino ad un valore limite, che è ottenuto quando la produzione di emanazione dal radio compensa la perdita che avviene per flusso verso l'esterno e per trasformazione sul posto in raggi di Becquerel.

Quando si scalda un sale di radio, il flusso di emanazione al di fuori del sale è fortemente aumentato, e i fenomeni di radioattività indotta sono più intensi rispetto a quando il sale si trova alla temperatura ordinaria. Ma quando il sale ritorna a temperatura ordinaria, è esaurito, come nel caso in cui era stato disciolto, contiene solo poca emanazione, e l'attività è divenuta molto debole. Poco a poco l'emanazione si accumula di nuovo nel sale solido e l'irraggiamento va aumentando.

Si può ammettere che il radio origina un flusso costante di emanazione, di cui una parte sfugge all'esterno, mentre la parte rimanente è trasformata, nel radio stesso, in raggi di Becquerel. Quando il radio è stato scaldato al colore rosso, perde la maggior parte del suo potere di attivazione, cioè, il flusso di emanazione all'esterno è diminuito. Di conseguenza, la proporzione di emanazione utilizzata nello stesso radio deve essere maggiore, e il prodotto raggiunge una radioattività limite più alta.

Ci si può proporre di stabilire teoricamente la legge dell'aumento dell'attività di un sale radifero solido che è stato sciolto o riscaldato. Ammetteremo che l'intensità dell'irraggiamento del radio è, ad ogni istante, proporzionale alla quantità di emanazione  $q$  presente nel radio. Sappiamo che l'emanazione si distrugge spontaneamente secondo una legge tale che si abbia, ad ogni istante,

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (4.1)$$

essendo  $q_0$  la quantità di emanazione all'origine del tempo, e  $\theta$  la costante di tempo uguale a  $4,97 \times 10^5$  sec. Sia, d'altra parte,  $\Delta$  il flusso di emanazione fornito dal radio, quantità che supporremo costante. Vediamo ciò che avverrà, se non sfugge emanazione nello spazio ambiente. L'emanazione prodotta sarà allora interamente utilizzata nel radio per produrvi l'irraggiamento. Si ha, dalla formula 4.1

$$\frac{dq}{dt} = \frac{-q_0}{\theta} e^{-\frac{t}{\theta}} = \frac{-q}{\theta}$$

e, di conseguenza, allo stato di equilibrio, il radio conterrà una certa quantità di emanazione  $Q$  tale che si abbia

$$\Delta = Q / \theta \quad (4.2)$$

e l'irraggiamento del radio sarà allora proporzionale a  $Q$ .

Supponiamo che si metta il radio nelle condizioni nelle quali perde l'emanazione all'esterno; ciò si può ottenere dissolvendo il composto radifero o riscaldandolo. Ma non appena la causa della perdita di emanazione è stata eliminata (il corpo è ritornato allo stato solido, oppure non è più riscaldato), l'emanazione si accumula di nuovo nel radio, e abbiamo un periodo, durante il quale il flusso  $\Delta$  lo porta sulla rapidità di distruzione  $q/\theta$ . Si ha allora

$$\frac{dq}{dt} = \Delta - \frac{q}{\theta} = \frac{Q - q}{\theta}$$

$$\frac{d}{dt}(Q - q) = \frac{-(Q - q)}{\theta} \quad (4.3)$$

$$Q - q = (Q - q_0) e^{-\frac{t}{\theta}}$$

essendo  $q_0$  la quantità di emanazione presente nel radio al tempo  $t = 0$ .

In base alla formula 4.3 l'eccesso della quantità di emanazione  $Q$  che il radio contiene allo stato di equilibrio sulla quantità  $q$  che esso contiene nel momento dato, decresce in funzione del tempo secondo una legge esponenziale che è la stessa legge della scomparsa spontanea dell'emanazione. Essendo l'irraggiamento del radio proporzionale alla quantità di emanazione, l'eccesso dell'intensità dell'irraggiamento limite sull'intensità effettiva deve diminuire in funzione del tempo secondo questa stessa legge; questo eccesso deve pertanto diminuire della metà in circa 4 giorni. La teoria precedente è incompleta, poiché si è trascurato la perdita di emanazione per flusso verso l'esterno.

È, d'altra parte, difficile sapere come ciò succede in funzione del tempo. Confrontando i risultati dell'esperienza con quelli di questa teoria incompleta, non si trova un accordo soddisfacente; si ricava, tuttavia, la convinzione che la teoria in questione contiene una parte di verità. La legge secondo la quale l'eccesso dell'attività limite rispetto all'attività effettiva diminuisce della metà in 4 giorni rappresenta, con una certa approssimazione, il cammino della ripresa di attività dopo il riscaldamento per una decina di giorni. Nel caso della ripresa di attività dopo la messa in soluzione questa stessa legge sembra convenire per un certo periodo di tempo, che inizia due o tre giorni dopo l'essiccazione del prodotto e prosegue da 10 a 15 giorni. I fenomeni sono d'altra parte complessi; la teoria indicata non spiega perché i raggi penetranti sono soppressi in proporzione maggiore di quelli assorbibili.

## NATURA E CAUSA DEI FENOMENI DI RADIOATTIVITÀ

Nel dibattito dei ricercatori sui corpi radioattivi, e per il fatto che le proprietà di questi corpi siano ancora poco conosciute, la spontaneità del loro irraggiamento si è posta come un problema, avente per i suoi il più grande interesse. Ad oggi, siamo più avanti dal punto di vista della conoscenza dei corpi radioattivi, e sappiamo isolare un corpo radioattivo di intensità molto grande, il radio. L'utilizzo delle proprietà osservabili del radio ha permesso di fare uno studio approfondito dei raggi emessi dai corpi radioattivi; i diversi gruppi di raggi che sono stati sin qui studiati presentano analogie con i gruppi di raggi che esistono nei tubi di Crookes: raggi catodici, raggi Roentgen, raggi canale. Questi sono ancora gli stessi gruppi di raggi che si ritrovano nell'irraggiamento secondario prodotto dai raggi Roentgen<sup>1</sup>, e nell'irraggiamento dei corpi che hanno acquistato radioattività indotta.

Ma se la natura dell'irraggiamento è ora meglio conosciuta, la causa della radioattività spontanea rimane misteriosa, e questo fenomeno è sempre per noi un enigma e un motivo di profondo stupore. I corpi spontaneamente radioattivi, in primo luogo il radio, rappresentano sorgenti di energia. Il flusso di energia cui danno origine ci è rivelato dall'irraggiamento di Becquerel, dagli effetti chimici e luminosi e dalla continua emissione di calore. Ci si è spesso chiesti se l'energia è creata nei corpi radioattivi o se questi corpi la prendono da sorgenti esterne. Alcune delle numerose ipotesi, che risultano da questi due modi di vedere, non hanno ancora ottenuto una conferma sperimentale.

Si può supporre che l'energia radioattiva sia stata immagazzinata in precedenza e che si esaurisca poco alla volta come accade per una fosforescenza di durata molto lunga. Si può immaginare che l'emissione di energia radioattiva corrisponda a una trasformazione della natura stessa dell'atomo del corpo radiante che sarebbe in via di evoluzione; il fatto che il radio liberi calore in modo continuo gioca a favore di questa ipotesi. Si può supporre che la trasformazione sia accompagnata da una perdita di peso e da una emissione di particelle materiali che costituiscono l'irraggiamento. La fonte di energia può ancora essere ricercata nell'energia gravitazionale. Infine, si può immaginare che lo spazio sia costantemente attraversato da irraggiamenti ancora sconosciuti che sono fermati al loro passaggio dai corpi radioattivi e trasformati in energia radioattiva.

Si possono invocare ragioni a favore e contro ognuna di queste interpretazioni, e più spesso le prove di verifica sperimentale delle conseguenze di queste ipotesi hanno dato risultati negativi. L'energia radioattiva dell'uranio e del radio non sembra finora esaurita né mostra una variazione apprezzabile con il tempo. Demarcay ha esaminato allo spettroscopio un campione di cloruro di radio puro ad intervalli di 5 mesi; non ha osservato alcun cambiamento nello spettro al termine di

---

1 Sagnac, Tesi di dottorato. - Curie e Sagnac, Comptes rendus, aprile 1900

questi 5 mesi. La riga principale del bario che si vedeva nello spettro e indicava la presenza del bario allo stato di traccia, non si era rafforzata per tutto l'intervallo di tempo considerato; il radio non si era dunque trasformato in bario in modo significativo.

Le variazioni di peso segnalate da M. Heydweiller per i composti del radio<sup>1</sup> non possono ancora essere considerate come un fatto stabilito. MM. Elster e Geitel hanno trovato che la radioattività dell'uranio non è variata nel fondo di un pozzo di miniera della profondità di 850 m; uno strato di terra di questo spessore non modificherebbe quindi l'irraggiamento primario ipotetico che provocherebbe la radioattività dell'uranio. Noi abbiamo misurato la radioattività dell'uranio a mezzogiorno e a mezzanotte, pensando che se l'irraggiamento primario ipotetico aveva la propria sorgente nel sole, poteva essere in parte assorbito attraversando la terra. L'esperienza non ha dato alcuna differenza per le due misure.

Le ricerche più recenti sono favorevoli all'ipotesi di una trasformazione atomica del radio. Questa ipotesi è stata proposta all'inizio delle ricerche sulla radioattività<sup>2</sup>; essa è stata veramente adottata da M. Rutherford che ha ammesso che l'emanazione del radio è un gas materiale che è uno dei prodotti della disaggregazione dell'atomo di radio<sup>3</sup>. Le recenti esperienze di MM. Ramsay e Soddy tendono a dimostrare che l'emanazione è un gas instabile che si distrugge dando luogo a una produzione di elio. D'altra parte, l'emissione continua di calore fornita dal radio non sarebbe spiegabile con una ordinaria reazione chimica, ma potrebbe forse avere la sua origine in una trasformazione dell'atomo.

Ricordiamo innanzitutto che le nuove sostanze radioattive si trovano sempre nei minerali dell'uranio; abbiamo vanamente cercato del radio nel bario in commercio. La presenza del radio sembra quindi legata a quella dell'uranio. I minerali di uranio contengono anche argon ed elio, e questa coincidenza non è probabilmente dovuta al caso. La presenza simultanea di questi diversi elementi negli stessi minerali fa pensare che la presenza degli uni è probabilmente necessaria per la formazione degli altri.

È tuttavia necessario sottolineare che il fatto che vengono a sostegno dell'idea di una trasformazione atomica del radio possono anche ricevere una interpretazione diversa. Invece di ammettere che l'atomo di radio si trasforma, si potrebbe ammettere che questo atomo è stabile, ma che agisce sul mezzo circostante (atomi materiali vicini o etere del vuoto), in modo da determinare trasformazioni atomiche. Questa ipotesi porta poi ad ammettere la possibilità della trasformazione degli elementi, ma lo stesso radio non sarebbe più allora un elemento in via di distruzione.

---

1 Heydweiller, Physik. Zeitschr., ottobre 1902

2 Madame Curie, Revue générale des Sciences, 30 gennaio 1899

3 Rutherford e Soddy, Phil. Mag., maggio 1903