

Stelle e Atomi

A. S. Eddington

M.A., D. Sc., LL.D., F.R.S. Plumian Professor of Astronomy in the University of
Cambridge

New Haven: Yale University Press

London: Humphrey Milford, Oxford University Press - 1927

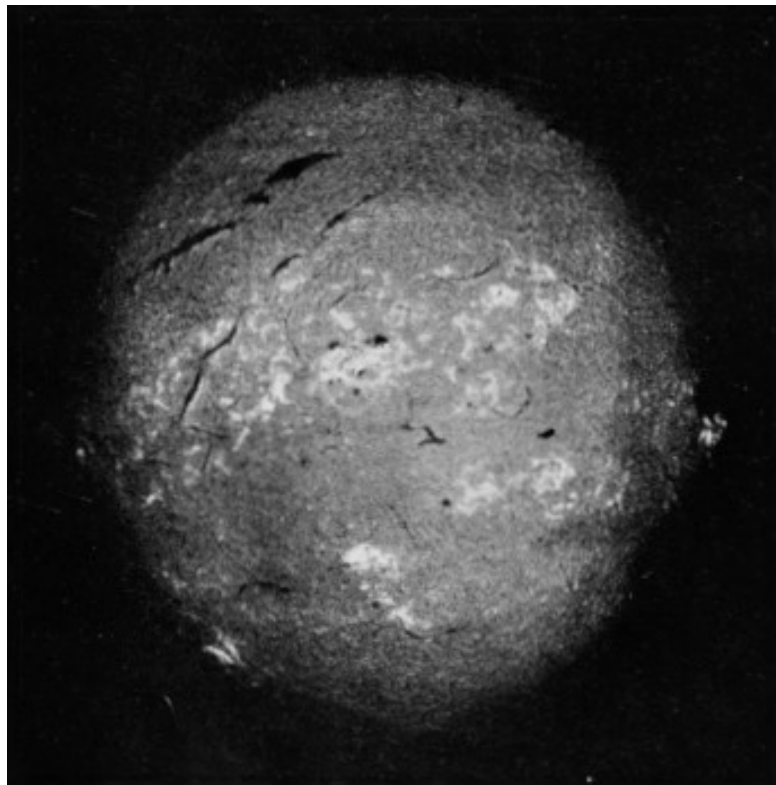


Fig. 1. - Il Sole. Fotografia dovuta allo spettro dell'idrogeno. (tratta da una fotografia scattata dal signor Evershed all'Osservatorio Kodaikanaln di Madras).

Prefazione

“Stelle e atomi” era il titolo di una conferenza serale che tenni al Congresso di Oxford della British Association nell’agosto del 1926. Modificando il testo per la pubblicazione ho potuto rimuovere le restrizioni dovute al tempo limitato della conferenza; ciò spiega perché nel presente lavoro il testo rivisto sia oggetto di tre conferenze – le prime tre – anziché di una sola. Pochi mesi prima dello stesso anno avevo anche tenuto una serie di tre conferenze sullo stesso argomento al King’s College di Londra; esse sono state fuse con quelle di Oxford e hanno costituito il materiale per la maggior parte delle aggiunte a quest’ultima.

Uno sviluppo completo dell’argomento, compresa la teoria matematica, è apparso in un lavoro più importante che ho intitolato: La Struttura interna delle Stelle. Qui mi sono semplicemente proposto di presentare le idee guida e i risultati.

I progressi nella nostra conoscenza degli atomi e delle radiazioni hanno portato a molti sviluppi interessanti in astronomia; reciprocamente lo studio della materia sottoposta alle condizioni estreme che regnano nelle stelle e nelle nebulose non è stato una delle cause minori del progresso della fisica atomica. Questo è il tema generale di queste conferenze. Tra le scoperte recenti si è scelto di conservare solo quelle che potevano essere esposte in modo relativamente elementare; tuttavia spesso devo chiedere al lettore di prestare attenzione; questo, spero, sarà ampiamente ripagato dall’affascinante attrattiva dell’argomento. Come esposizione, ho cercato di avvicinarmi il più possibile al tono della conversazione quotidiana e di mantenere una forma sistematica; ma la mente si rifiuta di fare improvvisamente piazza pulita delle sue abitudini, e un po’ del sistematico potrebbe essere riuscito a insinuarsi nelle pagine che seguono. In questi problemi dove il nostro pensiero oscilla costantemente tra l’infinitamente grande e l’infinitamente piccolo, e va dalla stella all’atomo per ritornare alla stella, la storia del nostro progresso è sorprendentemente ricca; se non ha perso troppo nell’essere raccontata, essa deve permettere al lettore di condividere in modo completo le gioie – e le pene – che la ricerca scientifica offre in tutte le sue fasi.

Ovunque le temperature sono espresse in gradi centigradi. Le parole miliardi, trilioni, ecc., sono prese nel significato che viene loro dato in Inghilterra: 10^{12} , 10^{18} , ecc.

A. S. Eddington.

LEZIONE I

L'interno di una stella

Il Sole appartiene ad un sistema di circa 3000 milioni di stelle. Le stelle sono globi di dimensioni paragonabili a quelle del Sole, cioè dell'ordine di un milione di miglia. Manterremo le unità di lunghezza inglesi nel seguito e ricordiamo d'ora in poi che: di diametro. Lo spazio per accoglierle è stato dato loro senza contare. Immaginate trenta palle da cricket che vagano all'interno della Terra; le stelle che vagano nel cielo non sono certo più anguste e corrono meno rischi di scontrarsi di queste palle da cricket. Siamo stupiti dalla grandezza del sistema stellare. Ma, molto probabilmente, questa grandezza non è un limite. Stanno crescendo le prove che le nebulose a spirale sono "isole-universo" al di fuori del nostro sistema stellare. È del tutto possibile che il nostro sguardo abbracci solo un'unità di un'organizzazione più vasta.

Una goccia d'acqua contiene diverse migliaia di milioni di milioni di atomi. Ogni atomo ha un diametro di circa un centomillesimo di pollice. Qui è l'estrema delicatezza dell'opera a stupirci. Ma non siamo al limite della piccolezza. Nell'atomo ci sono elettroni molto più piccoli che descrivono orbite, come i pianeti attorno al Sole, in uno spazio che, rispetto alle loro dimensioni, non è meno esteso del sistema solare.

Quasi a metà strada tra la scala dell'atomo e quella della stella esiste un'altra organizzazione non meno meravigliosa: il corpo umano. L'uomo è leggermente più vicino all'atomo che alla stella. Circa 10^{27} atomi costituiscono il suo corpo, e circa 10^{28} corpi umani fornirebbero materiale sufficiente per costruire una stella.

Dalla sua posizione centrale, l'uomo può contemplare e misurare le opere più gigantesche della Natura con l'astronomo, o le più piccole con il fisico. Oggi vi domanderò di guardare da entrambi i lati. Perché la strada che porta alla conoscenza delle stelle passa attraverso l'atomo, e grazie alle stelle si sono ottenuti importanti progressi nella conoscenza dell'atomo.

La stella che ci è più familiare è il Sole. Astronomicamente parlando, è a portata di mano. Possiamo misurarne le dimensioni, pesarlo, misurarne la temperatura, ecc., più facilmente che per qualunque altra stella. Possiamo fotografarne la superficie mentre le altre stelle sono così lontane che il più grande telescopio del mondo non riesce ad ingrandirle abbastanza affinché cessino di apparirci come semplici punti luminosi. Le figure 1 e 2¹ riproducono fotografie della superficie solare. La maggior parte delle stelle, senza dubbio, ci mostrerebbero aspetti simili se fossero abbastanza vicine a noi da permetterci di esaminarle.

Devo prima spiegare che queste non sono le solite fotografie. Le fotografie semplici mostrano molto bene le macchie scure chiamate macchie solari, ma per il resto sono piuttosto piatte e poco interessanti. Le immagini qui mostrate sono state scattate con uno spettroeliografo, uno strumento che vede la luce di una sola varietà (lunghezza d'onda) e

1 La Figura 1 è una riproduzione di una fotografia scattata da M. Evershed all'Osservatorio Kodaikanal, a Madras; la figura 2 proviene dall'Osservatorio di Mount Wilson, in California

ignora tutto il resto. L'effetto finale di questa selezione è che lo strumento ordina i diversi livelli nell'atmosfera solare e mostra cosa sta accadendo a un livello, invece di dare un'unica impressione sfocata di tutti i livelli sovrapposti. La Fig. 2, che si riferisce a un livello alto, offre una meravigliosa immagine di vortici e trambusto. Penso che i meteorologi solari descriverebbero probabilmente questi vortici in termini a noi non estranei. "Si sta avvicinando una profonda depressione con secondari, ed è probabile un rinnovo di condizioni instabili". Tuttavia potrebbe essere, c'è sempre una previsione meteo sicura sul sole; ciclone o anticiclone, la temperatura sarà molto calda, circa 6.000°C per l'esattezza.

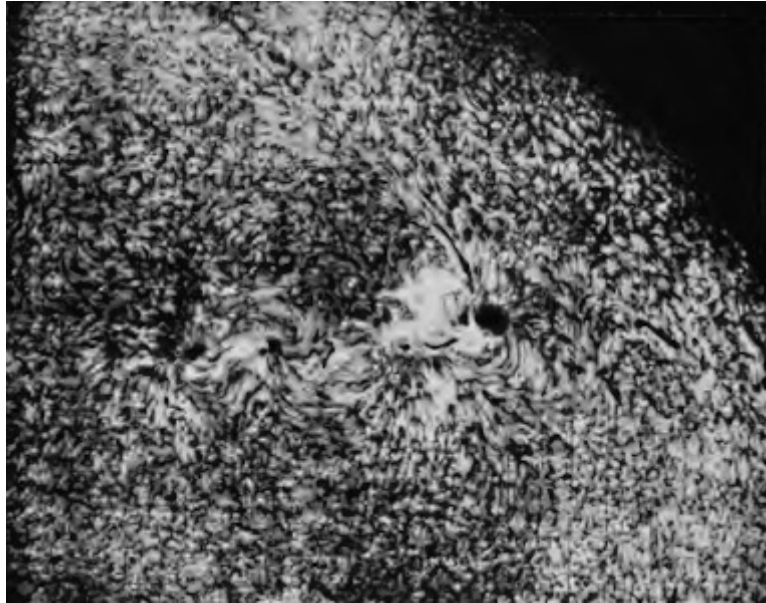


Fig. 2. - Il Sole. Fotografia dovuta allo spettro dell'idrogeno. (dall'Osservatorio del Monte Wilson, California.)

Ma ora non voglio soffermarmi sugli strati superficiali o sull'atmosfera del sole. Di recente sono state fatte molte nuove e interessanti scoperte in questa regione, e gran parte delle nuove conoscenze sono molto pertinenti al mio argomento "Stelle e atomi". Ma personalmente mi sento più a casa sotto la superficie, e ho fretta di immergermi più in basso. Quindi con questa breve occhiata allo scenario che attraversiamo ci immergeremo nell'interno profondo, dove l'occhio non può penetrare, ma dove è ancora possibile, tramite ragionamento scientifico, apprendere molto sulle condizioni.

Temperatura nell'interno

Con metodi matematici è possibile calcolare la velocità con cui aumenta la pressione man mano che scendiamo nel sole, e la velocità con cui deve aumentare la temperatura per resistere alla pressione. L'architetto può calcolare le sollecitazioni all'interno dei pilastri del suo edificio; non ha bisogno di praticare dei fori. Allo stesso modo l'astronomo può calcolare lo stress o la pressione in punti all'interno del sole senza praticare un foro. Forse è più sorprendente che la temperatura possa essere trovata tramite puro calcolo. È naturale che siate piuttosto scettici riguardo alla nostra affermazione secondo cui sappiamo quanto è caldo nel centro di una stella, e potreste essere ancora più scettici quando vi divulgherò i dati effettivi! Perciò è meglio che descriva il metodo per quanto mi è possibile. Non tenterò

di entrare nei dettagli, ma spero di mostrarvi che c'è un indizio che potrebbe essere seguito da metodi matematici appropriati.

Devo premettere che il calore di un gas è principalmente l'energia del movimento delle sue particelle che si affrettano in tutte le direzioni e tendono a diffondersi. È questo che conferisce a un gas la sua elasticità o forza espansiva; l'elasticità di un gas è ben nota a tutti attraverso la sua applicazione pratica in uno pneumatico. Ora si immagini di trovarsi in un punto profondo della stella, da cui poter guardare verso l'alto, in direzione della superficie, o verso il basso, verso il centro. Ovunque ci si trovi, deve essere raggiunta una certa condizione di equilibrio: da una parte c'è il peso di tutti gli strati soprastanti che preme verso il basso e cerca di comprimere il gas sottostante; dall'altra parte c'è l'elasticità del gas sottostante che cerca di espandersi e di forzare gli strati sovrastanti verso l'esterno. Poiché non accade né l'una né l'altra cosa e la stella rimane praticamente invariata per centinaia di anni, dobbiamo dedurre che le due tendenze si bilanciano. In ogni punto l'elasticità del gas deve essere appena sufficiente a bilanciare il peso degli strati superiori; e poiché è il calore a fornire l'elasticità, questo requisito stabilisce quanto calore deve avere il gas. E così troviamo il grado di calore o temperatura in ogni punto.

La stessa cosa può essere espressa in modo leggermente diverso. Come prima, fissiamo l'attenzione su un certo punto in una stella e consideriamo come è sostenuta la materia sopra di esso. Se non fosse sostenuta, cadrebbe verso il centro sotto la forza attrattiva della gravitazione. Il sostegno è dato da una successione di piccole spinte sferrate dalle particelle sottostanti; abbiamo visto che la loro energia termica le fa muovere in tutte le direzioni e continuano a urtare la materia soprastante. Ogni urto dà una leggera spinta verso l'alto e l'intera successione di urti sostiene il materiale superiore come un volano. (Questo processo non è limitato alle stelle; ad esempio, è in questo modo che un'automobile è sostenuta dai suoi pneumatici.) Un aumento della temperatura comporterebbe un aumento dell'attività delle particelle e quindi un aumento della rapidità e della forza dei colpi. Evidentemente dobbiamo assegnare una temperatura tale che la somma totale degli urti non sia né troppo grande né troppo piccola per mantenere il materiale superiore sostenuto in modo costante. Questo è in linea di principio il nostro metodo di calcolo della temperatura.

Sorge una difficoltà ovvia. L'intera forza di sostegno dipenderà non solo dall'attività delle particelle (temperatura), ma anche dal loro numero (densità). Inizialmente non conosciamo la densità della materia in un punto arbitrario nelle profondità del sole. È in questa connessione che è richiesta l'ingegnosità del matematico. Egli ha una quantità definita di materia con cui operare, vale a dire la massa nota del sole; quindi più ne usa in una parte del globo, meno ne avrà da risparmiare per le altre parti. Potrebbe dire a se stesso: "Non voglio esagerare con la temperatura, quindi vedrò se riesco a farcela senza superare i 10.000.000 di °C". "Ciò stabilisce un limite all'attività da attribuire a ciascuna particella; quindi quando il matematico raggiunge una grande profondità nel sole e di conseguenza ha un peso elevato di materiale al di sopra da sostenere, la sua unica risorsa è quella di utilizzare un gran numero di particelle per dare l'impulso totale richiesto. Si accorgerà allora di aver esaurito tutte le sue particelle troppo in fretta, e di non avere più nulla per riempire il centro. Naturalmente la sua struttura, sostenuta dal nulla, crollerebbe nella cavità. In questo modo possiamo dimostrare che è impossibile costruire una stella

permanente delle dimensioni del sole senza introdurre un'attività o una temperatura superiori a 10.000.000 di °C. 'Il matematico può fare un passo oltre; invece di trovare semplicemente un limite inferiore, può accertare quale deve essere quasi la vera distribuzione della temperatura tenendo conto del fatto che la temperatura non deve essere 'disomogenea'. Il calore fluisce da un posto all'altro, e qualsiasi discontinuità verrebbe presto livellata in una vera stella. Lascero che il matematico si occupi più approfonditamente di queste considerazioni, che appartengono al seguito dell'indizio; sono contento se vi ho mostrato che c'è un'apertura per un attacco al problema.

Questo tipo di indagine è stata avviata più di cinquant'anni fa. È stata gradualmente sviluppata e corretta, fino a quando ora crediamo che i risultati debbano essere quasi corretti, cioè sappiamo davvero quanto è caldo all'interno di una stella.

Ho appena menzionato una temperatura di 6.000°; quella era la temperatura vicino alla superficie, la regione che effettivamente vediamo. Non vi è alcuna seria difficoltà nel determinare questa temperatura superficiale tramite osservazione; in effetti lo stesso metodo è spesso utilizzato commercialmente per trovare la temperatura di una fornace dall'esterno. È per le regioni profonde fuori dalla vista che è richiesto il metodo di calcolo altamente teorico. Questi 6.000° sono solo il calore marginale della grande fornace solare, il che non dà alcuna idea della terrificante intensità interna. Scendendo verso l'interno, la temperatura sale rapidamente fino a superare il milione di gradi e continua ad aumentare finché al centro del sole è di circa 40.000.000°.

Non immaginate che 40.000.000° sia un grado di calore così estremo che la temperatura è diventata insignificante. Queste temperature stellari devono essere prese alla lettera. Il calore è l'energia del movimento degli atomi o delle molecole di una sostanza, e la temperatura che indica il grado di calore è un modo per stabilire quanto velocemente si stanno muovendo questi atomi o molecole. Ad esempio, alla temperatura di questa stanza le molecole d'aria si muovono con una velocità media di 500 iarde al secondo; se la riscaldassimo fino a 40.000.000° la velocità sarebbe di poco più di 100 miglia al secondo. Non c'è nulla di cui allarmarsi: l'astronomo è piuttosto abituato a velocità del genere. Le velocità delle stelle, o delle meteore che entrano nell'atmosfera terrestre, sono solitamente comprese tra 10 e 100 miglia al secondo. La velocità della Terra che viaggia attorno al Sole è di 20 miglia al secondo. Quindi per un astronomo questo è il grado di velocità più ordinario che potrebbe essere suggerito, e naturalmente considera 40.000.000° una condizione molto confortevole con cui avere a che fare. E se l'astronomo non è spaventato da una velocità di 100 miglia al secondo, il fisico sperimentale la disprezza parecchio, perché è abituato a maneggiare atomi sparati dal radio e da sostanze simili a velocità di 10.000 miglia al secondo. Abituato com'è a osservare questi atomi dinamici e a testare le loro capacità, il fisico ritiene che gli atomi "al trotto" delle stelle siano molto comuni.

Oltre agli atomi che corrono avanti e indietro in tutte le direzioni, abbiamo all'interno di una stella grandi quantità di onde di etere che corrono anch'esse in tutte le direzioni. Le onde di etere sono chiamate con nomi diversi a seconda della loro lunghezza d'onda. Le onde più lunghe sono le onde hertziane utilizzate nelle trasmissioni; seguono poi le onde di calore infrarosse; poi le onde di luce visibile ordinaria; poi i raggi ultravioletti, fotografici o chimici; poi i raggi X; infine i raggi gamma emessi da sostanze radioattive. Probabilmente i più corti di tutti sono i raggi che costituiscono la radiazione molto

penetrante che si trova nella nostra atmosfera, che secondo le ricerche di Kohlhörster e Millikan si ritiene ci raggiungano dallo spazio interstellare. Sono tutti fondamentalmente uguali ma corrispondono a ottave diverse. L'occhio è sintonizzato solo su un'ottava, quindi la maggior parte di esse sono invisibili; ma essenzialmente sono della stessa natura della luce visibile.

Le onde dell'etere all'interno di una stella appartengono alla divisione chiamata raggi X. Sono le stesse dei raggi X prodotti artificialmente in un tubo a raggi X. In media sono "più morbide" (cioè più lunghe) dei raggi X utilizzati negli ospedali, ma non più morbide di alcuni di quelli utilizzati negli esperimenti di laboratorio. Quindi abbiamo all'interno di una stella qualcosa di familiare e ampiamente studiato in laboratorio.

Oltre agli atomi e alle onde eteriche, c'è una terza popolazione che si unisce alla danza. Ci sono moltitudini di elettroni liberi. L'elettrone è la cosa più leggera conosciuta, pesando non più di 1/1840 dell'atomo più leggero. È semplicemente una carica di elettricità negativa che vaga da sola. Un atomo è costituito da un nucleo pesante che di solito è circondato da una cintura di elettroni. Viene spesso paragonato a un sistema solare in miniatura, e il paragone dà un'idea appropriata della vacuità di un atomo. Il nucleo viene paragonato al sole, e gli elettroni ai pianeti. Ogni tipo di atomo, ogni elemento chimico, ha un diverso quorum di elettroni planetari. Il nostro sistema solare con otto pianeti potrebbe essere paragonato in particolar modo all'atomo di ossigeno che ha otto elettroni circolanti. Nella fisica terrestre di solito consideriamo la cintura o crinolina di elettroni come una parte essenziale dell'atomo perché raramente incontriamo atomi non completamente rivestiti; quando incontriamo un atomo che ha perso uno o due elettroni dal suo sistema, lo chiamiamo "ione". Ma all'interno di una stella, a causa della grande agitazione in corso, sarebbe assurdo esigere uno standard di abbigliamento così meticoloso. Tutti i nostri atomi hanno perso una considerevole parte dei loro elettroni planetari e sono quindi ioni secondo la rigorosa nomenclatura.

Ionizzazione degli atomi

Alle alte temperature all'interno di una stella, lo scontro delle particelle tra loro, e più in particolare la collisione delle onde dell'etere (raggi X) con gli atomi, causa la rottura e la liberazione degli elettroni. Questi elettroni liberi formano la terza popolazione a cui ho fatto riferimento. Per ogni individuo la libertà è solo temporanea, perché verrà presto catturato da qualche altro atomo mutilato; ma nel frattempo un altro elettrone sarà stato staccato da qualche altra parte per prendere il suo posto nella popolazione libera. Questa separazione degli elettroni dagli atomi è chiamata ionizzazione e, poiché è estremamente importante nello studio delle stelle, vi mostrerò subito le fotografie del processo.

Il mio argomento è "Stelle e atomi"; vi ho già mostrato le fotografie di una stella, quindi dovrei mostrarvi la fotografia di un atomo. Oggigiorno è piuttosto facile. Dal momento che ci sono alcuni trilioni di atomi presenti nel più piccolo pezzo di materiale, sarebbe molto confusionario se la fotografia li mostrasse tutti. Fortunatamente la fotografia esercita la discriminazione e mostra solo atomi di "treno espresso" che sfrecciano come meteore, ignorando tutti gli altri. Possiamo disporre una particella di radio in modo che spari solo pochi atomi espressi attraverso il campo della macchina fotografica, e quindi ottenere un'immagine chiara di ciascuno di essi.

La Fig. 3¹ è una fotografia di tre o quattro atomi che hanno attraversato il campo visivo, dando origine a larghe tracce dritte. Si tratta di atomi di elio scaricati ad alta velocità da una sostanza radioattiva.

Mi chiedo se nella vostra mente non ci sia il sospetto che questa fotografia possa essere falsa. Sono davvero questi i singoli atomi che si stanno mostrando, quelle unità infinitesimali che non molti anni fa sembravano concetti teorici ben al di fuori di qualsiasi comprensione pratica? Risponderò a questa domanda ponendone una. Vedete un segno sporco sulla foto. È il pollice di qualcuno? Se dite Sì, allora vi assicuro senza esitazione che queste strisce sono singoli atomi. Ma se siete ipercritici e dite "No. "Quello non è il pollice di qualcuno, ma è un segno che mostra che il pollice di qualcuno è stato lì", allora devo essere altrettanto cauto e dire che la striscia è un segno che mostra dove è stato un atomo. La fotografia invece di essere l'impressione di un atomo è l'impressione dell'impressione di un atomo, così come non è l'impressione di un pollice ma l'impressione dell'impressione di un pollice. Non vedo che importi davvero che l'impressione sia di seconda mano invece che di prima mano. Non credo che siamo stati colpevoli di falsificazione più del criminologo che cosparge di polvere un'impronta digitale per renderla visibile, o del biologo che macchia i suoi preparati con lo stesso oggetto. L'atomo nel suo passaggio lascia quello che potremmo chiamare una "traccia" lungo la sua scia; e dobbiamo al professor C. T. R. Wilson un dispositivo molto ingegnoso per renderla visibile. Il "branco di cani" del professor Wilson è costituito da vapore acqueo che si riversa sulla scia e lì si condensa in minuscole gocce.

Ora vorrete vedere una fotografia di un elettrone. Anche questo può essere gestito. La traccia ondulata spezzata in Fig. 3 è un elettrone. A causa della sua piccola massa, l'elettrone viene più facilmente deviato nel suo percorso rispetto all'atomo pesante che si lancia a testa di toro attraverso tutti gli ostacoli. La Fig. 4 mostra numerosi elettroni, e ne include uno ad altissima velocità che per questo motivo è stato in grado di tracciare una scia dritta. Tra l'altro, rivela il dispositivo utilizzato per rendere visibili le tracce, perché si possono vedere separatamente le minuscole gocce d'acqua.

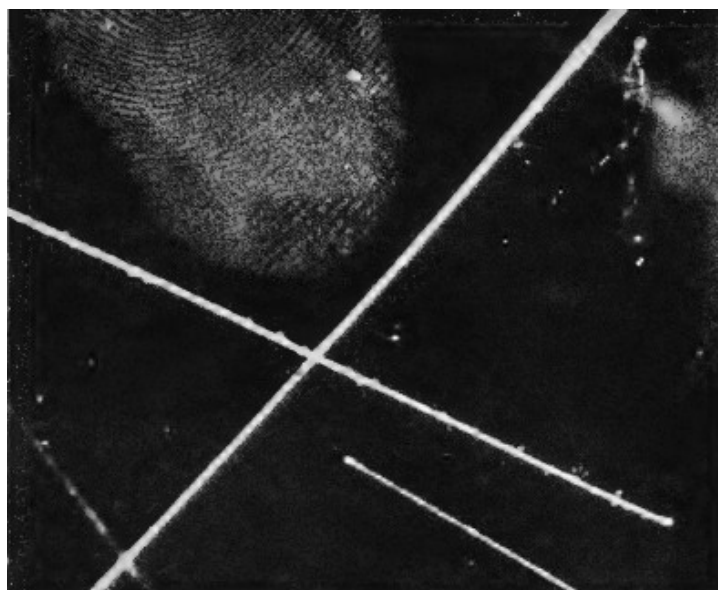


Fig. 3

1 Sono debitore al professor C. T. R. Wilson per le figure 3-6.

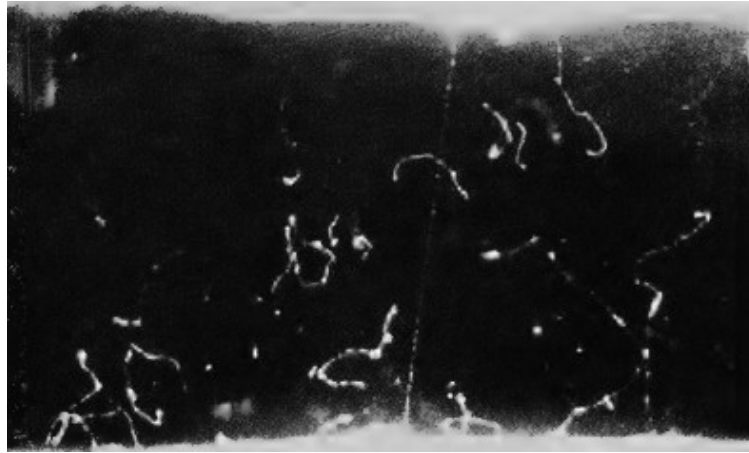


Fig.4 - Atomi e elettroni in rapido movimento

Abbiamo visto fotografie di atomi ed elettroni liberi. Ora vogliamo una fotografia di raggi X per completare la popolazione stellare. Non possiamo riuscirci del tutto, ma quasi. Le fotografie con raggi X sono abbastanza comuni; ma una fotografia di raggi X è un'altra cosa. Ho già detto che gli elettroni possono essere staccati dagli atomi tramite la collisione dei raggi X con essi. Quando ciò accade, l'elettrone libero viene solitamente sparato via ad alta velocità, così che è uno degli elettroni espressi che possono essere fotografati. Nella Fig. 5 si vedono quattro elettroni sparati via in questo modo. Vi accorgete che tutti partono da punti sulla stessa linea e non serve molta immaginazione per vedere nella vostra mente una forza misteriosa che viaggia lungo questa linea e crea le esplosioni. Quel potere è costituito dai raggi X che sono stati diretti in un fascio stretto lungo la linea (da destra a sinistra) quando è stata scattata la fotografia. Sebbene i raggi X siano lasciati alla vostra immaginazione, la fotografia mostra in ogni caso il processo di ionizzazione che è così importante nell'interno stellare, la liberazione degli elettroni dagli atomi tramite l'incidenza dei raggi X. Si nota che è solo una questione di probabilità che i raggi X ionizzino un atomo quando lo incontrano. Ci sono trilioni di atomi in giro (di cui la fotografia non si accorge); ma, nonostante tutto, i raggi X percorrono una lunga strada prima di incontrare l'atomo su cui scelgono di operare.

Infine posso mostrarvi l'altro metodo di ionizzazione degli atomi mediante urto di tipo più meccanico, in questo caso mediante la collisione di un elettrone veloce. Nella Fig. 6 un elettrone veloce viaggiava quasi orizzontalmente, ma le minuscole gocce d'acqua che dovrebbero segnare la traccia sono così sparse che a prima vista non si riesce a cogliere la connessione. Notiamo che le gocce compaiono a coppie. Questo perché l'elettrone veloce colpisce alcuni degli atomi lungo il suo percorso, strappando via un elettrone da ciascuno. Si vedono a intervalli lungo il percorso un atomo rotto e un elettrone libero che giacciono uno accanto all'altro, anche se non si riesce a distinguerli tra loro. Occasionalmente l'elettrone veloce originale era troppo vigoroso e c'è un'ulteriore confusione, ma di solito si possono vedere chiaramente i due frammenti risultanti dallo scontro. In primo luogo è la carica elettrica e non l'alta velocità delle particelle a determinare il loro aspetto in queste fotografie. Ma una particella ad alta velocità lascia dietro di sé una scia di particelle elettricamente cariche, le vittime della sua furiosa guida, così che viene mostrata indirettamente dalla sua fila di vittime.

Un cinico potrebbe osservare che l'interno di una stella è un argomento molto sicuro di

cui parlare perché nessuno può andarci e dimostrare che hai torto. Io risponderei che almeno non sto abusando delle illimitate opportunità di immaginazione; vi sto solo chiedendo di far entrare all'interno della stella oggetti e processi abbastanza familiari che possono essere fotografati. Forse ora vi volterete verso di me e direte: "Che diritto hai di supporre che la Natura sia priva di immaginazione come te? Forse ha nascosto nella stella qualcosa di nuovo che sconvolgerà tutti i tuoi pensieri". Ma penso che la scienza non avrebbe mai fatto grandi progressi se avesse sempre immaginato ostacoli sconosciuti nascosti dietro ogni angolo. Almeno possiamo sbirciare con cautela dietro l'angolo, e forse scopriremo che dopotutto non c'è niente di veramente formidabile. Il nostro scopo nell'immergerci nell'interno non è semplicemente ammirare un mondo fantastico con condizioni che trascendono l'esperienza ordinaria; è cogliere il meccanismo interno che fa sì che le stelle si comportino come fanno. Se vogliamo comprendere le manifestazioni superficiali, se vogliamo capire perché "una stella differisce da un'altra stella", dobbiamo scendere più in basso, nella sala macchine, per tracciare l'inizio del flusso di calore ed energia che si riversa attraverso la superficie. Infine, allora, la nostra teoria ci riporterà in superficie e saremo in grado di verificare tramite il confronto con l'osservazione se siamo stati gravemente fuorviati. Nel frattempo, sebbene non possiamo naturalmente dimostrare un negativo generale, non c'è motivo di anticipare qualcosa di cui la nostra esperienza di laboratorio non ci mette in guardia.

I raggi X in una stella sono gli stessi dei raggi X sperimentati in laboratorio, ma sono enormemente più abbondanti nella stella. Possiamo produrre raggi X come quelli stellari, ma non possiamo produrli con la stessa abbondanza stellare. La fotografia (Fig. 5) mostrava un fascio di raggi X di laboratorio che aveva strappato via quattro elettroni da atomi diversi; questi sarebbero stati rapidamente ricatturati. Nella stella dovete immaginare l'intensità moltiplicata milioni di volte, così che gli elettroni vengono strappati via tanto velocemente quanto si depositano e gli atomi vengono tenuti quasi completamente spogli. La mutilazione quasi completa degli atomi è importante nello studio delle stelle per due motivi principali.

Il primo è questo. Un architetto prima di pronunciare un parere sui progetti di un edificio vorrà sapere se il materiale mostrato nei progetti sarà legno, acciaio, latta o carta. Allo stesso modo, prima di scoprire i dettagli dell'interno di una stella, sembrerebbe essenziale sapere se è composta da materiale pesante come il piombo o leggero come il carbonio. Per mezzo dello spettroscopio possiamo scoprire molto sulla composizione chimica dell'atmosfera del sole; ma non sarebbe giusto prenderla come un campione della composizione del sole nel suo complesso. Sarebbe molto rischioso fare ipotesi sugli elementi che prevalgono nelle profondità interne. "Sembra che siamo giunti a un punto morto. Ma ora si scopre che quando gli atomi vengono completamente frantumati, si comportano tutti quasi allo stesso modo, almeno per quanto riguarda quelle proprietà di cui ci occupiamo in astronomia. L'alta temperatura, di cui eravamo inclini a temere all'inizio, ha semplificato le cose per noi, perché ha in larga misura eliminato le differenze tra i diversi tipi di materiale. La struttura di una stella è un problema fisico insolitamente semplice; è a basse temperature, come quelle che sperimentiamo sulla Terra, che la materia inizia ad avere proprietà problematiche e complicate. Gli atomi stellari sono selvaggi nudi, ignari delle distinzioni di classe dei nostri atomi terrestri completamente schierati. Siamo

quindi in grado di fare progressi senza indovinare la composizione chimica dell'interno. È necessario fare una riserva, vale a dire che non vi è una proporzione eccessiva di idrogeno. L'idrogeno ha il suo modo di comportarsi; ma fa ben poca differenza quale degli altri elementi 91 predomini.

L'altro punto è uno su cui avrò molto da dire in seguito. È che dobbiamo renderci conto che gli atomi nelle stelle sono frammenti mutilati degli atomi voluminosi con sistemi elettronici estesi a noi familiari sulla Terra; e quindi il comportamento dei gas stellari e terrestri non è affatto lo stesso per quanto riguarda le proprietà che riguardano le dimensioni degli atomi.

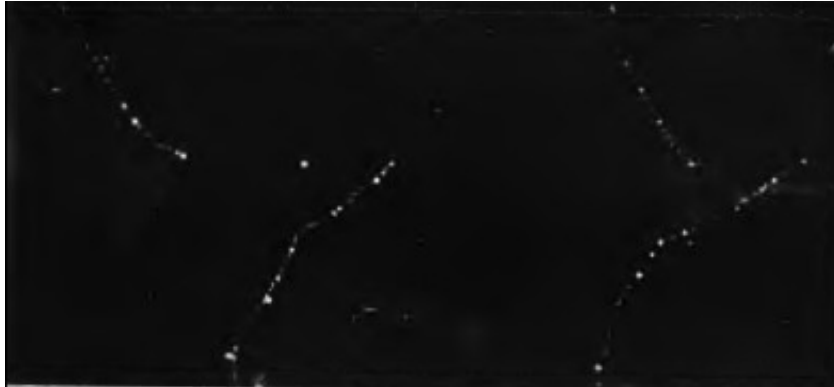


Fig. 5 - Ionizzazione da raggi X



Fig. 6 - Ionizzazione per collisione

Per illustrare l'effetto della composizione chimica di una stella, torniamo al problema del supporto degli strati superiori da parte del gas sottostante. A una data temperatura, ogni particella indipendente contribuisce con la stessa quantità di supporto, indipendentemente dalla sua massa o natura chimica; gli atomi più leggeri compensano la loro mancanza di massa muovendosi più attivamente. Questa è una legge ben nota originariamente trovata nella chimica sperimentale, ma ora spiegata dalla teoria cinetica di Maxwell e Boltzmann. Supponiamo di aver inizialmente ipotizzato che il sole è composto interamente da atomi d'argento e di aver effettuato di conseguenza i nostri calcoli della temperatura; in seguito cambiamo idea e sostituiamo il tutto con un elemento più leggero, l'alluminio. Un atomo d'argento pesa solo quattro volte più di un atomo di alluminio; quindi dobbiamo sostituire quattro atomi di alluminio per ogni atomo d'argento per mantenere invariata la massa del sole. Ma ora la forza di sostegno sarà ovunque quadruplicata e tutta la massa verrà sollevata verso l'esterno se non apportiamo ulteriori modifiche. Un atomo d'argento pesa solo quattro volte più di un atomo di alluminio; quindi dobbiamo sostituire quattro atomi di alluminio per ogni atomo d'argento per mantenere invariata la massa del sole. Ma ora la forza di sostegno sarà ovunque quadruplicata e tutta la massa verrà sollevata verso l'esterno se non apportiamo ulteriori

modifiche. Per mantenere l'equilibrio, l'attività di ogni particella deve essere ridotta nel rapporto 1/4; ciò significa che dobbiamo assegnare a tutto il sole di alluminio temperature uguali a 1/4 di quelle assegnate al sole d'argento. Quindi per gli atomi non frantumati un cambiamento nella composizione chimica assegnata comporta un grande cambiamento nella nostra inferenza sulla temperatura interna.

Ma se gli elettroni vengono strappati dall'atomo, diventano anche particelle indipendenti che forniscono supporto agli strati superiori. Un elettrone libero fornisce lo stesso supporto di un atomo; ha una massa molto più piccola, ma si muove circa cento volte più velocemente. La rottura di un atomo d'argento fornisce 47 elettroni liberi, creando con il nucleo residuo dell'atomo 48 particelle in tutto. L'atomo di alluminio fornisce 13 elettroni o 14 particelle in tutto; quindi 4 atomi di alluminio forniscono 56 particelle indipendenti. Il passaggio dall'argento frantumato a una massa uguale di alluminio frantumato comporta una variazione da 48 a 56 particelle, il che richiede una riduzione della temperatura del 14 per cento. Possiamo tollerare questo grado di incertezza nella nostra valutazione della temperatura interna. Altri corpi sostituiti all'argento non producono in generale cambiamenti maggiori, e le differenze sono veramente piccole per la miscela di più elementi. Se si esclude l'idrogeno, il cambiamento più considerevole consiste nella sostituzione di 48 particelle per l'argento con 81 particelle per una uguale massa di elio. Ma per l'idrogeno, il cambiamento è di 48 a 216, così che l'idrogeno da risultati largamente diversi da quelli degli altri elementi.; è questo un grande miglioramento sul calcolo corrispondente effettuato con gli atomi non rotti, per il quale l'incertezza si traduceva con la presenza di un fattore 4.

Oltre al fatto che li avvicinano l'uno all'altro, i risultati che danno sulla struttura chimica diversa, la ionizzazione, accrescendo il numero delle particelle di supporto, abbassa notevolmente le temperature calcolate. Si crede talvolta che la temperatura eccessivamente alta assegnata all'interno di una stella è una novità sensazionale. Non è così. I primi investigatori che trascuravano sia la ionizzazione e la pressione di radiazione, trovavano temperature molto più elevate di quelle oggi ammesse.

Pressione di radiazione e massa

Le stelle diverse tra loro per la loro massa, cioè per la quantità di materia raggruppata per formarla; ma le differenze non sono così grandi come lascerebbe credere la grande diversità del loro splendore. Non possiamo sempre valutare la massa di una stella, ma vi è un buon numero di stelle per le quali la massa è stata determinata dalle misure astronomiche. La massa del Sole è 2.000.000.000.000.000.000.000 ton.

Spero di aver contato esattamente gli zeri; pertanto credo che se vi fosse uno o due zeri in più o in meno non ve ne accorgete nemmeno. Ma la Natura, essa, se ne accorge. Quando essa forma le stelle, essa ha attribuito evidentemente molta importanza alla realizzazione del numero esatto di zeri. La sua idea che una stella deve contenere una quantità determinata di materia. Ben inteso essa ammette ciò che i funzionari del Tesoro chiamerebbero "una mano che aiuta". Essa può pure lasciar passare una stella con un zero di troppo e darci così una stella eccezionalmente grande, o uno zero in meno dandoci una stella molto piccola. Ma queste differenze sono rare, e un errore di due zeri è quasi una cosa inconsueta. Ordinariamente essa si mantiene molto più vicina al modello che è

stabilito.

Come fa la Natura a tenere il conto degli zeri? Sembra chiaro che ci debba essere qualcosa all'interno della stella stessa che tiene sotto controllo e, per così dire, fa un segnale di avvertimento non appena è stata raccolta la giusta quantità di materiale. Pensiamo di sapere come è fatto. Ricordate le onde di etere all'interno della stella. Queste cercano di fuggire verso l'esterno ed esercitano una pressione sulla materia che le sta imprigionando. Questa forza verso l'esterno, se è sufficientemente potente da meritare di essere considerata in confronto ad altre forze, deve essere presa in considerazione in qualsiasi studio dell'equilibrio o della stabilità della stella. Ora, in tutti i piccoli globi questa forza è piuttosto banale; ma la sua importanza aumenta con la massa del globo, e si calcola che per una massa uguale a quella indicata sopra raggiunga lo stesso status delle altre forze che governano l'equilibrio della stella. Se non avessimo mai visto le stelle e stessimo semplicemente considerando come un curioso problema quanto grande un globo di materia potrebbe stare assieme, potremmo calcolare che non ci sarebbero difficoltà fino a circa duemila quadrilioni di tonnellate; ma oltre questo limite le condizioni sono completamente alterate e questa nuova forza inizia a prendere il controllo della situazione. Qui, temo, il calcolo rigoroso si ferma, e nessuno è ancora riuscito a calcolare cosa farà la nuova forza con la stella quando prenderà il controllo. Ma non può essere un caso che le stelle siano tutte così vicine a questa massa critica; e così mi azzardo a congetturare il resto della storia. La nuova forza non proibisce una massa maggiore, ma la rende rischiosa. Può aiutare una rotazione moderata attorno all'asse a rompere la stella. Di conseguenza, masse maggiori sopravvivranno solo raramente; per la maggior parte, le stelle saranno mantenute alla massa a cui la nuova forza diventa per la prima volta una seria minaccia. La forza di gravitazione raccoglie insieme materiale nebuloso e caotico; la forza della pressione di radiazione lo taglia in grumi di dimensioni adeguate.

Questa forza di pressione di radiazione è meglio conosciuta da molte persone con il nome di "pressione della luce". Il termine "radiazione" comprende tutti i tipi di onde eterie, inclusa la luce, quindi il significato è lo stesso. È stato dimostrato per la prima volta teoricamente e poi verificato sperimentalmente che la luce esercita una pressione minima su qualsiasi oggetto su cui cade. In teoria sarebbe possibile buttare a terra un uomo puntandogli addosso un riflettore, solo che il riflettore dovrebbe essere eccessivamente intenso e l'uomo verrebbe probabilmente prima vaporizzato. La pressione della luce probabilmente gioca un ruolo importante in molti fenomeni celesti. Una delle prime ipotesi fu che le particelle minute che formano la coda di una cometa fossero spinte verso l'esterno dalla pressione della luce solare, il che spiegherebbe il fatto che la coda di una cometa punta lontano dal sole. Ma questa particolare applicazione deve essere considerata dubbia. All'interno della stella, l'intenso flusso di luce (o meglio, raggi X) è come un vento che si precipita verso l'esterno e distende la stella.

L'interno di una stella

Ora possiamo farci un'idea dell'interno di una stella: un guazzabuglio di atomi, elettroni e onde eteriche. Atomi scompigliati sfrecciano a 100 miglia al secondo, e la loro normale schiera di elettroni viene strappata via nella mischia. Gli elettroni persi stanno accelerando 100 volte più velocemente per trovare nuovi luoghi di quiete. Seguiamo il

progresso di uno di loro. C'è quasi una collisione quando un elettrone si avvicina a un nucleo atomico, ma aumentando la velocità, compie una curva stretta. A volte c'è uno slittamento laterale sulla curva, ma l'elettrone continua con energia aumentata o ridotta. Dopo mille sfioramenti, tutte avvenute in un millesimo di milionesimo di secondo, la frenetica corsa si conclude con uno slittamento laterale peggiore del solito. L'elettrone è abbastanza catturato e attaccato all'atomo. Ma ha appena preso il suo posto quando un raggio X esplose nell'atomo. Succhiando l'energia del raggio, l'elettrone si lancia di nuovo verso la sua prossima avventura.

Temo che la commedia sguaiata della fisica atomica moderna non sia molto tenera verso i nostri ideali estetici. Il maestoso dramma dell'evoluzione stellare si rivela più simile alle scappatelle sottili come un capello nei film. La musica delle sfere ha quasi un accenno di jazz.

E qual è il risultato di tutto questo trambusto? Molto piccolo. Gli atomi e gli elettroni, nonostante tutta la loro fretta, non vanno mai da nessuna parte; cambiano solo posto. Le onde eteriche sono l'unica parte della popolazione che realizza qualcosa di permanente. Sebbene apparentemente sfreccino in tutte le direzioni indiscriminatamente, in media compiono un lento progresso verso l'esterno. Non c'è alcun progresso verso l'esterno degli atomi e degli elettroni; la gravitazione provvede a questo. Ma lentamente le onde eteriche ingabbiate trapelano verso l'esterno come attraverso un setaccio. Un'onda eterica si precipita da un atomo all'altro, avanti, indietro, ora assorbita, ora scagliata di nuovo in una nuova direzione, perdendo la sua identità, ma vivendo di nuovo nel suo successore. Con un po' di fortuna, in un lasso di tempo non eccessivamente lungo (da diecimila a dieci milioni di anni, a seconda della massa della stella) si troverà vicino al confine. A temperature più basse, passa dai raggi X ai raggi luminosi, alterandosi un po' a ogni rinascita. Alla fine è così vicina al confine che può sfrecciare fuori e viaggiare in pace per qualche centinaio di anni. Forse alla fine potrà raggiungere un mondo lontano dove un astronomo è in agguato per intrappolarla nel suo telescopio ed estorcerle i segreti del suo luogo di nascita.

È la perdita che vogliamo in particolar modo determinare; ed è per questo che dobbiamo studiare pazientemente cosa sta succedendo nella folla turbolenta. Per mettere il problema in un'altra forma; le onde sono spinte a fluire fuori dal gradiente di temperatura nella stella, ma sono ostacolate e respinte dalle loro avventure con gli atomi e gli elettroni. È compito della matematica, aiutata dalle leggi e dalle teorie sviluppate da uno studio di questi stessi processi in laboratorio, calcolare i due fattori, il fattore che spinge e il fattore che ostacola il flusso in uscita, e quindi trovare la perdita. Questa perdita calcolata dovrebbe, naturalmente, concordare con le misure astronomiche dell'energia di calore e luce che fuoriesce dalla stella. E così finalmente arriviamo a un test osservativo delle teorie.

Opacità della materia stellare

Si consideri il fattore che ostacola la fuga, il ritorno delle onde eteriche attraverso i loro incontri con atomi ed elettroni. Se avessimo a che fare con onde luminose, chiameremmo questa ostruzione al loro passaggio "opacità", e potremmo usare convenientemente lo stesso termine per l'ostruzione ai raggi X.

Ci rendiamo presto conto che la materia della stella deve essere decisamente opaca. La quantità di radiazione all'interno è così grande che, a meno che non sia molto severamente confinata, la perdita sarebbe molto maggiore della quantità che osserviamo uscire dalle stelle. La seguente è una illustrazione del grado tipico di opacità richiesto per concordare con la perdita osservata. Entriamo nella stella Capella e troviamo una regione in cui la densità è la stessa di quella dell'atmosfera che ci circonda¹; una lastra di materia spessa solo due pollici formerebbe uno schermo così opaco che solo un terzo delle onde eteriche che cadono da un lato passerebbero dall'altro lato, mentre il resto verrebbe assorbito dallo schermo. Uno o due piedi di materia sarebbero praticamente uno schermo perfetto. Se pensiamo alle onde luminose, questa sembra un'opacità sorprendente per un materiale tenue come l'aria; ma dobbiamo ricordare che è un'opacità per i raggi X, e il fisico pratico conosce bene la difficoltà di far passare i tipi più morbidi di raggi X anche solo attraverso pochi millimetri di aria.

C'è un soddisfacente accordo nel generale ordine di grandezza tra l'opacità all'interno della stella, determinata dall'osservazione astronomica della perdita, e l'opacità delle sostanze terrestri ai raggi X con maggiore o minore lunghezza d'onda. Questo ci dà una certa sicurezza che la nostra teoria è sulla strada giusta. Ma un attento confronto ci mostra che c'è una certa differenza importante tra l'opacità stellare e quella terrestre.

In laboratorio troviamo che l'opacità aumenta molto rapidamente con la lunghezza d'onda dei raggi X utilizzati. Non troviamo nulla di simile alla stessa differenza nelle stelle, sebbene i raggi X nelle stelle più fredde debbano avere una lunghezza d'onda notevolmente maggiore di quelli nelle stelle più calde. Inoltre, avendo cura di fare il confronto alla stessa lunghezza d'onda per entrambe, scopriamo che l'opacità stellare è minore di quella terrestre. Dobbiamo seguire questa divergenza.

C'è più di un modo in cui un atomo può ostacolare le onde d'etere, ma non sembra esserci dubbio che per i raggi X sia nelle stelle che in laboratorio la parte principale dell'opacità dipenda dal processo di ionizzazione. L'onda d'etere cade su un atomo e la sua energia viene risucchiata da uno degli elettroni del pianeta che la usa per sfuggire all'atomo e viaggiare via ad alta velocità. Il punto da notare è che nell'atto stesso dell'assorbimento il meccanismo assorbente è rotto, e non può essere riutilizzato finché non è stato riparato. Per ripararlo l'atomo deve catturare uno degli elettroni liberi che vagano in giro, inducendolo a prendere il posto dell'elettrone perso.

In laboratorio possiamo produrre solo sottili flussi di raggi X, per cui ogni trappola d'onda è chiamata ad agire solo occasionalmente. C'è tutto il tempo per ripararla prima che la prossima volta abbia la possibilità di catturare qualcosa; e non c'è praticamente alcuna perdita di efficienza dovuta al fatto che le trappole sono fuori uso. Ma nelle stelle il flusso di raggi X è estremamente intenso. È come un esercito di topi che marcia nella tua dispensa facendo scattare le trappole il più velocemente possibile. Qui è il tempo sprecato nel rimettere a posto le trappole, catturando elettroni, che conta, e la quantità della cattura dipende quasi interamente da questo.

Abbiamo visto che gli atomi stellari hanno perso la maggior parte dei loro elettroni; ciò significa che in qualsiasi momento una grande parte delle trappole di assorbimento è in attesa di riparazione. Per questo motivo troviamo un'opacità minore nelle stelle rispetto

1 La densità media di Capella è quasi uguale alla densità dell'aria.

alla materia terrestre. L'opacità ridotta è semplicemente il risultato del sovraccarico dei meccanismi di assorbimento: hanno troppa radiazione da gestire. Possiamo anche vedere perché le leggi dell'opacità stellare e terrestre sono in qualche modo diverse. La velocità di riparazione, che è il fattore principale da considerare nell'opacità stellare, aumenta comprimendo la materia, perché in questo modo l'atomo non dovrà aspettare così a lungo per incontrare e catturare un elettrone libero. Di conseguenza l'opacità stellare aumenterà con la densità. In condizioni terrestri non c'è alcun vantaggio nell'accelerare la riparazione che sarà comunque completata in tempo sufficiente; quindi l'opacità terrestre è indipendente dalla densità.

La teoria dell'opacità stellare si riduce quindi principalmente alla teoria della cattura di elettroni da parte di atomi ionizzati; non che questo processo sia accompagnato dall'assorbimento di raggi X (in realtà è accompagnato dall'emissione), ma è il necessario preliminare all'assorbimento. La teoria fisica della cattura degli elettroni non è ancora del tutto definitiva, ma è sufficientemente avanzata da consentirci di utilizzarla provvisoriamente nei nostri calcoli del fattore che ostacola la fuoriuscita di radiazione dalle stelle.

La relazione Massa-Luminosità

Non vogliamo affrontare subito un problema troppo difficile, e quindi ci occuperemo di stelle composte da gas perfetto. Se non vi piace la frase tecnica "gas perfetto", potete chiamarlo semplicemente "gas", perché tutti i gas terrestri a cui probabilmente penserete sono privi di imperfezioni sensibili. È solo ad elevata compressione che i gas terrestri diventano imperfetti. Devo dire che ci sono molti esempi di stelle gassose¹. In molte stelle la materia è così gonfia che è più tenue dell'aria che ci circonda; per esempio, se fossimo dentro Capella non noteremmo la sua materia più di quanto notiamo l'aria in questa stanza.

Per le stelle gassose, quindi, l'indagine fornirà formule con cui, data la massa della stella, possiamo calcolare quanta energia di calore e luce ne uscirà, in breve, quanto sarà luminosa. Nella Fig. 7 è rappresentata una curva che fornisce questa relazione teorica tra la luminosità e la massa di una stella. Strettamente parlando, oltre alla massa, c'è un altro fattore che influenza la luminosità calcolata: si possono avere due stelle della stessa massa, una densa e l'altra gonfia, e non avranno esattamente la stessa luminosità. Ma si scopre (piuttosto inaspettatamente) che questo altro fattore, la densità, produce una differenza molto piccola alla luminosità, sempre a patto che la materia non sia troppo densa per essere un gas perfetto. Pertanto non dirò altro sulla densità in questo breve riassunto.

Ecco alcuni dettagli sulla scala del diagramma. La luminosità è misurata in magnitudini, un'unità piuttosto tecnica. Bisogna ricordare che la magnitudine stellare è come l'handicap di un golfista: più è alto il numero, peggiore è la prestazione. Il diagramma comprende praticamente l'intera gamma di luminosità stellare; in alto, -4 rappresenta quasi le stelle più luminose conosciute, e in basso 12 è quasi il limite più debole. La differenza dall'alto al basso è circa la stessa della differenza tra una luce ad arco e una lucciola. Il sole è vicino alla magnitudine 5. Queste grandezze si riferiscono, ovviamente, alla luminosità reale, non a quella apparente influenzata dalla distanza;

1 Salvo diversa indicazione, "gassoso" è inteso come "composto da gas perfetto".

inoltre, ciò che viene rappresentato qui è la “luminosità del calore” o intensità di calore, che a volte è leggermente diversa dall’intensità della luce. Sono stati realizzati strumenti astronomici che misurano direttamente il calore anziché la luce ricevuta da una stella. Questi hanno avuto un discreto successo; ma ci sono delle correzioni problematiche a causa del grande assorbimento di calore nell’atmosfera terrestre, ed è nella maggior parte dei casi più facile e più accurato dedurre la luminosità del calore dalla luminosità della luce, tenendo conto del colore della stella. La scala orizzontale si riferisce alla massa, ma è graduata in base al logaritmo della massa. All’estrema sinistra la massa è circa $1/6$ x sole, e all’estrema destra circa 30 x sole; ci sono pochissime stelle con masse al di fuori di questi limiti. La massa del sole corrisponde alla divisione etichettata 0.0.

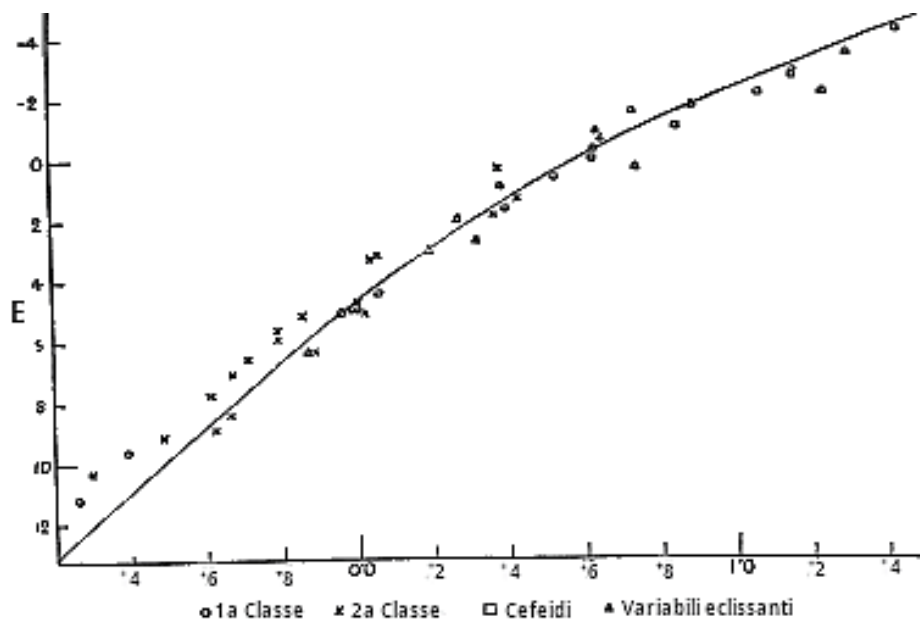


Fig. 7. La curva Massa-Luminosità

Avendo ottenuto la nostra curva teorica, la prima cosa da fare è testarla con le osservazioni. Vale a dire, raccogliamo insieme quante più stelle possiamo trovare, di cui sia la massa che la luminosità assoluta sono state misurate. Tracciamo i punti corrispondenti (opposti alle opportune graduazioni orizzontali e verticali) e vediamo se cadono sulla curva, come dovrebbero fare se la teoria fosse corretta. Non ci sono molte masse stellari determinate con buona precisione. Tutto ciò che è ragionevolmente affidabile è stato incluso nella Fig. 7. I cerchi, le croci, i quadrati e i triangoli si riferiscono a diversi tipi di dati, alcuni buoni, alcuni cattivi, alcuni pessimi.

I cerchi sono i più affidabili. Scorriamoli da destra a sinistra. Per prima cosa c’è la componente luminosa di Capella, che giace magnificamente sulla curva perché ho disegnato la curva attraverso di essa. Vedete, c’era una costante numerica che, allo stato attuale delle nostre conoscenze sugli atomi e sulle onde d’etere, ecc., non era possibile determinare con certezza dalla teoria pura. Quindi la curva, quando è stata ottenuta, era allargata in una direzione e poteva essere aumentata o diminuita. Fu ancorata facendola passare attraverso la componente luminosa di Capella che sembrava la stella migliore a cui affidarsi per questo scopo. Dopo di che non si sarebbe potuto più manomettere la curva. Proseguendo verso sinistra abbiamo la componente più debole di Capella; poi Sirio; poi, in un gruppo, due componenti di α Centauri (la stella fissa più vicina) con il Sole tra di loro, e

—stesi sulla curva—un cerchio che rappresenta la media di sei stelle doppie nelle Iadi. Infine, molto a sinistra ci sono due componenti di una nota stella doppia chiamata Krueger 60.

I dati osservativi per testare la curva non sono così estesi e affidabili come potremmo desiderare; ma penso comunque che sia chiaro dalla Fig. 7 che la teoria è sostanzialmente confermata e ci consente davvero di predire la luminosità di una stella dalla sua massa, o viceversa. Questo è un risultato utile, perché ci sono migliaia di stelle di cui possiamo misurare la luminosità assoluta ma non la massa, e ora possiamo dedurre le loro masse con una certa sicurezza.

Poiché non sono stato in grado di fornire qui i dettagli del calcolo, dovrei chiarire che la curva in Fig. 7 è tracciata da pura teoria o esperimento terrestre, fatta eccezione per l'unica costante determinata facendola passare attraverso Capella. Possiamo immaginare fisici che lavorano su un pianeta circondato da nubi come Giove e che non hanno mai visto le stelle. Dovrebbero essere in grado di dedurre, con il metodo spiegato, che se esiste un universo al di là delle nuvole, è probabile che esso si aggrega principalmente in masse dell'ordine di mille quadrilioni di tonnellate. Potrebbero quindi prevedere che queste aggregazioni saranno globi che riversano luce e calore e che la loro luminosità dipenderà dalla massa nel modo dato dalla curva in Fig. 7. Tutte le informazioni che abbiamo utilizzato per i calcoli sarebbero accessibili a loro sotto le nuvole, tranne per il fatto che abbiamo rubato loro un vantaggio nell'utilizzare la componente luminosa di Capella. Anche senza questa occhiata proibita, la teoria fisica odierna permetterebbe loro di attribuire una luminosità alla stella invisibile, il che non sarebbe poi così assurdo. A meno che non siano più saggi di noi, probabilmente attribuirebbero a tutte le stelle una brillantezza circa dieci volte superiore¹, il che non è un grave errore per un primo tentativo di affrontare un problema così trascendente. Speriamo di chiarire il fattore discrepante 10 con una maggiore conoscenza dei processi atomici; nel frattempo lo accantoniamo fissando la costante dubbia tramite osservazione astronomica.

Stelle dense

L'accordo tra i punti delle osservazioni con la curva è assai buono, considerando la natura approssimata delle misure osservative; e sembra fornire una conferma piuttosto forte della teoria. Ma c'è una confessione orribile da fare: abbiamo confrontato la teoria con le stelle sbagliate. Almeno quando il confronto fu fatto per la prima volta all'inizio del 1924 nessuno nutriva dubbi sul fatto che fossero le stelle sbagliate.

Dobbiamo ricordare che la teoria è stata sviluppata per stelle in condizioni di gas perfetto. Nella metà destra della Fig. 7 le stelle rappresentate sono tutte stelle diffuse;

1 Per questa previsione non è necessario conoscere la composizione chimica delle stelle, a patto che siano esclusi casi estremi (ad esempio una proporzione eccessiva di idrogeno). Ad esempio, si considerino le ipotesi che Capella sia fatta rispettivamente di (a) ferro, (b) oro. Secondo la teoria, l'opacità di una stella fatta dell'elemento più pesante sarebbe 24 volte l'opacità di una stella fatta di ferro. Questo di per sé renderebbe la stella dorata una magnitudine (=24 volte) più debole. Ma la temperatura viene aumentata dalla sostituzione; e sebbene il cambiamento non sia molto grande, aumenta l'efflusso di calore di circa 24 volte. L'effetto risultante sulla luminosità è praticamente nessun cambiamento. Mentre questa indipendenza della costituzione chimica è soddisfacente per quanto riguarda la determinatezza dei risultati, rende il fattore discrepante 10 particolarmente difficile da spiegare.

Capella con una densità media circa uguale a quella dell'aria in questa stanza può essere considerata tipica. Un materiale di questa tenuità è evidentemente un vero gas e nella misura in cui queste stelle concordano con la curva la teoria è confermata. Ma nella metà sinistra del diagramma abbiamo il Sole, la cui materia è più densa dell'acqua, Krueger 60, più densa del ferro, e molte altre stelle con la densità solitamente associata alla materia solida o liquida. Che cosa c'entrano con la curva riservata a un gas perfetto? Quando queste stelle vennero inserite nel diagramma non ci si aspettava che concordassero con la curva; in effetti, l'accordo era molto fastidioso. Si cercava qualcosa di molto diverso. L'idea era che la teoria potesse forse essere considerata attendibile per i suoi meriti, con la conferma già fornita dalle stelle diffuse; quindi, misurando quanto queste stelle dense scendessero al di sotto della curva, avremmo avuto informazioni definitive su quanto grande fosse la deviazione da un gas perfetto a una data densità. Secondo le idee correnti, ci si aspettava che il sole sarebbe sceso di tre o quattro magnitudini sotto la curva, e che la Krueger 60, ancora più densa, sarebbe dovuto essere di quasi dieci magnitudini sotto¹. Vedete che l'aspettativa è stata del tutto disattesa. Lo shock fu persino più grande di quanto io possa indicare, perché il grande calo di luminosità quando la stella è troppo densa per comportarsi come un vero gas era un principio fondamentale nella nostra concezione dell'evoluzione stellare. In base a ciò le stelle erano state divise in due gruppi noti come giganti e nane, le prime essendo le stelle gassose e le seconde le stelle dense.

Ora ci si presentano due alternative. "La prima è supporre che qualcosa sia andato storto nella nostra teoria; che la vera curva per le stelle gassose non sia come l'abbiamo disegnata, ma corra in alto a sinistra del diagramma, così che il Sole, Krueger 60, ecc., si trovino alle distanze appropriate al di sotto di essa. In breve, il nostro critico immaginario aveva ragione: la Natura aveva nascosto qualcosa di inaspettato all'interno della stella e aveva così frustrato i nostri calcoli. Bene, se così fosse, sarebbe stato bello averlo scoperto tramite le nostre indagini.

L'altra alternativa è considerare questa domanda: è impossibile che un gas perfetto abbia la densità del ferro? La risposta è piuttosto sorprendente. Non c'è alcuna ragione terrena per cui un gas perfetto non debba avere una densità di gran lunga superiore a quella del ferro. O sarebbe più corretto dire che la ragione per cui non dovrebbe è terrena e non si applica alle stelle.

La materia del sole, nonostante sia più densa dell'acqua, è davvero un gas perfetto. Sembra incredibile, ma deve esserlo. La caratteristica di un vero gas è che c'è molto spazio tra le particelle separate: un gas contiene pochissima sostanza e molto vuoto. Di conseguenza, quando lo si comprime, non si deve comprimere la sostanza; si comprime solo un po' dello spazio libero. Ma se si continua a comprimere, arriva un momento in cui si è spremuto tutto lo spazio vuoto; gli atomi sono quindi incastrati a contatto e ogni ulteriore compressione significa comprimere la sostanza stessa, il che è una proposizione

1 L'osservazione mostra che il sole è circa 4 magnitudini più debole della stella diffusa media della stessa classe spettrale, e Krueger 60 è 10 magnitudini più debole delle stelle diffuse della sua classe. L'intero calo è stato generalmente ritenuto dovuto alla deviazione da un gas perfetto; ma questo non ha tenuto conto di una possibile differenza di massa. Il confronto con la curva consente di confrontare la stella densa con una stella gassosa della sua stessa massa, e vediamo che la differenza scompare. Quindi (se non ci sono stati errori) la stella densa è una stella gassosa, e le differenze sopra menzionate erano dovute interamente a differenze di massa.

completamente diversa. Quindi, avvicinandosi a quella densità, la caratteristica di comprimibilità di un gas si perde e la materia non è più un gas vero e proprio. In un liquido gli atomi sono quasi a contatto; questo vi darà un'idea della densità a cui il gas perde la sua caratteristica comprimibilità.

I grandi atomi terrestri che cominciano a incastrarsi a una densità prossima a quella dello stato liquido non esistono nelle stelle. Gli atomi stellari sono stati ridotti dalla rottura di tutti i loro elettroni esterni. Gli atomi più leggeri sono ridotti al nucleo nudo, di dimensioni piuttosto insignificanti. Gli atomi più pesanti trattengono alcuni degli elettroni più vicini, ma non hanno molto più di un centesimo del diametro di un atomo completamente strutturato. Di conseguenza possiamo continuare a spremere ancora di più prima che questi minuscoli atomi o ioni entrino in contatto. Alla densità dell'acqua o persino del platino c'è ancora un po' di spazio tra gli atomi ridotti; e resta spazio di scarto da spremere fuori come in un gas perfetto.

Il nostro errore è stato che nel valutare la congestione nella sala da ballo stellare avevamo dimenticato che le crinoline non sono più di moda.

Suppongo che siamo stati molto ciechi a non aver previsto questo risultato, considerando quanta attenzione avevamo dedicato alla mutilazione degli atomi in altri rami dell'indagine. Per una via indiretta siamo giunti a una conclusione che è davvero molto ovvia. E quindi concludiamo che le stelle sulla sinistra del diagramma non sono dopo tutto le stelle "sbagliate". Il sole e altre stelle dense sono sulla curva del gas perfetto perché la loro materia è un gas perfetto. Un'attenta ricerca ha dimostrato che nelle piccole stelle all'estrema sinistra della Fig. 7 le cariche elettriche degli atomi e degli elettroni determinano una leggera deviazione dalle normali leggi di un gas; R. H. Fowler ha dimostrato che l'effetto è quello di rendere il gas non imperfetto ma superperfetto, ovvero più facilmente comprimibile di un gas ordinario. Noterete che in media le stelle corrono un po' al di sopra della curva a sinistra della Fig. 7. È probabile che la deviazione sia genuina e sia dovuta in parte alla superperfezione del gas; abbiamo già visto che l'imperfezione le avrebbe portate al di sotto della curva.

Anche alla densità del platino c'è un sacco di spazio libero, così che nelle stelle potremmo continuare a comprimere la materia stellare a una densità che trascende qualsiasi cosa conosciuta sulla Terra. Ma questa è un'altra storia, la racconterò più avanti.

L'accordo generale tra la luminosità osservata e quella prevista delle stelle di varie masse è il test principale della correttezza delle nostre teorie sulla loro costituzione interna. L'incidenza delle loro masse in un intervallo che è particolarmente critico per la pressione di radiazione è anche una preziosa conferma. Sarebbe esagerato affermare che questo successo limitato è una prova che abbiamo raggiunto la verità sull'interno stellare. Non è una prova, ma è un incoraggiamento a lavorare ulteriormente lungo la linea di pensiero che abbiamo perseguito. Il groviglio sta iniziando ad allentarsi. I più ottimisti possono supporre che ora sia raddrizzato; i più cauti si prepareranno per il nodo successivo. L'unica ragione per pensare che la verità autentica non possa essere così lontana è che all'interno di una stella, se mai si trovasse lì, il problema della materia è ridotto alla sua massima semplicità; e l'astronomo è impegnato in un problema che è essenzialmente meno ambizioso di quello del fisico terrestre, al quale la materia appare sempre sotto forma di

sistemi di elettroni dall'organizzazione estremamente complessa.

Abbiamo preso le attuali teorie della fisica e le abbiamo spinte fino alle loro conclusioni più remote. Non c'è alcuna intenzione dogmatica in questo; è il mezzo migliore che abbiamo per testarle e rivelarne le debolezze, se ce ne sono.

Nei tempi antichi due aviatori si procurarono le ali. Dedalo volò sano e salvo nell'aria e fu debitamente onorato al suo atterraggio. Icaro si librò verso il sole finché la cera che gli legava le ali non si sciolse e il suo volo finì in un fiasco. Nel soppesare i loro successi, c'è qualcosa da dire per Icaro. Le autorità classiche ci dicono che stava solo "facendo una acrobazia", ma io preferisco pensare a lui come all'uomo che ha portato alla luce un grave difetto costruttivo nelle macchine volanti del suo tempo. Così, anche nella scienza. Il cauto Dedalo applicherà le sue teorie dove è sicuro che andranno in sicurezza; ma a causa del suo eccesso di cautela le loro debolezze nascoste rimangono inesplorate. Icaro metterà a dura prova le sue teorie fino al punto di rottura, finché le giunture deboli non si mostreranno. Per la mera avventura? Forse in parte; questa è la natura umana. Ma se non è ancora destinato a raggiungere il sole e a risolvere finalmente l'enigma della sua costituzione, possiamo almeno sperare di imparare dal suo viaggio qualche suggerimento per costruire una macchina migliore.

LEZIONE II

ALCUNE RECENTI INDAGINI

Ci aiuterà ad apprezzare il significato astronomico di ciò che abbiamo appreso nella lezione precedente se ci allontaniamo dal generale al particolare e vediamo come si applica alle singole stelle. Prenderò due stelle attorno alle quali ruotano storie di particolare interesse e racconterò la storia della nostra conoscenza di esse.

La storia di Algol

Questo è un racconto poliziesco, che potremmo chiamare "La parola mancante e il falso indizio".

In astronomia, a differenza di molte scienze, non possiamo maneggiare e sondare gli oggetti del nostro studio; dobbiamo attendere passivamente e ricevere e decodificare i messaggi che ci inviano. "Tutte le nostre informazioni sulle stelle ci arrivano attraverso raggi di luce; osserviamo e cerchiamo di comprendere i loro segnali. Ci sono alcune stelle che sembrano inviarci una serie regolare di punti e linee, come la luce intermittente di un faro. Non possiamo tradurla in un codice morse; tuttavia, con una misurazione attenta, riusciamo a distinguere una grande quantità di informazioni dai messaggi. La stella Algol è la più famosa di queste "stelle variabili". Dai segnali apprendiamo che in realtà si tratta di due stelle che ruotano l'una intorno all'altra. A volte la più luminosa delle due stelle è nascosta, dando un'eclissi profonda o "trattino"; a volte la stella debole è nascosta, dando un "punto". Ciò si ripete in un periodo di 2 giorni e 21 ore, il periodo di rivoluzione delle due stelle.

C'erano molte più informazioni nel messaggio, ma era piuttosto allettante. C'era, per così dire, solo una parola mancante. Se potessimo fornire quella parola, il messaggio darebbe dettagli completi e precisi sulle dimensioni del sistema: i diametri e le masse dei due componenti, la loro luminosità assoluta, la distanza tra loro, la loro distanza dal sole. In assenza della parola, il messaggio ha detto che non c'è nulla di veramente definito su nessuna di queste cose.

In queste circostanze gli astronomi sarebbero stati a malapena umani se non avessero provato a indovinare la parola mancante. La parola avrebbe dovuto dirci quanto fosse più grande la stella luminosa rispetto a quella più debole, vale a dire il rapporto tra le masse delle due stelle. Alcune delle stelle variabili meno note ci danno messaggi completi. (Questi potrebbero quindi essere utilizzati per testare la relazione tra massa e luminosità assoluta e sono rappresentati da triangoli nella Figura 7.) La difficoltà relativa ad Algol derivava dall'eccessiva luminosità della componente più brillante che sommergeva e rendeva illeggibili i segnali più delicati della componente debole. Dagli altri sistemi abbiamo potuto trovare il valore più usuale del rapporto di massa, e basarci su quello per un'ipotesi sul suo valore probabile per Algol. Diverse autorità hanno preferito stime leggermente diverse, ma il giudizio generale è stato che in sistemi come Algol la componente luminosa è due volte più massiccia della componente debole. E così si è

ipotizzato che la parola mancante fosse "due"; su questa ipotesi sono state elaborate le varie dimensioni del sistema e sono state generalmente accettate come vicine alla verità. Questo è successo sedici anni fa¹!

In questo modo il senso del messaggio è stato reso tale che la stella più luminosa aveva un raggio di 1.100.000 chilometri (una volta e mezza il raggio del sole), ovvero aveva metà della massa del sole e trenta volte la luce, la potenza, ecc. del sole. Si vedrà subito che questo non si adatta alla nostra curva nella Fig. 7; una stella di metà della massa del sole dovrebbe essere molto più debole del sole. Fu piuttosto sconcertante trovare una stella così famosa che protestava contro la teoria; ma dopo tutto la teoria deve essere testata tramite il confronto con i fatti e non con le supposizioni, e la teoria potrebbe benissimo avere una base più solida della congettura sulla parola mancante. Inoltre, il tipo spettrale di Algol è uno che di solito non è associato a una bassa massa, e questo gettava un po' di sospetto sui risultati accettati.

Se siamo disposti a fidarci della teoria data nell'ultima lezione, possiamo fare a meno della parola mancante. O, per dirla in un altro modo, possiamo provare in successione varie ipotesi invece di "due" finché non ne raggiungiamo una che dia alla componente luminosa una massa e una luminosità che concordano con la curva in Fig. 7. L'ipotesi "due" fornisce, come abbiamo visto, un punto che cade molto lontano dalla curva. Modifichiamo l'ipotesi in "tre" e ricalcoliamo la massa e la luminosità su questa ipotesi; il punto corrispondente è ora un po' più vicino alla curva. Continuiamo con "quattro", "cinque", ecc.; se il punto attraversa la curva, sappiamo di essere andati troppo oltre e dobbiamo assumere un valore intermedio per raggiungere l'accordo desiderato. "Questo è stato fatto nel novembre 1925 e sembrava che la parola mancante dovesse essere "cinque", non "due", un cambiamento piuttosto sorprendente. E ora il messaggio correva

Raggio della componente luminosa = 2.140.000 chilometri.

Massa della componente luminosa = 4,3 x massa del sole.

Se si confrontano queste con le cifre iniziali, si vedrà che c'è una grande alterazione. Alla stella viene ora assegnata una grande massa, molto più appropriata per una stella di tipo B. Si scopre anche che Algol è più di cento volte più luminosa del sole; e la sua parallasse è 0,028 " — il doppio della distanza precedentemente supposta.

Ma nel frattempo due astronomi dell'Ann Arbor Observatory avevano iniziato a cercare la parola mancante con un nuovo metodo straordinario. Avevano infatti trovato la parola e l'avevano pubblicata un anno prima, ma non era diventata di dominio pubblico. Se una stella ruota, un bordo o "arto" si avvicina a noi e l'altro si allontana da noi. Possiamo misurare le velocità verso di noi o lontano da noi tramite l'effetto Doppler sullo spettro, ottenendo un risultato definito in miglia al secondo. Quindi possiamo e misuriamo la velocità equatoriale di rotazione del sole osservando prima il bordo est, poi quello ovest e prendendo la differenza di velocità mostrata. Tutto ciò è molto bello sul sole, dove si può coprire il disco tranne la parte speciale che si vuole osservare; ma come è possibile coprire parte di una stella quando essa è un semplice punto luminoso? Non si può; ma in Algol la copertura è fatta per noi. La componente debole è il nostro schermo. Mentre passa davanti alla stella luminosa, c'è un momento in cui lascia una sottile falce di luna che si vede a est e un altro momento in cui una sottile falce di luna a ovest viene scoperta.

1 Stime più approssimate erano state fatte molto prima.

Naturalmente, la stella è troppo lontana perché si possa effettivamente vedere la forma della falce di luna, ma in questi momenti si riceve luce solo dalle falci di luna, il resto del disco è nascosto. Cogliendo questi momenti si possono effettuare le misurazioni proprio come se si manipolasse uno schermo. Fortunatamente la velocità di rotazione di Algol è grande e quindi può essere misurata con un errore relativamente piccolo. Ora si moltiplica la velocità equatoriale per il periodo di rotazione¹; e si avrà la circonferenza di Algol. Dividendo per 6,28 si ottiene il raggio.

Questo era il metodo sviluppato da Rossiter e McLaughlin. Quest'ultimo, che lo applicò ad Algol, trovò che il raggio della componente luminosa era di 2.180.000 chilometri.

Per quanto si può giudicare, il suo risultato ha una notevole accuratezza; in effetti è probabile che il raggio sia ora meglio conosciuto di quello di qualsiasi altra stella, eccetto il sole. Se ora lo confrontiamo con il valore trovato dalla teoria, si vedrà che c'è motivo di soddisfazione. McLaughlin ha valutato le altre costanti e dimensioni del sistema; queste concordano ugualmente bene, ma ciò segue automaticamente perché mancava solo una parola da fornire. In entrambe le determinazioni la parola mancante o il rapporto di massa si è rivelato essere 5,0.

Questa non è proprio la fine della storia. Perché la prima ipotesi sul rapporto di massa era andata così male? Ormai sappiamo che una disparità di massa è strettamente associata a una disparità di luminosità delle due stelle. La disparità di luminosità è stata data nel messaggio originale di Algol; ci ha informato che la componente debole fornisce circa un tredicesimo della luce di quella brillante. (Almeno è così che l'abbiamo interpretata.) Secondo la nostra curva, ciò corrisponde a un rapporto di massa $2\frac{1}{2}$, che non rappresenta un grande miglioramento rispetto all'ipotesi originale 2. Per un rapporto di massa 5, la compagna avrebbe dovuto essere molto più debole, in effetti la sua luce avrebbe dovuto essere impercettibile. Sebbene considerazioni come queste non potessero aver avuto molta influenza sull'ipotesi originale, all'inizio sembravano rassicurarci sul fatto che non ci fosse molto di sbagliato.

Chiamiamo la componente luminosa Algol A e quella debole Algol B. Alcuni anni fa è stata fatta una nuova scoperta, ovvero Algol C. Si è scoperto che Algol A e B viaggiano insieme in un'orbita attorno a una terza stella in un periodo di poco meno di due anni (o almeno in questo periodo stanno viaggiando intorno, e dobbiamo supporre che ci sia qualcosa attorno a cui ruotare). Finora avevamo creduto che quando Algol A era quasi nascosto al momento dell'eclissi più profonda tutta la luce rimanente dovesse provenire da Algol B; ma ora è chiaro che appartiene ad Algol C, che splende sempre senza interferenze. Di conseguenza il rapporto di massa $2\frac{1}{2}$ è quello di Algol A rispetto ad Algol C. La luce di Algol B è irrilevante come dovrebbe essere per un rapporto di massa 5.²

Il messaggio di Algol A e B era confuso, non solo a causa della parola mancante, ma anche perché una o due parole di un altro messaggio di Algol C si erano confuse con esso; così che anche quando si scoprì che la parola mancante era "cinque" e fu confermata in

1 Il periodo osservato di Algol è il periodo di rivoluzione, non di rotazione. Ma le due componenti sono molto vicine tra loro, e non vi può essere dubbio che a causa delle grandi forze di marea mantengono le stesse facce rivolte l'una verso l'altra; vale a dire, i periodi di rotazione e di rivoluzione sono uguali.

2 Può essere interessante aggiungere che, sebbene la luce propria di Algol B sia impercettibile, possiamo osservare una riflessione (o ri-radiazione) della luce di Algol A da parte sua. Questa luce riflessa cambia come il chiaro di luna a seconda che Algol B sia "nuova" o "piena".

due modi, il messaggio non era del tutto coerente. In un altro punto il messaggio sembrava vacillare e recitare "due e mezzo". Il passaggio finale è la scoperta che "due e mezzo" appartiene a un messaggio diverso da una stella in precedenza insospettata, Algol C. E così tutto finisce felicemente.

Il miglior detective non è infallibile. In questa storia il nostro detective astronomico ha fatto un'ipotesi ragionevole ma fallimentare all'inizio del caso. Forse si è accorto prima del suo errore, solo che c'è stato un falso indizio lasciato cadere da una terza persona che si trovava presente al crimine, il che sembra confermare l'ipotesi. "È stata una vera sfortuna. Ma rende la storia poliziesca ancora migliore.

La Storia della Compagna di Sirio

Il titolo di questo racconto poliziesco è "Il messaggio senza senso".

Sirio è la stella più appariscente del cielo. Naturalmente veniva osservata molto spesso nei primi antichi, e veniva usata dagli astronomi insieme ad altre stelle luminose per determinare il tempo e impostare gli orologi. Era una *stella orologio*, come diciamo. Ma si è scoperto che non era affatto un buon orologio; avrebbe guadagnato costantemente per alcuni anni, e poi perso. Nel 1844 Bessel scoprì la causa di questa irregolarità; Sirio stava descrivendo un'orbita ellittica. Ovviamente doveva esserci qualcosa attorno a cui muoversi, e così si arrivò a riconoscere che lì c'era una stella oscura che nessuno aveva mai visto. Dubito che qualcuno si aspettasse che sarebbe mai stata vista. La Compagna di Sirio fu, credo, la prima stella invisibile a essere regolarmente riconosciuta. Non dovremmo chiamare ipotetica una stella del genere. Le proprietà meccaniche della materia sono molto più cruciali della proprietà accidentale di essere visibile; non consideriamo un pannello di vetro trasparente 'ipotetico'. C'era vicino a Sirio qualcosa che esibiva la proprietà meccanica più universale della materia, vale a dire, esercitare una forza sulla materia vicina secondo la legge di gravitazione. Questa è una prova migliore dell'esistenza di una massa materiale di quanto non lo sarebbe la prova oculare.

Tuttavia, diciotto anni dopo, la Compagna di Sirio fu effettivamente vista da Alvan Clark. Questa scoperta fu unica nel suo genere; Clark non stava guardando Sirio perché ne era interessato, ma perché era un bel punto luminoso con cui testare la perfezione ottica di un grande nuovo oggetto di vetro che la sua azienda aveva realizzato. Oserei dire che quando vide il piccolo punto luminoso vicino a Sirio rimase deluso e cercò di pulirlo. Tuttavia, rimase, e si dimostrò essere la Compagna già nota ma finora invisibile.

I grandi telescopi moderni mostrano facilmente la stella e rovinano un po' il romanticismo; ma mentre il romanticismo svaniva, la conoscenza cresceva e ora sappiamo che la Compagna è una stella non molto meno massiccia del sole. Ha $4/5$ della massa del sole, ma emette solo $1/360$ della luce del sole. La debolezza non ci ha particolarmente sorpreso¹; presumibilmente ci dovrebbero essere stelle incandescenti che brillano molto intensamente e stelle incandescenti che brillano debolmente, con tutti i tipi di gradi intermedi di luminosità. Si è ipotizzato che la Compagna fosse una delle stelle deboli rosse.

Nel 1914 il professor Adams dell'Osservatorio del Monte Wilson scoprì che non era una

1 La relazione massa-luminosità non era sospettata all'epoca di cui parlo.

stella rossa. Era bianca, incandescente. Perché allora non brillava così intensamente? Apparentemente l'unica risposta era che doveva essere una stella molto piccola. Vedete, la natura e il colore della luce mostrano che la sua superficie deve brillare più intensamente di quella del sole; ma la luce totale è solo $1/3600$ di quella del sole; quindi la superficie deve essere inferiore a $1/3600$ di quella del sole. Ciò rende il raggio inferiore a $1/19$ di quello del sole e porta il globo a una dimensione che normalmente associamo a un pianeta piuttosto che a una stella. Calcolando la somma in modo più accurato, scopriamo che la Compagna di Sirio è un globo di dimensioni intermedie tra la Terra e il pianeta più grande successivo, Urano. Ma se si intende mettere una massa non molto inferiore a quella del sole in un globo non molto più grande della terra, sarà un addensamento stretto. La densità effettiva risulta essere 60.000 volte quella dell'acqua, circa una tonnellata per pollice cubo.

Impariamo a conoscere le stelle ricevendo e interpretando i messaggi che la loro luce ci porta. Il messaggio della Compagna di Sirio, quando fu decifrato, diceva: "Sono composta da materia 3.000 volte più densa di qualsiasi cosa tu abbia mai incontrato; una tonnellata della mia materia sarebbe una piccola pepita che potresti mettere in una scatola di fiammiferi". Quale risposta si può dare a un messaggio del genere? La risposta che la maggior parte di noi diede nel 1914 fu: "Stai zitto. Non dire sciocchezze".

Ma nel 1924 la teoria descritta nell'ultima lezione era stata sviluppata; e ricorderete che alla fine indicava la possibilità che la materia nelle stelle potesse essere compressa a una densità che trascendeva di gran lunga la nostra esperienza terrestre. Ciò richiamò alla mente lo strano messaggio del Compagno di Sirio. Non poteva più essere liquidato come un'evidente assurdità. "Ciò non significa che potremmo immediatamente presumere che sia vero; ma deve essere soppesato e testato con una cautela che non dovremmo sprecare per una semplice canzoncina senza senso.

Bisogna capire che è stato molto difficile spiegare il messaggio originale come un errore. Sul fatto che la massa sia $4/5$ della massa del sole, non ci può essere alcun serio dubbio. È una delle migliori determinazioni della massa stellare. Inoltre, è ovvio che la massa deve essere grande se deve deviare Sirio dal suo corso e sconvolgere la sua puntualità come orologio. La determinazione del raggio è meno diretta, ma è fatta con un metodo che ha avuto un successo notevole applicato ad altre stelle. Ad esempio, il raggio dell'enorme stella Betelgeuse è stato calcolato per la prima volta in questo modo; in seguito si è scoperto che era possibile misurare direttamente il raggio di Betelgeuse per mezzo di un interferometro ideato da Michelson, e la misura diretta ha confermato il valore calcolato. Di nuovo, la Compagna di Sirio non è l'unica a possedere questa particolarità. Almeno altre due stelle ci hanno inviato messaggi che annunciano una densità incredibilmente alta; e considerando le nostre limitate opportunità di rilevare questa condizione, non ci possono essere dubbi sul fatto che queste "nane bianche", come vengono chiamate, siano relativamente abbondanti nell'universo stellare.

Ma non vogliamo fidarci completamente di un indizio per paura che si riveli falso in qualche modo insospettato. Pertanto nel 1924 il professor Adams si mise di nuovo al lavoro per applicare al messaggio un test che avrebbe dovuto essere cruciale. La teoria della gravitazione di Einstein indica che tutte le righe dello spettro di una stella saranno leggermente spostate verso l'estremità rossa dello spettro rispetto alle corrispondenti righe

terrestri. Sul sole l'effetto è quasi troppo piccolo per essere rilevato, tenendo conto delle numerose cause di leggero spostamento che devono essere districate. Per me personalmente la teoria di Einstein fornisce una garanzia molto più forte della reale esistenza dell'effetto rispetto alle prove osservative disponibili. Tuttavia è un fatto sorprendente che coloro che hanno condotto l'indagine siano ora unanimi nel loro giudizio che l'effetto si verifica realmente sul sole, sebbene alcuni di loro all'inizio pensassero di avere prove contrarie. Finora la teoria di Einstein è stata considerata dall'astronomo pratico principalmente come qualcosa che gli veniva chiesto di testare; ma ora la teoria ha la possibilità di mostrare il suo valore aiutandoci a testare qualcosa di molto più dubbio di essa stessa. L'effetto Einstein è proporzionale alla massa divisa per il raggio della stella; e poiché il raggio della Compagna di Sirio è molto piccolo (se il messaggio è giusto) l'effetto sarà molto grande. Dovrebbe infatti essere trenta volte più grande di quello del sole. Ciò lo eleva molto al di sopra di tutte le cause secondarie di spostamento delle righe che hanno reso il test sul sole così incerto.

L'osservazione è molto difficile perché la Compagna di Sirio è debole per un lavoro di questo tipo, e la luce diffusa dal suo vicino incredibilmente brillante causa molti problemi. Tuttavia, dopo un anno di sforzi, il professor Adams ha effettuato misure soddisfacenti e ha trovato un grande spostamento come previsto. Esprimendo i risultati nell'unità di misura usuale di chilometri al secondo, la media delle sue misurazioni è arrivata a 19, mentre lo spostamento previsto era di 20.

Il professor Adams ha così preso due piccioni con una fava. Ha eseguito un nuovo test della teoria generale della relatività di Einstein e ha dimostrato che una materia almeno 2.000 volte più densa del platino non solo è possibile, ma esiste effettivamente nell'universo stellare.¹ Questa è la migliore conferma che potremmo avere della nostra tesi secondo cui il sole, con una densità pari a 1,5 volte quella dell'acqua, è ancora molto lontano dalla densità massima della materia stellare; ed è quindi del tutto ragionevole che si comporti come un gas perfetto.

Ho detto che l'osservazione è stata estremamente difficile. Per quanto esperto sia l'osservatore, non credo che dovremmo riporre fiducia implicita in un risultato che mette a dura prova la sua abilità al massimo, finché non è stato verificato da altri che lavorano in modo indipendente. Pertanto, per il momento si devono avanzare le solite riserve nell'accettare queste conclusioni. Ma la scienza non è solo un catalogo di fatti accertati sull'universo; è una forma di progresso, a volte tortuosa, a volte incerta. E il nostro interesse per la scienza non è semplicemente un desiderio di sentire gli ultimi fatti aggiunti alla collezione; ci piace discutere delle nostre speranze e paure, probabilità e aspettative. Ho raccontato la storia poliziesca fin dove si è svolta. Non so se siamo arrivati all'ultimo capitolo.

Atomi sconosciuti e interpretazione degli spettri

Bisogna capire che questa materia di enorme densità non dovrebbe essere una strana

¹ I miei riferimenti al gas perfetto della densità del platino e alla materia 2.000 volte più densa del platino sono stati spesso considerata dai giornalisti un gas perfetto 2.000 volte più denso del platino. È quasi impossibile calcolare qual è la condizione della materia nella Compagna di Sirio, ma non mi aspetto che sia un gas perfetto.

sostanza, un nuovo elemento chimico o nuovi elementi. È solo materia ordinaria frantumata dall'alta temperatura e quindi in grado di essere compressa più strettamente, proprio come più persone potrebbero essere stipate in una stanza se si rompessero alcune ossa. Una delle caratteristiche della fisica astronomica è quella di mostrarci gli elementi ordinari della Terra in uno stato straordinario, frantumati o ionizzati a un livello che non è stato riprodotto o solo riprodotto con grande difficoltà in laboratorio. Non è soltanto nell'inaccessibile interno della stella che troviamo materia in uno stato al di fuori dell'esperienza terrestre.

Ecco un'immagine della Nebulosa Anello nella Lira (Fig. 8)¹. È stata scattata attraverso un prisma in modo che si vede non un anello ma un certo numero di anelli corrispondenti a diverse righe dello spettro e che rappresentano i diversi tipi di atomi che sono all'opera producendo la luce della nebulosa. L'anello più piccolo, piuttosto debole (contrassegnato da una freccia), è costituito dalla luce prodotta dagli atomi di elio nella nebulosa, non elio comune ma atomi di elio frantumati. Fu uno dei grandi successi di laboratorio dei tempi recenti quando il professor A. Fowler nel 1912 riuscì a colpire gli atomi di elio in un tubo a vuoto in modo sufficiente a produrre questo tipo di luce, già ben noto nelle stelle. Altri due anelli sono dovuti all'idrogeno. Con queste tre eccezioni, nessuno degli anelli è stato ancora imitato in laboratorio. Ad esempio, non sappiamo quali elementi producano i due anelli più luminosi rispettivamente all'estrema destra e all'estrema sinistra.

A volte ci viene chiesto se nelle stelle si manifestino nuovi elementi che non sono presenti o non sono ancora stati scoperti sulla Terra. Possiamo dare con una certa sicurezza la risposta No. "Questo, tuttavia, non è perché tutto ciò che si vede nelle stelle è stato identificato con elementi terrestri noti. La risposta è in effetti data non dall'astronomo ma dal fisico. Quest'ultimo è stato in grado di decifrare lo schema ordinato degli elementi; e traspare che non ci sono spazi vuoti per nuovi elementi finché non arriviamo a elementi di peso atomico molto elevato, che non avrebbero probabilità di salire nell'atmosfera di una stella e mostrarsi nell'osservazione astronomica. Ogni elemento porta un numero, a partire dall'idrogeno che è il n. 1, fino all'uranio che è il n. 92. E, cosa ancora più importante, l'elemento porta la sua targa così vistosamente che un fisico è in grado di leggerla. Può, ad esempio, vedere che il ferro è il n. 26 senza dover contare quanti elementi noti lo precedono. Gli elementi sono stati chiamati in base ai loro numeri, e fino al n. 84 hanno tutti risposto Presente!²

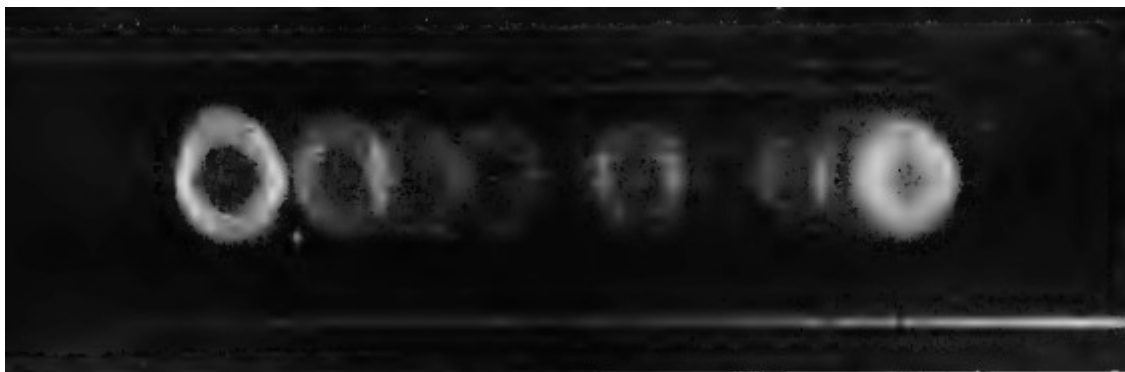
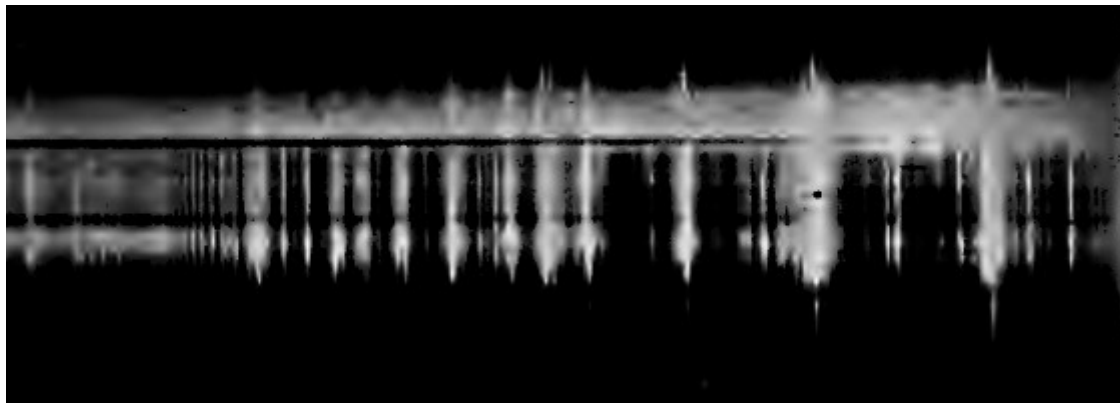


Fig. 8. La nebulosa anello nella Lira

1 Fotografata dal Dott. W. H. Wright presso il Lick Observatory, California.

2 I numeri 43, 61, 75 sono scoperte recenti e potrebbero richiedere conferma. Ora restano solo due lacune (85 e 87) a parte possibili elementi oltre l'uranio.

L'elemento elio (n. 2) fu scoperto per la prima volta da Lockyer nel sole e solo molti anni dopo fu trovato sulla terra. Gli astrofisici non sono propensi a ripetere questa impresa; non possono scoprire nuovi elementi se non ce ne sono. La fonte sconosciuta dei due anelli vicini sulla destra della fotografia (un anello luminoso e un anello più debole) è stata chiamata nebulio. Ma il nebulio non è un nuovo elemento.



Fic.9. Idrogeno. La serie di Balmer

È un elemento abbastanza familiare che non possiamo identificare perché ha perso diversi dei suoi elettroni. Un atomo che ha perso un elettrone è come un amico che si è rasato i baffi; i suoi vecchi conoscenti non lo riconoscono. Riconosceremo il nebulium un giorno. I fisici teorici sono al lavoro per cercare di trovare leggi che determinino esattamente il tipo di luce emessa dagli atomi in vari stadi di mutilazione, in modo che sia puramente una questione di calcolo dedurre l'atomo dalla luce che emette. I fisici sperimentali sono al lavoro per provare metodi sempre più potenti per colpire gli atomi, così che un giorno un atomo terrestre sarà stimolato a dare luce nebulosa. È una grande gara; e non so da che parte stare. L'astronomo non può fare molto per aiutare la soluzione del problema che ha posto. Credo che se misurasse con la massima cura il rapporto di intensità delle due linee di nebulio darebbe ai fisici un utile suggerimento. Fornisce anche un altro indizio, anche se è difficile ricavarne qualcosa, vale a dire le diverse dimensioni degli anelli nella fotografia, che mostrano una differenza nella distribuzione degli atomi emittenti. Evidentemente il nebulio ha una predilezione per le parti esterne della nebulosa e l'elio per il centro; ma non è chiaro quale inferenza si debba trarre da questa differenza nelle loro abitudini.

Gli atomi di elementi diversi e gli atomi dello stesso elemento in diversi stati di ionizzazione, hanno tutti insieme distintivi di linee che vengono mostrate quando la luce viene esaminata attraverso uno spettroscopio. In certe condizioni (come nelle nebulose) queste appaiono come linee luminose; ma più spesso sono impresse come linee scure su uno sfondo continuo. In entrambi i casi le linee ci permettono di identificare l'elemento, a meno che non appartengano a un atomo in uno stato di cui non abbiamo avuto esperienza terrestre. La profezia avventata secondo cui la conoscenza della composizione dei corpi celesti debba essere per sempre al di là della nostra portata è stata da tempo smentita; e gli elementi familiari, idrogeno, carbonio, calcio, titanio, ferro e molti altri, possono essere riconosciuti nelle parti più lontane dell'universo. L'emozione di questa scoperta precoce è ormai passata. Ma nel frattempo la spettroscopia stellare ha notevolmente ampliato il suo campo d'azione; non è più un'analisi chimica, ma un'analisi fisica. Quando incontriamo

una vecchia conoscenza, c'è prima la fase del riconoscimento; la domanda successiva è "Come stai?" Dopo aver riconosciuto l'atomo stellare, poniamo questa domanda e l'atomo risponde "Abbastanza sano" o "Gravemente distrutto", a seconda dei casi. La sua risposta trasmette informazioni sul suo ambiente, sulla severità del trattamento a cui è sottoposto, e quindi porta a una conoscenza delle condizioni di temperatura e pressione nell'oggetto osservato.

Esaminando la serie di stelle dalla più fredda alla più calda, possiamo tracciare come gli atomi di calcio siano dapprima interi, poi ionizzati singolarmente, poi doppiamente, segno che il colpo diventa più forte man mano che il calore diventa più intenso. (L'ultima fase è indicata dalla scomparsa di tutti i segni visibili di calcio, perché lo ione con due elettroni mancanti non ha righe nella parte osservabile dello spettro.) Il cambiamento progressivo di altri elementi è mostrato in modo analogo. Un grande progresso in questo studio fu fatto nel 1920 dal professor M. N. Saha, che per primo applicò le leggi fisiche quantitative che determinano il grado di ionizzazione a qualsiasi temperatura e pressione data. In tal modo aprì una nuova linea nella ricerca astrofisica che è stata ampiamente sviluppata. Pertanto, se notiamo il posto nella sequenza stellare in cui gli atomi di calcio completi lasciano il posto agli atomi con un elettrone mancante, la teoria fisica è in grado di stabilire la temperatura o la pressione corrispondente¹. I metodi di Saha sono stati migliorati da R. H. Fowler e E. A. Milne. Un'applicazione importante è stata la determinazione delle temperature superficiali delle tipologie di stelle più calde (12.000°–25.000°), poiché i metodi alternativi disponibili per le stelle più fredde non sono soddisfacenti a queste alte temperature. Un altro risultato piuttosto sorprendente fu la scoperta che la pressione nella stella (al livello misurato dallo spettroscopio) è pari solo a 1/10.000 di atmosfera; in precedenza si supposeva, senza prove molto certe, che fosse all'incirca uguale a quella della nostra atmosfera.

Usiamo comunemente il metodo dell'analisi spettrale quando vogliamo determinare quali elementi sono presenti in un dato minerale sulla Terra. È ugualmente affidabile nell'esame delle stelle poiché non può fare alcuna differenza se la luce che stiamo studiando proviene da un corpo vicino o ha viaggiato fino a noi per centinaia di anni attraverso lo spazio. Ma c'è una limitazione nel lavoro stellare che deve essere sempre ricordata. Quando il chimico cerca, diciamo, l'azoto nel suo minerale, si preoccupa di fornire le condizioni che, secondo la sua esperienza, sono necessarie affinché lo spettro dell'azoto si manifesti. Ma nelle stelle dobbiamo prendere le condizioni così come le troviamo. Se l'azoto non appare, non è una prova che l'azoto sia assente; è molto più probabile che l'atmosfera stellare non risponda alle condizioni giuste per il test. Nello spettro di Sirio le linee dell'idrogeno sono estremamente evidenti e sopraffanno tutto il resto. Non ne deduciamo che Sirio sia composto principalmente da idrogeno; ne deduciamo invece che la sua superficie si trova a una temperatura vicina ai 10.000°, perché si può calcolare che quella è una temperatura molto favorevole per un grande sviluppo di queste righe dell'idrogeno. Nel sole lo spettro più evidente è del ferro. Non ne deduciamo che il sole sia insolitamente ricco di ferro; ne deduciamo che si trova a una temperatura relativamente bassa, vicina ai 6.000°, favorevole alla produzione dello spettro del ferro. Un

¹ Non fornisce temperatura e pressione contemporaneamente, ma ne fornisce una se l'altra è nota. Questa è un'informazione preziosa che può essere messa insieme ad altre conoscenze sulle condizioni alla superficie delle stelle.

tempo si pensava che la preminenza dell'idrogeno in Sirio e degli elementi metallici nel sole indicasse un'evoluzione degli elementi, con l'idrogeno che si trasforma in elementi più pesanti man mano che la stella si raffredda dallo stadio siriano a quello solare. Non vi è alcun motivo per interpretare le osservazioni in questo modo; l'indebolimento dello spettro dell'idrogeno e l'aumento di quello del ferro si verificherebbero in ogni caso come conseguenza della diminuzione della temperatura; e simili apparenze spurie dell'evoluzione degli elementi possono essere organizzate in laboratorio.

È piuttosto probabile che gli elementi chimici abbiano più o meno la stessa abbondanza relativa nelle stelle di quella sulla Terra. Tutte le prove sono coerenti con questa visione; e per alcuni degli elementi più comuni c'è una qualche conferma positiva. Ma nel calcolare l'abbondanza degli elementi siamo limitati all'esterno della stella, come lo siamo all'esterno della Terra, quindi questa conclusione provvisoria non dovrebbe essere indebitamente inasprita.

Serie spettrale

Per illustrare ulteriormente questo tipo di deduzione, consideriamo lo spettro mostrato nella Fig. 9 e vediamo cosa possiamo imparare da esso. Con un po' di difficoltà possiamo districare una serie splendidamente regolare di righe luminose. I segni sopra vi aiuteranno a distinguere le prime righe della serie dai numerosi altri spettri mescolati ad essa. Notando la spaziatura decrescente da destra a sinistra, si potrà vedere che la serie continua verso sinistra per almeno quindici righe oltre l'ultima contrassegnata, le righe alla fine si avvicinano e formano una "testa" alla serie. Questa è la famosa serie di Balmer dell'idrogeno, e dopo averla riconosciuta identifichiamo l'idrogeno come uno degli elementi presenti nella fonte di luce. Ma questo è solo il primo passo, e possiamo procedere a ulteriori inferenze.

La teoria dell'atomo di idrogeno del professor Bohr ci insegna che ogni riga della serie è emessa da un atomo in uno stato diverso. Questi "stati di eccitazione" possono essere numerati consecutivamente, partendo dallo stato normale dell'atomo di idrogeno come n. 1. La luce emessa nei primi stati entra nella parte dello spettro non riprodotta qui e la prima riga nella nostra immagine corrisponde allo stato n. 8. Contando verso sinistra da qui, si riconosceranno senza troppa difficoltà le righe successive fino allo stato n. 30. Ora gli stati successivi corrispondono ad atomi sempre più gonfi, vale a dire, l'elettrone planetario¹ compie un circuito sempre più ampio. Il raggio (o più propriamente il semiasse) della sua orbita è proporzionale al quadrato del numero dello stato, così che l'orbita per lo stato n. 30 è 900 volte più grande dell'orbita per l'atomo normale n. 1. Il diametro dell'orbita nel n. 30 è approssimativamente un decimillesimo di millimetro. Si può trarre immediatamente una conclusione: lo spettro mostrato nella Fig. 9 non è stato prodotto in nessun laboratorio terrestre. Nel vuoto più spinto che può essere realizzato nella spettroscopia terrestre, gli atomi sono ancora troppo addensati per lasciare spazio a un'orbita così grande. La sorgente deve essere materia così tenue che c'è spazio vuoto per l'elettrone per compiere questo ampio giro senza scontrarsi con o subire interferenze da altri atomi. Senza entrare in ulteriori dettagli possiamo concludere che la Fig. 9 è uno

1 L'idrogeno (essendo l'elemento n. 1) ha un solo elettrone planetario.

spettro di materia più rarefatto del vuoto più spinto conosciuto sulla Terra.¹

È interessante notare che, mentre nella maggior parte dell'immagine le righe sono mostrate su uno sfondo scuro, all'estrema sinistra lo sfondo è luminoso; il cambiamento avviene proprio nel punto in cui la serie di Balmer giunge al termine. Questo sfondo luminoso è dovuto anche all'idrogeno ed è causato nel modo seguente. Gli atomi gonfi nello stato n. 30 o giù di lì sono pericolosamente vicini al punto di scoppio, quindi è naturale che insieme a loro ci siano atomi che hanno superato il limite e scoppiano. Hanno perso i loro elettroni planetari e sono impegnati a catturarne di nuovi. Proprio come è richiesta energia per strappare via un elettrone da un atomo, così ci sarà energia superflua di cui liberarsi quando l'atomo doma un elettrone selvaggio. Questa energia superflua viene irradiata e forma lo sfondo luminoso a cui si fa riferimento. Senza entrare nei tecnicismi della teoria, possiamo vedere che è appropriato che questa luce proveniente dagli atomi esplosi appaia nello spettro immediatamente oltre le righe degli atomi più gonfi, poiché l'esplosione è una conseguenza del rigonfiamento.

Mentre avete davanti a voi questa fotografia della serie Balmer, potrei cogliere l'occasione per raccontare la storia di un'altra famosa serie. In alcune delle stelle più calde, nel 1896 è stata scoperta una serie correlata di righe, nota come serie Pickering. Questa è spaziata esattamente secondo lo stesso piano regolare, ma le righe cadono a metà strada tra quelle della serie di Balmer, non esattamente a metà strada a causa degli intervalli gradualmente decrescenti da destra a sinistra, ma proprio dove si interpolerebbero naturalmente le righe per raddoppiarne il numero mantenendo la spaziatura regolare. A differenza della serie Balmer, la serie Pickering non era mai stata prodotta in alcun laboratorio. Quale elemento la stava causando? La risposta sembrava ovvia; sicuramente queste due serie correlate, una a metà strada tra l'altra, dovevano appartenere a modi di vibrazione diversi dello stesso atomo, l'idrogeno. Quella sembrava essere l'unica risposta possibile all'epoca; ma da allora abbiamo imparato di più sugli atomi. Possiamo ragionevolmente sostenere che la semplicità ideale di queste due serie indica che sono prodotte da un sistema atomico del tipo più semplice possibile, vale a dire un atomo con un elettrone planetario; ma bisogna ricordare che questa condizione ci dice solo come è rivestito l'atomo, non cosa è l'atomo. L'atomo di elio (o, per quel che conta, l'atomo di uranio) può occasionalmente mascherarsi sotto le spoglie succinte dell'atomo di idrogeno. L'elio normale ha due elettroni planetari; ma se uno di questi viene perso, diventa simile all'idrogeno e copia il semplice sistema dell'idrogeno su una scala diversa. È significativo che la serie di Pickering appaia solo nelle stelle più calde, in condizioni che possono causare la perdita di un elettrone. La differenza tra idrogeno ed elio simile all'idrogeno è innanzitutto la differenza di peso atomico; il nucleo di elio è quattro volte più massiccio. Ma questo non influisce molto sullo spettro perché entrambi i nuclei sono così massicci che rimangono quasi inalterati dall'elettrone danzante. In secondo luogo, il nucleo di elio ha una carica elettrica doppia; ciò equivale a sostituire nel sistema vibrante una molla di controllo di forza doppia. Cosa può essere più naturale del fatto che la forza raddoppiata della molla raddoppi il numero di righe nella serie senza alterarne altrimenti il piano? In questo modo il professor Bohr ha scoperto la vera origine della serie di Pickering; è dovuta

1 La figura 9 è una fotografia dello "spettro flash" della cromosfera solare scattata da Davidson a Sumatra durante l'eclissi del 14 gennaio 1926.

all'elio ionizzato, non all'idrogeno.¹

Il nucleo pesante, sia di idrogeno che di elio, rimane quasi inalterato dalla vibrazione atomica, quasi, ma non del tutto. In seguito, il professor A. Fowler riuscì a riprodurre la serie di Pickering in laboratorio e fu in grado di misurarne le righe con una precisione molto maggiore di quella ottenibile con la spettroscopia stellare; fu quindi in grado di dimostrare dalle sue misure che il nucleo non è del tutto ininfluenza. Era un delicato problema di stelle doppie trasferito all'interno dell'atomo; o forse un'analogia più vicina sarebbe l'influenza reciproca del sole e di Giove, perché Giove, avendo un millesimo della massa del sole, lo disturba più o meno nella stessa misura in cui l'elettrone leggero disturba il nucleo di idrogeno. L'elio ionizzato è una copia fedele dell'atomo di idrogeno (su scala alterata) in tutto tranne che per la "oscillazione"; la scossa è minore rispetto all'idrogeno perché il nucleo di elio è ancora più massiccio e simile alla roccia. La differenza di oscillazione fa sì che la serie di Pickering dell'elio e la serie di Balmer dell'idrogeno siano leggermente fuori fase l'una rispetto all'altra; e misurando questa discrepanza il professor Fowler è stato in grado di determinare con estrema precisione l'oscillazione e quindi la massa dell'elettrone. In questo modo si scopre che la massa dell'elettrone è pari a 1/1844 della massa del nucleo di idrogeno; ciò concorda bene con la massa trovata con altri metodi e la determinazione non è probabilmente inferiore in accuratezza a nessuno di essi.

E così l'indizio inizialmente raccolto in stelle distanti 500 anni luce, seguito a sua volta dai fisici teorici e sperimentali, porta alla fine alla più piccola delle cose conosciute.

La nube nello spazio

Dopo aver già considerato la materia più densa dell'universo, passiamo ora a considerare la più rara.

Nonostante i grandi miglioramenti nell'arte di svuotare i contenitori, siamo ancora molto lontani dal produrre un vero vuoto. Gli atomi in un tubo a vuoto prima che si esauriscano radunano un numero formidabile contenente circa venti cifre. Un forte svuotamento significa eliminare cinque o sei zeri alla fine di quel numero; e gli sforzi più strenui per eliminare un altro zero sembrano ridicolmente inefficaci, un semplice rosicchiamento dell'enorme numero che deve rimanere.

Alcune stelle sono estremamente rarefatte. Betelgeuse, per esempio, ha una densità di circa un millesimo di quella dell'aria. Dovremmo chiamarla un vuoto se non fosse in contrasto con la vacuità molto maggiore dello spazio circostante. Oggigiorno i fisici non hanno difficoltà a produrre un vuoto migliore di Betelgeuse; ma in tempi precedenti questa stella sarebbe stata considerata un tentativo molto credibile di vuoto.

Le parti esterne di una stella, e in particolare le appendici luminose come la cromosfera solare e la corona, raggiungono densità molto più basse. Anche le nebulose gassose sono, come suggerisce il loro aspetto, estremamente tenui. Quando c'è abbastanza spazio per infilare una capocchia di spillo tra atomi adiacenti, possiamo iniziare a parlare di un

¹ La riga dell'elio nella Nebulosa Anello su cui abbiamo già commentato non è un membro della Serie Pickering, ma ha avuto la stessa storia. Inizialmente si supponeva che fosse dovuta all'idrogeno, in seguito (nel 1912) riprodotta da Fowler sulla Terra in una miscela di elio e idrogeno, e infine scoperta da Bohr come appartenente all'elio.

“vuoto reale”. Al centro della nebulosa di Orione, quel grado di rarefazione è probabilmente raggiunto e superato.

Una nebulosa non ha confini definiti e la densità svanisce gradualmente. “C’è motivo di pensare che lo svuotamento diventi lento a grandi distanze. Prima di uscire completamente dalla sfera di una nebulosa, entriamo nella sfera di un’altra, così che c’è sempre una certa densità residua nello spazio interstellare.

Credo che, ragionando sulla coda delle nebulose, siamo in grado di fare una stima della quantità di materia che rimane non aggregata nello spazio. Una regione ordinaria in cui non c’è nebulosità osservabile è il vuoto più alto esistente, almeno entro i limiti del sistema stellare, ma rimane ancora circa *un atomo in ogni pollice cubo*. Dipende dal nostro punto di vista se consideriamo questo come una sorprendente pienezza o uno straordinario vuoto dello spazio. Forse è la pienezza che ci impressiona di più. L’atomo non riesce a trovare un posto di vera solitudine all’interno del sistema delle stelle; ovunque vada può fare un cenno a un collega a non più di un pollice di distanza.

Affrontiamo lo stesso argomento da un’angolazione diversa.

Nella “Storia di Algol” ho fatto riferimento al modo in cui misuriamo la velocità di rotazione del sole. Puntiamo lo spettroscopio prima su un lembo del sole e poi sull’altro. Prendendo una qualsiasi delle righe scure dello spettro, scopriamo che si è spostata leggermente tra le due osservazioni. Questo ci dice che la materia che ha impresso la riga si stava muovendo verso di noi o si stava allontanando da noi con velocità diverse nelle due osservazioni. Questo è ciò che ci aspettavamo di trovare; la rotazione del sole fa sì che la materia solare si muova verso di noi da un lato del disco e si allontani da noi dall’altro lato. Ma ci sono alcune righe scure che non mostrano questo cambiamento. Si trovano esattamente nella stessa posizione, sia che le osserviamo a est o a ovest del sole. È chiaro che non possono avere origine nel sole. Sono rimasti impresse nella luce dopo che hanno lasciato il sole e prima che raggiungesse il nostro telescopio. Abbiamo così scoperto un mezzo presente da qualche parte tra il sole e il nostro telescopio; e poiché alcune righe sono riconosciute come appartenenti all’ossigeno, possiamo dedurre che si tratta di un mezzo contenente ossigeno.

Sembra l’inizio di una grande scoperta, ma finisce in un fiasco. Capita che fossimo già a conoscenza di un mezzo contenente ossigeno che si trova da qualche parte tra il nostro telescopio e il sole. È un mezzo essenziale per la nostra esistenza. L’atmosfera terrestre è responsabile delle righe “fisse” visibili nello spettro solare.

Proprio come lo spettroscopio può dirci che il sole sta girando (un fatto che ci è già familiare osservando i segni distintivi sulla superficie), allo stesso modo può dirci che alcune stelle stanno vagando lungo un’orbita e quindi sono sotto l’influenza di una seconda stella che potrebbe essere visibile o meno. Ma anche qui a volte troviamo righe “fisse” che non cambiano con le altre. Quindi da qualche parte tra la stella e il telescopio esiste un mezzo stazionario che imprime queste righe sulla luce. Questa volta non è l’atmosfera terrestre. Le righe appartengono a due elementi, calcio e sodio, nessuno dei quali è presente nell’atmosfera. Inoltre, il calcio si trova in uno stato frantumato, avendo perso uno dei suoi elettroni, e le condizioni della nostra atmosfera non sono tali da causare questa perdita. Non sembra esserci dubbio che il mezzo contenente il sodio e il calcio ionizzato (e senza dubbio molti altri elementi che non si mostrano) sia separato dalla terra

e dalla stella. Si tratta della “pienezza” dello spazio interstellare già menzionata. La luce deve attraversare un atomo per pollice cubo per tutto il tragitto dalla stella alla Terra e, durante il suo viaggio di centinaia di miliardi di miglia, incontrerà un numero di atomi sufficiente a imprimere queste righe scure nel suo spettro.

Inizialmente ci fu un’interpretazione antagonista. Si pensava che le righe fossero prodotte in una nube attaccata alla stella, formante una specie di aureola attorno ad essa. I due componenti viaggiano in orbite l’uno attorno all’altro, ma il loro moto orbitale non richiede alcuna perturbazione da parte di un mezzo diffuso che riempie e circonda il sistema combinato. Si trattava di un suggerimento molto ragionevole, ma poteva essere messo alla prova. Il test era ancora una volta la velocità. Sebbene entrambi i componenti possano muoversi periodicamente avanti e indietro all’interno della nube circostante di calcio e sodio, è chiaro che il loro avvicinamento o allontanamento medio da noi, nel corso di un lungo periodo di tempo, deve coincidere con quello del calcio e del sodio, se si vuole che la stella non lasci il suo alone. Il test è stato condotto dal professor Plaskett con il riflettore da 72 pollici del Dominion Observatory nella Columbia Britannica. Scopri che la velocità secolare o media di avvicinamento della stella¹ era generalmente molto diverso dal tasso mostrato dalle righe fisse del calcio o del sodio. È evidente che la materia responsabile delle righe fisse non poteva essere un’appendice della stella, poiché non riusciva a tenere il passo con essa. Plaskett andò oltre e dimostrò che, mentre le stelle stesse avevano ogni sorta di velocità individuale, la materia delle righe fisse aveva la stessa o quasi la stessa velocità in tutte le parti del cielo, come se fosse un mezzo continuo attraverso lo spazio interstellare. Penso che non vi siano dubbi sul fatto che questa ricerca dimostri l’esistenza di una nube cosmica che pervade il sistema stellare. La pienezza dello spazio interstellare diventa un dato di fatto osservativo e non più una congettura teorica.

Il sistema di stelle galleggia in un oceano, non semplicemente un oceano di spazio, non semplicemente un oceano di etere, ma un oceano così materiale che in ogni pollice cubo è presente un atomo o giù di lì. È un oceano placido senza molto moto relativo; probabilmente esistono delle correnti, ma sono di natura minore e non raggiungono le elevate velocità comunemente possedute dalle stelle. Sono molti gli spunti di interesse, ma ne toccherò solo uno o due. Perché gli atomi di calcio sono ionizzati? Nella calma dello spazio interstellare sembra che ci siamo allontanati dal tumulto che ha distrutto gli atomi di calcio all’interno di una stella; quindi a prima vista sembra difficile capire perché gli atomi nella nuvola non debbano essere completi. Tuttavia, anche nelle profondità dello spazio la disgregazione dell’atomo continua; perché nello spazio passa sempre la luce delle stelle e alcune onde luminose sono abbastanza potenti da strappare un primo o un secondo elettrone dall’atomo di calcio. Una delle scoperte più curiose della fisica moderna è che quando un’onda luminosa viene attenuata dalla diffusione, ciò di cui in realtà soffre è l’attenuazione piuttosto che una vera e propria perdita di potenza. Ciò che si indebolisce non è la potenza, ma la probabilità che questa sia mostrata. Un’onda luminosa capace di far esplodere un atomo conserva ancora la sua potenza anche se viene attenuata un milione di volte dalla diffusione; solo che è un milione di volte più parsimoniosa nell’esercizio di tale potenza.

¹ Ciò, naturalmente, si riscontra nelle altre righe dello spettro che appartengono realmente alla stella e che si spostano avanti e indietro mentre descrive la sua orbita.

In altri termini, un atomo esposto alle onde attenuate dovrà attendere in media un milione di volte in più prima che un'onda decida di farlo esplodere; ma l'esplosione, quando si verifica, avrà esattamente la stessa intensità, indipendentemente dalla sua attenuazione. Questo è completamente diverso dal comportamento delle onde d'acqua; un'onda che inizialmente è abbastanza forte da far capovolgere una barca, una volta propagatasi, diventerà troppo debole. È più simile al fuoco di una mitragliatrice, che ha maggiori probabilità di mancare un determinato oggetto a maggiore distanza, ma è altrettanto distruttivo se colpisce. La proprietà a cui si fa riferimento qui (la proprietà quantistica) è il mistero più profondo della luce.

Quindi nello spazio interstellare gli elettroni vengono ancora strappati dagli atomi di calcio, ma molto raramente. L'altro aspetto della questione è la velocità di riparazione, e in questo contesto la bassa densità della nube cosmica è il fattore decisivo. L'atomo ha così poche possibilità di riparazione. -Mentre viaggia nello spazio, l'atomo incontra un elettrone solo circa una volta al mese, e non è affatto detto che catturerà il primo che incontra. Di conseguenza, per mantenere ionizzata la maggior parte degli atomi sarà sufficiente una rottura molto rara. Lo stato di frantumazione degli atomi all'interno di una stella può essere paragonato al degrado di una casa colpita da un tornado; lo stato di degrado nello spazio interstellare è dovuto alla normale usura associata a un'eccessiva negligenza nelle riparazioni.

Un calcolo indica che la maggior parte degli atomi di calcio nello spazio interstellare ha perso due elettroni; questi atomi non interferiscono con la luce e non producono alcuno spettro visibile. Le "righe fisse" sono prodotte da atomi temporaneamente in uno stato di riparazione migliore con solo un elettrone mancante; essi non possono in nessun momento ammontare a più di un millesimo del numero totale, ma anche così saranno sufficientemente numerosi da produrre l'assorbimento osservato.

In genere pensiamo che lo spazio interstellare sia eccessivamente freddo. È vero che qualsiasi termometro posizionato lì indicherebbe una temperatura di soli 3° sopra lo zero assoluto, se fosse in grado di registrare una lettura così bassa. La materia compatta, come un termometro, o anche la materia che dal punto di vista ordinario è considerata altamente diffusa, raggiunge questa bassa temperatura. Ma la regola non si applica alla materia così rarefatta come le nubi interstellari. La sua temperatura è regolata da altri fattori e probabilmente non sarà molto al di sotto della temperatura superficiale delle stelle più calde, diciamo 15.000 °C. Lo spazio interstellare è allo stesso tempo eccessivamente freddo e decisamente caldo.¹

1 Poiché la parola temperatura viene talvolta utilizzata con significati nuovi e inediti, posso aggiungere che 15.000° è la temperatura corrispondente alle singole velocità degli atomi e degli elettroni, ovvero la vecchia temperatura dei gas.

La cromosfera solare

Ancora una volta cambiamo scena, e ora siamo di nuovo nelle parti esterne del sole. La Fig. 10¹ mostra una delle enormi fiamme di prominenza che di tanto in tanto escono dal sole. La fiamma in questa immagine era alta circa 120.000 miglia. Ha subito grandi cambiamenti di forma ed è scomparsa in poco più di ventiquattro ore. Questo fu un esemplare piuttosto eccezionale. Fiamme più piccole si verificano abbastanza comunemente; sembra che i curiosi segni neri nella Fig. 1, che spesso sembrano fenditure, siano in realtà protuberanze viste in proiezione sullo sfondo ancora più luminoso del sole. Le fiamme sono composte da calcio, idrogeno e diversi altri elementi.



Fig. 10. Prominenza solare

Non ci interessano tanto le protuberanze quanto lo strato da cui nascono. L'atmosfera ordinaria del sole termina piuttosto bruscamente, ma al di sopra di essa c'è uno strato profondo ma molto rarefatto chiamato cromosfera, costituito da pochi elementi selezionati che sono in grado di galleggiare non sulla sommità dell'atmosfera solare, ma sui *raggi solari*. L'arte di cavalcare un raggio solare è evidentemente piuttosto difficile, perché solo pochi elementi hanno l'abilità necessaria. Il più esperto è il calcio. Il leggero e agile atomo di idrogeno è abbastanza bravo in questo, ma il ponderoso atomo di calcio lo fa meglio.

Lo strato di calcio sospeso sulla luce solare è spesso almeno 5.000 miglia. Possiamo osservarlo meglio quando la parte principale del sole è nascosta dalla luna in un'eclissi; ma lo spettroeliografo ci consente di studiarlo in una certa misura senza un'eclissi. Nel complesso è stabile e quiescente, sebbene, come mostrano le fiamme della protuberanza, sia soggetto a essere spazzato via in cielo da violente esplosioni. Le conclusioni sulla cromosfera del calcio che sto per descrivere si basano su una serie di notevoli ricerche del professor Milne.

Come fa un atomo a galleggiare su un raggio di sole? La possibilità dipende dalla pressione della luce a cui abbiamo già fatto riferimento. La luce solare che viaggia verso l'esterno trasporta un certo impulso; se l'atomo assorbe la luce, assorbe anche l'impulso e quindi riceve un piccolo impulso verso l'esterno. Questo impulso gli consente di recuperare il terreno che stava perdendo cadendo verso il sole. Gli atomi nella cromosfera sono tenuti a fluttuare sopra il sole come minuscoli volani, scendendo un po' e poi

1 Fotografia scattata da E. T. Cottingham e dall'autore a Principe durante l'eclissi totale del 29 maggio 1919.

risalendo di nuovo per l'impulso della luce. Solo quegli atomi che possono assorbire grandi quantità di luce solare in proporzione al loro peso saranno in grado di fluttuare con successo. Dobbiamo esaminare piuttosto da vicino il meccanismo di assorbimento dell'atomo di calcio se vogliamo vedere perché eccelle sugli altri elementi.

L'atomo di calcio comune ha due elettroni piuttosto liberi nel suo sistema; i chimici esprimono questo dicendo che è un elemento bivalente, i due elettroni liberi sono particolarmente importanti nel determinare il comportamento chimico. Ognuno di questi elettroni possiede un meccanismo per assorbire la luce. Ma nelle condizioni prevalenti nella cromosfera uno degli elettroni viene spezzato e gli atomi di calcio si trovano nello stesso stato frantumato che dà origine alle "righe fisse" nella nube interstellare. Il calcio cromosferico si sostiene quindi con la luce solare che riesce a raccogliere con l'unico elettrone libero rimasto. Separarsene sarebbe fatale; l'atomo non sarebbe più in grado di assorbire la luce solare e cadrebbe come un sasso. È vero che dopo che due elettroni sono persi ne rimangono ancora diciotto; ma questi sono tenuti così strettamente che la luce solare non ha alcun effetto su di essi e possono solo assorbire onde più corte che il sole non irradia in alcuna quantità. L'atomo, quindi, potrebbe salvarsi solo se ripristinasse il suo principale meccanismo di assorbimento, raccogliendo un elettrone di passaggio; ha poche possibilità di catturarlo nella cromosfera rarefatta, quindi probabilmente cadrebbe sulla superficie del sole.

Ci sono due modi in cui la luce può essere assorbita. In uno l'atomo assorbe così avidamente che esplose, e l'elettrone scappa via con l'energia in eccesso. Questo è il processo di ionizzazione che è stato mostrato nella Fig. 5. Chiaramente questo non può essere il processo di assorbimento nella cromosfera perché, come abbiamo visto, l'atomo non può permettersi di perdere l'elettrone. Nell'altro metodo di assorbimento l'atomo non è così avido. Non scoppia, ma si gonfia visibilmente. Per accogliere l'energia extra l'elettrone viene lanciato in un'orbita più alta. Questo metodo è chiamato eccitazione. Dopo essere rimasto nell'orbita eccitata per un po' di tempo, l'elettrone scende di nuovo spontaneamente. Il processo deve essere ripetuto 20.000 volte al secondo per mantenere l'atomo in equilibrio nella cromosfera.

Il punto a cui stiamo arrivando è: perché il calcio dovrebbe essere in grado di galleggiare meglio di altri elementi? È sempre sembrato strano che un elemento piuttosto pesante (il n. 20 in ordine di peso atomico) si trovi in queste regioni più alte, dove ci si aspetterebbe solo atomi più leggeri. Ora vediamo che l'abilità speciale richiesta è quella di riuscire a lanciare un elettrone 20.000 volte al secondo senza mai commettere l'errore fatale di farlo cadere. Non è facile nemmeno per un atomo. Il calcio¹ riesce perché possiede una possibile orbita di eccitazione solo un po' al di sopra dell'orbita normale, così da poter far oscillare l'elettrone tra queste due orbite senza gravi rischi. Con la maggior parte degli altri elementi la prima orbita disponibile è relativamente molto più alta; l'energia richiesta per raggiungere questa orbita non è di molto inferiore all'energia richiesta per staccare completamente l'elettrone; quindi non possiamo avere una fonte continua di luce in grado di causare i salti orbitali senza a volte esagerare e causare la perdita dell'elettrone. Ciò che è così favorevole è l'ampia differenza tra l'energia di eccitazione e l'energia di ionizzazione del calcio: il sole è molto ricco di onde d'etere capaci di provocare la prima, mentre è quasi

1 Ci riferiamo al calcio così come si trova nella cromosfera, vale a dire senza un elettrone.

privo di tali onde capaci di provocare la seconda.

Il tempo medio impiegato per ogni esecuzione è di 1/20.000 di secondo. Questo è diviso in due periodi. C'è un periodo durante il quale l'atomo attende pazientemente che un'onda luminosa lo colpisca e gli faccia rigettare l'elettrone. C'è un altro periodo durante il quale l'elettrone ruota costantemente nell'orbita superiore prima di decidere di scendere di nuovo. Il professor Milne ha mostrato come calcolare dalle osservazioni della cromosfera la durata di entrambi questi periodi. Il primo periodo di attesa dipende dall'intensità della radiazione solare. Ma concentriamo l'attenzione soprattutto sul secondo periodo, che è più interessante perché è una proprietà definita dell'atomo di calcio, che non ha nulla a che fare con le circostanze locali. Sebbene lo misuriamo per gli ioni nella cromosfera del sole, lo stesso risultato deve applicarsi agli ioni di calcio ovunque. Il risultato di Milne è che un elettrone lanciato nell'orbita superiore rimane lì per un tempo medio di un centomilionesimo di secondo prima di ricadere spontaneamente. Posso aggiungere che durante questo breve periodo di tempo compie qualcosa come un milione di rivoluzioni nell'orbita superiore.

Forse questa è un'informazione che non desideravate particolarmente sapere. Non credo che possa essere definita interessante, se non per coloro che hanno un hobby per gli atomi. Ma mi sembra interessante che dovremmo puntare un telescopio e uno spettroscopio sul sole per scoprire questa proprietà familiare di una sostanza che maneggiamo quotidianamente. È un tipo di misura di immensa importanza in fisica. La teoria di questi salti atomici rientra nella teoria quantistica, che è ancora il più grande enigma della scienza fisica e che ha grande bisogno della guida dell'osservazione proprio su una questione come questa. Possiamo immaginare quale sensazione si produrrebbe se, dopo un milione di rivoluzioni attorno al sole, un pianeta facesse un salto di questo tipo. Con quanta impazienza dovremmo cercare di determinare l'intervallo medio in cui tali salti si sono verificati! L'atomo è piuttosto simile a un sistema solare, e non è meno interessante perché è su scala più piccola.

Al momento non vi è alcuna prospettiva di misurare il tempo di rilassamento dell'atomo di calcio eccitato in un modo diverso. Tuttavia, si è scoperto che è possibile determinare il tempo corrispondente per uno o due altri tipi di atomi mediante esperimenti di laboratorio. Non è necessario che il tempo sia esattamente lo stesso per diversi elementi; ma anche le misure di laboratorio per l'idrogeno indicano un periodo uguale a centomilionesimo di secondo, quindi non c'è nulla da ridire sulla determinazione astronomica per il calcio.

L'eccitazione dell'atomo di calcio avviene tramite la luce di due particolari lunghezze d'onda e gli atomi nella cromosfera si sostengono sottraendo alla luce solare questi due costituenti. È vero che dopo un centesimo di milionesimo di secondo si verifica una ricaduta e l'atomo deve rigettare ciò di cui si è appropriato; ma nel rimettere la luce è probabile che la invii verso l'interno come verso l'esterno, così che la luce solare in uscita subisce più perdite di quante ne recuperi. Di conseguenza, quando osserviamo il sole attraverso questo mantello di calcio, lo spettro mostra lacune o righe scure alle due lunghezze d'onda interessate. Queste righe sono indicate con le lettere H e K. Non sono completamente nere, ed è importante misurare la luce residua al loro centro, perché sappiamo che deve avere un'intensità appena abbastanza forte da mantenere gli atomi di

calcio fluttuanti sotto la gravità solare; non appena la luce in uscita è così indebolita da non poter sostenere più gli atomi, non può subire ulteriori depredazioni, e quindi emerge nello spazio con questa intensità limitante. La misura fornisce dati numerici per calcolare le costanti dell'atomo di calcio, compreso il tempo di rilassamento sopra menzionato.

Gli atomi in cima alla cromosfera poggiano sulla luce indebolita che ha attraversato lo schermo sottostante; la piena luce del sole li spazzerebbe via. Milne ha dedotto una conseguenza che potrebbe forse avere un'applicazione pratica nei fenomeni di esplosione di "nuove stelle" o novae, e in ogni caso è curiosamente interessante. A causa dell'effetto Doppler, un atomo in movimento assorbe una lunghezza d'onda piuttosto diversa da un atomo stazionario; così che se per qualsiasi motivo un atomo si allontana dal sole, si sosterrà con una luce che è un po' dal lato dell'assorbimento più profondo. Questa luce, essendo più intensa di quella che ha fornito un equilibrio, farà sì che l'atomo si allontani più velocemente. L'assorbimento dell'atomo stesso si allontanerà quindi gradualmente dall'assorbimento dello schermo sottostante. Parlando piuttosto metaforicamente, l'atomo è in equilibrio precario sulla sommità della riga di assorbimento ed è soggetto a cadere nella piena luce del sole da un lato. Apparentemente la velocità dell'atomo dovrebbe continuare ad aumentare finché non deve risalire una riga di assorbimento adiacente (forse a causa di qualche altro elemento); se la linea è troppo intensa per essere superata, l'atomo si bloccherà a metà strada, mentre la velocità rimane fissa a un valore particolare. Queste inferenze successive possono essere piuttosto inverosimili, ma in ogni caso l'argomento indica che è probabile che ci sia una fuga di calcio nello spazio esterno.

Con la teoria di Milne possiamo calcolare il peso totale della cromosfera di calcio del sole. La sua massa è di circa 300 milioni di tonnellate. Difficilmente ci si aspetterebbe di imbattersi in una cifra così insignificante in astronomia. È inferiore al tonnellaggio gestito dalle nostre ferrovie inglesi ogni anno. Penso che gli osservatori solari debbano sentirsi piuttosto presi in giro quando considerano il lavoro che sono stati indotti a spendere per questo nulla aereo. Ma la scienza non disprezza le inezie. E l'astronomia può ancora essere istruttiva anche quando, per una volta, scende a numeri comuni.

La storia di Betelgeuse

Questa storia non ha molto a che fare con gli atomi, e difficilmente rientra nel titolo di queste lezioni; ma abbiamo avuto occasione di alludere a Betelgeuse come il famoso esempio di una stella di grandi dimensioni e bassa densità, e la sua storia è strettamente associata ad alcuni degli sviluppi che stiamo studiando.

Nessuna stella ha un disco abbastanza grande da essere visto con i nostri attuali telescopi. Possiamo calcolare che una lente o uno specchio di circa 20 piedi di apertura sarebbero necessari per mostrare tracce anche del disco stellare più grande. Immaginate per un momento di aver costruito uno strumento di questo ordine di grandezza. Quale sarebbe la stella più promettente su cui provarlo?

Forse Sirio sarebbe la prima, poiché è la stella più luminosa del cielo. Ma Sirio ha una superficie incandescente che irradia molto intensamente, quindi non è necessario che abbia una vasta estensione. Evidentemente dovremmo preferire una stella che, sebbene luminosa, abbia la sua superficie in una condizione di debole luminosità; allora la luminosità apparente deve essere dovuta a una vasta area. Abbiamo bisogno, quindi, di

una stella che sia rossa e luminosa. Betelgeuse sembra la migliore per soddisfare questa condizione. È la più luminosa delle due stelle-della spalla di Orione, l'unica stella rossa evidente nella costellazione. Ci sono una o due rivali, tra cui Antares, che potrebbero essere preferite; ma non possiamo sbagliarci di molto puntando il nostro nuovo strumento su Betelgeuse nella speranza di trovare il disco stellare più grande o quasi più grande.

Potreste notare che non ho prestato attenzione alle distanze di queste stelle. Capita che la distanza non sia rilevante. Sarebbe rilevante se stessimo cercando di trovare la stella di maggiori dimensioni effettive; ma qui stiamo considerando la stella che presenta il disco apparente più grande¹, vale a dire che copre l'area più grande del cielo. Se fossimo a una distanza doppia rispetto a quella attuale dal sole, riceveremmo solo un quarto della luce; ma il sole apparirebbe linearmente grande la metà delle sue dimensioni attuali e la sua area apparente sarebbe un quarto. Quindi la luce per unità di area del disco non è alterata dalla distanza. Spostando il sole a una distanza sempre maggiore, il suo disco apparirà più piccolo ma non meno luminoso, finché non sarà così lontano che il disco non potrà essere discriminato.

Dall'esame spettroscopico sappiamo che Betelgeuse ha una temperatura superficiale di circa 3.000°. Una temperatura di 3.000° non è irraggiungibile in laboratorio, e sappiamo in parte per esperimento e in parte per teoria qual è il potere radiante di una superficie in questo stato. Quindi non è difficile calcolare quanto grande deve essere l'area del cielo che Betelgeuse deve coprire affinché l'area moltiplicata per la potenza radiante possa dare la luminosità osservata di Betelgeuse. L'area risulta essere molto piccola. La dimensione apparente di Betelgeuse è quella di mezzo penny a cinquanta miglia di distanza. Utilizzando una misura più scientifica, il diametro di Betelgeuse previsto da questo calcolo è 0.051 di un secondo d'arco.

Nessun telescopio esistente può mostrare un disco così piccolo. Consideriamo brevemente come un telescopio forma un'immagine, in particolare come riproduce quel dettaglio e contrasto di luce e oscurità che tradisce che stiamo guardando un disco o una stella doppia e non una macchia che emana da un singolo punto. Questa prestazione ottica è chiamata potere risolutivo; non è principalmente una questione di ingrandimento ma di apertura, e il limite di risoluzione è determinato dalla dimensione dell'apertura del telescopio.

Per creare un'immagine nitidamente definita, il telescopio non deve solo portare luce dove dovrebbe esserci luce, ma deve anche portare oscurità dove dovrebbe esserci oscurità. Quest'ultimo compito è il più difficile. Le onde luminose tendono a diffondersi in tutte le direzioni e il telescopio non può impedire alle singole piccole onde di deviare verso parti dell'immagine in cui non hanno nulla a che fare. Ma ha un solo rimedio: per ogni onda intrusiva deve inviarne una seconda attraverso un percorso leggermente più lungo o più corto, in modo da arrivare in una fase opposta alla prima onda e annullarne l'effetto. Ecco dove nasce l'utilità di un'ampia apertura, che consente una differenza più ampia di percorso delle singole onde, in modo che quelle da una parte dell'apertura possano essere ritardate relativamente a quelle da un'altra parte e interferire con esse. Un piccolo obiettivo di vetro può fornire luce; ci vuole un obiettivo di vetro grande per fornire

1 C'è un certo imbarazzo nell'applicare il termine "apparente" a qualcosa di troppo piccolo per essere visto; ma, ricordando che ci siamo armati di un telescopio immaginario in grado di mostrare il disco, il significato sarà chiaro.

oscurità nell'immagine.

Ora possiamo chiederci se l'apertura circolare ordinaria sia necessariamente la più efficiente per dare alle onde le differenze di percorso richieste. Qualsiasi deviazione da una forma simmetrica rischia di rovinare la definizione dell'immagine, producendo ali e frange. L'immagine non somiglierà così tanto all'oggetto osservato. Ma d'altro canto potremmo essere in grado di mettere a fuoco le caratteristiche rivelatrici. Non importa quanto ampiamente il modello dell'immagine possa differire dall'oggetto, a patto che siamo in grado di leggere il significato del modello. Se non possiamo riprodurre un disco stellare, proviamo a riprodurre qualcosa di distintivo di un disco stellare.

Una piccola riflessione mostra che dovremmo migliorare le cose bloccando il centro del vetro dell'obiettivo e usando solo le regioni estreme su un lato o sull'altro. Per queste regioni la differenza del percorso della luce delle onde è maggiore e sono le più efficienti nel fornire il contrasto scuro necessario per delineare correttamente l'immagine.

Ma se il centro del vetro dell'obiettivo non verrà utilizzato, perché sostenere la spesa di produrlo? Siamo portati all'idea di utilizzare due aperture ampiamente separate, ciascuna delle quali comporta una lente o uno specchio relativamente piccolo. Arriviamo così a uno strumento sul modello di un telemetro.

Questo strumento non ci mostrerà il disco di una stella. Se lo guardiamo attraverso, l'impressione principale dell'immagine della stella è molto simile a quella che avremmo dovuto vedere con entrambe le aperture singolarmente: un "disco spurio" circondato da anelli di diffrazione. Ma guardando attentamente, vediamo che questa immagine è attraversata da bande scure e luminose che sono prodotte dall'interferenza tra le onde luminose provenienti dalle due aperture. Al centro dell'immagine le onde provenienti dalle due aperture giungono cresta su cresta poiché hanno viaggiato simmetricamente lungo percorsi uguali; di conseguenza c'è una banda luminosa. Un po' più a lato l'asimmetria fa sì che le onde giungano cresta su valle, così che si annullano a vicenda; qui c'è una banda scura. La larghezza delle bande diminuisce all'aumentare della separazione delle due aperture e, per ogni data separazione, la larghezza effettiva è facilmente calcolabile.

Ogni punto del disco della stella dà origine a un'immagine di diffrazione con un sistema di bande di questo tipo, ma finché il disco è piccolo rispetto al dettaglio più fine dell'immagine di diffrazione non si verifica alcuna sfocatura apprezzabile. Se aumentiamo continuamente la separazione delle due aperture e rendiamo così le bande più strette, arriva un momento in cui le bande luminose per una parte del disco cadono sulle bande scure per un'altra parte del disco. Il sistema di bande diventa quindi indistinto. È una questione di calcolo matematico determinare l'effetto risultante della somma dei sistemi di bande per ogni punto del disco. Si può dimostrare che per una certa separazione delle aperture le bande scompariranno del tutto; e oltre questa separazione il sistema dovrebbe riapparire anche se non raggiungendo la sua nitidezza originaria. La scomparsa completa avviene quando il diametro del disco stellare è uguale a $1 \frac{1}{5}$ volte la larghezza delle bande (dal centro di una banda luminosa alla successiva). Come già detto, la larghezza di banda può essere calcolata dalla separazione nota delle aperture.

L'osservazione consiste nel far scorrere le due aperture finché le bande non scompaiono. Il diametro del disco si deduce subito dalla loro separazione al momento

della scomparsa. Sebbene misuriamo la dimensione del disco in questo modo, non *vediamo* mai il disco.

Possiamo riassumere il principio del metodo nel modo seguente. L'immagine di un punto di luce visto attraverso un telescopio non è un punto, ma un piccolo schema di diffrazione. Quindi, se osserviamo un oggetto esteso, diciamo Marte, lo schema di diffrazione sfoca i dettagli fini della marcatura sul pianeta. Se, tuttavia, stiamo osservando una stella che è quasi puntiforme, è più semplice invertire l'idea; l'oggetto, non essendo un punto ideale, sfoca leggermente il dettaglio del modello di diffrazione. Percepiremo la sfocatura solo se il modello di diffrazione contiene dettagli abbastanza fini da risentirne. Betelgeuse, a causa delle sue dimensioni finite, deve teoricamente offuscare un modello di diffrazione; ma il disco di diffrazione ordinario e gli anelli prodotti con il telescopio più grande sono troppo grossolani per mostrarlo. Creiamo un'immagine di diffrazione con dettagli più fini utilizzando due aperture. Teoricamente possiamo rendere il dettaglio il più fine possibile aumentando la separazione delle due aperture. Il metodo consiste quindi nell'ampliare la separazione finché il modello non diventa abbastanza fine da essere percettibilmente offuscato da Betelgeuse. Per un disco stellare più piccolo, lo stesso effetto di sfocatura non sarebbe evidente finché il dettaglio non fosse stato reso ancora più fine da un'ulteriore separazione delle aperture.

Questo metodo fu ideato molto tempo fa dal professor Michelson, ma fu solo nel 1920 che lo provò su larga scala con un grande raggio di 20 piedi attraverso il riflettore da 100 pollici del Mount Wilson Observatory. Dopo molti tentativi, Pease e Anderson riuscirono a dimostrare che le bande luminose e scure di Betelgeuse scomparivano quando le aperture venivano separate di 10 piedi. Il diametro dedotto è 0,045 di un secondo d'arco, in accordo abbastanza buono con il valore previsto. Solo cinque o sei stelle hanno dischi abbastanza grandi da essere misurati con questo strumento. Si è capito che è contemplata la costruzione di un interferometro da 50 piedi; ma anche questo sarà insufficiente per la grande maggioranza delle stelle. Siamo abbastanza certi che il metodo di calcolo descritto prima fornisca i diametri corretti delle stelle, ma è sempre auspicabile una conferma tramite il metodo di misura più diretto di Michelson.

Per dedurre le dimensioni effettive della stella dal suo diametro apparente, dobbiamo conoscerne la distanza. Betelgeuse è una stella piuttosto remota e la sua distanza non può essere misurata con molta accuratezza, ma l'incertezza non cambierà l'ordine di grandezza generale dei risultati. Il diametro è di circa 300 milioni di miglia. Betelgeuse è abbastanza grande da contenere l'intera orbita della Terra al suo interno, forse persino l'orbita di Marte. Il suo volume è circa cinquanta milioni di volte quello del sole.

Non esiste un modo diretto per conoscere la massa di Betelgeuse perché non ha una compagna vicina che potrebbe influenzare il suo moto. Possiamo, tuttavia, dedurre una massa dalla relazione massa-luminosità nella Fig. 7. Ciò fornisce una massa uguale a 35 x sole. Se il risultato è corretto, Betelgeuse è una delle stelle più massive, ma, naturalmente, non massiva in proporzione alla sua dimensione. La densità media è circa un milionesimo della densità dell'acqua, o poco più di un millesimo della densità dell'aria¹.

C'è un modo con cui avremmo potuto dedurre che Betelgeuse è meno densa del sole,

1 Densità inferiori a quella dell'aria sono state trovate per alcune delle variabili Algol tramite un tipo di indagine completamente diverso, e anche per alcune delle variabili Cefeidi tramite un altro metodo ancora. Ci sono anche molti altri esempi di stelle di massa paragonabile a quella di Betelgeuse.

anche se non avessimo avuto basi di teoria o analogia per stimare la sua massa. Secondo la moderna teoria della gravitazione, un globo delle dimensioni di Betelgeuse e della stessa densità media del sole avrebbe alcune proprietà notevoli:

In primo luogo, a causa della grande intensità della sua gravitazione, la luce non sarebbe in grado di sfuggire; e tutti i raggi emessi ricadrebbero sulla stella per il loro stesso peso.

In secondo luogo, lo spostamento di Einstein (utilizzato per testare la densità della Compagna di Sirio) sarebbe così grande che lo spettro verrebbe spostato fuori dall'esistenza.

In terzo luogo, la massa produce una curvatura dello spazio, e in questo caso la curvatura sarebbe così grande che lo spazio si chiuderebbe attorno alla stella, lasciandoci fuori, cioè da nessuna parte.

A parte l'ultima considerazione, sembra piuttosto un peccato che la densità di Betelgeuse sia così bassa.

È ormai ampiamente riconosciuto che le stelle rappresentano un'aggiunta molto importante al laboratorio di fisica, una sorta di annesso ad alta temperatura in cui è possibile studiare il comportamento della materia in condizioni molto estese. Essendo un astronomo, naturalmente pongo la connessione in modo un po' diverso e considero il laboratorio fisico come una stazione a bassa temperatura collegata alle stelle. Sono le condizioni di laboratorio che dovrebbero essere considerate anormali. A parte la nube interstellare che si trova alla temperatura moderata di circa 15.000° , suppongo che nove decimi della materia dell'universo siano superiori a $1.000.000^{\circ}$. In condizioni ordinarie (capirete il mio uso del termine) la materia ha proprietà piuttosto semplici. Ma nell'universo esistono regioni eccezionali, con temperature non molto lontane dallo zero assoluto, dove le proprietà fisiche della materia acquisiscono grande complessità; gli ioni si circondano di sistemi elettronici completi e diventano gli atomi dell'esperienza terrestre. La nostra terra è uno di questi luoghi freddi e qui possono sorgere le complicazioni più strane. Forse la cosa più strana di tutte è che alcune di queste complicazioni possono incontrarsi e speculare sul significato dell'intero schema.

LEZIONE III

L'ETÀ DELLE STELLE

Abbiamo visto che spazialmente la scala dell'uomo è circa a metà strada tra l'atomo e la stella. Sono tentato di fare un paragone simile per quanto riguarda il tempo. La durata della vita di un uomo si colloca forse a metà strada in scala tra la vita di un atomo eccitato e la vita di una stella. Per coloro che insistono su una maggiore accuratezza, anche se non vorrei affermare l'accuratezza delle attuali stime della vita di una stella, modificherei questa un poco. Per quanto riguarda la massa, l'uomo è un po' troppo vicino all'atomo e un pretendente più forte per la posizione intermedia sarebbe l'ippopotamo. Per quanto riguarda il tempo, i settant'anni dell'uomo sono un po' troppo vicini alle stelle, e sarebbe meglio sostituirli con una farfalla.

C'è una lezione morale seria in questa fantasia. Dovremo considerare periodi di tempo che sconvolgono la nostra immaginazione. Temiamo di fare tali bozze sull'eternità. Eppure, l'immensità della scala temporale dell'evoluzione stellare è meno lontana dalla scala dell'esperienza umana di quanto lo sia la minuscola scala temporale dei processi studiati nell'atomo.

Il nostro approccio all'età delle stelle' sarà indiretto, e alcuni problemi incidentali ci tratterranno lungo il percorso.

Stelle Pulsanti

La stella δ Cephei è una delle stelle variabili. Come Algol, la sua luce fluttuante ci invia un messaggio. Ma il messaggio quando viene decodificato non è minimamente simile al messaggio di Algol.

Vorrei dire subito che gli esperti hanno opinioni divergenti sull'interpretazione del messaggio di δ Cephei. Non è questo il luogo per discutere la questione, o per spiegare perché ritengo che interpretazioni rivali non possano essere accettate. Posso solo raccontarvi quella che, secondo me, è la storia corretta. L'interpretazione che seguo è stata suggerita da Plummer e Shapley. Quest'ultimo in particolare l'ha resa molto convincente e gli sviluppi successivi hanno, credo, teso a rafforzarla. Non affermerei, tuttavia, che ogni dubbio sia stato bandito.

Algol si è rivelata essere una coppia di stelle molto vicine tra loro che di tanto in tanto si eclissano a vicenda; δ Cephei è una stella singola che pulsa. È un globo che si gonfia e si contrae simmetricamente con un periodo regolare di 53 giorni. E mentre il globo si gonfia e si contrae causando grandi cambiamenti di pressione e temperatura all'interno, così il flusso di luce emesso aumenta e diminuisce di intensità e varia anche in qualità o colore.

Non si tratta di eclissi; i segnali luminosi non sono sotto forma di 'punti' e 'linee'; e in ogni caso il cambiamento di colore mostra che c'è un cambiamento reale nelle condizioni fisiche della sorgente di luce. Ma all'inizio le spiegazioni hanno sempre dato per scontato che fossero coinvolte due stelle, e miravano a collegare i cambiamenti fisici con un moto orbitale. Ad esempio, si è ipotizzato che la stella principale, nel percorrere la sua orbita,

sfregasse attraverso un mezzo resistente che ne riscaldava la superficie anteriore; quindi la luce della stella variava a seconda che ci venisse presentata la superficie anteriore riscaldata o quella posteriore più fredda. La spiegazione orbitale è ora crollata perché si è scoperto che non c'è letteralmente spazio per due stelle. La presunta orbita era stata elaborata nel solito modo da misure spettroscopiche della velocità di avvicinamento e di allontanamento; più tardi abbiamo iniziato a saperne di più sulle vere dimensioni delle stelle, prima tramite calcoli e poi (per alcune stelle) tramite misure dirette. Si è scoperto che la stella era grande e l'orbita piccola; e la seconda stella, se esisteva, avrebbe dovuto essere posta all'interno della stella principale. Questa sovrapposizione delle stelle è una *reductio ad absurdum* dell'ipotesi binaria, e bisogna trovare qualche altra spiegazione.

Ciò che era stato preso per avvicinamento e recessione della stella nel suo complesso era in realtà avvicinamento e recessione della superficie mentre si sollevava e si abbassava con la pulsazione. Le stelle che variano come δ Cephei sono stelle diffuse enormemente più grandi del sole e lo spostamento totale misurato ammonta solo a una frazione del raggio della stella. Non c'è quindi bisogno di supporre uno spostamento corporeo della stella (moto orbitale); le misure seguono l'oscillazione di quella parte della superficie della stella presentata verso di noi.

La decisione che δ Cephei è una stella singola e non doppia ha una conseguenza immediata. Significa che il periodo di 53 giorni è *intrinseco* nella stella ed è quindi uno degli indizi della sua condizione fisica. È un periodo libero, non forzato. È importante apprezzare il significato di questo. Il numero di macchie solari oscilla da un massimo a un minimo e di nuovo al massimo in un periodo di circa $11 \frac{1}{2}$ anni; anche se non comprendiamo ancora il motivo di questa fluttuazione, ci rendiamo conto che questo periodo è caratteristico del sole nel suo stato attuale e cambierebbe se si verificasse un cambiamento notevole nel sole. Un tempo, tuttavia, si disputava se la fluttuazione delle macchie solari non potesse essere causata dalla rivoluzione del pianeta Giove, il cui periodo non è poi così diverso; se questa spiegazione fosse stata sostenibile, il periodo di $11 \frac{1}{2}$ anni sarebbe stato qualcosa di imposto al sole dall'esterno e non ci avrebbe insegnato nulla sulle proprietà del sole stesso. Dopo esserci convinti che il periodo di luce di δ Cephei è un periodo libero di una singola stella, che le appartiene nello stesso modo in cui una nota particolare appartiene a un diapason, possiamo accettarlo come un valido indicatore della costanza (o meno) delle condizioni fisiche della stella.

Nell'astronomia stellare di solito ci sentiamo molto soddisfatti se riusciamo a determinare i nostri dati (parallasse, raggio, massa, luminosità assoluta, ecc.) entro il 5 per cento; ma la misura di un periodo offre possibilità di accuratezza di gran lunga superiori. Credo che la quantità più accuratamente conosciuta in tutta la scienza (esclusa la matematica pura) sia il periodo medio della luna, che è comunemente dato a dodici cifre significative. Il periodo di δ Cephei può essere trovato ad almeno sei cifre significative. Collegando un periodo osservabile alle condizioni intrinseche di una stella, abbiamo ottenuto un indicatore abbastanza sensibile da mostrare cambiamenti estremamente piccoli. Ora indovinerete perché mi sto avvicinando all'età delle stelle attraverso le variabili Cefeidi. Finora sono le uniche stelle note a portare un indicatore sensibile, con cui potremmo sperare di testare il tasso di cambiamento evolutivo. Crediamo che δ Cephei, come altre stelle, si sia condensata da una nebulosa e che la condensazione e la contrazione

siano ancora in corso. Nessuno si aspetterebbe di rilevare la contrazione tramite le nostre approssimative determinazioni del raggio, anche se continuasse per cento anni; ma l'evoluzione deve essere effettivamente lenta se un periodo intrinseco misurabile a 1 parte su 10.000.000 non mostra alcun cambiamento in un secolo.

Non ha molta importanza se comprendiamo o meno la natura di questo periodo intrinseco. Se una stella si contrae, il periodo di pulsazione, il periodo di rotazione o qualsiasi altro periodo libero ad esso associato, si modificherà. Se si preferisce seguire una qualsiasi delle interpretazioni rivali del messaggio di δ Cefei, si possono apportare le modifiche necessarie alla formulazione del mio argomento, ma il verdetto generale sulla velocità del progresso dell'evoluzione rimarrà invariato. Solo se si stacca il periodo dalla stella stessa, tornando alla vecchia interpretazione della stella doppia, l'argomentazione crolla; ma non credo che nessuno degli interpreti rivali proponga di farlo.

Non sorprende che queste stelle pulsanti siano considerate con particolare interesse. Le stelle ordinarie devono essere osservate con rispetto come gli oggetti nelle teche di vetro nei musei; le nostre dita sono ansiose di pizzicarle e testarne la resilienza. Le stelle pulsanti sono come quegli affascinanti modelli nel Museo della Scienza dotati di un pulsante che può essere premuto per mettere in moto il meccanismo. Essere in grado di vedere il meccanismo di una stella pulsare è molto istruttivo per lo sviluppo della nostra conoscenza.

La teoria di una stella stabile, descritta nella prima lezione, può essere estesa alle stelle pulsanti; e possiamo calcolare il periodo libero di pulsazione per una stella di massa e densità assegnate. Ricorderete che abbiamo già calcolato l'emissione di calore o la luminosità e l'abbiamo confrontata con l'osservazione, ottenendo un test soddisfacente sulla veridicità della teoria; ora possiamo calcolare il periodo di pulsazione e confrontandolo con l'osservazione ottenere un altro test. A causa della mancanza di informazioni su una certa costante della materia stellare, c'è un'incertezza nel calcolo rappresentata da un fattore di circa 2; cioè, calcoliamo due periodi, uno il doppio dell'altro, tra i quali, con un minimo di fortuna dovrebbe trovarsi il periodo vero. La conferma osservativa è molto buona. Ci sono sedici variabili Cefeidi su cui può essere effettuato il test; i loro periodi vanno da 13 ore a 35 giorni e tutti concordano con i valori calcolati entro i limiti di accuratezza previsti. In un modo più indiretto la stessa conferma è mostrata nella Fig. 7 dalla stretta concordanza dei quadrati, che rappresentano le variabili Cefeidi, con la curva teorica.

La Cefeide come una "Candela Standard"

Le variabili Cefeidi dello stesso periodo sono molto simili tra loro. Una Cefeide di periodo $5 \frac{1}{2}$ giorni trovata in qualsiasi parte dell'universo sarà praticamente una replica di δ Cefei; in particolare sarà una stella della stessa luminosità assoluta. Questo è un fatto scoperto tramite osservazione e non è previsto da nessuna parte della teoria ancora esplorata. La luminosità, come abbiamo visto, dipende principalmente dalla massa; il periodo, d'altro canto, dipende principalmente dalla densità; così che la relazione osservata tra luminosità e periodo implica una relazione tra massa e densità. Presumibilmente questa relazione significa che per una data massa c'è solo una densità speciale, uno stadio nel corso della condensazione della stella, in cui è probabile che si

verifichino pulsazioni; ad altre densità la stella può solo bruciare costantemente.

Questa proprietà rende la Cefeide estremamente utile per gli astronomi. Funge da candela standard, una sorgente di potenza luminosa nota.

In un modo ordinario non si può dire la luminosità *reale* di una luce semplicemente guardandola. Se appare fioca, ciò potrebbe significare o una reale debolezza o una grande distanza. Di notte, sul mare, si osservano numerose luci la cui distanza e luminosità reale non è possibile stimare; il giudizio sulla luminosità reale potrebbe essere sbagliato di un fattore di un quintilione se si scambia Arturo per la luce di una nave. Ma tra di loro si potrebbe notare una luce che attraversa una serie regolare di cambiamenti in un certo numero di secondi; questo ci dice che si tratta di un faro, noto per proiettare una luce di tante migliaia di candele. Ora si può stimare con certezza la distanza da noi, a patto, naturalmente, che non ci sia nebbia.



Fig. 11. Ammasso stellare Ω Centauri.

Allo stesso modo, quando guardiamo il cielo, la maggior parte delle luci che vediamo potrebbero trovarsi a qualsiasi distanza e avere una luminosità reale. Anche le misure più raffinate della parallasse riescono a localizzare solo alcune delle luci più vicine. Ma se vediamo una luce che ammicca alla maniera delle Cefeidi con un periodo di 53 giorni, sappiamo che è una replica di δ Cefei ed è una luce di 700 volte la potenza solare. Oppure, se il periodo è un qualsiasi altro numero di giorni, possiamo assegnare la potenza solare appropriata per quel periodo. Da questo possiamo giudicare la distanza. La luminosità apparente, che è una combinazione di distanza e luminosità reale, viene misurata; quindi è un calcolo semplice rispondere alla domanda: a quale distanza deve essere posta una luce di 700 volte la potenza solare per dare la luminosità apparente osservata? Che dire dell'interferenza della nebbia? Sono state fatte discussioni accurate e sembra che, nonostante la nube cosmica nello spazio interstellare, di solito non vi sia alcun assorbimento o dispersione apprezzabile della luce delle stelle nel suo percorso verso di

noi.

Con le Cefeidi che fungono da candele standard, le distanze nell'universo stellare sono state rilevate superando di gran lunga quelle raggiunte dai metodi precedenti. Se le distanze fossero semplicemente quelle delle variabili Cefeidi stesse, ciò non sarebbe così importante, ma vengono fornite molte più informazioni.

La Fig. 11¹ mostra un famoso ammasso stellare chiamato ω Centauri. Tra le migliaia di stelle nell'ammasso sono state scoperte non meno di 76 variabili Cefeidi. Ognuna è una candela standard che serve a misurare la distanza principalmente di se stessa ma anche incidentalmente del grande ammasso in cui si trova. I 76 indicatori concordano meravigliosamente tra loro, con una deviazione media inferiore al 5 percento. In questo modo Shapley ha scoperto che la distanza dell'ammasso è di 20.000 anni luce. I messaggi luminosi che riceviamo oggi sono stati inviati dall'ammasso 20.000 anni fa².

L'astronomo, più di altri devoti della scienza, impara ad apprezzare il vantaggio di non essere troppo vicino agli oggetti che sta studiando. Le stelle più vicine vanno bene a modo loro, ma è un gran fastidio trovarsi proprio in mezzo a loro. Infatti ogni stella deve essere trattata singolarmente e localizzata alla sua giusta distanza mediante elaborate misure; il progresso è molto laborioso. Ma quando determiniamo la distanza di questo ammasso remoto, mettiamo al sicuro in un colpo solo le distanze di molte migliaia di stelle. Essendo nota la distanza, le magnitudini apparenti possono essere trasformate in magnitudini reali, e statistiche e correlazioni di luminosità e colore assoluti possono essere accertate. Anche prima che la distanza venga trovata, possiamo imparare molto dalle stelle negli ammassi, cosa che è impraticabile scoprire da stelle meno remote. Possiamo vedere che le Cefeidi sono molto al di sopra della luminosità media e sono superate da relativamente poche stelle. Possiamo accertare che più luminosa è la Cefeide, più lungo è il suo periodo. Scopriamo che le stelle più luminose di tutte sono rosse.³ C'è un rovescio della medaglia; i minuscoli punti di luce nell'ammasso distante non sono gli oggetti più soddisfacenti da misurare e analizzare, e potremmo risparmiare le stelle più vicine; ma resta il fatto che ci sono certe linee di indagine stellare in cui la lontananza si rivela un vantaggio effettivo, e ci allontaniamo dalle stelle più vicine per rivolgerci a oggetti distanti cinquantamila anni luce.

Sono noti circa 80 ammassi globulari con distanze che vanno da 20.000 a 200.000 anni luce. C'è qualcosa di ancora più remoto? Da tempo si sospetta che le nebulose⁴ a spirale, che sembrano essere estremamente numerose, siano al di fuori del nostro sistema stellare e formino "universi isola" "Le evidenze di ciò sono diventate gradualmente più forti e ora si ritiene che siano decisamente confermate. Nel 1924 Hubble scoprì un certo numero di variabili Cefeidi nella grande nebulosa di Andromeda, che è la più grande e presumibilmente una delle più vicine delle spirali. Non appena i loro periodi furono

1 Da una fotografia scattata al Royal Observatory, Capo di Buona Speranza.

2 Per fare un paragone, la stella fissa più vicina è distante 4 anni luce. A parte gli ammassi, raramente abbiamo a che fare con distanze superiori a 2.000 anni luce.

3 Non si può sempre essere certi che ciò che è vero per le stelle degli ammassi sia vero per le stelle in generale; e la nostra conoscenza delle stelle più vicine, sebbene inferiore a quella delle stelle negli ammassi, non concorda del tutto con questa associazione di colore e luminosità.

4 Il termine nebulosa comprende una varietà di oggetti e solo le nebulose classificate come spirali sono probabilmente al di fuori del nostro sistema stellare.

determinati, furono disponibili come candele standard per misurare la distanza della nebulosa. La loro magnitudine apparente era molto più debole di quella delle corrispondenti Cefeidi negli ammassi globulari, dimostrando che devono essere ancora più remote. Da allora Hubble ha trovato la distanza di una o due altre spirali nello stesso modo.

A occhio nudo si può vedere la nebulosa di Andromeda come una debole macchia di luce. Quando la si guarda, si sta guardando indietro di 900.000 anni nel passato.

L'ipotesi della contrazione

Il problema di fornire sufficienti riserve di energia per mantenere l'emissione di luce e calore del sole è stato spesso dibattuto da astronomi e altri. Nel secolo scorso Helmholtz e Kelvin hanno dimostrato che il sole potrebbe mantenere il suo calore per un tempo molto lungo restringendosi continuamente. La contrazione comporta un avvicinamento o una caduta della materia verso il centro; l'energia potenziale gravitazionale viene così convertita e resa disponibile come calore. Si è ipotizzato che questa fosse l'unica risorsa, poiché non si conosceva nessun'altra fonte in grado di produrre una quantità così grande. Ma la fornitura non è illimitata, e in base a questa ipotesi la nascita del sole deve essere datata non più di 20.000.000 di anni fa. Anche all'epoca di cui sto parlando il limite temporale si è rivelato restrittivo; ma Kelvin ha assicurato ai geologi e ai biologi che devono limitare i loro contorni della storia terrestre a questo periodo.

Verso l'inizio del presente secolo la teoria della contrazione si trovava nella curiosa posizione di essere generalmente accettata e generalmente ignorata. Mentre pochi si avventuravano a contestare l'ipotesi, nessuno sembra aver avuto esitazioni, se gli faceva comodo, nel riportare la storia della terra o della luna a un'epoca molto precedente alla presunta era della formazione del sistema solare. La data della creazione di Lord Kelvin non fu trattata con più rispetto di quella dell'arcivescovo Ussher.

Le gravi conseguenze di questa ipotesi diventano particolarmente evidenti se si considerano le stelle diffuse ad alta luminosità; queste sono prodighe della loro energia e la sprecano cento o mille volte più velocemente del sole. Il sole economico avrebbe potuto sopravvivere con la sua energia di contrazione per 20.000.000 di anni, ma per le stelle ad alta luminosità il limite è ridotto a 100.000 anni. Ciò include la maggior parte delle stelle visibili a occhio nudo. Osiamo credere che si siano formate negli ultimi 100.000 anni? L'antichità dell'uomo è maggiore di quella delle stelle che ora brillano? Le stelle nella nebulosa di Andromeda percorrono il loro corso in meno tempo di quanto la loro luce impiega per raggiungerci?

Una cosa è sentire fastidiosa una limitazione della scala temporale, escludendo idee e spiegazioni altrimenti plausibili e attraenti; un'altra cosa è produrre prove definitive contro la scala temporale. Non credo che gli astronomi avessero *sul loro terreno* un'arma per un attacco diretto all'ipotesi di Helmholtz-Kelvin finché le variabili Cefeidi non ne hanno fornita una. Per venire alle cifre: δ Cephei emette più di 700 volte il calore del sole. Conosciamo la sua massa e il suo raggio, e possiamo calcolare senza difficoltà quanto velocemente il raggio deve contrarsi per fornire questo calore. La velocità richiesta è una parte su 40.000 all'anno. Ora, δ Cephei è stata osservata attentamente per la prima volta nel 1785, quindi nel tempo in cui è stata sotto osservazione il raggio deve essere cambiato di

una parte su 300 se l'ipotesi di contrazione è corretta. Ricordate che abbiamo in δ Cephei un indicatore molto sensibile di qualsiasi cambiamento che si verifica in essa, vale a dire il periodo di pulsazione; chiaramente cambiamenti della suddetta magnitudine non potrebbero verificarsi senza disturbare questo indicatore. Il periodo mostra qualche cambiamento? È dubbio; ci sono forse prove sufficienti per un leggero cambiamento, ma non è più di 1/200 del cambiamento richiesto dall'ipotesi di contrazione.

Accettando la teoria della pulsazione, il periodo dovrebbe diminuire di 17 secondi ogni anno, una quantità facilmente rilevabile. Il cambiamento effettivo non è più di un decimo di secondo all'anno. Almeno durante la fase Cefeide le stelle attingono a qualche fonte di energia diversa da quella fornita dalla contrazione.

Su una questione così importante non vorremmo riporre fiducia implicita in un solo argomento, e ci rivolgiamo alle scienze sorelle per altre e forse più conclusive prove. Le indagini fisiche e geologiche sembrano decidere definitivamente che l'età della terra, calcolata a partire da un'epoca che non risale affatto alle sue origini come pianeta, è di gran lunga maggiore della stima di Helmholtz-Kelvin dell'età del sistema solare. Di solito si dà la massima importanza alla determinazione dell'età delle rocce in base al rapporto del loro contenuto di uranio-piombo. L'uranio si disintegra in piombo ed elio a una velocità nota. Poiché il piombo è diverso dall'uranio nelle proprietà chimiche, i due elementi non verrebbero depositati insieme in modo naturale; quindi il piombo trovato con l'uranio si è presumibilmente formato dalla sua decomposizione¹. Misurando la quantità di piombo presente nell'uranio possiamo determinare quanto tempo fa è stato depositato l'uranio. L'età delle rocce più vecchie è risultata essere di circa 1.200 milioni di anni; alcune autorità hanno sollecitato stime inferiori, ma nessuna abbastanza bassa da salvare l'ipotesi della contrazione. Il sole, ovviamente, deve essere molto più vecchio della terra e delle sue rocce.

Sembra che abbiamo bisogno di una scala temporale che consenta almeno 10.000.000.000 di anni per l'età del sole; certamente non possiamo abbassare le nostre richieste al di sotto di 1.000.000.000 di anni. È necessario cercare una fonte di energia più prolifica per mantenere il calore del sole e delle stelle durante questo periodo prolungato. Possiamo subito restringere il campo di ricerca. Nessuna fonte di energia è di alcuna utilità se non libera calore nelle profondità interne della stella. Il nocciolo del problema non è semplicemente la fornitura di radiazioni, ma il mantenimento del calore interno che impedisce alla massa gravitante di collassare. Ricorderete come nella prima lezione abbiamo dovuto assegnare una certa quantità di calore a ogni punto dell'interno stellare per mantenere la stella in equilibrio. Ma il calore interno scorre continuamente verso l'esterno più freddo e poi sfugge nello spazio come radiazione della stella. Questo, o il suo equivalente, deve essere rimesso a posto se si vuole che la stella sia mantenuta stabile, se non si vuole che si contragga ed evolva alla velocità della scala temporale Kelvin. E non serve a niente rimetterlo sulla superficie della stella, bombardandola con meteore, per esempio. Non potrebbe risalire il gradiente di temperatura, e quindi coglierebbe semplicemente la prima opportunità di fuga come radiazione aggiuntiva. Non è possibile mantenere un gradiente di temperatura fornendo calore all'estremità inferiore. Il calore

¹ Ciò può essere verificato perché il piombo uranio ha un peso atomico diverso dal piombo non così derivato. Il piombo comune è una miscela di diversi tipi di atomi (isotopi).

deve essere immesso all'estremità superiore, vale a dire nel profondo interno della stella.

Poiché non possiamo ben immaginare una fonte estranea di calore in grado di rilasciarsi al centro di una stella, l'idea di una stella che raccoglie energia man mano che procede sembra essere definitivamente esclusa. *Ne consegue che la stella contiene nascosta al suo interno l'energia che deve durare per il resto della sua vita.*

L'energia ha massa. Molte persone preferirebbero dire che l'energia è massa; ma non è necessario che ne discutiamo. Il fatto essenziale è che un erg di energia in qualsiasi forma ha una massa di $1,1 \cdot 10^{-21}$ grammi. L'erg è la consueta unità scientifica di energia; ma possiamo misurare l'energia anche con il grammo o la tonnellata come misuriamo qualsiasi altra cosa che possiede massa. Non c'è una vera ragione per cui non si dovrebbe acquistare una libbra di luce da una compagnia elettrica, se non che si tratta di una quantità maggiore di quella di cui probabilmente si ha bisogno e, ai prezzi attuali, costerebbe qualcosa come 100.000.000 di sterline. Se si potesse far viaggiare tutta questa luce (onde di etere) avanti e indietro tra specchi formanti un recipiente chiuso, e poi pesare il recipiente, il peso osservato sarebbe il peso ordinario del recipiente più 1 libbra che rappresenta il peso della luce. È evidente che un oggetto che pesa una tonnellata non può contenere più di una tonnellata di energia; e il sole con una massa di 2.000 quadrilioni di tonnellate non può contenere più di 2.000 quadrilioni di tonnellate di energia al massimo.

Un'energia di $1,8 \cdot 10^{54}$ erg ha una massa di $2 \cdot 10^{33}$ grammi, che è la massa del sole; di conseguenza, questa è la somma totale dell'energia contenuta nel sole, l'energia che deve durare per tutto il resto della sua vita¹. Non sappiamo quanto di questa sia in grado di essere convertita in calore e radiazione; se è tutta convertibile, ce n'è abbastanza per mantenere la radiazione solare al tasso attuale per 15 miliardi di anni. Per dirla in un'altra forma, il calore emesso dal sole ogni anno ha una massa di 120 miliardi di tonnellate; e se questa perdita di massa continuasse, non ci sarebbe più massa alla fine di 15 miliardi di anni.

Energia Subatomica

Questa riserva di energia è, con insignificanti eccezioni, energia di costituzione di atomi ed elettroni; vale a dire, energia subatomica. La maggior parte di essa è inerente alla costituzione di elettroni e protoni, le cariche elettriche elementari negative e positive, da cui è costituita la materia; così che non può essere liberata a meno che queste non vengano distrutte. La principale riserva di energia in una stella non può essere utilizzata per la radiazione a meno che la materia che compone la stella non venga annientata.

È possibile che la stella possa avere una vita abbastanza lunga senza saccheggiare la riserva energetica principale. Una piccola parte della riserva può essere rilasciata da un processo meno drastico dell'annichilazione della materia, e questo potrebbe essere sufficiente a far bruciare il sole per circa 10.000.000.000 di anni, che è forse il periodo più

¹ Potreste chiedervi perché, dopo aver detto che il sole contiene al massimo 2.000 quadrilioni di tonnellate di energia, ora suppongo che contenga proprio questa quantità. In realtà è solo un punto verbale che dipende dalla definizione scientifica di energia. Tutta la massa è massa di qualcosa, e ora chiamiamo quel qualcosa "energia", che sia una delle forme di energia familiari o meno. Nella frase successiva vedrete che non suppongo che l'energia sia convertibile in forme note, quindi è una terminologia che non ci impegna in nulla.

lungo di cui possiamo ragionevolmente aver bisogno. Il processo meno drastico è la trasmutazione degli elementi. Abbiamo quindi raggiunto un punto in cui ci si presenta una scelta aperta: possiamo o affidare la nostra fede alla trasmutazione degli elementi, accontentandoci di una scala temporale piuttosto angusta, oppure possiamo supporre l'annichilazione della materia, il che fornisce una scala temporale molto ampia. Ma al momento non vedo alcuna possibilità di una terza scelta. Lasciatemi ripercorrere l'argomento. Per prima cosa abbiamo scoperto che l'energia di contrazione era irrimediabilmente inadeguata; poi abbiamo scoperto che l'energia deve essere rilasciata all'interno della stella, in modo che provenga da una fonte interna, non esterna; ora facciamo il punto dell'intera riserva interna di energia. Non si trova alcuna riserva di qualche importanza finché non si considerano gli elettroni e i nuclei atomici; qui una quantità ragionevole può essere rilasciata raggruppando i protoni e gli elettroni nei nuclei atomici (trasmutazione degli elementi) e una quantità molto maggiore annientandoli.

La trasmutazione degli elementi, da sempre il sogno dell'alchimista, si realizza nella trasformazione delle sostanze radioattive. L'uranio si trasforma lentamente in una miscela di piombo ed elio. Ma nessuno dei processi radioattivi conosciuti libera abbastanza energia da mantenere il calore del sole. L'unica importante liberazione di energia tramite trasmutazione avviene proprio all'inizio dell'evoluzione degli elementi.

Dobbiamo iniziare con l'idrogeno. L'atomo di idrogeno è costituito semplicemente da una carica positiva e una negativa, un protone per il nucleo più un elettrone planetario. Chiamiamo la sua massa 1. Quattro atomi di idrogeno formeranno un atomo di elio. Se la massa dell'atomo di elio fosse esattamente 4, ciò mostrerebbe che tutta l'energia degli atomi di idrogeno è rimasta nell'atomo di elio. Ma in realtà la massa è 3,97; quindi quell'energia di massa 0,03 deve essere sfuggita durante la formazione dell'elio dall'idrogeno. Annichilando 4 grammi di idrogeno avremmo dovuto rilasciare 4 grammi di energia, ma trasmutandolo in elio rilasciamo 0,03 grammi di energia. Entrambi i processi potrebbero essere utilizzati per fornire il calore del sole, anche se, come abbiamo già affermato, il secondo ne fornisce assai meno.

Il rilascio di energia avviene perché nell'atomo di elio solo due dei quattro elettroni rimangono come elettroni planetari, gli altri due sono cementati con i quattro protoni vicini nel nucleo di elio. Avvicinando cariche positive e negative si provoca un cambiamento dell'energia del campo elettrico e si rilascia energia elettrica che si diffonde come onde di etere. Ecco dove sono andati a finire gli 0,03 grammi di energia. La stella può assorbire queste onde di etere e utilizzarle come calore.

Possiamo passare dall'elio a elementi superiori, ma non otteniamo molta più emissione di energia. Ad esempio, un atomo di ossigeno può essere fatto da 16 atomi di idrogeno o 4 atomi di elio; ma per quanto ne sappiamo ha solo il peso dei 4 atomi di elio, così che il rilascio di energia non è apprezzabilmente maggiore quando l'idrogeno è trasmutato in ossigeno rispetto a quando è trasmutato in elio¹. Ciò diventa più chiaro se prendiamo la massa di un atomo di idrogeno pari a 1,008, così che la massa dell'elio sia esattamente 4 e quella dell'ossigeno 16; allora è noto dalle ricerche del dott. Aston con lo spettrografo di massa che gli atomi di altri elementi hanno masse che sono molto vicine a numeri interi.

1 Nelle sue ultime ricerche Aston è riuscito a rilevare che l'atomo di ossigeno è appena sensibilmente più leggero dei quattro atomi di elio.

La perdita di 0,008 per atomo di idrogeno si applica approssimativamente a qualsiasi elemento che si forma.

La visione secondo cui l'energia di una stella deriva dalla costruzione di altri elementi dall'idrogeno ha il grande vantaggio che non vi è alcun dubbio sulla possibilità del processo; mentre non abbiamo alcuna prova che l'annichilazione della materia possa verificarsi in Natura. Non mi riferisco alla presunta trasmutazione dell'idrogeno in elio in laboratorio; coloro la cui autorità accetto non sono convinti da questi esperimenti. A mio avviso l'esistenza dell'elio è la migliore prova che potremmo desiderare della possibilità della formazione dell'elio. I quattro protoni e i due elettroni che costituiscono il suo nucleo devono essere stati assemblati in un momento e in un luogo; e perché non nelle stelle? Quando sono stati assemblati, l'energia in eccesso deve essere stata rilasciata, fornendo una prolifica fornitura di calore. A prima vista, questo suggerisce l'interno di una stella come probabile localizzazione, poiché senza dubbio lì è in funzione una prolifica fonte di calore. Sono consapevole che molti critici considerano le condizioni nelle stelle non sufficientemente estreme per provocare la trasmutazione: le stelle non sono abbastanza calde. I critici si espongono a un'ovvia replica: diciamo loro di andare a cercare un posto più caldo.

Ma qui il vantaggio sembra finire. Ci sono molte indicazioni astronomiche che l'ipotesi che attribuisce l'energia delle stelle alla trasmutazione dell'idrogeno è insoddisfacente. Potrebbe forse essere responsabile della rapida liberazione di energia nelle fasi iniziali (giganti) quando la stella è un grande corpo diffuso che irradia calore in abbondanza; ma l'energia nella vita successiva sembra provenire da una fonte soggetta a diverse leggi di emissione. Ci sono prove considerevoli che, quando una stella invecchia, si libera di una grande frazione della materia che la costituiva originariamente, e apparentemente questo può essere avvenuto solo tramite l'annichilazione della materia. Le prove, tuttavia, non sono molto coerenti e non penso che siamo in grado di giungere a una decisione definitiva. Nel complesso l'ipotesi dell'annichilazione della materia sembra la più promettente; e la preferirò nella breve discussione sull'evoluzione stellare che mi propongo di fornire.

L'espressione "annichilazione della materia" suona come qualcosa di soprannaturale. Non sappiamo ancora se può verificarsi naturalmente o meno, ma non c'è alcun ostacolo evidente. I costituenti ultimi della materia sono minuscole cariche positive e negative che possiamo immaginare come centri di tipi opposti di tensione nell'etere. Se si potesse convincerli a scorrere insieme, si annullerebbero, lasciando solo uno schizzo nell'etere che si diffonderebbe come un'onda elettromagnetica portando via l'energia rilasciata dall'annullamento della tensione. La quantità di questa energia è incredibilmente grande; annientando una sola goccia d'acqua dovremmo essere riforniti di 200 cavalli-vapore per un anno. Rivolgiamo occhi avidi a questa riserva senza, tuttavia, nutrire grandi speranze di scoprire mai il segreto per liberarla. Se si dimostrasse che le stelle hanno scoperto il segreto e stanno usando questa riserva per mantenere il calore, la nostra prospettiva di successo finale sembrerebbe decisamente più vicina.

Immagino che molti fisici considereranno l'argomento dell'energia subatomica come un campo di speculazione aerea. Non è questo il modo in cui si presenta a un astronomo. Se si concede che le stelle evolvono molto più lentamente rispetto all'ipotesi di contrazione, la misura dell'emissione di energia subatomica è una delle misure astronomiche più comuni:

la misura del calore o della luce delle stelle.¹ La raccolta di dati osservativi sull'attività di liberazione dell'energia subatomica fa parte della routine dell'astronomia pratica; e dobbiamo seguire il consueto corso di organizzazione delle misure in una sorta di coerenza, in modo da scoprire come l'output è correlato alla temperatura, alla densità o all'età della materia che lo fornisce, in breve, per scoprire le leggi dell'emissione. Da questo punto in poi la discussione potrà essere più o meno ipotetica, a seconda del temperamento del ricercatore; ed è infatti probabile che in questo come in altri rami della conoscenza si possano fare progressi grazie a un uso appropriato dell'immaginazione scientifica. In questo come in qualsiasi altro argomento, le vane speculazioni sono da condannare e non ce n'è alcun bisogno; il problema è quello dell'induzione dall'osservazione, tenendo in debita considerazione la nostra conoscenza teorica delle possibilità insite nella struttura atomica.

Non posso passare da questo argomento senza menzionare la radiazione penetrante da tempo nota esistente nella nostra atmosfera, che secondo le ricerche di Kohlhörster e Millikan proviene dallo spazio esterno. Il potere di penetrazione è un segno di lunghezza d'onda corta e di intensa concentrazione di energia. Finora il più grande potere di penetrazione è stato mostrato dai raggi gamma originati da processi subatomici che si verificano in sostanze radioattive. La radiazione cosmica è ancora più penetrante e sembra ragionevole riferirla a processi più energetici nell'atomo, come quelli suggeriti per la sorgente di energia stellare. Millikan ha effettuato misure accurate e ha concluso che le proprietà concordano con quelle che dovrebbero essere possedute dalla radiazione liberata nella trasmutazione dell'idrogeno; non è abbastanza penetrante da essere attribuita a un processo così energetico come l'annichilazione di protoni ed elettroni.

Non sembra esserci alcun dubbio che questa radiazione stia viaggiando verso il basso dal cielo. Ciò è dimostrato dalle misure della sua intensità a diverse altezze nell'atmosfera e a diverse profondità sotto la superficie dei laghi di montagna; si indebolisce a seconda della quantità di aria o acqua che ha dovuto attraversare. Presumibilmente la sua origine deve essere extraterrestre. La sua intensità non varia con l'altitudine del sole, quindi non proviene dal sole. Ci sono alcune evidenze di variazione a seconda della posizione della Via Lattea, la maggior parte della radiazione viene ricevuta quando la massima estensione del sistema stellare è in alto. Non può provenire dall'interno delle stelle, essendo il potere di penetrazione troppo limitato; tutta la materia più calda e densa dell'universo è separata da noi da mura impenetrabili. Al massimo potrebbe provenire solo dalla scorza esterna delle stelle, dove la temperatura è moderata e la densità è bassa; ma è più probabile che la sua fonte principale sia nelle nebulose diffuse o forse nella materia che forma la nube generale nello spazio.²

Dobbiamo attendere ulteriori sviluppi prima di poter considerare la presunta origine subatomica di questa radiazione come qualcosa di diverso da una speculazione; la

1 Una misura del calore osservato fluire da una sorgente continua di calore è una misura dell'emissione della sorgente, a meno che non vi sia un accumulo di energia. La ripartizione della scala temporale Kelvin indica che l'accumulo nelle stelle (positivo o negativo) e la conseguente espansione o contrazione è trascurabile rispetto all'emissione o al deflusso.

2 Le stelle messe insieme coprono un'area del cielo molto inferiore al disco apparente del sole, quindi, a meno che i loro strati superficiali non generino questa radiazione in maniera molto più abbondante del sole, non possono esserne responsabili.

menzioniamo qui solo come una possibile apertura al progresso. Sarà di grande interesse se potremo raggiungere con questo mezzo una conoscenza più diretta dei processi che supponiamo siano la fonte dell'energia stellare; e i messaggi che ci vengono trasmessi dai raggi cosmici che pretendono di essere correlati a questi processi meritano la massima attenzione. Le nostre opinioni sull'energia stellare saranno probabilmente influenzate da un punto cruciale. Finora abbiamo solitamente supposto che la temperatura molto elevata all'interno di una stella sia una delle condizioni essenziali per la liberazione di energia subatomica e che anche una densità ragionevolmente elevata sia importante. Teoricamente sembrerebbe quasi incredibile che la formazione di elementi superiori o l'annichilazione di protoni ed elettroni possa procedere con un certo grado di vigore in regioni dove gli incontri sono rari e non c'è un'alta temperatura o una radiazione intensa che possa risvegliare gli atomi dall'apatia; ma più affrontiamo le difficoltà di tutte le teorie sul rilascio di energia subatomica, meno siamo inclini a condannare qualsiasi prova come incredibile. La presenza di sodio e calcio nella nube cosmica, di elio e nebulio nelle nebulose diffuse, di titanio e zirconio in grandi quantità nelle atmosfere delle stelle più giovani, testimonia che l'evoluzione degli elementi è già molto avanzata durante la fase protostellare diffusa, a meno che il nostro universo non sia costruito dai detriti di una creazione precedente. Da questo punto di vista è appropriato che noi discerniamo i sintomi dell'attività subatomica nello spazio aperto. Ma il fisico potrebbe anche scuotere la testa di fronte al problema. Come possono quattro protoni e due elettroni riunirsi per formare un nucleo di elio in un mezzo così raro che il percorso libero dura per giorni? L'unica consolazione è che la modalità di questo evento è (secondo le attuali conoscenze) così inconcepibile in qualsiasi condizione di densità e temperatura che possiamo postularla nelle nebulose, partendo dal principio che potremmo essere impiccati per una pecora piuttosto che per un agnello.

Evoluzione delle stelle

Vent'anni fa l'evoluzione stellare sembrava molto semplice. Le stelle iniziano ad essere molto calde e gradualmente si raffreddano fino a spegnersi.

In questa visione la temperatura di una stella indicava lo stadio di evoluzione che aveva raggiunto. Il profilo della sequenza era sufficientemente indicato dall'osservazione grossolana del colore: bianco-caldo, giallo-caldo, rosso-caldo; un ordine più dettagliato di temperatura era accertato esaminando la luce con uno spettroscopio. Le stelle rosse naturalmente arrivarono per ultime nella sequenza; erano le stelle più vecchie sull'orlo dell'estinzione. Sir Norman Lockyer si oppose fermamente a questo schema e in larga misura anticipò la visione più moderna; ma la maggior parte degli astronomi vi ripose la propria fede fino al 1913 circa.

Dieci anni fa si erano acquisite maggiori conoscenze sulle densità delle stelle. Sembrava probabile che la densità sarebbe stata un criterio più diretto dello sviluppo evolutivo rispetto alla temperatura. Concesso che una stella si condensi da materiale nebuloso, deve essere molto diffusa nella fase più giovane; da quella fase si contrarrà e aumenterà costantemente di densità.

Ma ciò richiede un'intera riorganizzazione dello schema evolutivo, perché l'ordine in base alla densità non è affatto lo stesso dell'ordine in base alla temperatura superficiale.

Nella prima visione tutte le stelle rosse fredde erano vecchie e morenti. Ma ora si scopre che un gran numero di esse sono estremamente diffuse, stelle come Betelgeuse, per esempio. Queste devono essere considerate le stelle più giovani; dopotutto non è innaturale che una stella che sta appena iniziando a condensarsi da materiale nebuloso debba iniziare allo stadio più basso di temperatura. Non tutte le stelle rosse sono diffuse; ce ne sono molte come Krueger 60 che hanno un'alta densità, e queste le lasciamo indisturbate come rappresentanti l'ultimo stadio dell'evoluzione. Sia il primo che l'ultimo periodo della vita di una stella sono caratterizzati da basse temperature; nel frattempo la temperatura deve essere salita fino a un massimo e poi essere nuovamente scesa.

La teoria delle stelle giganti e nane proposta da Hertzsprung e Russell ha portato queste conclusioni in un ordine eccellente. Ha riconosciuto una serie di stelle *giganti*, stelle relativamente diffuse con temperatura in aumento e una serie di stelle *nane* o dense con temperatura in calo. Le due serie si sono fuse alle temperature più elevate. Una singola stella durante la sua vita è salita nella serie delle giganti fino alla sua temperatura più elevata e poi è scesa nella serie delle nane. La luminosità è rimasta abbastanza costante durante la fase gigante perché la temperatura in continuo aumento controbilanciava la riduzione della superficie della stella; nella fase nana la temperatura calante e la contrazione della superficie causavano una rapida diminuzione della luminosità man mano che la stella avanzava lungo la serie. Ciò era in accordo con l'osservazione. La teoria ha dominato la maggior parte delle ricerche astrofisiche più recenti ed è stata determinante nel portare alla luce molti fatti importanti. Un esempio deve bastare. Sebbene potremmo avere una stella gigante e una nana con la stessa temperatura superficiale, e quindi con spettri molto simili, tuttavia un esame attento dello spettro mostra differenze rivelatrici; ed è ora abbastanza facile accertare dallo spettro se la stella è una gigante diffusa o una nana densa.

La caratteristica attrattiva della teoria delle giganti e delle nane era la semplice spiegazione data per il progresso crescente e decrescente della temperatura. Il passaggio dalla serie delle giganti a quella delle nane avrebbe dovuto verificarsi quando la densità avesse raggiunto un valore tale (circa un quarto della densità dell'acqua) che la deviazione del materiale da un gas perfetto avrebbe iniziato a essere seria. Cinquant'anni fa Lane dimostrò che un globo di gas perfetto deve aumentare di temperatura mentre si contrae, e il suo metodo per trovare la temperatura interna è quello preso in considerazione; quindi è previsto l'aumento della temperatura nella fase gigante. Ma l'aumento dipende essenzialmente dalla facile comprimibilità del gas; e quando la comprimibilità viene persa ad alta densità, ci si può aspettare che la temperatura crescente lasci il posto a una temperatura decrescente, così che la stella si raffreddi come farebbe un solido o un liquido. Si credeva che ciò spiegasse lo stadio di nana.

Ho cercato di ricordare idee di venti e dieci anni fa e non dovette supporre che, dal punto di vista delle conoscenze attuali, io possa approvare tutto ciò che qui è enunciato. Sono stato volutamente vago nel dire se con calore di una stella intendo la temperatura interna o quella superficiale, poiché in passato le idee su questo punto erano molto vaghe; non ho fatto alcun riferimento alle nane bianche, che ora si ritiene siano le stelle più dense e presumibilmente più antiche di tutte. Ma è soprattutto l'ultimo paragrafo a entrare in conflitto con le nostre ultime conclusioni, perché non ammettiamo più che il materiale

stellare cesserà di comportarsi come un gas perfetto a un quarto della densità dell'acqua. Il nostro risultato secondo cui il materiale nelle stelle nane dense è ancora un gas perfetto infligge un colpo mortale a questa parte della teoria delle stelle giganti e nane.

Sarebbe difficile dire quale sia la teoria accettata dell'evoluzione stellare oggi. La teoria è in fase di miscuglio e stiamo ancora aspettando che emerga qualcosa di soddisfacente. L'intero argomento è in dubbio e siamo disposti a riconsiderare quasi tutto. Provvisoriamente, tuttavia, darò per scontato che la precedente teoria sia corretta nell'assumere che la sequenza dell'evoluzione vada dalle stelle più diffuse a quelle più dense. Sebbene io faccia questa ipotesi, non sono sicuro che sia ammissibile. La precedente teoria aveva forti ragioni a sostegno, che non sono più valide. Finché si supposeva che la contrazione fosse la fonte del calore di una stella, la contrazione e l'aumento della densità erano essenziali per tutto il suo avanzamento; con l'accettazione dell'energia subatomica la contrazione cessa di svolgere questo ruolo fondamentale.

Propongo di limitare l'attenzione alle stelle nane¹ perché è tra loro che si è verificato il ribaltamento. Esse formano una serie ben definita che si estende da alta temperatura superficiale a bassa temperatura superficiale, da alta luminosità a bassa luminosità, e la densità aumenta costantemente lungo la serie. Ora la chiamiamo Serie Principale. Comprende la grande maggioranza delle stelle. Per fissare le idee prendiamo tre stelle tipiche lungo la serie: Algol vicino alla parte alta, il Sole vicino al centro e Krueger 60 vicino alla parte bassa. Le informazioni rilevanti su di esse sono riassunte di seguito:

<i>Stella</i>	<i>Massa</i> (Sole =1)	<i>Densità</i> <i>media</i> (Acqua =1)	<i>Temperatura</i> <i>centrale</i> (milione di °)	<i>Temperatura</i> <i>superficiale</i> (°)	<i>Colore</i>	<i>Luminosità</i> (Sole=1)
Algol	4,3	0,15	40	12000	bianca	150
Sole	1	1,4	40	6000	gialla	1
Krueger 60	0,27	9,1	35	3000	rossa	0,01

L'idea di evoluzione è che queste rappresentino le fasi attraversate nella vita di una singola stella². Da notare la densità crescente nella terza colonna; secondo il nostro criterio accettato indica che l'ordine di sviluppo è Algol→Sole→Krueger 60.

Una confusione tra temperatura interna e temperatura superficiale è responsabile di alcuni degli errori delle vecchie teorie. A giudicare dall'esterno, la stella si raffredda da 12.000° a 3.000° nel passaggio lungo la serie, ma non c'è alcun cambiamento del genere nel suo calore interno. La temperatura centrale rimane sorprendentemente stabile. (Non si può fare particolare affidamento sulla leggera caduta apparentemente mostrata da Krueger 60.) È davvero notevole che tutte le stelle della serie principale abbiano una temperatura centrale di circa 40 milioni di gradi, per quanto possiamo calcolare. È difficile

1 Il termine "stelle nane" non intende includere le nane bianche.

2 Possiamo difficilmente supporre che tutte le stelle dopo aver raggiunto la serie principale attraversino esattamente le stesse fasi. Ad esempio, Algol, quando si è ridotta alla massa del Sole, potrebbe avere densità e temperatura leggermente diverse. Ma le prove osservative indicano che queste differenze individuali sono piccole. La serie principale è quasi una sequenza lineare; deve avere una certa 'ampiezza' così come una 'lunghezza', ma al momento la dispersione delle singole stelle lontano dalla linea centrale della sequenza sembra essere dovuta principalmente ai probabili errori dei dati osservativi e la vera ampiezza non è stata determinata.

resistere all'impressione che ci sia qualche insolita proprietà associata a questa temperatura, sebbene tutti i nostri istinti fisici ci avvertano che l'idea è assurda.

Ma il punto cruciale è la diminuzione di massa mostrata nella seconda colonna. Se una singola stella deve progredire in qualsiasi parte della serie principale, deve perdere massa. Possiamo esprimere la stessa inferenza in modo più generale. Ora che si è scoperto che la luminosità dipende principalmente dalla massa, non può esserci un'importante evoluzione delle stelle deboli da quelle luminose a meno che le stelle non perdano una parte considerevole della loro massa.

È questo risultato che ha fatto sì che l'ipotesi dell'annichilazione della materia venisse seriamente messa in discussione. Ogni progresso nella teoria dell'evoluzione stellare è sospeso in attesa di una decisione su questa ipotesi. Se viene accettata, fornisce una facile chiave per questi cambiamenti. La stella può (dopo aver attraversato lo stadio gigante) raggiungere lo stadio di Algol, e poi con la graduale annichilazione della materia in essa contenuta passare lungo la serie principale finché, quando rimane solo un sedicesimo della massa originale, sarà una debole stella rossa come Krueger 60. Ma se non c'è annichilazione di materia, la stella, una volta raggiunto lo stadio di nana, sembra essere immobile; deve rimanere nel punto della serie corrispondente alla sua massa costante.

Sia chiaro qual è il punto in questione. Le stelle perdono massa a causa della loro radiazione; non c'è dubbio su questo. Il sole perde 120 miliardi di tonnellate all'anno, indipendentemente dal fatto che la sua radiazione provenga dall'annichilazione della materia o da qualsiasi altra fonte interna. La domanda è, per quanto tempo può continuare questa perdita? A meno che non ci sia annichilazione della materia, tutta la massa che può sfuggire come radiazione lo farà in un tempo relativamente breve; il sole sarà allora estinto e ci sarà una fine alla perdita e all'evoluzione. Ma se c'è annichilazione della materia la vita del sole e la perdita di massa continueranno molto più a lungo, e un'estesa traccia evolutiva si aprirà davanti al sole; quando si sarà liberato di tre quarti della sua massa attuale sarà diventato una debole stella come Krueger 60.

La nostra scelta tra le possibili teorie dell'energia subatomica riguarda solo un punto dell'evoluzione stellare, ma è il punto cruciale. A meno che non scegliamo l'annichilazione della materia, accorciamo la vita di una stella così tanto che non c'è tempo per alcuna evoluzione significativa.

Sento la stessa obiezione che tutti devono provare a costruire ampiamente su un processo ipotetico senza alcuna prova diretta che le leggi della Natura ne permettano l'accadimento. Ma l'alternativa è lasciare le stelle in una sonnolenta uniformità senza alcuna prospettiva di sviluppo o cambiamento finché le loro vite non giungono alla fine. Qualcosa è necessario per galvanizzare la scena in questa attività, sia di progresso che di decadenza, in cui abbiamo creduto per così tanto tempo. Piuttosto disperatamente cogliamo l'unica possibilità visibile. Il sistema pietrificato cede. Le particelle ultime, una alla volta, cedono la loro energia e scompaiono dall'esistenza. Il loro sacrificio è la forza vitale delle stelle che ora procedono nella loro grande avventura:

Atomi o sistemi gettati in rovina,
E ora esplode una bolla, e ora un mondo.

Radiazione di massa

La nostra prima prova dell'estensione della scala temporale dell'evoluzione stellare è stata fornita dalla stabilità delle condizioni di δ Cephei. Questa è stata integrata dalla prova della grande estensione del tempo geologico sulla Terra. Non potevamo fare di più che stabilire un limite superiore al tasso di progresso dell'evoluzione e un limite inferiore all'età delle stelle. Ma questo limite era sufficiente per escludere l'ipotesi di contrazione e spingerci a considerare la riserva di energia subatomica.

Ora facciamo un nuovo attacco, che si basa sulla convinzione che il tasso di evoluzione sia determinato dal tasso a cui una stella può liberarsi della sua massa. Qui stiamo considerando solo l'evoluzione da stelle deboli a stelle luminose, e rimarrà spazio per una certa quantità di sviluppo nella fase gigante a cui i nostri argomenti non si applicheranno direttamente. Ma abbandonare tutte le linee di evoluzione tra stelle luminose e stelle deboli significherebbe ammettere che una stella differisce da un'altra in luminosità perché diversa inizialmente. Questo può essere vero; ma non dovremmo rinunciare al campo principale dell'evoluzione stellare senza combattere per esso.

Con la nuova linea di attacco raggiungiamo una determinazione precisa della scala temporale e non semplicemente un limite inferiore. Sappiamo a quale velocità le stelle in ogni fase perdono massa per radiazione; quindi possiamo trovare il tempo impiegato per perdere una data massa e quindi passare a una fase di massa inferiore. L'evoluzione da Algol al Sole richiede cinque miliardi di anni; l'evoluzione dal Sole a Krueger 60 richiede 500 miliardi di anni. È interessante notare che le stelle nella fase tra il Sole e Krueger 60 sono molto più abbondanti di quelle tra Algol e il Sole, un fatto che in qualche modo conferma la durata calcolata delle due fasi. L'abbondanza di stelle deboli non aumenta, tuttavia, così rapidamente come la durata calcolata; forse l'universo stellare non è esistito abbastanza a lungo perché le vecchie stelle fossero pienamente rappresentate.

Una stella di massa maggiore di Algol spreca la sua massa molto rapidamente, così che non aumentiamo l'età del Sole in modo apprezzabile supponendo che abbia iniziato con una massa maggiore di Algol. Il limite superiore all'età attuale del Sole è di 5,2 miliardi di anni, per quanto grande sia la sua massa iniziale.

Ma, ci si potrebbe chiedere, una stella non può accelerare il suo progresso liberandosi della materia in un modo diverso dalla radiazione? Gli atomi non possono sfuggire dalla sua superficie? Se così fosse, la perdita di massa e la conseguente evoluzione saranno accelerate, e il tempo richiesto potrebbe forse persino essere portato nell'ambito della teoria alternativa della trasmutazione degli elementi. Ma è abbastanza certo che la massa che sfugge sotto forma di atomi materiali è trascurabile rispetto a quella che scivola via impercettibilmente sotto forma di radiazione. Forse ci saranno dei dubbi se i 120 miliardi di tonnellate all'anno persi dal sole sotto forma di radiazione siano (astronomicamente considerati) una grande quantità o una piccola quantità. Da certi aspetti è una grande quantità. È più di 100.000 volte la massa della cromosfera di calcio. Il sole dovrebbe soffiare via la sua cromosfera e formarne una completamente nuova ogni cinque minuti per liberarsi in questo modo di tanta massa quanta ne perde per radiazione. È ovvio dall'osservazione solare che non c'è una tale fuoriuscita di materiale. Per dirla in un altro modo, per dimezzare la scala temporale dell'evoluzione sopra indicata, sarebbe necessario

che un miliardo di atomi fuoriuscissero ogni secondo attraverso ogni centimetro quadrato della superficie del sole. Penso che possiamo concludere che non esiste una scorciatoia per ottenere una massa più piccola e che la radiazione è responsabile praticamente dell'intera perdita.

Abbiamo notato prima che la Natura costruisce stelle che sono molto simili in massa, ma si permette qualche deviazione dal suo schema che a volte equivale a un errore di uno o. Penso che potremmo averle fatto un'ingiustizia, e che sia più attenta al suo lavoro di quanto supponessimo. Avremmo dovuto esaminare le monete appena uscite dalla sua zecca; non era giusto prendere monete in modo promiscuo, comprese molte che erano in circolazione da alcune centinaia di miliardi di anni e si erano consumate piuttosto sottili. Prendendo le stelle di recente formazione, vale a dire le stelle diffuse, scopriamo che il 90 per cento di esse ha una massa compresa tra 23 e 53 volte quella del sole, il che dimostra che inizialmente le stelle sono fatte quasi quanto lo sono gli esseri umani. In questo intervallo la pressione di radiazione aumenta dal 17 al 35 per cento della pressione totale; penso che ci si aspetterebbe che questa fosse la fase cruciale nella sua ascesa all'importanza. La nostra idea è che le masse stellari inizialmente abbiano questa uniformità piuttosto stretta (che non esclude una piccola proporzione di stelle eccezionali al di fuori dei limiti di cui sopra); le masse più piccole si evolvono da queste nel corso del tempo tramite la radiazione di massa.

Per il momento il sole è comodamente sistemato nel suo stato attuale, la quantità di energia irradiata è appena bilanciata dall'energia subatomica liberata al suo interno. Alla fine, tuttavia, deve andare avanti. L'andare avanti, o evoluzione, è continuo, ma per comodità di spiegazione ne parleremo come se si verificasse a tappe. Si possono immaginare due possibili motivi per il cambiamento: (1) la fornitura di energia subatomica potrebbe diminuire per esaurimento e non bilanciare più la radiazione, e (2) il sole sta lentamente diventando una stella di massa più piccola. Nelle teorie precedenti si è generalmente dato per scontato il primo motivo, e possiamo ancora considerarlo efficace durante la fase gigante delle stelle; ma è chiaro che il motivo per spostarsi lungo la serie principale deve essere la perdita di massa¹. Apparentemente la distinzione tra stelle giganti e nane, che sostituisce la vecchia distinzione tra gas perfetto e imperfetto, è che le abbondanti e presto esaurite riserve di energia subatomica nello stadio di gigante scompaiono e lasciano una riserva molto più stabile nello stadio di nana.

Quando il sole sarà diventato una stella di massa più piccola, dovrà ristabilire le sue condizioni interne. Supponiamo che all'inizio cerchi di mantenere la sua densità attuale. Come spiegato, possiamo calcolare la temperatura interna e scopriamo che la massa ridotta accoppiata a densità costante comporta una temperatura più bassa. Ciò chiuderà leggermente il rubinetto dell'energia subatomica, perché non ci sono dubbi che il rilascio di energia subatomica sia più rapido a temperature più elevate. La fornitura ridotta non sarà più sufficiente a bilanciare la radiazione; di conseguenza la stella si contrarrà proprio come avrebbe dovuto fare secondo la vecchia ipotesi di contrazione che corrisponde alla chiusura totale del rubinetto dell'energia subatomica. Il motivo è la perdita di massa; la prima conseguenza è un aumento della densità, che è un'altra caratteristica del progresso

1 L'esaurimento della riserva senza variazione di massa causerebbe la contrazione della stella verso una densità maggiore; avrebbe quindi una combinazione di densità e massa che (secondo l'osservazione) non si riscontra in nessuna stella reale.

lungo la serie principale.

Tracciando le conseguenze un po' oltre, la densità crescente provoca un aumento della temperatura che a sua volta riapre il rubinetto dell'energia subatomica. Non appena il rubinetto è aperto abbastanza da bilanciare il tasso di radiazione della stella, la contrazione si ferma e la stella rimane in equilibrio con la massa più piccola e la densità più alta.

Vedrete che le leggi del rilascio di energia subatomica devono essere invocate se vogliamo spiegare quantitativamente perché una particolare densità corrisponde a una particolare massa nel progresso lungo la serie principale. La contrazione deve procedere fino a portare le condizioni interne a uno stato in cui il rilascio di energia è alla velocità esatta richiesta per bilanciare la radiazione.

Temo che tutto questo possa sembrare molto complicato, ma il mio scopo è dimostrare che l'aggiustamento della stella dopo un'alterazione di massa è automatico. Dopo un cambiamento di massa, la stella deve risolvere nuovamente il problema delle condizioni interne necessarie per il suo equilibrio. Per quanto riguarda le condizioni meccaniche (sostenere il peso degli strati superiori), può scegliere uno qualsiasi di una serie di stati di densità diversa, a condizione che abbia la temperatura interna appropriata a quella densità. Ma tale equilibrio è solo temporaneo, e la stella non si stabilizzerà veramente finché il rubinetto dell'energia subatomica non sarà aperto nella giusta misura per bilanciare il tasso di radiazione che, come abbiamo già visto, è praticamente fissato dalla massa. La stella armeggia con il rubinetto finché non assicura questo equilibrio.

Una conclusione importante è stata evidenziata dal professor Russell. Quando la stella regola il rubinetto, non lo fa in modo intelligente; una prova deve automaticamente portare alla prova successiva, ed è di fondamentale importanza che la prova successiva sia automaticamente più vicina e non più lontana dalla giusta velocità. La condizione affinché sia più vicina alla giusta velocità è che la liberazione di energia subatomica aumenti con la temperatura o la densità.¹ Se diminuisce, o anche se non cambia, le prove saranno progressivamente sempre più lontane dal tasso richiesto, così che, sebbene sia possibile un equilibrio stabile, la stella non sarà mai in grado di trovarlo. È quindi essenziale ammettere come una delle leggi di emissione dell'energia subatomica che il tasso aumenta con la temperatura o con la densità o con entrambe; altrimenti l'energia subatomica non adempirà allo scopo per cui è stata introdotta, vale a dire mantenere la stella stabile per un tempo molto lungo.

La cosa strana è che la condizione di equilibrio viene raggiunta quando la temperatura centrale è vicina ai 40 milioni di gradi, sia che la stella si trovi in cima, al centro o in fondo alla serie principale. Le stelle in cima rilasciano da ogni grammo di materiale 700 erg di energia al secondo; il sole rilascia 2 erg al secondo; Krueger 60 rilascia 0,08 erg al secondo. Sembra straordinario che stelle che richiedono così diverse fonti di energia debbano tutte salire alla stessa temperatura per procurarsele. Sembra che a temperature inferiori a questo standard non siano disponibili nemmeno 0,08 erg al secondo, ma una volta raggiunto lo standard la fornitura è praticamente illimitata. Possiamo a malapena credere che esista una specie di punto di ebollizione (indipendente dalla pressione) in cui la materia evapora trasformandosi in energia. L'intero fenomeno è molto sconcertante.

¹ Questo incremento è stato dato per scontato nella nostra descrizione dettagliata della regolazione automatica della stella, e si vedrà che era essenziale darne per scontato.

Potrei aggiungere che le stelle giganti hanno temperature notevolmente inferiori ai 40 milioni di gradi. Sembrerebbe che stiano attingendo a speciali riserve di energia subatomica rilasciate a temperature più basse. Dopo aver esaurito queste scorte, la stella passa alla serie principale e procede a sfruttare la scorta principale. Sembra necessario supporre ulteriormente che la scorta principale non duri indefinitamente, così che alla fine la stella (o ciò che ne rimane) abbandona la serie principale e passa allo stadio di nana bianca.

Siamo ora in grado di affrontare una domanda che forse avreste voluto porre prima. Perché δ Cephei pulsa? Una possibile risposta è che l'oscillazione è stata avviata da qualche incidente. Per quanto possiamo calcolare, un'oscillazione, una volta avviata, continuerebbe per qualcosa come 10.000 anni prima di essere smorzata. Ma 10.000 anni sono ora considerati un periodo insignificante nella vita di una stella e, tenendo conto dell'abbondanza di Cefeidi, la spiegazione sembra inadeguata anche se potessimo immaginare il tipo di incidente supposto. È molto più probabile che la pulsazione sorga spontaneamente. Enormi riserve di energia termica vengono rilasciate nella stella, molto più che sufficienti ad avviare e mantenere la pulsazione, e ci sono almeno due modi alternativi in cui si può supporre che questo calore agisca su un meccanismo di pulsazione.

Ecco un'alternativa. Supponiamo prima che ci sia una pulsazione molto piccola. Quando viene compressa, la stella ha una temperatura e una densità più elevate del solito e il rubinetto dell'energia subatomica è aperto più completamente. La stella guadagna calore e la forza espansiva del calore extra aiuta il rimbalzo dalla compressione. Alla massima espansione il rubinetto è chiuso un po' e la perdita di calore diminuisce la resistenza alla compressione che ne consegue. Così le successive espansioni e compressioni diventano sempre più vigorose e una grande pulsazione cresce da un inizio infinitesimale. Si vedrà che la stella aziona il rubinetto dell'energia subatomica proprio come un motore aziona la valvola che immette calore nel suo cilindro; così che le pulsazioni di una stella vengono avviate come le pulsazioni di un motore.

L'unica obiezione che posso trovare a questa spiegazione è che è troppo efficace. Mostra perché ci si può aspettare che una stella pulsi; ma il problema è che le stelle in generale non pulsano: sono solo le rare eccezioni a comportarsi in questo modo. Ora è così facile spiegare le Cefeidi che dobbiamo tornare indietro e affrontare il problema più difficile, cioè spiegare le stelle normali stabili. Se la pulsazione si avvierà o meno dipenderà dal fatto che il motore della pulsazione sia sufficientemente potente da superare le forze che tendono a smorzare e dissipare le pulsazioni. Non possiamo prevedere il verificarsi o meno di un evento sulla base di alcuna teoria consolidata; dobbiamo piuttosto cercare di formulare le leggi del rilascio di energia subatomica in modo da conformarle alla nostra conoscenza, ovvero che la maggior parte delle stelle rimane stabile, ma certe condizioni di massa e densità danno il sopravvento alle forze pulsanti.

La pulsazione delle Cefeidi è un tipo di disfunzione che colpisce le stelle in un certo periodo della giovinezza; dopo averla attraversata, bruciano costantemente. Potrebbe esserci un altro attacco di malattia più avanti nella vita, quando la stella è soggetta a quelle esplosioni catastrofiche che causano la comparsa di "nuove stelle" o novae. Ma si sa molto poco sulle condizioni per questo, e non è certo se l'esplosione sia spontanea o provocata

dall'esterno.

Finché ci atteniamo alle generalità, la teoria dell'energia subatomica e in particolare la teoria dell'annichilazione della materia costituiscono un'apertura piuttosto promettente. È quando arriviamo ai dettagli tecnici che sorgono dubbi e perplessità. Le difficoltà si evidenziano nella presenza simultanea di stelle giganti e nane in ammassi coevi, nonostante i loro tassi di evoluzione ampiamente diversi. Esistono difficoltà nell'elaborare leggi sull'emissione di energia subatomica che salvaguardino la stabilità delle stelle senza farle pulsare tutte. Le difficoltà derivano dal fatto che, di norma, nella fase gigante, più basse sono la temperatura e la densità, più rapido è il rilascio di energia; e sebbene spieghiamo questo in modo generale considerando l'esauribilità delle fonti di energia più prolifiche, i fatti non vengono tutti chiariti da un simile schema. Infine, sorgono gravi difficoltà nel conciliare le leggi di emissione desunte dall'osservazione astronomica con qualsiasi quadro teorico possiamo formarci del processo di annichilazione della materia mediante l'interazione di atomi, elettroni e radiazioni.

L'argomento è molto importante, ma non possiamo certo approfondirlo ulteriormente in questa lezione. Quando la guida della teoria è chiara, l'interesse si concentra sui principi generali; quando la teoria è rudimentale, l'interesse si concentra sui dettagli tecnici che vengono esaminati con ansia perché sembrano favorire ora una visione ora un'altra. Ho trattato principalmente due punti salienti: il problema della fonte di energia di una stella e il cambiamento di massa che deve verificarsi se c'è un'evoluzione di stelle deboli da stelle luminose. Ho mostrato come questi sembrano incontrarsi nell'ipotesi di annichilazione della materia. Non ritengo che questa sia una conclusione sicura. Esito persino a sostenerla come probabile, perché ci sono molti dettagli che mi sembrano gettare notevoli dubbi su di essa, e ho la forte impressione che ci debba essere qualche punto essenziale che non è stato ancora afferrato. Lo dico semplicemente come l'indizio che al momento stiamo cercando di seguire, senza sapere se è falso o vero.

Mi sarebbe piaciuto concludere queste lezioni introducendo un grande culmine. Ma forse è più in linea con le vere condizioni del progresso scientifico che esse si esauriscano con uno sguardo all'oscurità che segna le frontiere della conoscenza attuale. Non mi scuso per la zoppia della conclusione, perché non è una conclusione. Vorrei poter essere sicuro che sia anche solo un inizio.

APPENDICE A

Ulteriori osservazioni sulla Compagna di Sirio

Ho preferito non complicare la Storia della Compagna di Sirio con dettagli di tipo tecnico; qualche ulteriore informazione potrebbe quindi essere gradita a quei lettori curiosi di apprendere il più possibile su questa straordinaria stella. Sono anche in grado di aggiungere un'ulteriore puntata della "storia poliziesca" che è appena giunta tra le mani, il cui investigatore questa volta è il signor R. H. Fowler.

La stella è compresa tra l'ottava e la nona magnitudine, quindi non è un oggetto eccessivamente debole. La difficoltà nel rilevarla deriva interamente dalla luce dominante della sua vicina. In epoche favorevoli è stata vista facilmente con un telescopio da 8 pollici. Il periodo di rivoluzione è di 49 anni.

La Compagna dista da Sirio quasi come Urano dal sole, ovvero venti volte la distanza Terra-sole. È stato suggerito che la luce potrebbe essere luce riflessa da Sirio. Ciò spiegherebbe il suo candore, ma non spiegherebbe direttamente il suo spettro, che differisce notevolmente da quello di Sirio. Per riflettere 1/10.000 della luce di Sirio (la sua luminosità effettiva), la Compagna dovrebbe avere un diametro di 74 milioni di miglia. Il diametro apparente del suo disco sarebbe di $0''{,}3$, il che, si potrebbe pensare, difficilmente potrebbe passare inosservato nonostante le condizioni sfavorevoli di osservazione. Ma l'obiezione più forte a questa ipotesi di luce riflessa è che si applica solo a questa stella. Le altre due nane bianche riconosciute non hanno stelle brillanti nelle vicinanze, quindi non possono brillare di luce riflessa. Non vale la pena inventare una spiegazione elaborata per uno di questi strani oggetti che non comprenda gli altri due.

L'effetto Einstein, a cui si fa appello per la conferma dell'alta densità, è un allungamento della lunghezza d'onda e una corrispondente diminuzione della frequenza della luce dovuta all'intenso campo gravitazionale attraverso cui i raggi devono passare. Di conseguenza le linee scure nello spettro appaiono a lunghezze d'onda maggiori, cioè spostate verso il rosso rispetto alle corrispondenti linee terrestri. L'effetto può essere dedotto sia dalla teoria della relatività gravitazionale sia dalla teoria quantistica; per chi ha una certa familiarità con la teoria quantistica, il seguente ragionamento è probabilmente il più semplice. L'atomo stellare emette lo stesso quanto di energia di un atomo terrestre, ma questo quanto deve consumare parte della sua energia per sfuggire all'attrazione della stella; l'energia di fuga è uguale alla massa $h\nu/c^2$ moltiplicata per il potenziale gravitazionale ϕ sulla superficie della stella. Di conseguenza l'energia ridotta dopo la fuga è $h\nu(1 - \phi/c^2)$; e poiché questa deve ancora formare un quanto $h\nu'$, la frequenza deve cambiare a un valore $\nu' = \nu(1 - \phi/c^2)$. Quindi lo spostamento $\nu' - \nu$ è proporzionale a ϕ , cioè alla massa divisa per il raggio della stella.

L'effetto sullo spettro assomiglia all'effetto Doppler di una velocità di recessione, e può quindi essere discriminato solo se conosciamo già la velocità visuale. Nel caso di una stella doppia la velocità è nota dall'osservazione dell'altra componente del sistema, così che la parte dello spostamento attribuibile all'effetto Doppler è nota. A causa del moto orbitale c'è una differenza di velocità tra Sirio e la sua Compagna che ammonta attualmente a 4,3 km

al secondo e questo è stato debitamente preso in considerazione; la differenza osservata nella posizione delle linee spettrali di Sirio e della sua Compagna corrisponde a una velocità di 23 km al secondo di cui 4 km al secondo sono attribuibili al moto orbitale e i restanti 19 km al secondo devono essere interpretati come effetto Einstein. Il risultato si basa principalmente sulle misure di una linea spettrale H_{β} . Le altre linee favorevoli sono nella parte più blu dello spettro e poiché la dispersione atmosferica aumenta con il blu, la luce diffusa di Sirio interferisce. Tuttavia, forniscono alcune utili prove di conferma.

Delle altre nane bianche α_2 Eridani è una stella doppia, la sua compagna è una nana rossa più debole di lei. Lo spostamento verso il rosso dello spettro sarà più piccolo rispetto alla Compagna di Sirio e non sarà così facile separarlo da varie possibili fonti di errore. Tuttavia la prospettiva non è senza speranza. L'altra nana bianca riconosciuta è una stella senza nome scoperta da Van Maanen; è una stella solitaria e di conseguenza non c'è modo di distinguere tra spostamento di Einstein e spostamento Doppler. Si sospetta che altre stelle si trovino in questa condizione, tra cui le Compagnie di Procione, 85 Pegasi e Mira Ceti.

Se la Compagna di Sirio fosse un gas perfetto, la sua temperatura centrale sarebbe di circa $1.000.000.000^{\circ}$ e la parte centrale della stella sarebbe un milione di volte più densa dell'acqua. Tuttavia, è improbabile che la condizione di un gas perfetto continui a sussistere. Bisogna capire che in ogni caso la densità diminuirà verso l'esterno della stella e le regioni che osserviamo sono del tutto normali. La materia densa è nascosta sotto alta pressione all'interno.

Forse la caratteristica più sconcertante che rimane è la straordinaria differenza di sviluppo tra Sirio e la sua Compagna, che devono aver avuto origine entrambe nello stesso periodo. A causa della radiazione di massa, l'età di Sirio deve essere inferiore a un miliardo di anni; una massa iniziale, per quanto grande, si irradierebbe fino a meno della massa attuale di Sirio entro un miliardo di anni. Ma un periodo del genere è insignificante nell'evoluzione di una piccola stella che irradia più lentamente, ed è difficile capire perché la Compagna avrebbe dovuto già abbandonare la serie principale e passare a questa (presumibilmente) fase successiva. Questa è simile ad altre difficoltà nel problema dell'evoluzione stellare, e sono convinto che ci sia qualcosa di fondamentale importanza che rimane da scoprire.

Fino a poco tempo fa, pensavo che ci fosse una seria (o, se preferite, una comica) difficoltà sul destino finale delle nane bianche. La loro elevata densità è possibile solo grazie alla collisione degli atomi, che a sua volta dipende dall'elevata temperatura. Non sembra ammissibile supporre che la materia possa rimanere in questo stato compresso se la temperatura scende. Potremmo aspettarci un momento in cui la fornitura di energia subatomica fallirà e non ci sarà più nulla a mantenere l'alta temperatura; quindi, raffreddandosi, il materiale tornerà alla normale densità dei solidi terrestri. La stella deve, quindi, espandersi e, per riacquistare una densità mille volte inferiore, il raggio deve espandersi dieci volte. Sarà necessaria energia per spingere la materia contro la gravità. Da dove verrà questa energia? Una stella ordinaria non ha abbastanza energia termica al suo interno per potersi espandere contro la gravità a questo punto; e difficilmente si può supporre che la nana bianca abbia avuto sufficiente lungimiranza per fare una speciale provvista per questa remota richiesta. La stella potrebbe quindi trovarsi in una situazione

scomoda: perderà calore continuamente *ma non avrà abbastanza energia per raffreddarsi.*

Un suggerimento per evitare questo dilemma è come il trucco di un romanziere che porta i suoi personaggi in un tale pasticcio che l'unica soluzione è ucciderli. Potremmo supporre che l'energia subatomica non cesserà mai di essere liberata finché non avrà rimosso l'intera massa o almeno condotto la stella fuori dalla condizione di nana bianca. Ma questo difficilmente risolve la difficoltà; la teoria dovrebbe in qualche modo proteggere automaticamente da un dilemma impossibile, e non fare affidamento su proprietà sconnesse della materia per proteggere le stelle vere e proprie dai guai.

Tutta la difficoltà sembra, tuttavia, essere stata rimossa in una recente indagine di R. H. Fowler. Egli conclude inaspettatamente che la materia densa della Compagna di Sirio ha un'ampia riserva di energia per provvedere all'espansione. Il punto interessante è che la sua soluzione invoca alcuni degli sviluppi più recenti della teoria quantistica: le "nuove statistiche" di Einstein e Bose e la teoria ondulatoria di Schrödinger. È una curiosa coincidenza che all'incirca nel periodo in cui questa materia di densità trascendentalmente elevata stava catturando l'attenzione degli astronomi, i fisici stavano sviluppando una nuova teoria della materia che riguardava in particolar modo l'alta densità. Secondo questa teoria la materia ha certe proprietà ondulatorie che difficilmente entrano in gioco a densità terrestri; ma sono di seria importanza a densità come quella della Compagna di Sirio. Fu nel considerare queste proprietà che Fowler giunse alla riserva di energia che risolve la nostra difficoltà; la teoria classica della materia non ne fornisce alcuna indicazione. La nana bianca sembra essere un terreno di caccia felice per gli sviluppi più rivoluzionari della fisica teorica.

Per farci un'idea della nuova teoria della materia densa possiamo iniziare facendo riferimento alla fotografia della serie di Balmer nella Fig. 9. Questa mostra la luce irradiata da un gran numero di atomi di idrogeno in tutti gli stati possibili fino al n. 30 nelle proporzioni in cui si trovano naturalmente nella cromosfera del sole. La vecchia teoria elettromagnetica prevedeva che gli elettroni che si muovevano lungo percorsi curvi avrebbero irradiato luce continua; e la vecchia teoria statistica prevedeva l'abbondanza relativa di orbite di diverse dimensioni, in modo che fosse possibile calcolare la distribuzione della luce lungo questo spettro continuo. Queste previsioni sono errate e non rispecchiano la distribuzione della luce mostrata nella fotografia; *ma diventano meno palesemente errate man mano che ci avviciniamo all'inizio della serie.* Le righe successive della serie si affollano e diventano così vicine da essere praticamente indistinguibili dalla luce continua. Così la previsione classica dello spettro continuo sta diventando approssimativamente vera; simultaneamente la previsione classica della sua intensità si avvicina alla verità. C'è un famoso Principio di corrispondenza enunciato da Bohr che afferma che per stati di numero molto elevato le nuove leggi quantistiche si fondono nelle vecchie leggi classiche. Se non dobbiamo mai considerare stati di numero basso è indifferente se calcoliamo la radiazione o le statistiche secondo le vecchie leggi o le nuove.

Negli stati ad alto numero l'elettrone è per la maggior parte del tempo molto distante dal nucleo. La continua prossimità al nucleo indica uno stato a basso numero. Non dobbiamo aspettarci, quindi, che nella materia estremamente densa la continua prossimità delle particelle darà origine a fenomeni caratteristici degli stati a basso numero? Non c'è una vera discontinuità tra l'organizzazione dell'atomo e l'organizzazione della stella; i

vincoli che legano le particelle nell'atomo, legano anche gruppi più estesi di particelle e alla fine l'intera stella. Finché questi legami sono di numero quantico elevato, la concezione alternativa è sufficientemente vicina alla validità che rappresenta le interazioni tramite forze secondo la moda classica e non prende atto degli "stati". Per densità molto elevate non c'è una concezione alternativa e dobbiamo pensare non in termini di forza, velocità e distribuzione di particelle indipendenti, ma in termini di stati.

L'effetto di questa rottura della concezione classica può essere visto al meglio passando subito al limite finale quando la stella diventa un singolo sistema o molecola nello stato n. 1. Come un atomo eccitato che collassa con salti discontinui come quelli che danno la serie di Balmer, la stella con pochi ultimi sussulti di radiazione raggiungerà lo stato limite che non ha stato oltre. Ciò non significa che un'ulteriore contrazione sia impedita dalle ultime particelle che si incastrano a contatto, così come il collasso dell'atomo di idrogeno non è impedito dall'elettrone che si incastra contro il protone; il progresso si arresta perché la stella è tornata alla prima di una serie integrale di possibili condizioni di un sistema materiale. Un atomo di idrogeno nello stato n. 1 non può irradiare; tuttavia il suo elettrone si muove con elevata energia cinetica. Allo stesso modo una stella quando ha raggiunto lo stato n. 1 non irradia più; tuttavia le sue particelle si muovono con energia estremamente grande. Qual è la sua temperatura? Se si misura la temperatura in base al potere radiante, la sua temperatura è lo zero assoluto, poiché la radiazione è nulla; se si misura la temperatura in base alla velocità media delle molecole, la sua temperatura è la più alta raggiungibile dalla materia. Il destino finale della nana bianca è di diventare allo stesso tempo la materia più calda e più fredda dell'universo. La nostra difficoltà è doppiamente risolta. Poiché la stella è intensamente calda, ha abbastanza energia per raffreddarsi se lo desidera; poiché è così intensamente fredda, ha smesso di irradiare e non vuole diventare più fredda.

Abbiamo descritto quello che si ritiene essere lo stato finale della nana bianca e forse quindi di ogni stella. La Compagna di Sirio non ha ancora raggiunto questo stato, ma è così avanti che il trattamento classico è già inammissibile. Se qualche stella ha raggiunto lo stato n. 1, è invisibile; come gli atomi nello stato normale (il più basso), non emettono luce. Il legame dell'atomo che sfida la concezione classica delle forze si è esteso fino a coprire la stella. Non avrei mai immaginato, quando è iniziata questa indagine sulle Stelle e sugli Atomi, che si sarebbe conclusa con uno scorcio di un Atomo-Stella.

APPENDICE B

L'identificazione del Nebulio

L'evento più interessante in astrofisica da quando è stata pubblicata la prima edizione di questo libro è l'identificazione del nebulio da parte di I. S. Bowen nell'autunno del 1927. Abbiamo detto: "Il nebulio non è un nuovo elemento. È un elemento abbastanza familiare che non possiamo identificare perché ha perso molti dei suoi elettroni". Si scopre che il nebulio è ossigeno che ha perso due elettroni. Tuttavia, ci sono circostanze impreviste connesse a questa identificazione. Non è difficile in laboratorio rimuovere due elettroni da un atomo di ossigeno e ottenere così un atomo di nebulio; ma in laboratorio questo non emette luce di nebulio. Il nostro fallimento nell'imitare artificialmente la luce di nebulio non era dovuto all'incapacità di colpire gli atomi in modo sufficientemente potente; *ma perché non eravamo in grado di lasciarli sufficientemente in pace.*

Nelle lezioni si faceva riferimento a una gara tra fisici sperimentali e teorici per risolvere il mistero del nebulio; il successo fu effettivamente raggiunto da una felice combinazione del lavoro di entrambi. Per capire questo dobbiamo prima osservare che quando le posizioni di alcune righe in uno spettro sono state misurate sperimentalmente, le posizioni di alcune righe ulteriori possono essere calcolate tramite una regola semplice ed esatta. Consideriamo ad esempio tre stati di un atomo; la regola è che la frequenza della riga spettrale emessa in una transizione dallo stato 3 allo stato 1 è la somma delle frequenze delle righe emesse nelle transizioni dallo stato 3 allo stato 2 e dallo stato 2 allo stato 1. Allo stesso modo, se ci sono 10 stati dell'atomo, è sufficiente misurare sperimentalmente le frequenze di 9 righe spettrali; possiamo quindi, mediante ripetute applicazioni della regola teorica, calcolare l'intero spettro che consiste di 45 righe corrispondenti alle 45 possibili coppie di stati tra cui potrebbe verificarsi una transizione. L'ambizione della fisica teorica è quella di calcolare lo spettro partendo puramente dalla conoscenza della struttura elettronica dell'atomo, senza alcun aiuto dall'osservazione, ma finora ciò è stato fatto solo per il tipo più semplice di atomo; con meno ambizione, tuttavia, la fisica teorica può prendere uno spettro che è stato osservato parzialmente e calcolarne la parte rimanente. La luce che ci giunge dagli ioni di ossigeno nelle nebulose remote non appartiene a nessuna parte dello spettro dell'ossigeno conosciuto sperimentalmente; tuttavia la sua sorgente è certamente l'ossigeno perché fa parte dello spettro dell'ossigeno completato nel modo da noi indicato.

Si può portare un cavallo all'acqua, ma non lo si può costringere a bere. In laboratorio possiamo produrre atomi di ossigeno doppiamente ionizzati e portarli allo stato 2, ma non possiamo convincerli a tornare allo stato 1. In teoria sappiamo esattamente che tipo di luce emetterebbero nella transizione; e ora riconosciamo che gli atomi stanno dando liberamente questa luce nelle nebulose, anche se non lo faranno al nostro comando. Con noi gli atomi non salteranno in nessun modo tra lo stato 1 e lo stato 2; girano sempre attraverso gli stati 3 o 4. Ci sono sempre un certo numero di righe dello spettro completo che mancano sperimentalmente perché l'atomo rifiuta il salto corrispondente; c'è infatti una regola di selezione che ci consente di predire le righe mancanti o "proibite". Sembra,

tuttavia, che il divieto si riferisca alle circostanze dell'esperimento terrestre e non si applichi universalmente.

Quando un atomo è eccitato, possiamo immaginare il suo elettrone come un ospite al piano superiore di un hotel vecchio stile con molte scale alternative e interconnesse; deve scendere fino alla sala d'attesa, la normale condizione non eccitata. Ci sono molti modi diversi per scendere, ma non c'è sempre una via diretta da un pianerottolo all'altro. A volte l'ospite arriva a un vicolo cieco da cui non c'è modo di scendere, e l'unica cosa da fare è salire a un pianerottolo più alto e tentare una nuova discesa. Il vicolo cieco corrisponde a uno stato dell'atomo che non è il più basso, ma da cui non c'è una transizione non proibita verso uno stato inferiore. Tale stato è detto metastabile. Ci sono molti passaggi non proibiti verso l'alto, ma per fare uno qualsiasi di questi l'atomo avrebbe bisogno di essere rifornito di energia da fonti esterne; spontaneamente può solo andare verso il basso, e da uno stato metastabile tutti i passaggi verso il basso sono proibiti. Ci sono tre modi per uscire dal vicolo cieco. In primo luogo, assorbendo la luce può ottenere l'energia necessaria per ascendere a uno stato superiore da cui può tentare un'altra via di discesa con forse più fortuna. In secondo luogo, quando si verifica una collisione con un altro atomo o elettrone libero, le solite regole vengono sospese; l'ospite, per così dire, si ritrova trasportato nella sala da un terremoto. Ma in questo caso la luce corrispondente alla transizione non viene emessa, l'energia viene eliminata in un altro modo. Infine, se dopo aver atteso a lungo il rilascio non avviene con i primi due metodi, l'elettrone si avventurerà nel passaggio proibito e verrà emessa la linea proibita dello spettro. "Passaggio di emergenza" sarebbe forse una descrizione migliore di "passaggio proibito".

Negli esperimenti terrestri non è possibile lasciare un atomo indisturbato per più di 1/1000 di secondo. In questo lasso di tempo entrerà in collisione con altri atomi di gas o con le pareti del tubo a vuoto. Tutti gli atomi che si trovano in uno stato metastabile hanno probabilità di essere rilasciati entro 1/1000 di secondo e non hanno alcuna occasione di usare l'uscita di emergenza. Nel materiale rarefatto attorno al sole, la cromosfera e la corona, le collisioni sono rare; tuttavia la forte radiazione solare eccita gli atomi molte migliaia di volte al secondo, così che vengono rapidamente liberati dalla metastabilità tramite passaggi verso l'alto. Ma nella solitudine di una nebulosa l'atomo può vagare per un anno o più senza scontrarsi con nulla, e la luce che attraversa la nebulosa è così debole che l'eccitazione avviene solo circa una volta al secolo. L'atomo che (dopo la sua ultima eccitazione) è caduto in uno stato metastabile esita a lungo; ma nulla interviene a liberarlo, così alla fine prende il passaggio proibito. Così nella tranquillità di una nebulosa osserviamo una luce che non viene emessa nella commozione di un tubo a vuoto.

Non bisogna trascurare che l'enorme estensione delle nebulose ha molto a che fare con la comparsa di queste linee proibite. Non sappiamo per quanto tempo l'atomo attende in una condizione metastabile: un minuto, un mese, un secolo. Non c'è modo di affrettare l'atomo; se non gli permettiamo questo riposo, non emetterà la riga proibita. La radiazione del nebulio deve quindi essere estremamente debole rispetto, ad esempio, alla luce del calcio nella cromosfera del sole, dove ogni atomo svolge il suo compito 20.000 volte al secondo. Il gran numero di atomi in una nebulosa compensa la pigrizia dei singoli atomi. Se una nebulosa contiene una quantità di ossigeno pari alla massa del sole, una stima ragionevole per le nebulose diffuse, e se ogni atomo di ossigeno viene stimolato a emettere

luce del nebulio una volta al secolo, la luminosità totale della luce del nebulio sarà 100 volte la luminosità del sole. Questa identificazione del nebulio è confermata dal fatto che le altre righe sconosciute e cospicue negli spettri delle nebulose sono state identificate con righe proibite. Alcune appartengono all'ossigeno singolarmente ionizzato, le altre all'azoto singolarmente ionizzato. Una miscela di azoto e ossigeno ha un nome più familiare. Ancora una volta siamo stati sedotti da quella Naturaarci-umorista. Ha posto nei cieli forme nuvolose che brillano con una "luce che non è mai stata sul mare o sulla terra", e abbiamo immaginato e persino nominato strani elementi che le compongono. Il fluido splendente che per così tanto tempo ci ha sconcertati è l'Aria.