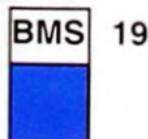
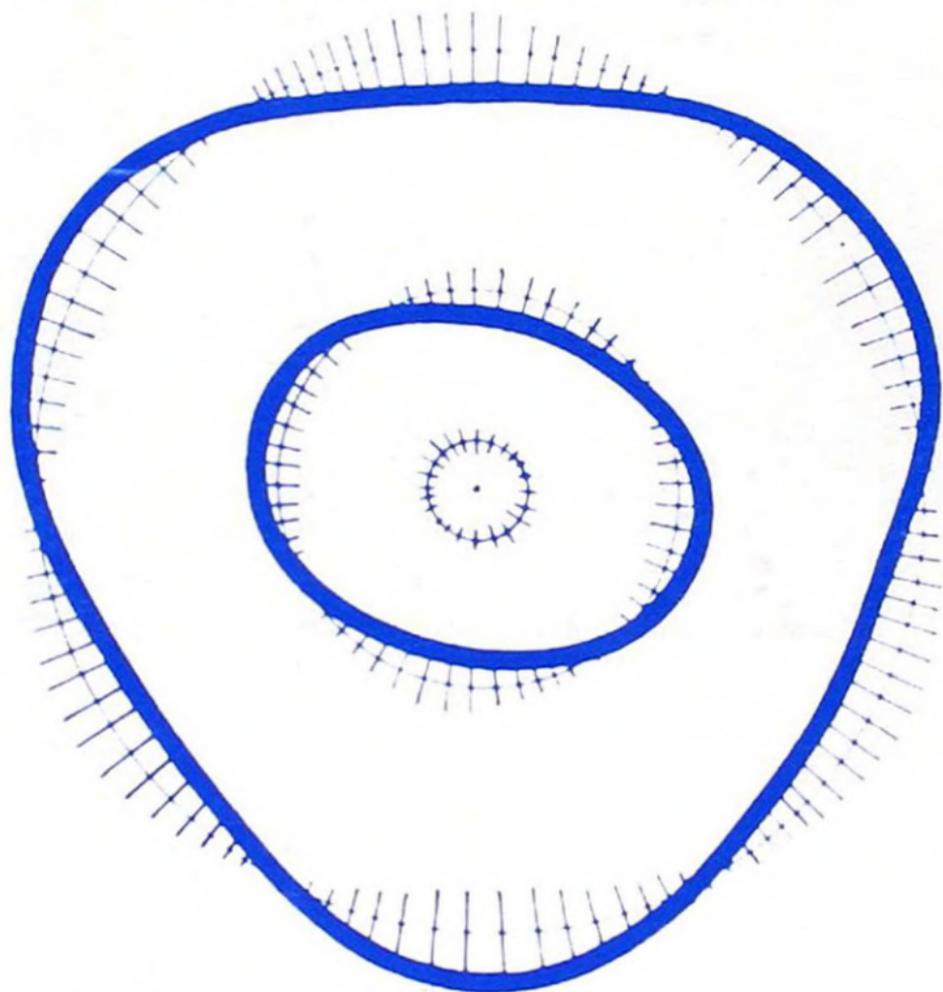


GEORGE GAMOW

TRENT'ANNI CHE SCONVOLSERO LA FISICA

LA STORIA DELLE TEORIA DEI QUANTI



ZANICHELLI



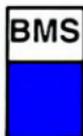
GEORGE GAMOW

TRENT'ANNI CHE SCONVOLSERO LA FISICA

LA STORIA DELLE TEORIA DEI QUANTI

Gli anni dal 1900 al 1930 hanno portato un profondo mutamento nella visione che l'uomo aveva dell'universo: tra la prima idea di Max Planck dei quanti di luce nel 1900, e la previsione dell'esistenza delle antiparticelle formulata da P. A. M. Dirac nel 1929, corre un periodo di emozionanti progressi nel campo della fisica teorica.

In questo libro, un illustre fisico teorico racconta retrospettivamente la storia di queste innovazioni decisive, ricostruendo il cammino delle idee e rievocando contemporaneamente attraverso aneddoti e ricordi personali, le figure dei suoi maestri, colleghi e amici: Planck, Bohr, Pauli, De Broglie, Heisenberg, Dirac, Fermi, Yukawa. Tutte le illustrazioni del libro, dagli schemi di approcci agli incisivi ritratti dei protagonisti della storia, sono opera dell'autore.



19

ZANICHELLI

George Gamow, ben noto anche al pubblico italiano, sia come illustre fisico teorico, sia come scrittore e divulgatore, è nato a Odessa, in Russia, nel 1904. Laureatosi all'Università di Leningrado nel 1928, lavorò a Copenhagen con Bohr nel 1928-29 e a Cambridge (Inghilterra) con Rutherford.

Ha dato molti importanti contributi alla fisica teorica, tra l'altro studiando il meccanismo di emissione delle particelle alfa dagli atomi radioattivi, suggerendo il modello a goccia per i nuclei degli elementi pesanti. Si è occupato di astrofisica, proponendo la teoria dell'origine termonucleare dell'energia solare; è uno dei sostenitori della teoria del « big bang », cioè dell'origine dell'universo da un'esplosione iniziale. Ha studiato il codice genetico proponendo un modo di decifrarlo.

Lasciata definitivamente la Russia nel 1933, ha insegnato a Parigi, a Londra e infine negli Stati Uniti di cui è cittadino dal 1940. Dal 1956 è professore di fisica all'Università del Colorado, Boulder.

George Gamow, oltre che autore di scritti scientifici tecnici, è un fecondo scrittore di opere divulgative, quasi tutte tradotte in molte lingue. Ama illustrare egli stesso i suoi libri, con uno stile che unisce Botticelli (che egli dichiara suo maestro di pittura) alla pop art.

Titolo originale **Thirty Years That Shook Physics**
Copyright © 1966 *Educational Services Incorporated*

L'edizione originale di quest'opera fa parte della « Science Study Series » pubblicata dalla Anchor Books Doubleday & Company, Inc., Garden City, New York

Traduzione di Laura Felici
Copyright © 1966 *Nicola Zanichelli S.p.A., Bologna*

Prima ristampa luglio 1968

Illustrazioni dell'Autore

George Gamow

Trent'anni che sconvolsero la fisica

La storia della Teoria dei Quanti



Zanichelli Bologna

Agli amici della mia giovinezza

Indice

- p. 0 **Prefazione**
- 11 **Introduzione**
- 15 **1 Planck e i quanti di luce**
Meccanica statistica e radiazione termica. Max Planck e il quanto di energia. I quanti di luce e l'effetto fotoelettrico. L'effetto Compton.
- 37 **2 Bohr e le orbite quantiche**
La teoria di Rutherford dell'atomo nucleare. Quantizzazione di un sistema meccanico. Le orbite ellittiche di Sommerfeld. L'Istituto di Bohr.
- 67 **3 Pauli e il principio di esclusione**
Le quote per i livelli elettronici. L'elettrone rotante. Pauli e la fisica nucleare. Il neutrino.
- 83 **4 De Broglie e le onde pilota**
L'equazione d'onda di Schrödinger. Applicazioni della meccanica ondulatoria.
- 100 **5 Heisenberg e il principio di indeterminazione**
Si abbandonano le traiettorie lineari classiche.
- 118 **6 Dirac e le antiparticelle**
Unificazione della Teoria della Relatività e della Teoria dei Quanti. La fisica delle antiparticelle.
- 137 **7 Fermi e le trasformazioni delle particelle**
Le forze responsabili della trasformazione β . Utilizzazione delle leggi di interazione di Fermi. Le ricerche di Fermi sulle reazioni nucleari.

- 146 **8 Yukawa e i mesoni**
- 151 **9 Uomini al lavoro**
- 161 **Il « Faust » di Blegdamsvej**
- 201 **Indice analitico**

Prefazione

Due grandi teorie rivoluzionarie hanno mutato la fisica nei primi decenni del ventesimo secolo: la *Teoria della Relatività* e la *Teoria dei Quanti*. La prima fu praticamente creazione di un uomo solo, Albert Einstein, e apparve in due puntate: la Teoria della Relatività Ristretta, pubblicata nel 1905, e la Teoria Generale della Relatività, pubblicata nel 1915. La Teoria della Relatività di Einstein esige che fossero apportate modifiche radicali alla classica idea newtoniana secondo cui spazio e tempo sono due entità indipendenti nella descrizione del mondo fisico, e portava a un mondo unificato, a quattro dimensioni, in cui il tempo è considerato come quarta coordinata, sebbene non del tutto equivalente alle tre coordinate spaziali. Essa introdusse cambiamenti importanti nel modo di considerare il moto degli elettroni in un atomo, il moto dei pianeti nel sistema solare e il moto delle galassie nell'Universo.

La Teoria dei Quanti, invece, è il risultato del lavoro creativo di diversi grandi scienziati, a cominciare da Max Planck che fu il primo a introdurre nella fisica la nozione di quanto di energia. Questa teoria è passata attraverso molti stadi di sviluppo e ci permette oggi di scrutare in profondità sia la struttura di atomi e nuclei atomici, sia quella di corpi di dimensioni a noi familiari. Oggi la Teoria dei Quanti non è ancora completa, soprattutto nei suoi rapporti con la Teoria della Relatività e col problema delle particelle elementari, perché è bloccata (temporaneamente) dalle terribili difficoltà che si oppongono al suo ulteriore sviluppo.

Questo libro tratterà l'evoluzione della Teoria dei Quanti. L'autore fece per la prima volta conoscenza con l'idea dei quanti e con il modello atomico di Bohr all'età di diciotto anni, quando si iscrisse all'Università di Leningrado; in seguito, quando ne aveva ventiquattro, ebbe la fortuna di di-

ventare allievo di Bohr a Copenaghen. Durante quegli anni memorabili trascorsi in paa Blegdamsvej (indirizzo dell'istituto di Bohr) ebbe occasione di incontrare molti degli scienziati che contribuirono al primo sviluppo della Teoria dei Quanti e di partecipare alle loro discussioni. La narrazione che segue è un risultato di queste esperienze ed è imperniata sulla grande e simpatica figura di Niels Bohr. L'autore spera che la nuova generazione di fisici trovi in queste pagine qualche notizia interessante.

Gennaio 1965

A handwritten signature in black ink, reading "G. Gamow". The signature is fluid and cursive, with a long horizontal flourish extending to the right.

George Gamow

Introduzione

L'inizio del ventesimo secolo annunciò un'era di capovolgimenti senza precedenti, in cui venne messa in discussione la teoria classica che aveva dominato la fisica fin dall'epoca newtoniana. Il 14 dicembre 1900, parlando in una riunione della Società tedesca di Fisica, Max Planck affermò che ci si poteva liberare dei paradossi che infestavano la teoria classica dell'emissione e dell'assorbimento della luce da parte di corpi materiali, se si ammetteva che *l'energia raggiante poteva esistere soltanto sotto forma di pacchetti discreti*. Planck chiamò questi pacchetti *quanti di luce*. Cinque anni dopo Albert Einstein applicò con successo l'idea dei quanti di luce per spiegare le leggi empiriche dell'effetto fotoelettrico, cioè l'emissione di elettroni da parte di superfici metalliche irradiate con luce violetta e ultravioletta. Più tardi Arthur Compton eseguì il suo classico esperimento che mostrava come la diffusione dei raggi X da parte di elettroni liberi seguisse lo stesso principio che regola la collisione tra due sfere elastiche. Così, nel giro di pochi anni, la nuova idea di quantizzazione dell'energia raggiante prese saldamente piede sia nella fisica teorica sia in quella sperimentale.

Nel 1913 un fisico danese, Niels Bohr, estese l'idea di Planck di quantizzazione dell'energia raggiante alla descrizione dell'energia meccanica degli elettroni all'interno di un atomo. Introducendo specifiche « regole di quantizzazione » per i sistemi meccanici di dimensioni atomiche, giunse a un'interpretazione logica del modello atomico planetario di Ernest Rutherford che, pur poggiando su solide basi, si trovava però in netto contrasto con tutte le idee fondamentali della fisica classica. Bohr calcolò le energie di vari stati quantici discreti di elettroni atomici e interpretò l'emissione della luce come espulsione di un quanto di luce, la cui energia era pari alla differenza tra le energie possedute dallo stato quantico ini-

ziale e da quello finale di un elettrone atomico. Con i suoi calcoli egli fu in grado di rendere conto minuziosamente delle righe dello spettro dell'idrogeno e di elementi piú pesanti, problema che per decine di anni aveva disorientato gli spettroscopisti.

Il primo scritto di Bohr sulla teoria quantistica dell'atomo portò a sviluppi sconvolgenti. Grazie agli sforzi congiunti di fisici teorici e sperimentali di diversi paesi, nel giro di dieci anni si capirono molti particolari delle proprietà ottiche, magnetiche e chimiche dei vari atomi. Ma con il passare degli anni divenne sempre piú evidente che la teoria di Bohr, benché fortunata, non era ancora una teoria definitiva perché non poteva render conto di alcuni particolari che si conoscevano sugli atomi: per esempio non riusciva assolutamente a descrivere il processo di transizione di un elettrone da uno stato quantico a un altro, né dava modo di calcolare le intensità delle varie righe degli spettri ottici.

Nel 1925 un fisico francese, Louis de Broglie, pubblicò uno studio in cui dava un'interpretazione affatto inaspettata delle orbite quantiche di Bohr. Secondo de Broglie il moto di ogni elettrone è governato da certe misteriose « onde-pilota » la cui velocità di propagazione e la cui lunghezza d'onda dipendono dalla velocità dell'elettrone in questione. Partendo dall'assunto che la lunghezza di queste onde fosse inversamente proporzionale alla velocità dell'elettrone, de Broglie poté mostrare che nel modello dell'atomo di idrogeno di Bohr le diverse orbite quantiche erano quelle che potevano fornire un *numero intero* di « onde-pilota ». Così il modello di un atomo cominciò a sembrare simile a certi tipi di strumenti musicali con una nota fondamentale (l'orbita piú interna con l'energia piú bassa) e varie armoniche (le orbite esterne con energia piú alta). Un anno dopo la loro pubblicazione le idee di de Broglie vennero sviluppate e messe in una forma matematica piú precisa dal fisico austriaco Erwin Schrödinger, la cui teoria divenne nota con il nome di *Meccanica Ondulatoria*. La meccanica ondulatoria spiegava tutti i fenomeni atomici a cui già si applicava la teoria di Bohr e, al tempo stesso, anche quelli che la teoria di Bohr non riusciva a spiegare

(come per esempio le intensità delle righe dello spettro); prediceva inoltre alcuni fenomeni nuovi (come la diffrazione di un fascio di elettroni) che nessuno aveva neppure lontanamente immaginato, sia nella fisica tradizionale sia nella teoria dei quanti di Planck e Bohr. Insomma la meccanica ondulatoria forniva una teoria completa e perfettamente coerente su tutti i fenomeni atomici e, come si vide sul finire degli anni venti, poteva spiegare anche i fenomeni della disintegrazione radioattiva e delle trasformazioni nucleari artificiali.

Contemporaneamente alla pubblicazione del lavoro di Schrödinger sulla meccanica ondulatoria apparve lo scritto di un giovane fisico tedesco, W. Heisenberg, che elaborò un metodo per affrontare i problemi quantici servendosi della cosiddetta « algebra non commutativa », una disciplina matematica in cui $a \times b$ non è necessariamente uguale a $b \times a$. La comparsa simultanea dei lavori di Schrödinger e di Heisenberg su due diverse riviste tedesche (*Annalen der Physik* e *Zeitschrift der Physik*) sorprese il mondo della fisica teorica. Questi due lavori sembravano diversissimi eppure giungevano esattamente agli stessi risultati sulla struttura atomica e sugli spettri atomici, e ci volle più di un anno per scoprire che le due teorie erano identiche dal punto di vista fisico e differivano soltanto perché espresse in due forme matematiche completamente diverse. Era come se l'America fosse stata scoperta da Cristoforo Colombo con un viaggio attraverso l'Atlantico diretto verso occidente, e contemporaneamente anche da un Giapponese altrettanto audace con un viaggio attraverso il Pacifico diretto verso oriente. Ma c'era ancora una spina sul sentiero della Teoria dei Quanti e si faceva sentire in modo doloroso ogni volta che si tentava di quantizzare sistemi meccanici che, date le alte velocità coinvolte (vicine a quelle della luce), richiedevano che si tenesse conto della Teoria della Relatività. Erano stati fatti molti tentativi infruttuosi per collegare la Teoria dei Quanti con la Teoria della Relatività, quando finalmente, nel 1929, un fisico britannico, P. A. M. Dirac, scrisse la sua famosa *equazione d'onda relativistica*. Le soluzioni di questa equazione descrivevano

perfettamente il moto degli elettroni atomici a velocità vicine a quella della luce e automaticamente ne spiegavano anche, premio inaspettato, la quantità di moto, il momento della quantità di moto e il momento magnetico. Alcune difficoltà formali connesse con l'applicazione pratica di questa equazione spinsero Dirac a supporre che insieme ai normali elettroni carichi negativamente *dovessero esistere anche antielettroni carichi positivamente*. La sua previsione ebbe una brillante conferma qualche anno dopo quando si trovarono nei raggi cosmici gli antielettroni. La teoria delle *antiparticelle* venne estesa ad altre particelle elementari oltre agli elettroni e oggi abbiamo antiprotoni, antineutroni, antimezioni, ecc.

Così verso il 1930, a soli trenta anni dal memorabile annuncio di Planck, la Teoria dei Quanti prese la forma finale sotto cui la conosciamo oggi. Pochissimi sono stati i progressi fatti in campo teorico nei decenni successivi a questi primi emozionanti sviluppi; gli ultimi anni sono stati invece molto fecondi nel campo sperimentale, specialmente nello studio delle numerose particelle elementari di recente scoperta. Stiamo però ancora aspettando che venga aperta una breccia nella solida barriera di difficoltà che ci impedisce di capire le masse, le cariche, i momenti magnetici, le interazioni e l'esistenza stessa delle particelle elementari. È quasi certo che quando si riuscirà ad aprire questa breccia ciò implicherà idee tanto diverse da quelle attuali quanto le idee attuali sono diverse da quelle della fisica classica.

Nei capitoli successivi cercherò di descrivere l'evolversi della Teoria dei Quanti di energia e di materia nei primi trenta anni del suo sviluppo turbolento, sottolineando le differenze concettuali tra la fisica classica del « buon tempo antico » e la nuova fisionomia che la fisica ha assunto nel ventesimo secolo.

1 Planck e i quanti di luce



Le origini della teoria rivoluzionaria di Max Planck, secondo cui la luce poteva essere emessa e assorbita soltanto sotto forma di certi pacchetti discreti di energia, risalgono a studi precedenti eseguiti da Ludwig Boltzmann, James Clerk Maxwell, Josiah Willard Gibbs e altri sulla descrizione statistica delle proprietà termiche dei corpi materiali. La Teoria Cinetica del Calore considerava il calore come risultato del moto casuale delle numerose singole molecole di cui sono formati tutti i corpi materiali. Poiché sarebbe stato impossibile (e anche inutile) seguire il moto di ogni singola molecola che prende parte al moto termico, la descrizione matematica dei fenomeni termici deve necessariamente ricorrere al metodo statistico. Come chi prende decisioni in politica economica non si preoccupa di sapere esattamente quanti ettari semina o quanti maiali possiede l'agricoltore Tizio, così il fisico non si cura di conoscere la posizione o la velocità di una particolare molecola in un gas formato da un grandissimo numero di singole molecole. Nell'economia di un paese e nel comportamento macroscopico di un gas, quale appare a un osserva-

tore, importano soltanto le medie ricavate prendendo in esame un gran numero di agricoltori o di molecole.

Uno dei principi fondamentali della *Meccanica Statistica* (che è lo studio dei valori medi delle proprietà fisiche di grandissimi raggruppamenti di particelle coinvolte nel moto casuale) è il cosiddetto *Teorema di Equipartizione*, che può essere dedotto matematicamente dai principi newtoniani della Meccanica. Esso afferma che *l'energia totale contenuta in un sistema di un gran numero di particelle, che scambiano energia tra di loro per mezzo di urti reciproci, si ripartisce ugualmente (in media) fra tutte le particelle*. Se tutte le particelle sono identiche, per esempio in un gas puro come l'ossigeno e il neon, esse avranno in media uguali velocità e uguali energie cinetiche. Se chiamiamo E l'energia totale disponibile nel sistema e N il numero totale di particelle, possiamo dire che l'energia media per particella è E/N . Se abbiamo una raccolta di vari tipi di particelle, come in una miscela di due o più gas diversi, le molecole di massa maggiore avranno velocità minori così che le loro energie cinetiche (proporzionali alla massa e al quadrato della velocità) saranno in media uguali a quelle delle molecole più leggere. Consideriamo per esempio una miscela di idrogeno e di ossigeno: le molecole di ossigeno che hanno massa 16 volte maggiore di quelle di idrogeno avranno una velocità media che è $\sqrt{16}$ volte (cioè 4 volte) più piccola di queste ultime*.

Sebbene il Principio di Equipartizione regoli la *distribuzione media dell'energia* tra i componenti di un grande raggruppamento di particelle, le velocità e le energie delle singole particelle possono scostarsi dalle medie, fenomeno noto con il nome di *fluttuazioni statistiche*. Le fluttuazioni possono anche essere rappresentate matematicamente; si ottengono allora curve che mostrano il numero relativo di particelle aventi per ogni data temperatura velocità superiori o inferiori alla media. Queste curve, che furono ricavate per la prima

* Poiché l'energia cinetica è il prodotto di [massa] \times [velocità]² questo prodotto resterà invariato se la massa aumenta in proporzione a un fattore 16 e la velocità diminuisce in proporzione a un fattore 4. Infatti $4^2 = 16$.

volta da J. Clerk Maxwell e portano il suo nome, sono rappresentate nella figura 1 per tre diverse temperature di un gas. L'uso del metodo statistico nello studio del moto termico delle molecole riusciva a spiegare benissimo le pro-

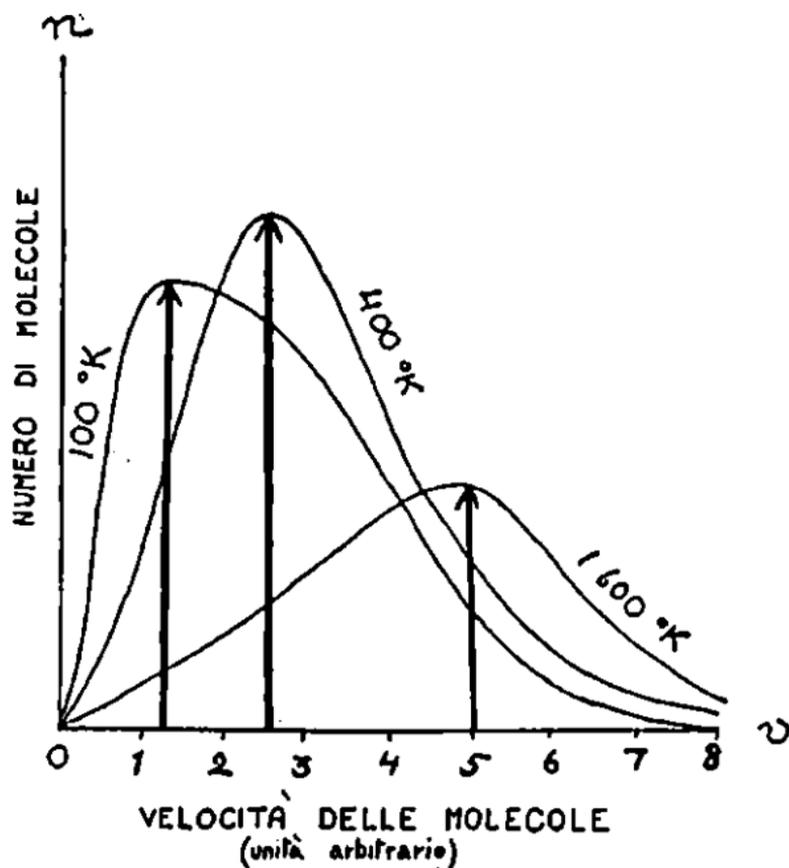


Fig. 1. Distribuzione di Maxwell: il numero di molecole che hanno una data velocità è riportato in funzione della velocità v , per tre diverse temperature, 100, 400 e 1600 °K. Dato che il numero di molecole all'interno del recipiente rimane costante, le aree sotto le tre curve sono uguali. Le velocità medie delle molecole aumentano con andamento proporzionale alla radice quadrata della temperatura assoluta.

prietà termiche dei corpi materiali, specialmente nel caso del gas: applicata ai gas la teoria risulta molto semplificata dal fatto che le molecole gassose si muovono liberamente nello spazio invece di essere stipate una accanto all'altra come nei liquidi e nei solidi.

Meccanica statistica e radiazione termica.

Verso la fine del diciannovesimo secolo Lord Rayleigh e Sir James Jeans cercarono di estendere il metodo statistico, così utile per la comprensione delle proprietà termiche dei corpi materiali, ai problemi della radiazione termica. Tutti i corpi materiali riscaldati emettono onde elettromagnetiche di diversa lunghezza d'onda. Quando la temperatura è relativamente bassa, per esempio al punto di ebollizione dell'acqua, la lunghezza d'onda predominante della radiazione emessa è piuttosto grande; queste onde non agiscono sulla retina dei nostri occhi (sono quindi invisibili), ma vengono assorbite dalla nostra pelle dandoci una sensazione di caldo: si parla perciò di calore o di *radiazione infrarossa*. Quando la temperatura sale a circa 600 °C (come negli elementi riscaldatori di una stufa elettrica) si vede una debole luce rossa. A 2 000 °C (temperatura che si raggiunge nel filamento di una lampadina elettrica) viene emessa una vivida luce bianca che contiene tutte le lunghezze d'onda dello *spettro della radiazione visibile*, dal rosso al violetto. Alla temperatura di un arco voltaico, 4 000 °C, viene emessa una quantità considerevole di *radiazione ultravioletta* invisibile, la cui intensità cresce rapidamente via via che la temperatura aumenta ancora. A ogni data temperatura vi è una frequenza di vibrazione predominante a cui l'intensità è massima, e all'aumentare della temperatura questa frequenza predominante cresce sempre più. La situazione è rappresentata graficamente nella figura 2 che dà la distribuzione delle intensità negli spettri corrispondenti a tre temperature diverse.

Se confrontiamo le curve della figura 1 con quelle della figura 2 notiamo una notevole somiglianza qualitativa: mentre nel primo caso l'aumento della temperatura sposta il punto massimo della curva verso velocità molecolari più alte, nel secondo caso il punto massimo si sposta verso frequenze di radiazione più alte. Questa somiglianza suggerì a Rayleigh e a Jeans l'idea di applicare alla radiazione termica lo stesso Principio di Equipartizione che aveva avuto tanto successo nel caso dei gas: presupporre cioè che l'energia raggianti to-

tale disponibile sia ugualmente distribuita fra tutte le possibili frequenze di vibrazione. Questo tentativo portava però a risultati catastrofici! Il guaio era che, malgrado tutte le somiglianze tra un gas formato da singole molecole e la radiazione termica formata da vibrazioni elettromagnetiche, esisteva una differenza sostanziale: mentre il numero di mole-

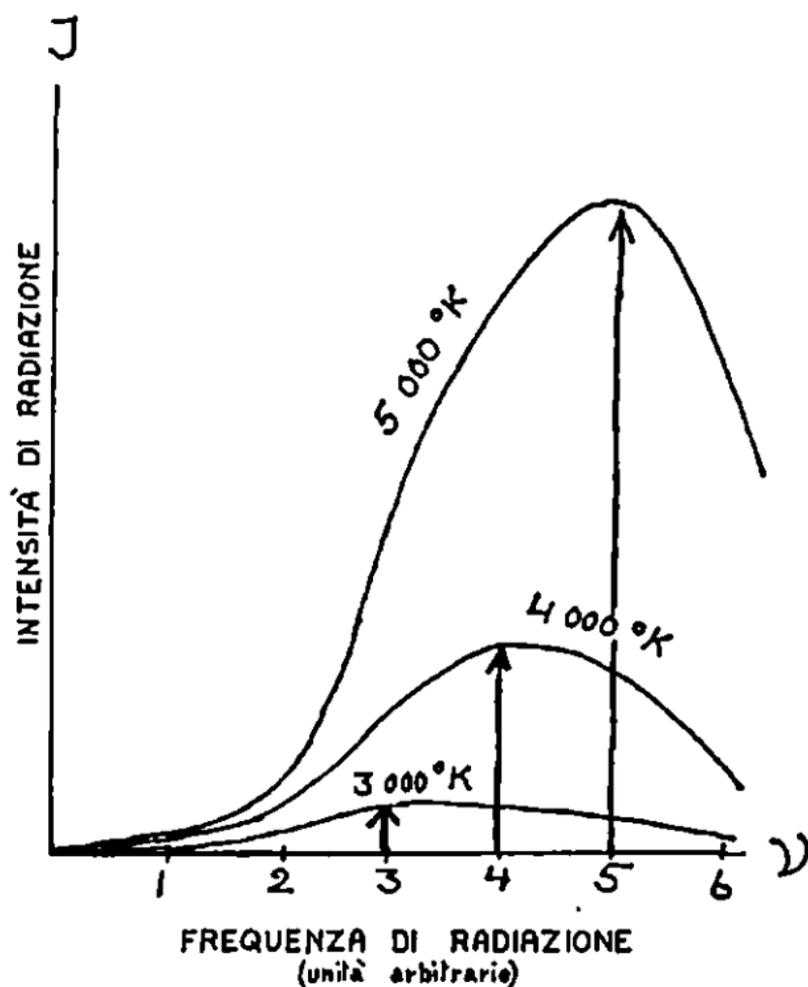


Fig. 2. Nel grafico è riportata la distribuzione dell'intensità di radiazione a diverse frequenze ν (quale risulta dalle osservazioni) in funzione delle frequenze. Poiché l'energia irradiata in tutto lo spettro è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta T , le aree sotto le curve crescono al crescere della temperatura. La frequenza corrispondente all'intensità massima aumenta in proporzione diretta alla temperatura assoluta.

cole di gas in un dato spazio chiuso è sempre finito, pur essendo di solito grandissimo, il numero di vibrazioni elettromagnetiche possibili nello stesso spazio è sempre infinito. Per capirlo è necessario ricordare che la configurazione del moto ondulatorio nello spazio circoscritto da un cubo, per fare un esempio, è formata dalla sovrapposizione di varie onde stazionarie aventi i nodi sulle pareti del cubo.

Si può vedere meglio quel che succede in un caso più semplice di moto ondulatorio unidimensionale, il moto di una fune legata alle due estremità. Poiché le estremità della fune non possono muoversi, le sole vibrazioni possibili sono quelle indicate nella figura 3 e corrispondono in linguaggio musicale alla nota fondamentale e alle varie armoniche della corda vibrante: in tutta la lunghezza della corda possono esserci una mezza lunghezza d'onda, due, tre,... dieci,... cento, mille, un milione, un miliardo,... qualunque numero di mezze lunghezze d'onda. Le corrispondenti frequenze di vibrazione delle varie armoniche saranno due volte, tre volte,... dieci,... cento,... mille volte... un miliardo di volte ecc. quelle della nota fondamentale.

Nel caso di onde stazionarie all'interno di un recipiente a tre dimensioni, come un cubo, la situazione sarà simile, sebbene un po' più complicata, e porterà a un numero illimitato di vibrazioni diverse, con lunghezze d'onda sempre più brevi e frequenze corrispondenti sempre più alte. Così se E è la quantità totale di energia raggiante disponibile nel contenitore, il Principio di Equipartizione porterà a concludere che a ogni singola vibrazione spetterà E/∞ , una quantità infinitamente piccola di energia! L'assurdità di tale conclusione è evidente, ma possiamo metterla ancor più in risalto con la spiegazione che segue.

Supponiamo di avere una scatola cubica, le cui pareti interne siano fatte di specchi ideali che riflettono al cento per cento la luce che cade su di essi: questo è il « cubo di Jeans ». Naturalmente specchi così non esistono e non possono essere fabbricati: anche il migliore specchio assorbe una piccola frazione della luce incidente; possiamo però servirci di questo concetto di specchi ideali nelle discussioni teoriche, come

caso limite di specchi reali di ottima qualità. Un ragionamento di questo tipo, in cui si *pensa* quale sarebbe il risultato di un esperimento dove si facesse uso di specchi perfetti, superfici senza attrito, barre senza peso, ecc., è noto col nome

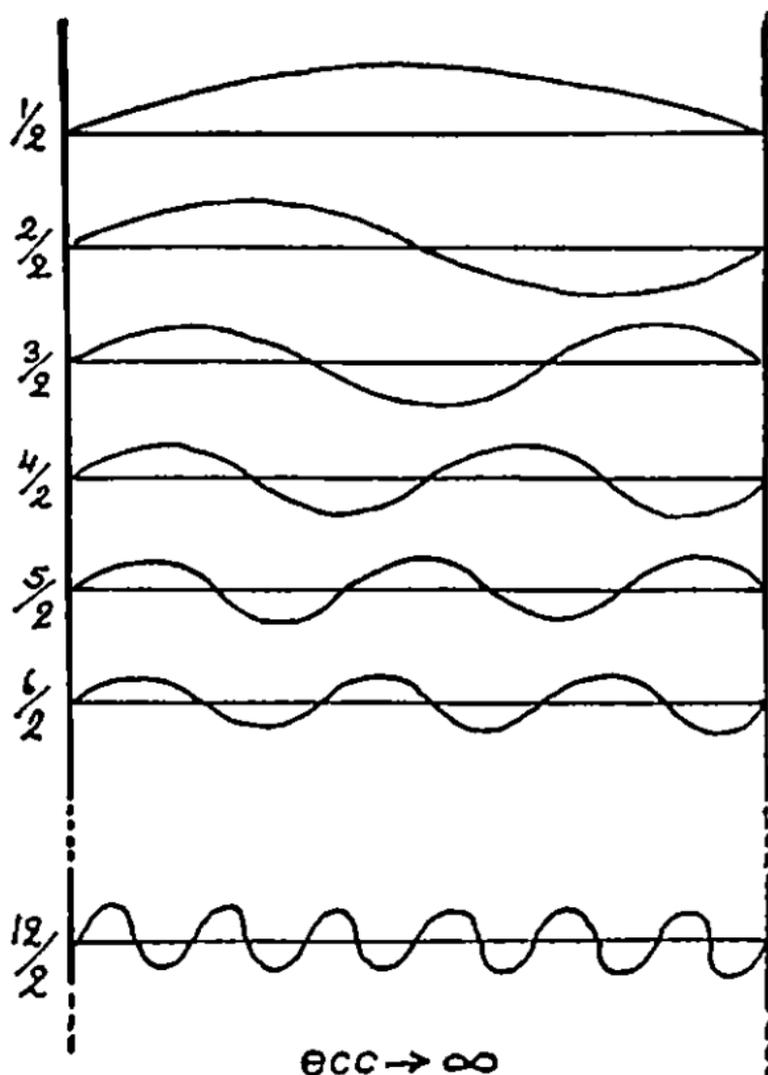


Fig. 3. La nota fondamentale e le armoniche superiori nel caso di un continuo unidimensionale, per esempio una corda di violino.

di « esperimento ideale » (il nome originale è *Gedankenexperiment*), e viene usato spesso in molti rami della fisica teorica. Se apriamo una finestrella in una parete di un cubo

di Jeans e lasciamo entrare un po' di luce, richiudendo la finestrella immaginaria dopo questa operazione, la luce resterà dentro per un tempo indefinito essendo riflessa avanti e indietro dalle pareti di specchi ideali. Quando un po' di tempo dopo apriremo lo sportello osserveremo il lampo della luce che sfugge. In questo caso la situazione è identica, in teoria, a quella che si ottiene pompando un po' di gas in un recipiente chiuso e lasciandolo uscire successivamente. L'idrogeno gassoso può restare indefinitamente in un recipiente di vetro e rappresenta un caso ideale; ma non potrebbe restare a lungo in un recipiente di palladio, perché è noto che le molecole di idrogeno si propagano abbastanza facilmente attraverso questo materiale. D'altra parte non potremmo adoperare un recipiente di vetro per conservare l'acido fluoridrico, che reagisce chimicamente con le pareti di vetro. Perciò il cubo di Jeans, con le sue pareti di specchio ideale, dopo tutto non è una cosa talmente campata in aria!

C'è però una differenza tra il gas e la radiazione racchiusa in un recipiente. Dato che le molecole non sono punti materiali ma hanno certi diametri finiti, sono soggette a molti urti reciproci in cui può avvenire uno scambio di energia. Così se immettiamo in un recipiente un po' di gas caldo e un po' di gas freddo, gli urti reciproci fra le molecole faranno ben presto rallentare quelle veloci e accelerare quelle lente, dando luogo a una distribuzione uniforme di energia in armonia con il Principio di Equipartizione. Nel caso di un gas ideale formato di molecole puntiformi, che naturalmente non esiste in natura, non ci sarebbero urti reciproci e la parte calda del gas resterebbe calda mentre la parte fredda resterebbe fredda. Questo scambio di energia tra le molecole di un gas ideale può però essere stimolato introducendo nel recipiente una o più particelle con diametri finiti ancorché piccoli (le particelle browniane): scontrandosi con esse le molecole puntiformi veloci trasmetterebbero loro la propria energia, che verrebbe trasmessa a sua volta alle altre molecole puntiformi più lente.

Nel caso delle onde luminose la situazione è diversa perché due fasci di luce che si trovino sul percorso l'uno dell'altro

non intralciano in alcun modo la rispettiva propagazione *. Così, per ottenere uno scambio di energia fra le onde stazionarie di diverse lunghezze d'onda dobbiamo introdurre nel recipiente piccoli corpi capaci di assorbire e rimettere ogni possibile lunghezza d'onda, permettendo così uno scambio di energia fra tutte le vibrazioni possibili. I comuni corpi neri, come il carbone di legna, hanno questa proprietà, almeno nella parte visibile dello spettro, e possiamo immaginare « corpi neri ideali » che si comportino nello stesso modo con tutte le possibili lunghezze d'onda. Mettendo in un cubo di Jeans qualche particella di polvere ideale di carbone risolveremo il nostro problema dello scambio di energia.

Eseguiamo ora un esperimento concettuale immettendo in un cubo di Jeans, precedentemente vuoto, un certo quantitativo di radiazione di una certa lunghezza d'onda, per esempio un po' di luce rossa. Immediatamente dopo l'introduzione l'interno del cubo conterrà soltanto onde stazionarie rosse, che si estenderanno da una parete all'altra, mentre saranno assenti tutti gli altri modi di vibrazione. È come quando in un piano a coda si tocca un solo tasto: se, come avviene in pratica, c'è soltanto un debole scambio di energia tra le diverse corde dello strumento, la nota continuerà a suonare finché tutta l'energia comunicata alla corda si dissiperà per smorzamento. Se invece c'è una fuga di energia tra le corde attraverso l'armatura a cui sono collegate, anche altre corde cominceranno a vibrare finché, per il Teorema di Equipartizione, tutte le 88 corde avranno un'energia pari a $1/88$ dell'energia totale comunicata.

Ma per offrire una buona analogia con il cubo di Jeans un pianoforte dovrebbe avere un numero molto maggiore di tasti oltre il limite di destra, nella regione degli ultrasuoni (fig. 4): in questo caso l'energia comunicata a una sola corda nel campo di udibilità, si propagherebbe verso destra nella

* Per evitare obiezioni da parte di quei lettori che ne sanno molto di più di quanto occorra per seguire questa discussione, l'autore si affretta a dire che, secondo la moderna elettrodinamica quantistica, si deve prevedere una certa diffrazione della luce da parte della luce a causa della formazione di coppie virtuali di elettroni. Ma Jeans e Planck non lo sapevano.

regione dei suoni di maggiore altezza e si perderebbe nelle regioni infinitamente lontane delle vibrazioni ultrasonore: un brano di musica suonato su un pianoforte del genere si trasformerebbe così in un suono acuto e stridulo. Analogamente

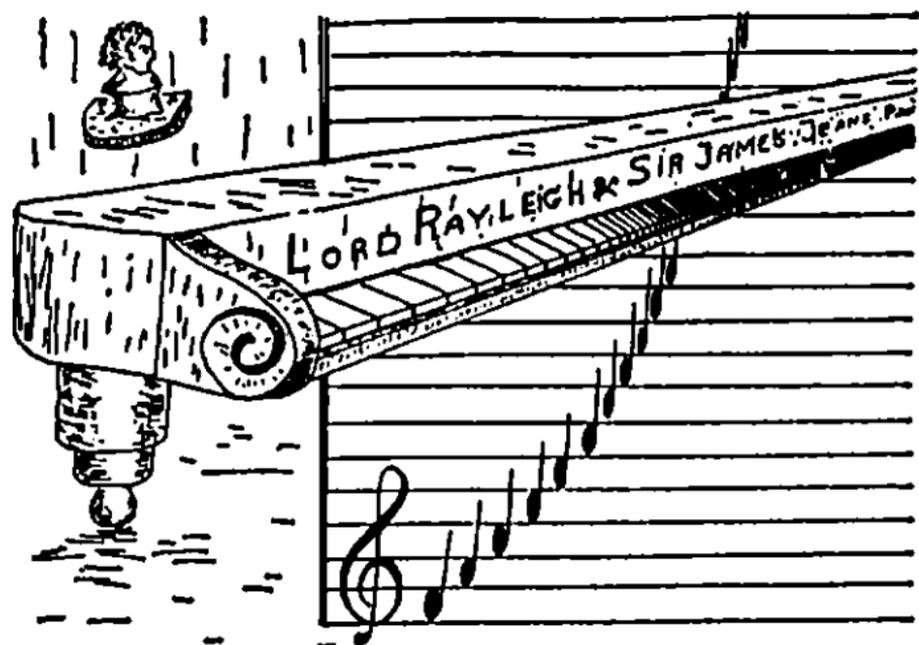


Fig. 4. Un pianoforte con un numero illimitato di tasti che si estendono nella regione degli ultrasuoni fino alle frequenze infinite. Per il Principio di Equipartizione tutta l'energia fornita dal pianista a uno dei tasti a bassa frequenza si propagherebbe per tutta la regione degli ultrasuoni, fuori del campo di udibilità.

mente l'energia della luce rossa introdotta nel cubo di Jeans si trasformerebbe in luce azzurra, violetta, ultravioletta, raggi X e raggi γ e così via senza alcun limite. Sarebbe temerario starsene accanto al caminetto, dato che la luce rossa proveniente dalle braci amichevolmente scintillanti si trasformerebbe rapidamente nella pericolosa radiazione ad alta frequenza dei prodotti di fissione!

La fuga di energia verso la regione di suoni acuti non costituisce un vero pericolo per i concertisti, non soltanto perché

la tastiera è limitata sulla destra, ma soprattutto perché, come si è detto, la vibrazione di ogni corda si smorza troppo in fretta per consentire il trasferimento di una parte, sia pure piccola, di energia a una corda vicina. Nel caso dell'energia raggianti però la situazione è molto più seria e, se in questo caso valesse il Principio di Equipartizione, lo sportello aperto di una caldaia sarebbe un'ottima sorgente di raggi X e di raggi γ . Evidentemente c'era qualcosa di sbagliato in ciò che sostenevano i fisici del diciannovesimo secolo, e occorreva apportarvi qualche drastica modifica per evitare la Catastrofe Ultravioletta, che è prevista dalla teoria ma non si verifica mai in realtà.

Max Planck e il quanto di energia.

La spiegazione dello spettro di emissione del « corpo nero » fu data da Max Planck, un fisico classico al cento per cento (cosa per cui non può essere biasimato). Fu proprio lui a dare origine a quella che si chiama *fisica moderna*. Sul finire del secolo, alla riunione del 14 dicembre 1900 della Società Tedesca di Fisica, Planck espose le sue idee in proposito, ed erano idee così fuori del comune e così grottesche che egli stesso poteva a stento crederci, sebbene causassero viva emozione nell'uditorio e in tutto il mondo della fisica.

Max Planck era nato a Kiel nel 1858 e si era poi trasferito con la famiglia a Monaco. Qui frequentò il Maximilian Gymnasium ed entrò poi all'Università dove studiò fisica per tre anni. Trascorse quindi un anno all'Università di Berlino, entrando in contatto con i grandi fisici del momento, Herman von Helmholtz, Gustav Kirchhoff e Rudolph Clausius, e molto imparò sulla teoria del calore, conosciuta col nome tecnico di termodinamica. Tornato a Monaco presentò una tesi sul Secondo Principio della Termodinamica ottenendo il dottorato nel 1879 e divenendo poi docente in quella Università. Sei anni dopo accettò l'incarico di professore a Kiel e nel 1889 si trasferì, sempre come professore incaricato, all'Università di Berlino, diventando poi professore ordinario nel 1892, e restandolo fino a quando andò a riposo a 70 anni.

Dopo di che continuò la propria attività di fisico e tenne molte conferenze pubbliche fino a quando morì a circa novant'anni. Due dei suoi ultimi lavori, *Wissenschaftliche Selbstbiographie* e *Wege zur physikalischen Erkenntnis* (*Autobiografia scientifica* e *Il concetto di causalità in fisica* *) furono pubblicati nel 1947, l'anno dopo la sua morte.

Planck era il tipico professore tedesco della sua epoca, serio e probabilmente pedante, ma non privo di calore umano, come appare evidente dalla sua corrispondenza con Arnold Sommerfeld il quale, sulla base del lavoro di Niels Bohr, applicava la teoria quantistica alla struttura dell'atomo. Alludendo al quanto come invenzione di Planck, Sommerfeld gli scriveva in una lettera: « Egli dissodò il terreno vergine là dove io mi limitai a raccogliere fiorellini selvatici » e Planck gli rispose: « Ciò che raccolsi, ciò che raccogliesti, scambiamoci, uniamo insieme, per intrecciare una bella girlanda » **.

Max Planck ricevette molte onoreficenze accademiche per i suoi successi scientifici; diventò membro dell'Accademia Prussiana delle Scienze nel 1894 e fu eletto membro straniero della Royal Society di Londra nel 1926 e, sebbene non abbia dato nessun contributo all'astronomia, un asteroide recentemente scoperto è stato chiamato in suo onore Planckiana.

Per tutta la sua lunga vita Max Planck si interessò quasi esclusivamente dei problemi della termodinamica e i numerosi scritti da lui pubblicati furono tanto importanti da procurargli l'ambita carica di professore ordinario dell'Università di Berlino all'età di soli trentaquattro anni. Ma la vera rivelazione del suo lavoro scientifico, la scoperta del *quanto di energia*, per cui ottenne il Premio Nobel nel 1918, venne abbastanza tardi, quando aveva già quarantadue anni. Normalmente quarantadue anni non è tardi nella vita di un uomo in qualunque occupazione e professione ma di solito il lavoro più importante di un fisico teorico viene fatto verso i

* Entrambe tradotte in italiano in MAX PLANCK, *Conoscenza del mondo fisico*, Boringhieri, Torino, 1964 (N.d.T.).

** *Ibid.*, pp. 31-32 (N.d.T.).

venticinque anni, quando egli ha avuto il tempo di imparare abbastanza delle teorie esistenti ma la sua mente è ancora tanto agile da concepire idee nuove, audaci e rivoluzionarie. Per esempio Isaac Newton concepì la Legge della Gravitazione Universale a ventitré anni, Albert Einstein la Teoria della Relatività quando ne aveva ventisei e Niels Bohr pubblicò la sua Teoria della Struttura Atomica a ventisette anni. Nel suo piccolo, anche l'autore di questo libro ha pubblicato il suo lavoro piú importante, sulle trasmutazioni naturali e artificiali dei nuclei atomici, a ventiquattro anni.

Nella sua conferenza Planck affermò che, secondo suoi calcoli piuttosto complicati, si poteva porre rimedio alle conclusioni paradossali raggiunte da Rayleigh e Jeans ed evitare il pericolo della Catastrofe Ultravioletta *se si poneva come postulato che l'energia delle onde elettromagnetiche (comprese le onde luminose) può esistere soltanto sotto forma di certi pacchetti discreti, o quanti, essendo il contenuto in energia di ogni pacchetto direttamente proporzionale alla frequenza corrispondente.*

Le considerazioni teoriche nel campo della fisica statistica sono notoriamente difficili, ma studiando il grafico della figura 5 ci si può fare un'idea di come il postulato di Planck « dissuada » l'energia raggiante dallo sconfinare entro la regione senza limiti delle frequenze alte dello spettro.

In questo grafico sono riportate sull'asse delle ascisse le frequenze possibili all'interno di un cubo « unidimensionale » di Jeans, e vengono contrassegnate con 1, 2, 3, 4 ecc.; sull'asse delle ordinate sono riportate le energie di vibrazione che si possono assegnare a ciascuna delle possibili frequenze. Secondo la fisica classica è ammesso qualunque valore di energia (cioè qualunque punto sulle linee verticali passanti per 1, 2, 3, ecc.), e la distribuzione dà così luogo statisticamente all'equipartizione dell'energia tra tutte le possibili frequenze. Invece, ammesso il postulato di Planck, rimane possibile soltanto un insieme discreto di valori di energia, pari a uno, due, tre volte ecc. il pacchetto di energia corrispondente alla frequenza data. Poiché si suppone che l'ener-

gia contenuta in ogni pacchetto sia direttamente proporzionale alla frequenza, otteniamo i valori permessi di energia rappresentati nel grafico dai grossi punti neri. Quanto più alta è la frequenza, tanto più piccolo è il numero di possibili

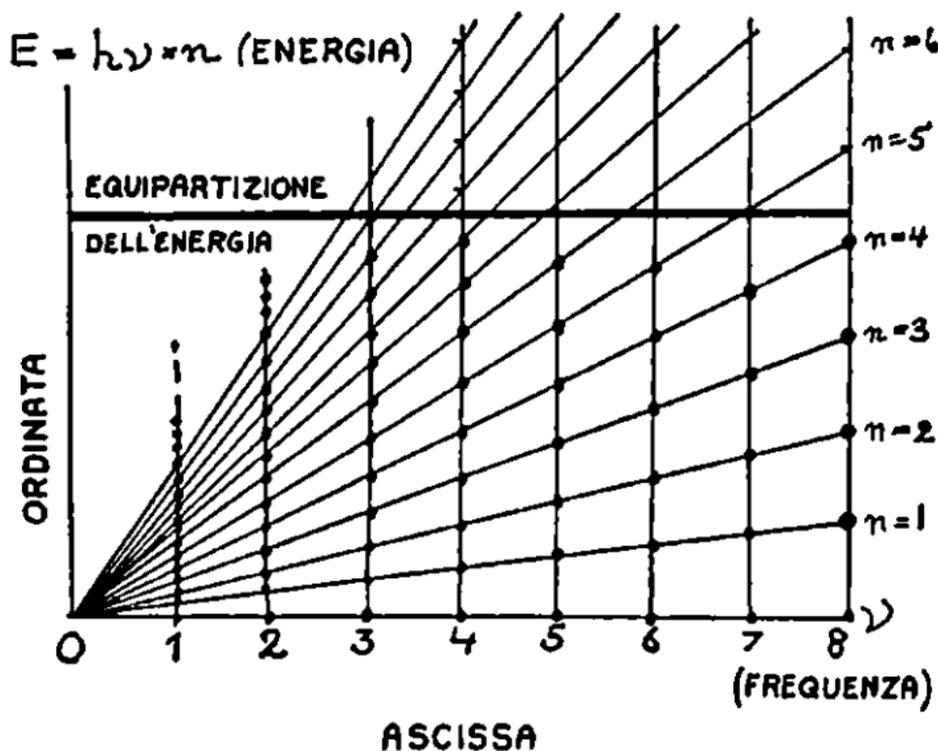


Fig. 5. Se, secondo l'ipotesi di Planck, l'energia corrispondente a ogni frequenza ν deve essere un multiplo intero della quantità $h\nu$, la situazione è molto diversa da quella che appare nella figura precedente. Per esempio, per $\nu=4$ ci sono 8 possibili stati di vibrazione, mentre per $\nu=8$ ce ne sono soltanto 4. Questa limitazione riduce il numero di vibrazioni possibili alle alte frequenze e annulla il paradosso di Jeans.

valori di energia sotto un dato livello, e questo fa sì che le vibrazioni ad alta frequenza non possano assorbire ulteriore energia. Ne risulta che la quantità di energia che può essere acquistata dalle vibrazioni ad alta frequenza diventa finita malgrado il loro numero infinito e così tutto si aggiusta. È stato detto che ci sono « le bugie, le bugie innocenti e la

statistica », ma nel caso dei calcoli di Planck la statistica si dimostrò pressoché vera. Egli aveva ottenuto per la distribuzione dell'energia nello spettro della radiazione termica una formula teorica che concordava perfettamente con la distribuzione osservata, riportata nella figura 2.

Mentre la formula di Rayleigh e Jeans cresce indefinitamente, richiedendo una quantità infinita di energia totale, il grafico dedotto dalla formula di Planck si riabbassa alle alte frequenze e la sua forma concorda perfettamente con le curve osservate. L'ipotesi di Planck, secondo cui il contenuto in energia di un quanto di radiazione è direttamente proporzionale alla frequenza, può essere scritta:

$$E = h\nu$$

in cui ν (la lettera greca ν) è la frequenza e h una costante universale nota col nome di *Costante di Planck*. Per far concordare le curve teoriche di Planck con quelle osservate occorre assegnare a h un certo valore numerico che è risultato pari a $6,77 \times 10^{-27}$ nel sistema C.G.S. *.

Il valore numerico estremamente piccolo della costante di Planck fa sì che la teoria quantistica non abbia importanza quando si considerano i fenomeni su grande scala che incontriamo nella vita di ogni giorno, ed emerga soltanto nello studio dei processi che hanno luogo su scala atomica.

I quanti di luce e l'effetto fotoelettrico.

Dopo aver lasciato uscire dalla bottiglia il diavoletto del quanto, Max Planck ne fu egli stesso terribilmente spaventato e preferì credere che i pacchetti di energia non fossero conseguenza delle proprietà peculiari delle onde luminose, ma piuttosto delle proprietà intrinseche degli atomi che possono emettere e assorbire radiazione soltanto in certe quantità discrete. La radiazione sarebbe dunque come il burro

* Le dimensioni fisiche della costante di Planck, h , sono quelle di un prodotto di energia per tempo, cioè [erg · sec] in unità del sistema C.G.S.: grandezza conosciuta nella meccanica classica col nome di *azione*. L'azione compare in molte formulazioni importanti, come il Principio di Minima Azione di Hamilton.

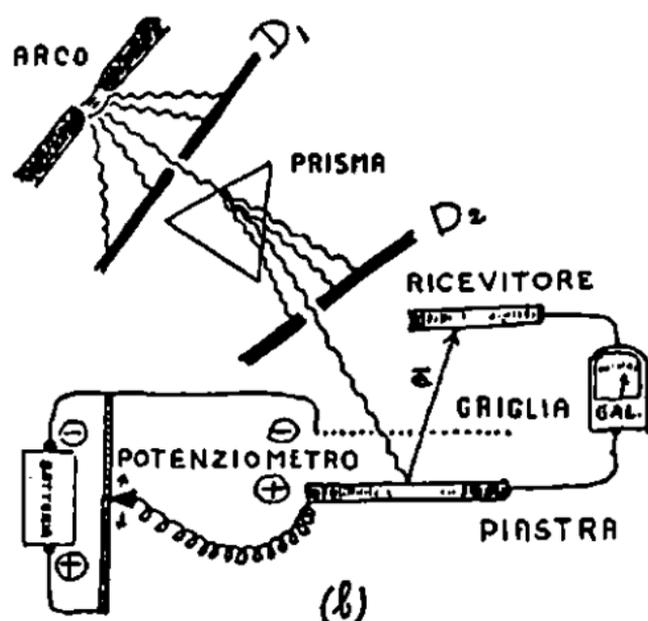
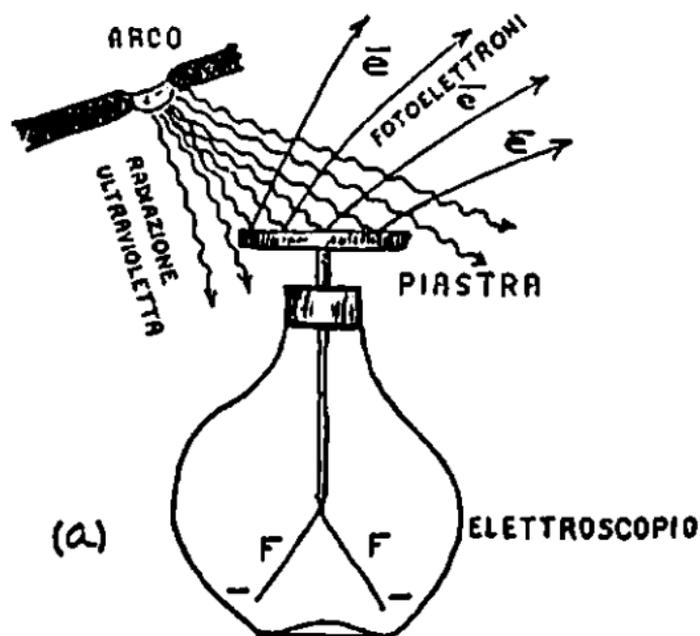


Fig. 6. Studi sperimentali sull'Effetto Fotoelettrico. In (a) è illustrato un metodo rudimentale per mettere in evidenza l'effetto fotoelettrico: la radiazione ultravioletta emessa da un arco voltaico estrae gli elettroni da una piastra metallica attaccata a un elettroscopio; le foglie F cariche negativamente, che fino ad allora si respingevano a vicenda, perdono la carica e si riavvicinano. In (b) è illustrato il metodo moderno: la radiazione ultravioletta proveniente da un arco voltaico attraversa un pri-

che può essere comprato e restituito al negoziante soltanto in panetti di peso stabilito, sebbene il burro di per sé possa esistere in qualsiasi quantità (non meno però di una molecola!). Cinque anni soltanto dopo la proposta originale di Planck, il quanto di luce venne riconosciuto come entità fisica esistente indipendentemente dal meccanismo della sua emissione o del suo assorbimento da parte degli atomi: questo passo fu compiuto da Albert Einstein in un articolo pubblicato nel 1905, l'anno del suo primo articolo sulla Teoria della Relatività. Einstein indicò che l'esistenza di quanti di luce che corrono liberamente nello spazio rappresenta una condizione necessaria per spiegare le leggi empiriche dell'effetto fotoelettrico: cioè l'emissione di elettroni dalle superfici metalliche irradiate con raggi violetti o ultravioletti.

Un'apparecchiatura semplice per mettere in evidenza l'effetto fotoelettrico (fig. 6a) consiste di un comune elettroscopio carico negativamente con attaccata una piastra metallica pulita, *P*. Quando da un arco voltaico *A*, ricco di raggi violetti e ultravioletti, una luce cade sulla piastra, si vedono le foglie *F* dell'elettroscopio riavvicinarsi perché l'elettroscopio si scarica. Fu dimostrato ripetutamente, tra gli altri dal fisico americano Robert Millikan (1868-1953), che particelle negative (elettroni) vengono cedute dalla piastra metallica. Se fra l'arco e la piastra si interpone una lastra di vetro che assorbe la radiazione ultravioletta, non vengono emessi elettroni, prova conclusiva del fatto che è l'azione dei raggi a causarne l'emissione. La figura 6b mostra schematicamente un'apparecchiatura più raffinata per studiare nei particolari i principi dell'effetto fotoelettrico. Essa comprende le seguenti parti.

sma, permettendo a una sola frequenza selezionata di cadere sulla piastra. L'energia dei fotoelettroni è misurata dalla loro capacità di passare dalla piastra al ricevitore muovendosi contro il campo elettrico regolabile per mezzo di un potenziometro posto fra la piastra e la griglia.

1. Un prisma di fluorite (trasparente alla radiazione ultravioletta) e una fenditura che permette la selezione di una radiazione monocromatica della lunghezza d'onda desiderata.
2. Un sistema di dischi rotanti con aperture triangolari di varie dimensioni che permette di far variare l'intensità della radiazione.
3. Un recipiente in cui sia stato fatto il vuoto spinto, un po' simile alle valvole elettroniche usate nelle radio. Una differenza di potenziale elettrico variabile viene applicato tra la piastra, che emette i fotoelettroni, e la griglia. Se la griglia è carica negativamente e la differenza di potenziale tra la griglia e la piastra è uguale o superiore all'energia cinetica dei fotoelettroni, espressa in elettron-volt, nel sistema non passerà nessuna corrente. Nel caso opposto vi sarà corrente e la sua intensità potrà essere misurata con il galvanometro. Con questa apparecchiatura si può misurare il numero e l'energia cinetica degli elettroni emessi da una luce incidente di qualsiasi intensità e lunghezza d'onda (o frequenza) date.

Lo studio dell'effetto fotoelettrico in diversi metalli ha portato a stabilire due semplici principi.

1. *Per luce di una data frequenza, ma di intensità variabile, l'energia dei fotoelettroni rimane costante mentre il loro numero aumenta in proporzione diretta all'intensità della luce (fig. 7a).*
2. *Se la frequenza della luce è variabile non vengono emessi fotoelettroni finché questa frequenza non supera un certo limite ν_0 che varia da un metallo all'altro. Oltre questa frequenza, chiamata soglia fotoelettrica, l'energia dei fotoelettroni aumenta linearmente essendo direttamente proporzionale alla differenza tra la frequenza della luce incidente e la frequenza critica ν_0 del metallo (fig. 7b).*

Questi fatti chiaramente appurati non potevano essere spiegati sulla base della teoria classica della luce: in certi punti la contraddicevano addirittura. Si sa che la luce è composta di onde elettromagnetiche corte e l'aumento dell'intensità della luce deve indicare un aumento delle forze elettriche e magnetiche oscillanti che si propagano attraverso lo spazio.

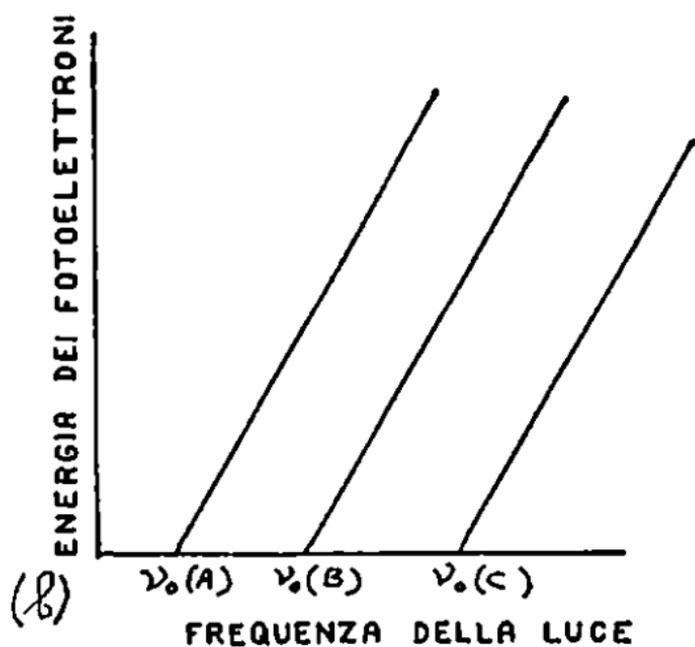
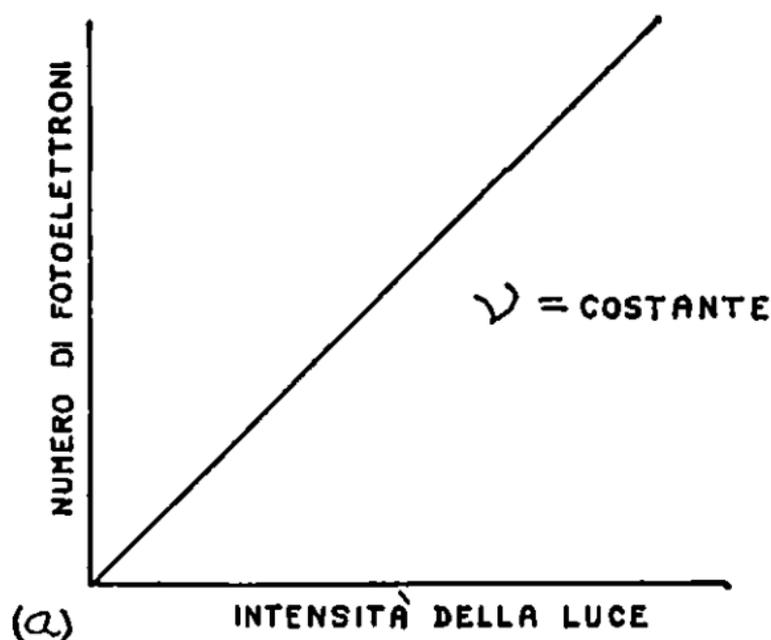


Fig. 7. Le Leggi dell'Effetto Fotoelettrico. In (a) il numero di elettroni è riportato in funzione dell'intensità della luce monocromatica incidente. In (b) l'energia dei fotoelettroni è riportata in funzione delle frequenze della luce monocromatica incidente per tre metalli diversi: A, B e C.

Poiché evidentemente gli elettroni sono emessi dal metallo per azione della forza elettrica, la loro energia dovrebbe aumentare al crescere dell'intensità della luce invece di restare costante come fa. Inoltre nella teoria elettromagnetica classica della luce non c'era motivo di aspettarsi che l'energia dei fotoelettroni dipendesse linearmente dalla frequenza della luce incidente.

Servendosi dell'idea di Planck dei quanti di luce, e supponendo che esistessero veramente sotto forma di pacchetti indipendenti di energia che si muovevano nello spazio, Einstein fu in grado di dare una spiegazione perfetta di entrambi i principi empirici dell'effetto fotoelettrico. Egli immaginò l'atto elementare dell'effetto fotoelettrico come risultato di una collisione tra un singolo quanto di luce incidente e uno degli elettroni di conduzione che trasportano la corrente elettrica nel metallo: in questo urto il quanto di luce svanisce cedendo tutta la sua energia all'elettrone di conduzione sulla superficie del metallo. Ma per attraversare la superficie e raggiungere lo spazio libero l'elettrone deve consumare una certa quantità di energia nel disimpegnarsi dall'attrazione degli ioni metallici: questa energia, conosciuta come « lavoro di estrazione », è diversa a seconda dei metalli e si indica di solito con il simbolo W . Cosí l'energia cinetica E_c con cui un fotoelettrone esce dal metallo è:

$$E_c = h(\nu - \nu_0) = h\nu - W$$

dove ν_0 è la frequenza critica della luce al di sotto della quale l'effetto fotoelettrico non ha luogo. Questa descrizione spiega contemporaneamente i due principi dedotti dagli esperimenti. Se la frequenza della luce incidente viene mantenuta costante il contenuto in energia di ogni quanto resta invariato e l'aumento nell'intensità della luce dà luogo soltanto all'aumento corrispondente nel numero dei quanti di luce. Viene cosí espulso un maggior numero di fotoelettroni, ciascuno con la stessa energia di prima. La formula che dà E_c come funzione di ν spiega i grafici empirici della figura 7b, prevedendo che le rette abbiano pendenza uguale per tutti i metalli perché il valore numerico di tale pendenza è h . Questa conseguenza

della descrizione dell'effetto fotoelettrico fatta da Einstein concorda perfettamente con gli esperimenti e non lascia dubbi sulla realtà dei quanti di luce.

L'effetto Compton.

Un importante esperimento che mostra la realtà dei quanti di luce fu eseguito nel 1923 da un fisico americano, Arthur Compton, che voleva studiare l'urto fra un quanto di luce e un elettrone in moto libero nello spazio. L'ideale sarebbe

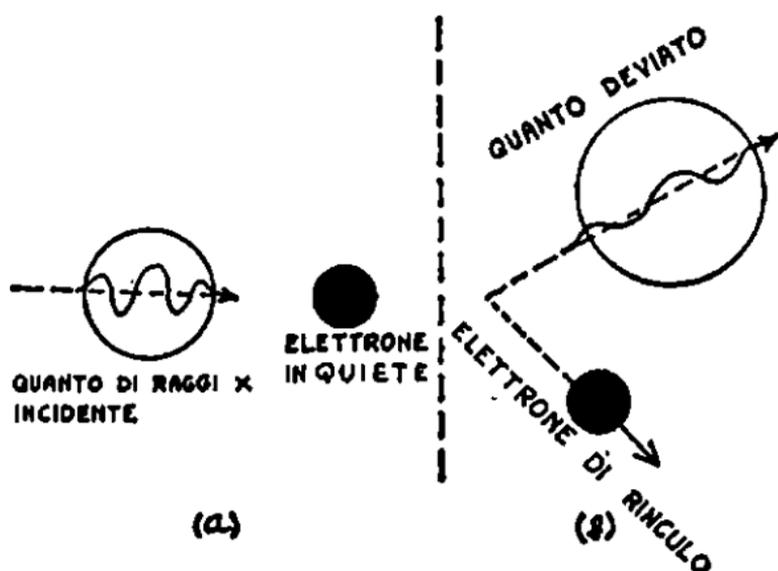


Fig. 8. Effetto Compton nei raggi X. Si noti che dopo la collisione la lunghezza d'onda del quanto di raggi X cresce a causa della perdita di energia a favore dell'elettrone.

osservare queste collisioni facendo attraversare un fascio di elettroni da un fascio di luce: purtroppo, però, perfino nei fasci di elettroni più intensi disponibili il numero di elettroni è così piccolo che si dovrebbe aspettare per secoli un solo urto. Compton superò la difficoltà servendosi dei raggi X, i cui quanti trasportano moltissima energia a causa dell'altissima frequenza in gioco. In confronto a questa energia trasportata da ogni quanto di raggi X diventa trascurabile l'e-

nergia con cui gli elettroni sono legati negli atomi degli elementi leggeri e perciò gli elettroni possono essere considerati slegati e completamente liberi. Se si considerasse una collisione tra un quanto di luce e un elettrone come una collisione fra due palle elastiche ci si dovrebbe aspettare che l'energia, e quindi la frequenza, dei raggi X deviati diminuisse all'aumentare dell'angolo di deviazione. Gli esperimenti di Compton (fig. 8) concordavano perfettamente con questa previsione teorica, e con la formula dedotta sulla base della conservazione dell'energia e della quantità di moto nell'urto di due sfere elastiche. Questa concordanza confermava ulteriormente l'esistenza dei quanti di luce.

2 Bohr e le orbite quantiche



L'aver scoperto che la luce si propaga nello spazio e può essere emessa e assorbita dalla materia soltanto sotto forma di pacchetti discreti di energia (quanti di luce), il cui contenuto in energia è rigorosamente definito dalle loro frequenze di vibrazione, influì profondamente sulle idee che in quel tempo si avevano circa la struttura degli atomi stessi. Quando, nel 1897, J. J. Thomson dimostrò con esperimenti diretti che minuscole particelle cariche negativamente (elettroni) potevano essere estratte dagli atomi, lasciando indietro dei residui carichi positivamente (ioni), divenne evidente che gli atomi non sono unità indivisibili costituenti la materia, come indicherebbe invece l'originario significato greco del loro nome, ma, al contrario, sono sistemi piuttosto complessi, formati di parti cariche positivamente e parti cariche negativamente. Thomson immaginò l'atomo costituito di una sostanza carica positivamente distribuita in modo più o meno uniforme in tutto il suo corpo, con elettroni carichi negativamente incorporati come l'uva passa in un panettone. Gli elettroni sono

attirati verso il centro della distribuzione di carica positiva e si respingono l'un l'altro conformemente alla legge di Coulomb sulle interazioni elettriche, e lo stato normale dell'atomo si raggiunge quando questi due sistemi di forze opposte sono in equilibrio. Se un atomo viene disturbato (o, come dicono i fisici, « eccitato ») dall'urto con un altro atomo o con un elettrone libero di passaggio, i suoi elettroni interni cominciano a vibrare (come le corde di un piano a coda) intorno alla posizione di equilibrio ed emettono luce corrispondente a un insieme di frequenze caratteristiche, che renderebbero conto degli spettri a righe osservati. Gli atomi dei diversi elementi chimici hanno un diverso numero di elettroni interni diversamente distribuiti, con frequenze caratteristiche diverse, e differiscono quindi nei loro spettri ottici quali risultano all'osservazione (fig. 9). Se si fosse accettato il modello dell'atomo di Thomson sarebbe stato possibile calcolare, servendosi dei metodi della meccanica classica, la distribuzione di equilibrio degli elettroni entro la struttura di un atomo contenente una data quantità di elettroni interni, e si sarebbe potuto prevedere che gli insiemi di frequenze di vibrazione caratteristiche calcolate coincidessero con gli spettri a righe osservati per i vari elementi. Thomson stesso e i suoi allievi eseguirono calcoli complicati per trovare le configurazioni di elettroni interatomici per le quali le frequenze di vibrazione calcolate coincidessero con le frequenze osservate negli spettri a righe dei vari elementi chimici. I risultati furono negativi in modo scoraggiante: gli spettri ricavati teoricamente in base al modello di Thomson non assomigliavano affatto agli spettri di nessuno degli elementi chimici osservati. Divenne sempre più evidente che occorreva apportare qualche cambiamento rivoluzionario al classico modello atomico di Thomson.

Questa necessità fu messa particolarmente in risalto da un giovane fisico danese, Niels Bohr, che, ottenuto il dottorato all'Università di Copenaghen con un lavoro sulla teoria del passaggio delle particelle cariche attraverso la materia, nel 1911 giunse al Cavendish Laboratory dell'Università di Cambridge per unirsi a un gruppo che lavorava sotto la direzione

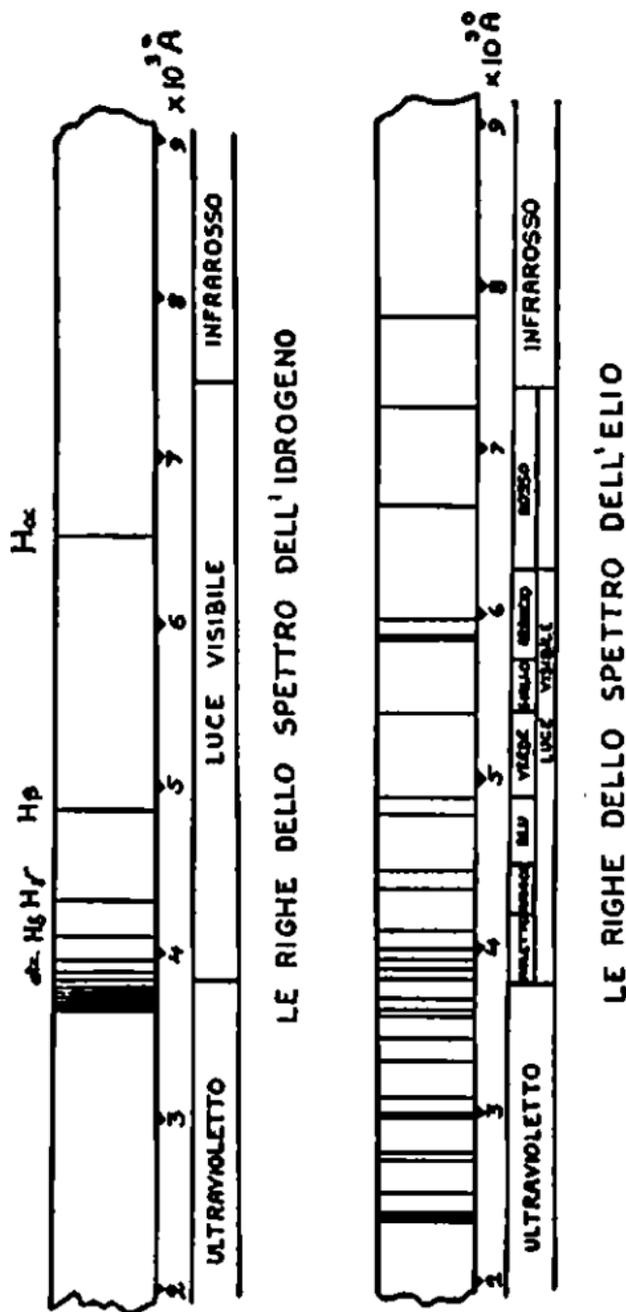


Fig. 9. Si confronti la semplicità dello spettro dell'idrogeno, prodotto dal moto di un solo elettrone, con la complessità e l'apparente disordine causati da due elettroni nello spettro dell'elio. Entrambi gli spettri si prolungano ancora nella regione ultravioletta e la regione infrarossa.

di J. J. Thomson. Bohr sosteneva che, poiché la luce non doveva più essere considerata composta di onde propagantisi in modo continuo, ma dovevano invece esserle attribuite le nuove misteriose proprietà connesse con l'emissione e l'assorbimento dell'energia sotto forma di pacchetti discreti di dimensioni ben definite, si doveva in conseguenza cambiare la tradizionale meccanica newtoniana su cui si basava il modello atomico di Thomson. Se si « quantizza » l'energia elettromagnetica della luce, cioè se la si riduce a porzioni definite di uno, due, tre o più quanti di luce ($h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$, ecc.), non è forse ragionevole supporre che l'energia meccanica degli elettroni atomici sia anch'essa quantizzata, che possa assumere soltanto un insieme discreto di valori, essendo i valori intermedi vietati da qualche legge della natura non ancora scoperta? Invero sarebbe stato strano che i sistemi atomici costruiti in base ai principi della meccanica newtoniana classica, come il modello dell'atomo di Thomson, emettessero e assorbissero luce sotto la forma dei quanti di Planck, che non si inquadrano affatto negli schemi della fisica classica!

La teoria di Rutherford dell'atomo nucleare.

A J. J. Thomson non piacevano queste idee rivoluzionarie del giovane danese, e molte aspre discussioni spinsero Bohr ad abbandonare Cambridge e a utilizzare il resto della sua borsa di studio per ricerche all'estero in qualche posto in cui le sue idee, ancora vaghe, sulla quantizzazione del moto dell'elettrone negli atomi suscitassero meno opposizione. Scelse l'Università di Manchester dove la cattedra di Fisica era affidata al figlio di un agricoltore neozelandese e antico allievo di Thomson: si chiamava Ernest Rutherford, divenuto poi Sir Ernest e in seguito Lord Rutherford di Nelson per le sue scoperte scientifiche. Quando Bohr giunse a Manchester, Rutherford era immerso in pieno in quegli studi, destinati a fare epoca, sulla struttura interna degli atomi: bombardava gli atomi con proiettili ad alta energia conosciuti col nome di « particelle α », emesse dagli elementi radioattivi allora

appena scoperti. In studi precedenti, eseguiti in maggioranza in Canada presso l'Università McGill, Rutherford era riuscito a dimostrare che le particelle α emesse dagli elementi radioattivi non sono altro che atomi di elio carichi positiva-

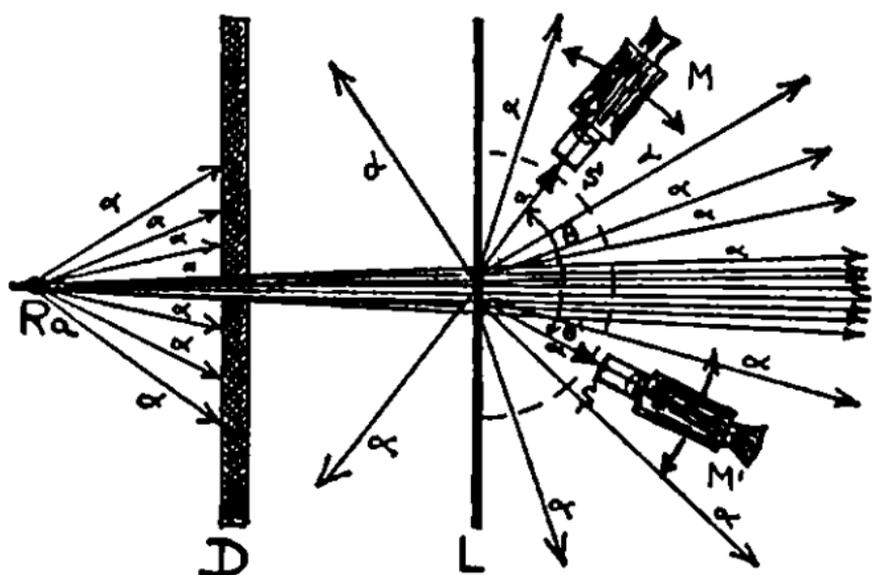


Fig. 10. L'apparecchio di Rutherford per studiare la deviazione delle particelle α in funzione dell'angolo di deviazione.

mente che si muovono con velocità spaventosamente alte, mai incontrate prima nella fisica. L'emissione di particelle α da parte di atomi pesanti instabili di elementi radioattivi era spesso seguita dall'emissione di elettroni (particelle β) e radiazioni elettromagnetiche ad alta frequenza (raggi γ), simili ai comuni raggi X ma con lunghezza d'onda molto piú corta. Se si vuole rompere qualcosa è naturale scegliere come proiettile una solida palla di ferro anziché una leggera palla da ping-pong, e Rutherford immaginò che queste massicce particelle α potessero penetrare molto piú facilmente nell'atomo che non le leggere particelle β . Il dispositivo era semplicissimo (fig. 10): una piccola quantità di sostanza radioattiva che emettesse particelle α , per esempio radio (Ra), veniva posta su una capocchia di spillo e sistemata a una certa distanza da una sottile lamina (L) del metallo da esaminare. Dopo che

il raggio aveva attraversato il diaframma (D) si formava un sottile fascio di particelle α . Attraversando la lamina metallica le particelle α urtavano contro gli atomi di cui era costituita, e una frazione delle particelle veniva deviata in direzioni diverse dal lato opposto della lamina. Cadendo sullo schermo fluorescente (S) posto dietro alla lamina, ogni particella α produceva una piccola scintillazione nel punto dell'urto. Osservando queste scintillazioni attraverso un microscopio (M) si poteva contare il numero di particelle deviate su traiettorie formanti angoli diversi rispetto alla direzione originale, proprio come sparando contro un bersaglio si può misurare la deviazione delle pallottole rispetto al centro del bersaglio dalla posizione dei buchi prodotti. Nei suoi esperimenti Rutherford notò che mentre la maggioranza delle particelle attraversava la lamina quasi senza deviazione, formando un punto luminoso di fronte all'apertura del diaframma (equivalente al centro del bersaglio) alcune erano deviate di angoli molto grandi. Dispositivi sperimentali un po' diversi hanno mostrato che in alcuni casi le particelle α sono respinte quasi completamente indietro verso la sorgente.

Queste osservazioni erano in aperta contraddizione con ciò che si poteva prevedere in base al modello atomico di Thomson. Attraversando l'atomo, la particella α poteva essere deviata dal suo percorso originale o per l'attrazione elettrica degli elettroni interatomici, o per la repulsione elettrica della carica positiva distribuita. L'interazione con gli elettroni, circa 10000 volte più leggeri delle particelle α , non provocherebbe certamente una deflessione percettibile del moto della particella α . D'altra parte nel modello di Thomson, il materiale carico positivamente era distribuito in modo troppo rado intorno a tutta la struttura dell'atomo per riuscire a provocare una deviazione apprezzabile delle particelle α che lo attraversavano. Infatti se scagliamo una palla di ferro contro un pezzo di carbone essa rimbalzerà lontano da questo con un angolo imprevedibile, rompendo magari il carbone in diversi pezzi. Ma se riduciamo in polvere sottile lo stesso pezzo di carbone e scagliamo la stessa palla attraverso la nuvola di

polvere di carbone che se ne ricava, essa passerà senza subire alcuna deviazione. Le grandissime deviazioni osservate negli esperimenti di Rutherford dimostravano categoricamente che la carica positiva dell'atomo (associata alla maggior parte della sua massa) non è distribuita in tutta la sua struttura, come nell'esempio della nuvola di carbone, ma è concentrata, come il pezzo solido di carbone, in un piccolo nocciolo duro: il nucleo. La relazione, osservata sperimentalmente, tra il numero di particelle α deviate nelle varie direzioni e l'angolo di deviazione, concordava perfettamente con la formula teorica per la deviazione di particelle che si muovono nel campo di una forza centrale repulsiva, la cui intensità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Era così nato il modello atomico di Rutherford: con i suoi elettroni leggeri, carichi negativamente, che si muovevano nello spazio libero intorno a un nucleo centrale pesante, carico positivamente, assomigliava un po' al Sistema Solare. Poiché la legge di Coulomb sull'attrazione elettrica è identica dal punto di vista matematico alla Legge della Gravitazione di Newton (essendo entrambe le forze inversamente proporzionali al quadrato della distanza), gli elettroni dell'atomo si muovono intorno al nucleo lungo orbite circolari o ellittiche, proprio come fanno i pianeti intorno al Sole. Ma c'è una grande differenza: mentre il Sole e i pianeti sono elettricamente neutri, il nucleo atomico e gli elettroni, trasportano cospicue cariche elettriche. È noto che le cariche elettriche oscillanti producono onde elettromagnetiche divergenti: il modello atomico di Rutherford può essere considerato una stazione radiotrasmittente in miniatura funzionante a frequenza estremamente elevata. Secondo la teoria classica dell'emissione elettromagnetica si potrebbe facilmente calcolare che le onde luminose emesse dagli elettroni nel ruotare intorno al nucleo atomico porterebbero via nello spazio tutta l'energia degli elettroni in circa un centomillesimo di secondo. Persa tutta la loro energia gli elettroni dovrebbero cadere nel nucleo e l'atomo cesserebbe di esistere!

Per essere esatti simili perdite di energia sono previste anche per i pianeti del sistema solare. Secondo la Teoria della

Relatività Generale di Einstein anche l'oscillazione di masse gravitanti emette le cosiddette « onde gravitazionali », che sottraggono energia. Ma, dato il piccolo valore della costante di Newton, le perdite di energia planetaria attraverso l'emissione gravitazionale sono estremamente piccole e dall'epoca della loro formazione, avvenuta quattro o cinque miliardi di anni fa, i pianeti non possono aver perduto più di qualche per cento della loro energia originaria.

Quantizzazione di un sistema meccanico.

E che dire degli atomi costruiti in base al modello di Rutherford? In teoria, come abbiamo detto, non potrebbero esistere per più di un centomillesimo di secondo, mentre di fatto esistono per l'eternità. Questo era il problema che il giovane Bohr si trovò di fronte al suo arrivo a Manchester. Sconcertanti contraddizioni di questo genere tra le previsioni teoriche da una parte e i dati dell'osservazione o addirittura il senso comune dall'altra sono i principali fattori dell'evoluzione della scienza. L'insuccesso del tentativo di A. A. Michelson di rivelare il moto della Terra attraverso un cetero luminifero * portò Einstein a formulare la Teoria della Relatività che mutò le nostre nozioni di spazio e tempo ricavate dal senso comune, e provocò cambiamenti profondi nella fisica classica. Allo stesso modo la « catastrofe ultravioletta », di cui abbiamo parlato nel capitolo precedente, portò Planck all'idea assolutamente nuova dei quanti di luce.

L'impossibilità teorica del modello atomico di Rutherford, che gli esperimenti avevano verificato, entrò in risonanza con la segreta sensazione di Bohr che se l'energia elettromagnetica era quantizzata dovesse essere quantizzata anche l'energia meccanica, sia pure forse in modo un po' diverso. Infatti quando un atomo eccitato emette un quanto di luce con energia $h\nu$, la sua energia meccanica deve diminuire esattamente della stessa quantità. Dato che gli spettri atomici sono

* Cfr. BERNARD JAFFE, *Michelson and the Speed of Light*, Doubleday, « Science Study Series », 1960.

costituiti da una serie di righe discrete, nettamente definite, le differenze di energia tra i vari stati possibili di un atomo devono avere anch'esse valori nettamente definiti e così pure le energie assolute di questi stessi stati. Questo porta all'idea

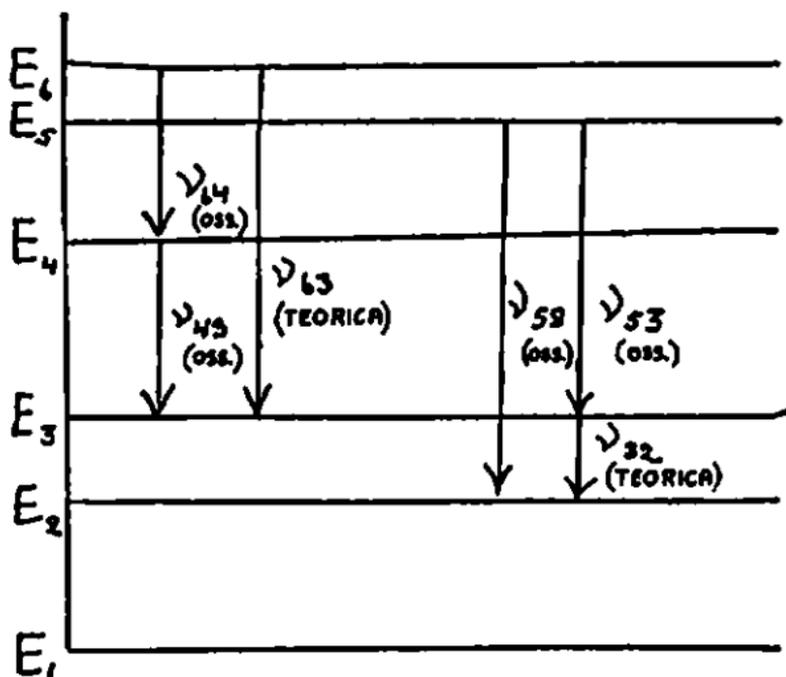


Fig. 11. La regola di Rydberg spiegata da Bohr.

che il meccanismo atomico sia pressappoco simile al cambio di velocità di un'automobile: si può innestare la prima (la marcia più bassa), la seconda, la terza ecc., ma mai la prima e mezzo o la terza e tre quinti.

Siano E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , e così via, i possibili valori energetici, disposti in ordine crescente, dei diversi stati di un atomo (fig. 11). Un atomo ha sempre un po' di energia interna, ma quando questa energia è caduta al livello più basso possibile, E_1 , nessuna porzione di essa è disponibile per emettere un quanto di luce: questo livello E_1 è lo *stato normale* o *stato fondamentale* dell'atomo in cui esso può esistere per l'eternità. Si chiama *energia di zero* e nel caso di un oscillatore è $h\nu/2$. Supponiamo ora che l'atomo sia portato in uno stato

eccitato con un'energia un po' piú alta E_n . Si può raggiungere questa energia per esempio sottoponendo il gas a una temperatura altissima, come nell'atmosfera del Sole dove gli atomi sono portati a stati eccitati dai violenti urti termici che avvengono tra di loro. Un altro modo per eccitare gli atomi consiste nel far passare una scarica elettrica ad alta tensione attraverso un tubo di vetro pieno di gas rarefatto *. Gli atomi vengono eccitati dall'urto degli elettroni veloci che si muovono rapidamente attraverso il tubo, dall'elettrodo negativo (catodo) a quello positivo (anodo). Questi congegni in cui il gas diventa luminoso al passaggio della scarica elettrica ad alta tensione in origine erano conosciuti col nome di tubi di Geissler, dal loro inventore Heinrich Geissler; oggi se ne vedono dappertutto, nelle insegne luminose e in altri apparecchi di illuminazione.

Quando un atomo è eccitato e portato all' m -esimo stato di energia E_m , può tornare a uno stato di energia inferiore, E_n ($n < m$) liberando l'eccesso di energia sotto forma di un quanto di luce. Cosí possiamo scrivere:

$$h\nu_{m,n} = E_m - E_n \quad \text{oppure} \quad \nu_{m,n} = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

I due indici in $\nu_{m,n}$ indicano che questa particolare frequenza nello spettro corrisponde al passaggio dall' m -esimo all' n -esimo stato quantico di moto.

Questa raffigurazione dell'emissione di quanti di luce come risultato del passaggio dell'atomo da uno stato di energia piú alto a uno piú basso ha una conseguenza interessantissima. Supponiamo di osservare nello spettro di un elemento due righe corrispondenti al passaggio dal 6° stato quantico al 4° e dal 4° al 3° (a sinistra nella figura 11); è allora possibile

* Si deve adoperare gas rarefatto perché, aumentando gli intervalli di tempo tra due collisioni successive, sia possibile che gli elettroni ricuperino, grazie all'accelerazione del campo, l'energia perduta in ogni collisione. Alla pressione atmosferica normale i gas non conducono l'elettricità, e quando la tensione diventa molto alta le loro proprietà isolanti cessano bruscamente e si forma una scintilla.

che il passaggio avvenga direttamente dal 6° stato al 3°, e troviamo una riga con una frequenza

$$\nu_{6,3} = \nu_{6,4} + \nu_{4,3}.$$

A destra, nella figura, è rappresentata la situazione opposta: poiché osserviamo le frequenze $\nu_{3,2}$ e $\nu_{3,3}$ ne segue che probabilmente osserviamo anche la frequenza

$$\nu_{3,2} = \nu_{3,3} - \nu_{3,2}.$$

Lo spettroscopista svizzero W. Ritz aveva scoperto questo principio di *Addizione e Sottrazione* quando Niels Bohr era ancora uno scolarotto. Ma nella spettroscopia prequantistica la regola di Ritz e altre simili regolarità numeriche tra le frequenze osservate erano soltanto enigmi imbarazzanti che non riuscivano a trovare una spiegazione ragionevole; diventarono tuttavia molto utili a Niels Bohr quando tentò di risolvere il problema dell'emissione e dell'assorbimento di luce da parte degli atomi, introducendo l'idea di stati quantici discreti degli elettroni atomici.

Per questi primi studi Bohr scelse l'atomo di idrogeno, l'atomo più leggero e quindi quello che si poteva supporre avesse la struttura più semplice; d'altronde si sapeva che anche il suo spettro era semplicissimo. Nel 1885 un insegnante svizzero, J. J. Balmer, che si interessava delle regolarità negli spettri a righe degli atomi, scoprì che le frequenze nella parte visibile dello spettro dell'idrogeno potevano essere rappresentate con grande precisione da una formula semplicissima. Ecco, nella tabella seguente, le frequenze di queste righe, indicate nella figura 9 in alto (dove sono riportate sotto forma di lunghezze d'onda $\lambda = c/\nu$).

$$H_{\alpha} \text{ ————— } \nu_1 = 4,569 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1} *$$

$$H_{\beta} \text{ ————— } \nu_2 = 6,168 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}$$

$$H_{\gamma} \text{ ————— } \nu_3 = 6,908 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}$$

$$H_{\delta} \text{ ————— } \nu_4 = 7,310 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}$$

* Sec⁻¹ significa « al secondo »; cm⁻¹ significa « al centimetro »; mele §¹ significa « mele al dollaro ».

Come il lettore stesso può verificare, queste cifre possono essere ricavate dalla formula

$$\nu_{m,n} = 3,289 \times 10^{15} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2} \right) \text{sec}^{-1}$$

dove m assume i valori: 3, 4, 5, 6 *. Per n più grandi le frequenze cadono nella regione ultravioletta e le righe diventano sempre più fitte convergendo sul valore

$$3,289 \times 10^{15} \times 1/4 = 8,2225 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}.$$

Nel quadro dato da Bohr della relazione esistente tra i quanti di luce emessa $h\nu_{m,n}$ e gli stati (o livelli) energetici dell'atomo E_m ed E_n , la formula di Balmer ci dice che l' m -esima riga della serie è dovuta al passaggio dall' m -esimo stato di un atomo di idrogeno eccitato al secondo stato (essendo $4 = 2^2$). Se nella formula di Balmer a $1/4 = 1/2^2$ si sostituisce $1 = 1/1^2$ e si pone $m = 2, 3, 4...$ si ottiene una sequenza di righe che cade ancor più lontano nella regione ultravioletta: effettivamente questa sequenza fu scoperta da Theodor Lyman. Se invece si sceglie come primo termine della formula di Balmer $1/9 = 1/3^2$, oppure $1/16 = 1/4^2$, si ottengono le frequenze della luce che cadono nella regione del lontano infrarosso e che furono scoperte rispettivamente da Friedrich Paschen e Frederick Brackett. Perciò gli stati quantici meccanici debbono apparire come nella figura 12, che indica anche le transizioni che danno luogo all'emissione delle serie di Lyman, Balmer, Paschen e Brackett.

Ogni riga dell'intero spettro è dunque caratterizzata dai due indici, m e n , nei due livelli quantici tra i quali avviene la transizione (dall' m -esimo all' n -esimo). Poiché l'energia del quanto di luce è pari alla differenza di energia tra lo stato da

* In questa formula di solito il coefficiente numerico è indicato con R e conosciuto col nome di costante di Rydberg, anche se dovrebbe essere chiamato più propriamente costante di Balmer.

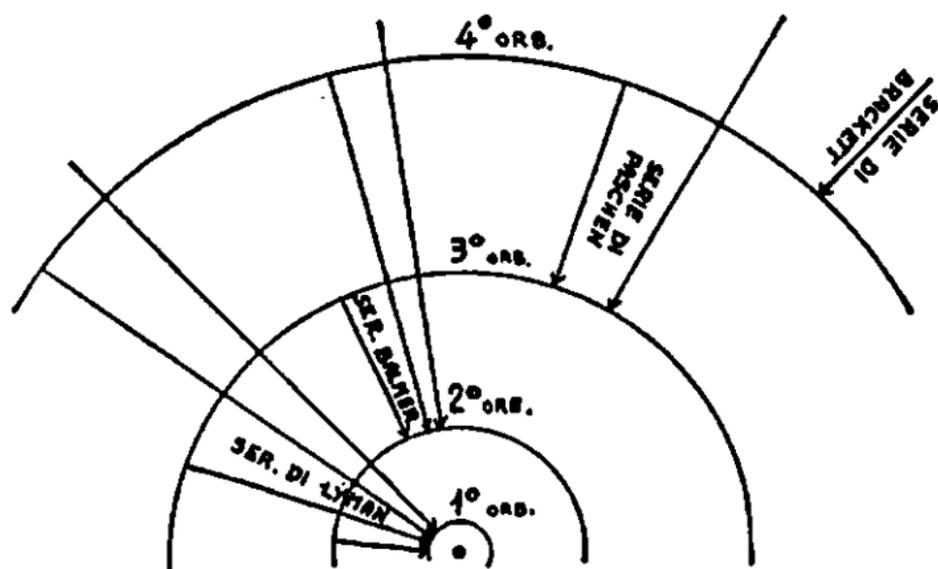


Fig. 12. Il modello dell'atomo di idrogeno secondo Bohr. Le serie di Lyman sono nell'ultravioletto, le serie di Balmer nella parte visibile dello spettro. Le serie di Paschen e di Brackett sono nell'infrarosso.

cui parte e quello a cui arriva, la formula di Balmer generalizzata può essere riscritta così:

$$h\nu_{m,n} = Rh \left[\left(-\frac{1}{m^2} \right) - \left(-\frac{1}{n^2} \right) \right]$$

ovvero

$$h\nu_{m,n} = \left(-\frac{Rh}{m^2} \right) - \left(-\frac{Rh}{n^2} \right),$$

dove le due quantità tra parentesi rappresentano i livelli di energia E_m ed E_n . Queste energie si scrivono sotto forma di quantità negative perché per convenzione si attribuisce valore di energia zero allo stato del sistema in cui tutte le parti che lo compongono si trovano a una distanza infinita l'una dall'altra. Così se l'energia del sistema è positiva esso non resterà insieme e tutti i suoi componenti andranno ognuno per conto suo. In sistemi stabili come quello dei pianeti che ruotano intorno al Sole, o come quello degli elettroni che ruotano intorno al nucleo atomico, l'energia è negativa e sarebbe

necessario fornire energia dall'esterno per scinderli nei loro componenti. Per spiegare i valori dell'energia nei diversi stati dell'atomo di idrogeno indicati dalla formula precedente, Bohr formulò due ipotesi semplificatrici.

1. Che l'atomo di idrogeno, essendo l'atomo più semplice di tutto il Sistema Periodico degli Elementi, contenga *soltanto un* elettrone.

2. Che i diversi stati quantici dell'idrogeno corrispondano al moto di questo elettrone lungo *orbite circolari* con raggi diversi.

Con queste ipotesi si dovrebbe essere in grado di ricavare le orbite quantiche degli elettroni dalla relazione $E_n = -Rb/n^2$. Prendiamo in esame il moto orbitale di un elettrone nell' n -esimo stato eccitato dell'atomo di idrogeno, e scriviamo r_n e v_n per il raggio e la velocità orbitale dell'elettrone nell' n -esimo stato. La massa dell'elettrone è m_e e la sua carica $-e$, mentre la carica del nucleo (in questo caso un protone) è $+e$. La condizione perché possa verificarsi il moto circolare dell'elettrone è l'equilibrio tra la forza d'attrazione elettrostatica $-e^2/r^2$ e la forza centrifuga $+mv^2/r$.

Da $-e^2/r^2 + m_e v^2/r = 0$ segue $v = e/\sqrt{m_e r}$, che dà la velocità v dell'elettrone necessaria al suo moto lungo il cerchio di raggio r . In base a questa equazione della meccanica classica un elettrone può muoversi lungo *qualunque* orbita circolare purché abbia la velocità necessaria.

Quale è la condizione quantica che seleziona soltanto le orbite con energie $E_n = -Rb/n^2$?

Nella Teoria Quantistica della Radiazione, descritta precedentemente, si affermava che la vibrazione di una frequenza data ν può portare soltanto l'energia di uno, due, tre o più quanti di luce, così che $E_n = nh\nu$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Si può riscrivere la relazione nella forma

$$\frac{E_n}{\nu} = nh$$

che significa che la quantità E/ν può essere soltanto un mul-

tiplo intero della costante di Planck h . È opportuno ricordare qui che le dimensioni fisiche di h sono:

$$\begin{aligned}
 [\text{azione}] &= \frac{[\text{energia}]}{[\text{frequenza}]} = \frac{[\text{massa}] \cdot [\text{velocità}]^2}{[\text{frequenza}]} = \\
 &= \frac{[\text{massa}] \cdot [\text{lunghezza}]^2}{[\text{tempo}]^{-1} \cdot [\text{tempo}]^2} = \\
 &= [\text{massa}] \cdot \frac{[\text{lunghezza}]}{[\text{tempo}]} \cdot [\text{lunghezza}] = \\
 &= [\text{massa}] \cdot [\text{velocità}] \cdot [\text{lunghezza}].
 \end{aligned}$$

Il prodotto della *massa* di una particella per la sua *velocità* e per la *distanza* che percorre è una quantità ben nota chiamata *azione*, ed è importante nella meccanica analitica classica. Per esempio, il « Principio della minima azione », formulato dal matematico francese P. L. M. de Maupertuis nel 1747, afferma che una particella soggetta a forze meccaniche viaggerà da un punto A a un punto B lungo la traiettoria in cui « l'azione totale » da A a B sarà o la minima o la massima fra tutte quelle delle altre possibili traiettorie fra questi due punti. La legge di Planck dei quanti di luce aggiunge al principio di Maupertuis un'ulteriore condizione: *l'azione totale deve essere sempre un multiplo intero di h* .

Nel caso della traiettoria circolare chiusa di un elettrone intorno al nucleo, questa condizione quantica richiederà che il prodotto della massa dell'elettrone per la sua velocità e per la distanza coperta in una rivoluzione sia un multiplo intero di h . Così per l' n -esima orbita di Bohr:

$$m_e \cdot v_n \cdot 2\pi r_n = nh$$

$$m_e \cdot \frac{e}{\sqrt{m_e r_n}} \cdot 2\pi r_n = 2\pi e \sqrt{m_e} \sqrt{r_n} = nh$$

$$\text{da cui } r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m} \cdot n^2.$$

Calcoleremo ora l'energia totale E_n di un elettrone sull' n -esima orbita, sommando la sua energia cinetica E_c e la sua energia potenziale U . Usando per la velocità l'espressione $v = c/\sqrt{m_e r}$ indicata precedentemente, e ricordando che l'energia potenziale di due cariche $+e$ e $-e$ poste fra loro a distanza r è $-e^2/r$, scriviamo

$$E_n = E_{c_n} + U_n = \frac{1}{2} m_e \frac{e^2}{m_e r_n} - \frac{e^2}{r_n} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n} - \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n}$$

Sostituendo a r_n l'espressione ricavata dalla formula precedente otteniamo

$$E_n = -\frac{2\pi^2 e^4 m_e}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

che coincide con l'espressione empirica ricavata dalla formula di Balmer:

$$E_n = -\frac{R h}{n^2}$$

se si pone

$$R = \frac{2\pi^2 e^4 m_e}{h^3}.$$

Quando Bohr introdusse in questa espressione i valori numerici di e , m_e e h , ottenne $R = 3,289 \times 10^{15} \text{ sec}^{-1}$, che è esattamente il suo valore sperimentale ottenuto mediante l'osservazione spettroscopica. Il problema della quantizzazione di un sistema meccanico era così felicemente risolto.

Le orbite ellittiche di Sommerfeld.

Il lavoro originale di Bohr sull'atomo di idrogeno fu presto seguito da quello di un fisico tedesco, Arnold Sommerfeld, che estese le idee di Bohr al caso di orbite ellittiche. Il moto di una particella nel campo di forza centrale è individuato generalmente da due coordinate (polari), la sua distanza r dal centro di attrazione e il suo angolo di posizione (azimut)

φ rispetto all'asse maggiore dell'ellisse come indica la figura 13; r ha il valore massimo quando $\varphi=0$; decresce fino a raggiungere il valore minimo per $\varphi=\pi$, e cresce di nuovo fino a raggiungere il valore massimo per $\varphi=2\pi$. Perciò, in

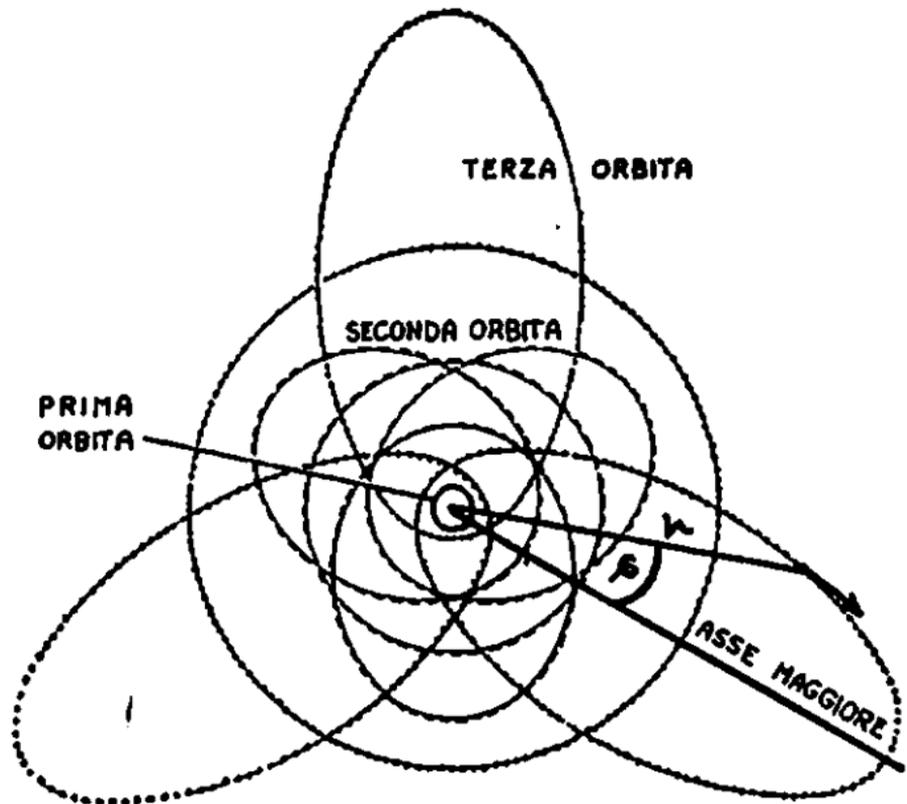


Fig. 13. *Orbite quantiche circolari ed ellittiche nell'atomo di idrogeno. La prima orbita circolare (linea continua) corrisponde all'energia più bassa dell'elettrone. Le altre quattro orbite, una circolare e tre ellittiche (linee tratteggiate) corrispondono alla stessa energia, che in esse è più alta che nella prima orbita. Le altre nove orbite (linee tratteggiate) — la figura ne mostra soltanto quattro — corrispondono a energia ancora più alta e uguale in tutte e nove.*

contrasto con le orbite circolari di Bohr dove r rimane costante e soltanto φ cambia, il moto lungo le orbite ellittiche di Sommerfeld è individuato da due coordinate indipendenti, r e φ ; ne segue che ogni orbita ellittica quantizzata deve es-

sere caratterizzata da *due* numeri quantici: il numero quantico azimutale n_φ e il numero quantico radiale n_r . Applicando le condizioni quantiche di Bohr, secondo cui le azioni meccaniche totali per la componente *azimutale* e la componente *radiale* del moto devono essere numeri interi, n_φ e n_r , Sommerfeld ottenne per l'energia del moto ellittico quantizzato la formula:

$$E_{n_\varphi n_r} = - \frac{Rh}{(n_\varphi + n_r)^2}.$$

Questa formula è praticamente uguale a quella originale di Bohr, con la sola differenza che il denominatore, invece di essere il quadrato di un intero, è il quadrato di una somma di due interi arbitrari, che è naturalmente a sua volta un intero arbitrario. Ponendo $n_r=0$ otteniamo, come caso speciale, le orbite circolari di Bohr. Se $n_r \neq 0$ otteniamo orbite ellittiche con diversi gradi di « ellitticità ». Ma tutte le orbite corrispondenti alla stessa somma $n_\varphi + n_r$ hanno esattamente la stessa energia malgrado le loro diverse forme. La somma $n_\varphi + n_r$, indicata di solito semplicemente con n , è nota col nome di *numero quantico principale*.

È opportuno osservare qui che, facendo intervenire la Teoria della Relatività, si ottengono per l'atomo di idrogeno risultati leggermente diversi perché, secondo la meccanica di Einstein, la massa della particella aumenta all'aumentare della velocità, e si avvicina al valore infinito quando la velocità si avvicina alla velocità della luce c . Infatti se m_0 è la « massa a riposo » di una particella (praticamente la sua massa quando si muove *molto più lentamente* della luce), la massa a velocità molto più alta v è data da:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

che tende all'infinito quando v si avvicina a c . Dato che nel moto ellittico la velocità varia nei diversi punti della traiettoria (Seconda Legge di Keplero), varrà anche la massa del-

l'elettrone e i calcoli diventano piú complicati. In questo caso le energie di orbite diverse corrispondenti allo stesso numero quantico principale diventano leggermente diverse, e un singolo livello si scinde in vari componenti ravvicinati. Corrispondentemente una singola riga spettrale, risultante dalle transizioni tra due livelli quantici (caratterizzati da due numeri quantici principali m e n), si scinde in numerosi componenti. Questa scissione, che può essere osservata soltanto servendosi di un analizzatore di spettri con altissimo potere disperdente, è nota col nome di « struttura fine » delle righe spettrali. Le differenze di frequenza tra i componenti della struttura fine dipendono dalla cosiddetta « costante di struttura fine », α , data da

$$\alpha = \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137}.$$

Tale quantità non ha dimensioni fisiche, essendo un numero puro, e la sua piccolezza dà ragione del fatto che i componenti della struttura fine siano così vicini. Se c fosse infinito α sarebbe zero e non si osserverebbe nessuna struttura fine.

Un'altra estensione della teoria originale di Bohr sta nell'aver capito che le orbite ellittiche di Sommerfeld non giacciono necessariamente sullo stesso piano, ma possono avere orientamenti diversi nello spazio, conferendo agli atomi con molti elettroni in moto su molte orbite diverse un aspetto che non è quello di dischi piatti (come nel caso del nostro sistema solare) ma piuttosto di corpi tridimensionali.

L'Istituto di Bohr.

Quando Bohr ritornò trionfante in Danimarca, la Reale Accademia delle Scienze Danese gli dette un aiuto finanziario per costruirsi un suo istituto per gli studi atomici e per assegnare borse di studio a giovani fisici teorici di tutto il mondo desiderosi di andare a Copenaghen a lavorare con lui.

Sorse così, al numero 15 di Blegdamsvej *, un edificio dell'Universitetets Institut for Teoretisk Fysik, e alla porta accanto sorse la casa del direttore per Bohr e la sua famiglia. È interessante ricordare che la Reale Accademia Danese delle Scienze trae i maggiori aiuti finanziari dalla Carlsberg, produttrice della migliore birra del mondo. Molti anni fa il fondatore della Carlsberg lasciò in testamento all'Accademia il reddito della società perché venisse usato per lo sviluppo della scienza: nel suo testamento veniva specificato che la splendida dimora, che il vecchio Carlsberg aveva costruito per sé proprio nel mezzo della proprietà della fabbrica di birra, fosse adibita a residenza del più famoso scienziato danese vivente. Quando Bohr raggiunse la fama e il precedente inquilino del Palazzo Carlsberg morì, poco dopo il 1930, Bohr e la sua famiglia vi si trasferirono. La figura 14 contiene uno schizzo della cravatta confezionata in occasione di un compleanno del notissimo fisico danese Linderstrøm Lang, che per molti anni fu direttore del laboratorio di ricerche della Carlsberg: vi è raffigurata una bottiglia di birra Carlsberg e rappresenta un simbolo per chiunque abbia lavorato con una borsa della Carlsberg nell'istituto di Bohr.

L'Istituto di Bohr diventò ben presto il centro del mondo della fisica quantistica e, per parafrasare i Romani, « tutte le strade portano a Blegdamsvej 17 ». L'istituto era tutto un ronzio di giovani fisici teorici e di idee nuove sugli atomi, i nuclei atomici e la Teoria dei Quanti in generale; la sua popolarità era dovuta al genio del suo direttore e al suo animo gentile, direi paterno. Mentre Albert Einstein, un altro genio di questa era, sebbene fosse anch'esso uomo gentilissimo non formò mai una vera « scuola » intorno a sé, ma lavorò di solito con un solo assistente con cui parlare, Bohr ebbe molti « figli » scientifici. Quasi tutti i paesi del mondo hanno dei fisici che dicono orgogliosi: « Ho lavorato con Bohr ».

Una volta, visitando l'Università di Gottinga, Bohr incontrò un giovane fisico tedesco, Werner Heisenberg (si veda il capi-

* L'indirizzo ufficiale dell'Istituto è diventato in seguito Blegdamsvej 17.



Fig. 14. La Birra Carlsberg e le sue conseguenze.

tolo 5) che a 25 anni aveva fatto importanti progressi nel campo della meccanica quantistica, e gli propose di andare a lavorare con lui a Copenaghen. Il giorno dopo, il pranzo offerto dall'Università in onore di Bohr fu interrotto da due poliziotti tedeschi in uniforme; uno di essi, mettendo una mano sulla spalla di Bohr, gli intimò: « Siete in arresto per ratto di bambino! ». I « poliziotti » erano naturalmente due

giovani ricercatori mascherati: Bohr non finì in prigione e Heisenberg andò a Copenaghen! Molti fisici teorici provenienti dall'Europa e dall'America andarono a Copenaghen per uno, due o più anni e vi tornarono in seguito diverse volte: P. A. M. Dirac (si veda il capitolo 6) e N. F. Mott (ora direttore del Cavendish Laboratory) dall'Inghilterra; H. A. Kramers e H. Casimir dall'Olanda; Wolfgang Pauli (capitolo 3) dalla Svizzera, Werner Heisenberg (capitolo 5), M. Delbrück (si veda l'Appendice) e Carl von Weizsäcker dalla Germania; L. Rosenfeld dal Belgio; S. Rosseland dalla Norvegia; O. Klein dalla Svezia; G. Gamow e L. Landau dalla Russia; R. C. Tolman, J. C. Slater e J. Robert Oppenheimer dagli Stati Uniti; Y. Nishina dal Giappone, e altri ancora. Vi si recarono per un soggiorno lungo, per una breve visita o soltanto per i convegni che si tenevano tutti gli anni a primavera.

Uno dei visitatori più pittoreschi era Paul Ehrenfest, professore all'Università di Leida. Ehrenfest era nato a Vienna nel 1880 e aveva studiato con Boltzmann, conseguendo la laurea nel 1904. In quello stesso anno sposò una matematica russa, Tatiana, e si trasferì con lei a Pietroburgo (oggi Leningrado) dove si fermò fino al 1912, quando gli fu offerta la cattedra di Fisica all'Università di Leida; rimase a Leida fino alla morte avvenuta nel 1933. I suoi lavori sulla meccanica statistica e sulla teoria degli invarianti adiabatici sono troppo astratti e complicati per essere descritti in questo libro, ma era un frequentatore impareggiabile di tutti i convegni scientifici, grazie alla sua conoscenza vasta e profonda della fisica e all'inclinazione critica della sua mente che lo aiutavano a scovare i punti deboli (talvolta anche sbagliandosi) delle nuove teorie proposte. Amava autodefinirsi un « insegnante » e parecchi suoi allievi ebbero successo nella loro carriera scientifica.

Una volta, mentre attraversavo * l'Olanda, diretto dalla Danimarca in Inghilterra, Ehrenfest mi invitò a stare in casa sua per qualche giorno. Mi venne a prendere alla stazione,

* Nel riferire i miei ricordi personali non mi atterrò alla modestia accademica tradizionale e scriverò in prima persona.

mi accompagnò a casa e mostrandomi la stanza degli ospiti dove avrei dormito disse: « Non fumi qui, se vuole fumare vada in strada ». A quell'epoca io fumavo quasi quanto oggi, perciò aggirai il regolamento soffiando il fumo della sigaretta nello sportello di una grossa stufa olandese che si trovava in camera mia. Ehrenfest detestava qualunque odore, a eccezione di quello dell'aria pura. Un giorno il suo allievo Casimir (oggi direttore Scientifico della Società di Apparecchi Radio Philips) aveva un appuntamento con lui nel pomeriggio; prima dell'incontro Cas (abbreviazione di Casimir che in olandese significa formaggio) andò dal barbiere a farsi tagliare i capelli e soltanto quando era ormai troppo tardi si accorse che il barbiere gli stava frizionando i biondi capelli con una lozione: le due ore che mancavano all'appuntamento con Ehrenfest dovette passarle girovagando per le strade per far svanire l'odore della lozione. Naturalmente nessuno avrebbe osato dire a Ehrenfest che il Bols olandese è migliore (o peggiore) del gin inglese!

In una commedia scritta da dilettanti, famosa tra gli scienziati, il *Faust* di Blegdamsvej (riprodotto in appendice a questo libro), Ehrenfest impersonava Faust che Mefistofele (Pauli) cerca di sedurre mostrandogli la visione di Gretchen (il Neutrino).

La personalità di Niels Bohr e il piacere di vivere e lavorare nel suo istituto sono ancora vivi nei miei ricordi degli anni trascorsi dal 1928 alla sua morte, e spero che uno o due aneddoti diano un'idea del fascino di quest'uomo eccezionale. Superato l'esame di cultura generale all'Università di Leningrado, nella primavera del 1928, riuscii a ottenere dal Governo Sovietico il permesso di trascorrere due mesi all'Università di Gottinga per seguirvi dei corsi estivi. In quel tempo l'idea di una scienza « proletaria » e di una scienza « capitalista », da ritenersi ostili l'una all'altra, non aveva ancora preso forma nella Russia Sovietica e il problema di andare all'estero si riduceva al problema di ottenere il permesso di cambiare una certa somma di rubli russi nell'equivalente in marchi tedeschi. Presentando le raccomandazioni di vari professori universitari riuscii a ottenere una magra somma di

denaro tedesco e mi ritrovai a bordo di una nave che salpava da Leningrado diretta verso la costa tedesca. Giunto a Gottinga affittai una tipica stanza da studente e mi misi al lavoro. Erano passati appena due anni dalla scoperta della meccanica ondulatoria (capitolo 4) e tutti si davano molto da fare per estendere la teoria originale di Bohr sulla struttura atomica e molecolare al nuovo e piú avanzato campo della meccanica ondulatoria. Ma a me non piace, e non è mai piaciuto, lavorare in un campo affollato: decisi perciò di vedere se si poteva fare qualcosa sulla struttura del nucleo atomico. In quell'epoca il nucleo veniva studiato sperimentalmente, ma non si era tentato ancora di proporre una teoria sulla sua struttura e sulle sue proprietà. Durante questi due mesi a Gottinga scoprii una miniera d'oro e riuscii a spiegare, sulla base della meccanica ondulatoria, la disintegrazione spontanea dei nuclei radioattivi, come pure la disintegrazione nucleare sotto il bombardamento di particelle sparate dall'esterno. In seguito scoprii che un lavoro molto simile era stato eseguito contemporaneamente da un fisico inglese, R. W. Gurney, in collaborazione con un fisico americano, E. U. Condon: i nostri lavori furono presentati quasi lo stesso giorno per la pubblicazione.

Finiti i corsi estivi a Gottinga stavano finendo anche i miei soldi e dovetti andarmene e far ritorno a casa; decisi però di fermarmi sulla via del ritorno a Copenaghen per fare la conoscenza del Professor Niels Bohr, di cui ammiravo tanto il lavoro. A Copenaghen affittai la stanza piú economica di uno scalcinato alberghetto e andai all'istituto di Bohr per domandare alla sua segretaria, Frøken (la signorina) Schultz, di farmi avere un appuntamento. (Quando visitai Copenaghen diversi anni fa, un anno prima della morte di Bohr, essa occupava ancora quel posto). « Il Professore », mi disse, « può riceverla questo pomeriggio ». Quando andai nel suo studio trovai un uomo di mezza età, cordiale e sorridente che mi chiese quale campo della fisica mi interessava e a che cosa stavo lavorando in quel momento. Gli parlai allora del lavoro che avevo fatto a Gottinga sulle trasformazioni nucleari, il cui manoscritto era stato inviato per la pubblicazione

ma non era ancora uscito. Bohr ascoltò con attenzione e disse: « Interessantissimo, interessantissimo davvero. Quanto si ferma qui? ». Gli spiegai che avevo appena i soldi per un altro giorno. « Ma se riesco a farle assegnare una borsa di studio Carlsberg dalla nostra Accademia delle Scienze * potrebbe restare un anno? ». Rimasi senza fiato e alla fine riuscii ad articolare, « Oh, sí, potrei! ». Allora le cose andavano in fretta. Frøken Schultz mi procurò una stanzetta graziosissima a due isolati dall'Istituto, in una pensione, diretta da Frøken Have, che in seguito divenne un « accampamento » per molti giovani fisici venuti a lavorare con Bohr. Il lavoro all'Istituto era molto facile e semplice: ognuno poteva fare quel che voleva e andare a lavorare o tornare a casa quando gli pareva e piaceva. Un altro giovane ricercatore stabilitosi nella pensione di Frøken Have era Max Delbrück, e veniva dalla Germania. A entrambi piaceva alzarsi tardi al mattino e Frøken Have aveva escogitato un sistema speciale per tirarci giù dal letto. Veniva in camera mia e mi svegliava: « Dottor Gamow, farebbe meglio ad alzarsi. Il Dottor Delbrück ha già fatto colazione ed è andato a lavorare! ». Poi usava lo stesso trucco con Delbrück ancora addormentato: « Dottor Delbrück, sveglia! Il Dottor Gamow se ne è già andato al lavoro! ». E così Max e io ci scontravamo nella stanza da bagno. Eppure ognuno faceva progressi nel suo lavoro, soprattutto la sera che è il momento piú ricco di ispirazione per i fisici teorici. Questo lavoro serale nella biblioteca dell'Istituto era spesso interrotto da Bohr, che diceva di essere stanchissimo e di aver voglia di andare al cinema. I soli film che gli piacessero erano i western violenti (stile Hollywood) e aveva sempre bisogno di essere accompagnato da un paio di studenti che gli spiegassero i complotti ingarbugliati in cui erano coinvolti Indiani amici e Indiani nemici, prodi cowboy e fuorilegge, sceriffi, bariste, cercatori d'oro e altri personaggi dell'Antico West. Ma la sua mentalità di teorico si rivelava anche in queste spedizioni al cinematografo: elaborò una teoria per spiegare perché, sebbene il cat-

* Di cui ora ho l'onore di essere membro.

tivo sparì sempre per primo, l'eroe è piú svelto e riesce ad ammazzarlo. Questa teoria di Bohr era basata sulla psicologia: poiché l'eroe non spara mai per primo, è il cattivo a dover decidere quando sparare e questo intralcia la sua azione; l'eroe invece agisce per un riflesso condizionato e afferra la pistola automaticamente appena vede muoversi la mano del cattivo. Noi non eravamo d'accordo con la sua teoria e un giorno andai in un negozio di giocattoli e comprai due pistole con fondine come quelle dei western. Facemmo le sparatorie con Bohr: lui faceva la parte dell'eroe e « ammazzò » tutti i suoi allievi.

Un'altra osservazione di Bohr ispirata ai film western era basata sul calcolo delle probabilità. « Posso ammettere », diceva, « che una ragazza stia camminando sola per uno stretto sentiero in qualche punto delle Montagne Rocciose, che faccia un passo falso e cadendo nel precipizio riesca ad afferrare l'estremità di un minuscolo pino, salvandosi da inevitabile morte. Posso anche immaginare che proprio in quel momento un bel cowboy stia cavalcando lungo lo stesso sentiero e, accortosi dell'incidente, legghi il suo laccio alla sella del cavallo e si cali nel precipizio per salvare la ragazza. Ma mi sembra estremamente improbabile che nello stesso momento un operatore cinematografico sia presente e possa fissare su una pellicola questa scena emozionante ».

In gioventú Niels Bohr era stato un vero atleta e sul campo di football era secondo soltanto a suo fratello, il noto matematico Harald Bohr, il magnifico portiere della squadra di Copenaghen.

Quando, durante le vacanze di Natale del 1930, andai con Bohr (che aveva allora 45 anni) e un gruppo di scienziati norvegesi (Rosseland, Solberg e il « Vecchio » Bjerknæs) a sciare nella parte settentrionale della Norvegia, oltre il Circolo Polare, Bohr ci batté tutti sugli sci.

Una storia che mi è sempre piaciuto narrare o scrivere a proposito di Bohr è il racconto di una sera a Copenaghen in cui Bohr, Fru Bohr (la Signora Bohr), il già nominato Casimir e io tornavamo da una cena d'addio offerta da Oscar Klein in occasione della sua nomina a professore universitario nella

nata Svezia. A quell'ora tarda le vie della città erano deserte (il che non si può dire oggi delle vie di Copenaghen), e tornando a casa passammo davanti all'edificio di una banca con le pareti di grossi blocchi di cemento: sull'angolo dell'edificio gli interstizi tra i corsi di blocchi erano così profondi da offrire un appiglio a un buon alpinista. Casimir, esperto rocciatore, si arrampicò fin quasi al terzo piano. Quando Casimir scese, Bohr, inesperto com'era, saltò a sua volta per misurarsi in quell'impresa: mentre stava appeso precariamente al livello del secondo piano, e Fru Bohr, Casimir e io seguivamo ansiosi i suoi progressi, due poliziotti si avvicinarono alle nostre spalle con le mani sulle fondine delle rivoltelle. Uno guardò su e disse all'altro: « O, ma è soltanto il Professor Bohr! », e se ne andarono tranquillamente in cerca di più pericolosi rapinatori di banche.

C'è un'altra storia divertente che illustra la stravaganza di Bohr. Sulla porta d'ingresso della sua casetta di campagna a Tisvilde aveva attaccato a un chiodo un ferro di cavallo, il proverbiale portafortuna. Vedendolo un visitatore esclamò: « Un grande scienziato come lei crede veramente che un ferro di cavallo sull'uscio di casa porti fortuna? ». « No », rispose Bohr, « Certo che non credo in queste superstizioni. Ma sa com'è », aggiunse con un sorriso, « dicono che porti fortuna anche a chi non ci crede! ».

Dopo la scoperta della meccanica ondulatoria e dopo che Heisenberg ebbe formulato il Principio di Indeterminazione, Bohr dedicò tutte le sue energie allo sviluppo semi-filosofico del *Punto di Vista Duale* sui microfenomeni in fisica, secondo cui ogni entità fisica, sia essa un quanto di luce, un elettrone o qualunque altra particella atomica, ha due facce come una medaglia: può essere trattata come una particella oppure come un'onda. Nel capitolo 5 torneremo su questo argomento con maggiori particolari. Lavorando anche con il suo assistente, L. Rosenfeld, Bohr estese la relazione di indeterminazione dal caso originario di una singola particella al campo elettromagnetico, gettando così le basi di un complicatissimo ramo della Teoria dei Quanti conosciuto come elettrodinamica quantistica.

Negli anni successivi, dopo la scoperta del neutrone, Bohr si interessò profondamente alla Teoria delle reazioni nucleari, allora soltanto parzialmente sviluppata. Egli dimostrò che quando una delle particelle usate come proiettili penetra all'interno del nucleo, non si limita a buttar fuori alcune particelle nucleari come una palla da biliardo ne fa schizzare via un'altra, ma vi resta per un brevissimo periodo (forse un decimiliardesimo di secondo) distribuendo la sua energia d'urto fra tutte le altre particelle. Questa energia può poi essere emessa sotto forma di un quanto di raggi γ oppure essere ceduta ad alcune particelle nucleari spingendole fuori del nucleo. Così per esempio i primi studi di reazioni nucleari eseguiti da Rutherford non dovrebbero essere scritti come si usava:



ma come un processo in tre tappe:



Nei simboli dei nuclei atomici dei vari elementi chimici i numeri scritti in basso a sinistra sono i *numeri atomici* degli elementi e i numeri in alto a destra sono i numeri di massa degli isotopi considerati. Il prodotto intermedio di breve vita ${}_9\text{F}^{18[*]}$ (il nucleo eccitato dell'isotopo del fluoro) è noto come nucleo composto, e l'introduzione di questa idea semplificò considerevolmente l'analisi di complicate reazioni nucleari. Quando lasciai definitivamente la Russia Sovietica nel 1933, divenni professore di fisica all'Università George Washington di Washington, D. C., dove l'anno dopo mi raggiunse un vecchio amico, già allievo di Bohr, il Dottor Edward Teller. Seguendo l'indirizzo di Copenaghen, furono organizzati Convegni Annuali di Fisica Teorica sotto gli auspici dell'Università George Washington e della Carnegie Institution di Washington, dove il Dottor Merle Tuve eseguiva importanti studi sperimentali di fisica nucleare. Il Convegno del 1939 ebbe un pubblico particolarmente scelto, con Niels Bohr (che in quell'epoca visitava gli Stati Uniti) ed Enrico

Fermi (capitolo 7) seduti in prima fila. Il primo giorno trascorse calmo, in discussioni di problemi di normale amministrazione, ma il giorno dopo vi furono grandi emozioni. Bohr giunse un po' in ritardo quel mattino: aveva in mano un telegramma della Dottoressa Lise Meitner emigrata a Stoccolma dalla Germania nazista. Il messaggio annunciava che il suo antico collaboratore, il Professor Otto Hahn, e i suoi compagni di lavoro di Berlino avevano scoperto che il bario e un altro elemento, che risultò un isotopo del cripton, erano comparsi in un campione di uranio bombardato con neutroni. Essa e suo nipote, il fisico teorico Otto Frisch, erano del parere che l'esperimento dimostrasse che un nucleo di uranio violentemente bombardato si scinde in due parti quasi uguali.

Il lettore può immaginare l'eccitazione di quel giorno e di quelli successivi. La notte stessa l'esperimento venne ripetuto nel laboratorio di Tuve e si scoprì che la fissione dell'uranio per l'urto di un solo neutrone dava luogo all'emissione di qualche neutrone nuovo in più. Sembrava aperta la possibilità di una reazione a catena e la possibilità che si liberasse energia nucleare in grandi quantità. Allontanati educatamente i giornalisti dalla sala del convegno si soppesarono accuratamente le ragioni pro e contro la reazione a catena. Bohr e Fermi, armati di grossi pezzi di gesso, in piedi di fronte alla lavagna, sembravano cavalieri di un torneo medievale. Così l'energia nucleare entrò nel mondo dell'uomo, portando alle bombe che sfruttano la fissione dell'uranio, ai reattori nucleari e infine alle armi termonucleari!

Quando ebbe inizio la seconda guerra mondiale Bohr si trovava a Copenaghen e decise di rimanere per tutta l'occupazione nazista per dare tutto l'aiuto possibile ai suoi compatrioti. Ma un giorno apprese dal movimento clandestino danese che doveva essere arrestato dalla Gestapo il mattino seguente; quella stessa notte un pescatore danese gli fece attraversare a forza di remi il Sund, portandolo sulla costa svedese, dove fu prelevato da un bombardiere britannico, un Mosquito. I Mosquito erano piccoli, e il solo posto disponibile per Bohr era il sedile vuoto nella coda dell'acropiano,

occupato di solito dall'artigliere di coda: poteva comunicare con l'abitacolo del pilota soltanto attraverso l'interfono. A un certo punto della traversata, mentre volavano sul Mare del Nord, il pilota provò a chiedere a Bohr come si sentisse ma non ottenne risposta; tutto allarmato appena atterrò sulla pista dell'aeroporto inglese corse verso la coda dell'aeroplano e aprì il portello dello scompartimento del mitragliere di coda: Bohr era lì, sano e salvo e dormiva placidamente!

Giunto dall'Inghilterra negli Stati Uniti, Bohr andò direttamente a Los Alamos per dare impulso ai lavori per la bomba a fissione. A causa dei rigidi regolamenti di sicurezza aveva i documenti intestati a Nicholas Baker ed era chiamato affettuosamente Zio Nick. Si racconta che in una delle sue visite a Washington incontrò nell'ascensore dell'albergo una giovane signora che aveva visto spesso a Copenaghen: essa era allora moglie di un fisico nucleare, il Dottor von Halban, e andava sovente a Copenaghen con il marito. « Come sono contenta di rivederla, Professor Bohr », esclamò lei. « Mi dispiace », disse Bohr, « ma ci deve essere un errore; mi chiamo Nicholas Baker. Però » aggiunse cercando di essere gentile senza infrangere i regolamenti di sicurezza, « mi ricordo di lei: è la signora von Halban ». « No », ribatté lei, « sono la signora Placzek ». Il fatto sta che qualche tempo innanzi aveva divorziato dal primo marito e aveva sposato George Placzek, che in passato aveva lavorato a lungo con Bohr.

Nell'estate del 1960 mia moglie e io facemmo un viaggio in Europa e passammo a Copenaghen per far visita a Bohr e alla sua famiglia. Stavano trascorrendo l'estate nella casa di campagna a Tisvilde ed egli ci invitò per alcuni giorni. Lo trovai tale e quale lo avevo visto per la prima volta nel 1928, ma naturalmente più lento e meno energico, e avemmo molte discussioni interessanti sulle difficoltà dello sviluppo attuale della fisica. Fu perciò per me un vero colpo quando, circa due anni dopo, appresi dalla radio la notizia che Niels Bohr era morto.

3 Pauli e il principio di esclusione



Uno dei visitatori piú pittoreschi di Blegdamsvej era senza dubbio Wolfgang Pauli. Nato a Vienna nel 1900, passò quasi tutta la vita come professore a Zurigo, ma compariva inaspettatamente come uno spiritello ovunque si coltivassero gli studi di fisica teorica. Quando lui compariva la sua risata sonora e un po' sardonica animava qualunque convegno, per noioso che fosse all'inizio. Arrivava sempre con idee nuove che esponeva al pubblico camminando continuamente su e giù lungo il tavolo, col grosso corpo che oscillava leggermente. Questa sua abitudine ispirò a qualcuno una poesia di cui ricordo soltanto questo frammento

*When with colleagues he debates
All his body oscillates.
When a thesis he defends*

*This vibration never ends.
Dazzling theories he unveils,
Bitten from his fingernails! **

Una volta Pauli decise, probabilmente per ordine del medico, di dimagrire e ci riuscì rapidamente come in tutte le cose che intraprendeva. Quando ricomparve a Copenaghen con diversi chili in meno era un uomo completamente diverso: triste, privo di senso dell'umorismo, brontolava invece di ridere. Subito lo incitammo tutti a venire con noi a mangiare le deliziose *wiener schnitzel* e a bere della buona birra Carlsberg, e in meno di una quindicina di giorni Pauli ridiventò l'allegro Pauli di un tempo.

Politicamente era antinazista e non alzò mai il braccio destro nel saluto di « Heil Hitler », tranne una volta. Quando insegnava all'Università di Michigan, ad Ann Arbor, si unì a un'allegria comitiva che andava in gita sul lago e, scendendo al buio dal battello, cadde rompendosi il braccio destro alla spalla. Gli ingessarono il braccio e gli misero un supporto che glielo teneva sollevato a un angolo di 45°: quando ricomparve a lezione scriveva con la sinistra e si rivolgeva agli studenti con un gesto di puro stile nazista, ma rifiutò di farsi fotografare finché non gli venne tolto il gesso.

Pauli iniziò la sua carriera scientifica molto presto, e a ventun anni scrisse un libro sulla Teoria della Relatività che rappresenta ancora oggi (nell'edizione riveduta) uno dei libri migliori sull'argomento. Egli è famoso nella fisica per tre motivi.

1. Il *Principio di Pauli*, che preferiva chiamare *Principio di Esclusione*.
2. Il *Neutrino di Pauli*, di cui suppose l'esistenza all'inizio degli anni venti e che per trent'anni sfuggì a una verifica sperimentale.

* Quando discute con i colleghi | tutto il suo corpo oscilla. | Quando sostiene una tesi | questa vibrazione non finisce mai. | Svela teorie straordinarie | rosicchiandosele dalle unghie.

3. *L'Effetto Pauli*, un fenomeno misterioso che non è stato e probabilmente non sarà mai capito su base puramente materialistica.

È noto che i fisici teorici non sanno maneggiare le apparecchiature sperimentali: appena le toccano queste vanno in pezzi. Pauli era un fisico teorico talmente bravo che, di solito, appena lui varcava semplicemente la soglia di un laboratorio si rompeva qualcosa. Una volta, nel laboratorio del Professor Franck, a Gottinga, accadde un fatto misterioso che a prima vista non sembrava connesso con la presenza di Pauli. Nel primo pomeriggio, senza causa apparente, un complicato apparecchio per lo studio dei fenomeni atomici si sfasciò. Franck ne scrisse divertito a Pauli, al suo indirizzo di Zurigo e, dopo qualche tempo, ricevette la risposta in una busta con francobollo danese. Pauli scriveva che era andato a trovare Bohr e che nel momento dell'incidente nel laboratorio di Franck il suo treno faceva una sosta di pochi minuti nella stazione di Gottinga. Potrete credere o no a questa storia, ma vi sono molte altre osservazioni che confermano la realtà dell'Effetto Pauli.

Le quote per i livelli elettronici.

Il Principio di Pauli ha basi scientifiche molto più solide dell'Effetto Pauli, e si riferisce al moto degli elettroni negli atomi. Nei capitoli precedenti abbiamo descritto le orbite quantiche, o, per usare un linguaggio più moderno, gli stati di vibrazione quantizzati nel campo di forze coulombiane che circondano i nuclei atomici *. Poiché l'atomo di idrogeno contiene soltanto un elettrone questo elettrone è libero di occupare qualunque possibile stato energetico e, in assenza di eccitazione dall'esterno, si trova naturalmente nello stato di minima energia, il più vicino al nucleo. Se viene portato da una forza esterna in uno stato di energia più alto, ricade sullo stato di partenza più basso emettendo varie righe dello

* Si veda il capitolo seguente.

spettro dell'idrogeno. Ma che cosa accade negli atomi contenenti due, tre o piú elettroni? Nel capitolo 2 abbiamo dedotto due formule per l'atomo di idrogeno nel suo stato piú basso ($n=1$). Il raggio dell'orbita, o piú esattamente il raggio medio della funzione continua che descrive questo stato, è dato da

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m}$$

e l'energia minima da

$$E_1 = - \frac{2\pi^2 e^4 m}{h^3}$$

Queste formule si ottengono partendo dal presupposto che la forza elettrica sia uguale a e^2/r^2 .

Supponiamo ora che un solo elettrone giri intorno al nucleo con carica Ze dove Z è il suo numero atomico. In questo caso la forza sarà Ze^2/r^2 invece di e^2/r^2 , e nelle formule precedenti dovremo sostituire e^2 con Ze^2 ed e^4 con Z^2e^4 . Al crescere del numero atomico Z i raggi dello stato fondamentale diminuiranno in proporzione inversa a Z , e i valori assoluti delle loro energie cresceranno in proporzione a Z^2 . Se invece di un solo elettrone introduciamo gli Z elettroni e se tutti questi affollano il livello piú basso, gli atomi che formano il sistema periodico degli elementi diventeranno sempre piú piccoli e sempre piú strettamente uniti. Naturalmente nel seguire questo ragionamento occorre tener presente che la repulsione elettrostatica tra gli elettroni tenderà ad allontanarli uno dall'altro; ma si può dimostrare facilmente che questa repulsione non sarà tanto forte da impedire agli atomi degli elementi piú pesanti di ridursi a dimensioni considerevolmente piú piccole. Così si può prevedere che i volumi atomici * decrescano continuamente e piuttosto in fretta

* Si possono calcolare ricavandoli dai pesi atomici e dalle densità dei vari elementi: si divide il peso atomico di un dato elemento per il peso di un suo cm^3 .

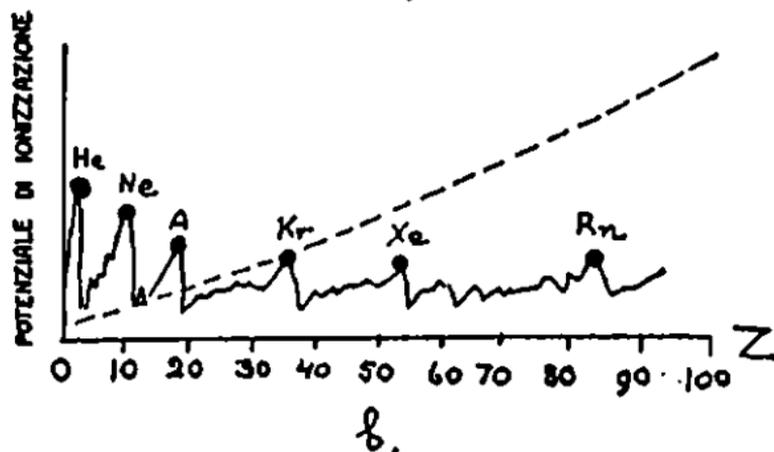
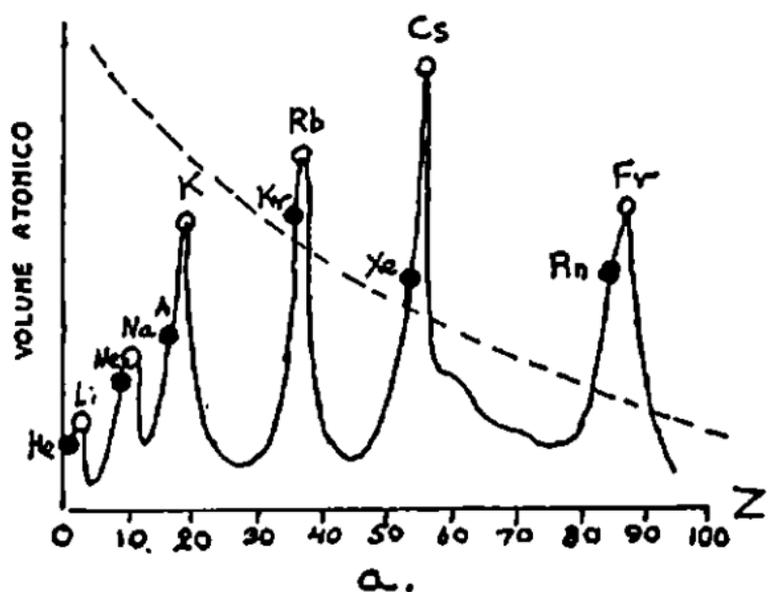


Fig. 15. I cambiamenti dei volumi atomici e dei potenziali di ionizzazione procedendo nel Sistema Periodico degli Elementi. I circoletti pieni corrispondono ai gas nobili che, avendo gli strati saturi, hanno le massime energie di legame. I circoletti vuoti sono metalli alcalini che cominciano a riempire nuovi strati.

passando dall'idrogeno all'uranio, come indica la linea tratteggiata della figura 15a. La linea continua nella stessa figura rappresenta i dati sperimentali e non le assomiglia affatto: ha soltanto una pendenza molto lieve ed è caratterizzata soprattutto dalla forma a sega, con i picchi aguzzi in corrispondenza dei metalli alcalini (Li, Na, K, Rb, Cs, ecc.) che,

come ogni chimico sa, sono molto pronti a formare composti con altri elementi o tra di loro. Di piú, se tutti gli elettroni di un atomo fossero accumulati nel livello energetico minimo, la difficoltà di estrarre un solo elettrone dall'atomo aumenterebbe rapidamente passando dagli elementi leggeri a quelli pesanti nel Sistema Periodico degli Elementi (la linea tratteggiata della figura 15b). Anche questa curva non corrisponde affatto alla curva osservata per i potenziali di ionizzazione che caratterizza questa difficoltà ed è rappresentata nella stessa figura da una linea continua. Confrontando le due curve notiamo che i massimi volumi atomici si hanno in quei punti dove diventa minima la difficoltà di estrarre un elettrone atomico. Sembra dunque che la successione degli elementi chimici possa essere rappresentata come una fila di corpi in cui variano periodicamente le dimensioni e la resistenza a cedere i propri elettroni. La conclusione è che con l'aggiunta di un numero sempre maggiore di elettroni i volumi occupati dai diversi stati quantici si contraggono, ma il numero di stati occupati dagli elettroni aumenta, così che il diametro esterno dell'atomo resta approssimativamente costante. Deve perciò esistere un principio fisico fondamentale che impedisca a tutti gli elettroni atomici di affollarsi nello stato quantico piú basso; appena la « quota » per un dato livello è completa gli elettroni in eccesso devono trovar posto negli altri stati quantici con energia piú alta. Pauli suggerì l'ipotesi che le cose si potessero sistemare in modo soddisfacente permettendo a *due soli elettroni* di occupare un dato stato quantico individuato da tre numeri quantici: radiale, n_r , azimutale, n_ϕ , zenitale, n_θ *. Nella teoria originale di Bohr, in cui fu formulato per la prima volta il Principio di Pauli, questi tre numeri quantici corrispondevano ai diametri medi, alle eccentricità medie e alle orientazioni spaziali medie delle orbite quantiche dell'elettrone. Nella meccanica

* Per semplificare ci allontaniamo qui dalla notazione abituale dei numeri quantici. In ogni ramo della scienza la terminologia diventa così scomoda via via che essa si sviluppa che è difficilissimo esporla in modo semplice a un lettore che si imbatte per la prima volta in queste nozioni complicate.

ondulatoria * rappresentano il numero di nodi del complicato moto oscillatorio tridimensionale delle funzioni ψ . Servendosi del Principio di Pauli, Bohr e i suoi collaboratori (tra cui naturalmente Pauli stesso) riuscirono a costruire i modelli di tutti gli atomi dall'idrogeno all'uranio. Non soltanto spiegarono i cambiamenti periodici dei volumi atomici e dei potenziali di ionizzazione, ma spiegarono anche tutte le altre proprietà degli atomi, le loro reciproche affinità chimiche, le valenze e altre proprietà che molti anni prima erano state riassunte, su base puramente empirica, e ridotte a sistema dal chimico russo D. I. Mendeleev, nel suo Sistema Periodico degli Elementi. Tutti questi sviluppi esulano dagli scopi del nostro libretto, il cui compito principale consiste nell' esporre le nuove idee rivoluzionarie, e non nel descrivere minuziosamente le loro conseguenze.

L'elettrone rotante.

Gli studi e l'interpretazione degli spettri atomici in base alla teoria di Bohr, che per descrivere il moto degli elettroni negli atomi si serviva di tre numeri quantici (cosa naturalissima per uno spazio tridimensionale!), andò bene fino a quando, poco dopo il 1920, tre numeri quantici risultarono improvvisamente insufficienti. Gli studi dell'effetto Zeeman (lo scindersi delle righe spettrali provocato da forti campi magnetici) rivelò l'esistenza di un numero di componenti maggiore di quello che poteva essere giustificato da tre interi: per spiegare la loro esistenza si introdusse un quarto numero quantico. Dapprima fu chiamato « numero quantico interno », un nome come un altro perché nessuno poteva spiegare l'ulteriore scissione. Poi, nel 1925, due fisici olandesi, Samuel Goudsmit e George Uhlenbeck, fecero una proposta coraggiosa: questa scissione supplementare delle righe, secondo loro, non era dovuta a un altro numero quantico che individuava l'orbita dell'elettrone nell'atomo, ma all'elettrone stesso. Prima di questa scoperta l'elettrone era stato

* Si veda il capitolo seguente.

sempre considerato un punto caratterizzato soltanto dalla sua massa e dalla sua carica elettrica; perché non immaginarlo come un piccolo corpo carico elettricamente e rotante sul suo asse come una trottola? Esso avrebbe un certo momento della quantità di moto e un momento magnetico come qualsiasi carica rotante. Un diverso orientamento della rotazione o « spin » dell'elettrone (come venne chiamato) rispetto al piano della sua orbita spiegherebbe gli ulteriori componenti nella scissione delle righe.

Si scoprì ben presto che la proposta funzionava e che attribuendo all'elettrone appropriati valori numerici per lo spin (cioè momento della quantità di moto) e per il momento magnetico si potevano spiegare tutti i componenti supplementari delle righe trovati dai fisici sperimentali. Il momento magnetico dell'elettrone rotante risultò gentilmente uguale al cosiddetto *magnetone di Bohr*, che è la minima quantità di magnetismo che può essere causata dalla sua rivoluzione intorno al nucleo. Ma cominciarono allora i guai con il momento della quantità di moto dell'elettrone rotante, che risultò *soltanto metà* del momento della quantità di moto regolare delle orbite atomiche, $h/2\pi$. Vennero fatti molti tentativi per sormontare questa difficoltà e alla fine il problema fu risolto da P. A. M. Dirac, in modo affatto originale, soltanto quattro anni dopo (capitolo 6).

Ecco come può essere spiegato il fatto che l'introduzione dell'elettrone rotante modifichi il Principio di Pauli del moto dell'elettrone atomico. Come ricorderete il Principio di Pauli affermava che *soltanto due* elettroni possono occupare una data orbita quantica; perché due? Dopo la scoperta dell'elettrone rotante il Principio di Pauli venne così emendato: « *soltanto due elettroni aventi spin opposto* », cioè rotanti in direzioni opposte.

La figura 16 illustra graficamente la situazione: (a) rappresenta il vecchio schema in cui due elettroni puntiformi e_1 ed e_2 si muovono lungo la stessa orbita; in (b) abbiamo la proposta più recente, secondo cui due elettroni possono muoversi lungo la stessa orbita soltanto se uno di essi (e_1) ruota intorno al suo asse nella stessa direzione in cui si muove intorno

al nucleo, mentre un altro (e_2) ruota nella direzione opposta. È bene far notare che il disegno (b) non è molto preciso, perché l'interazione tra il momento magnetico di un elettrone e il campo magnetico dell'intero atomo in cui l'elettrone si

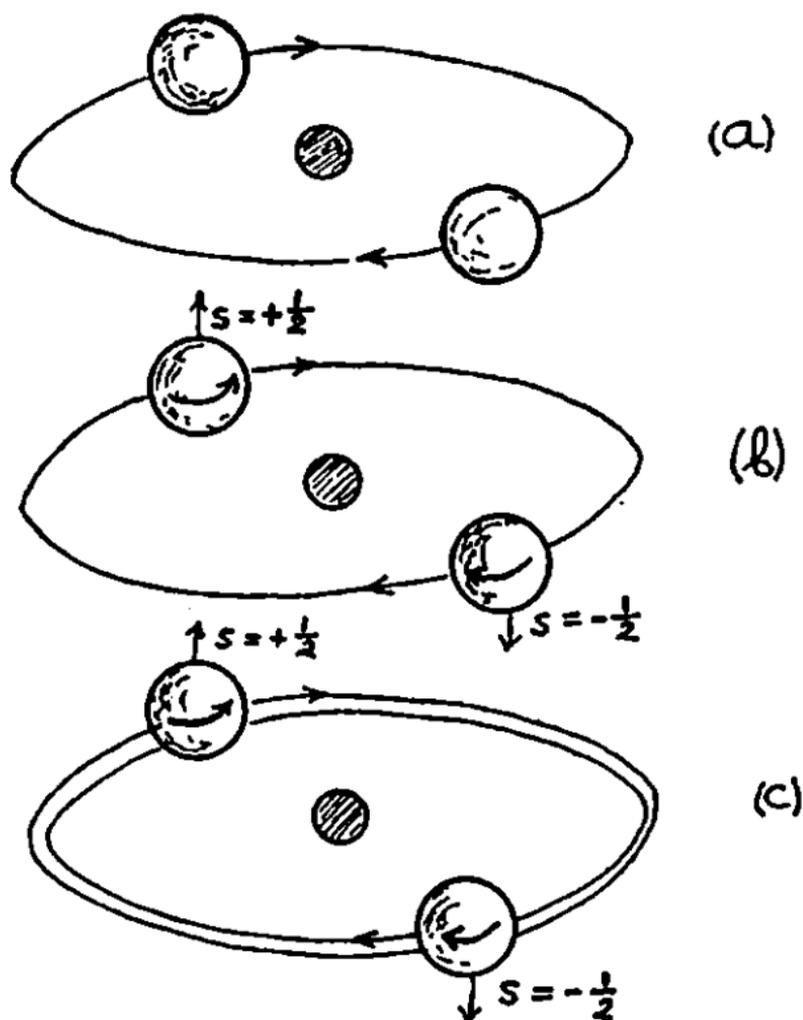


Fig. 16. I moti di due elettroni lungo la stessa orbita: (a) secondo il Principio originale di Pauli (non più di due elettroni possono occupare la stessa orbita); (b) il Principio di Pauli emendato (due elettroni che occupano la stessa orbita devono avere spin opposto, cioè ruotare intorno al proprio asse in direzione opposta); e (c) secondo il Principio di Pauli riformulato in cui, a causa delle forze magnetiche derivanti dal momento magnetico dell'elettrone, le orbite non sono identiche ed è permesso un solo elettrone in ogni livello energetico.

muove modifica leggermente l'orbita, così che in realtà abbiamo due orbite con un solo elettrone su ciascuna (c). Quindi l'originario Principio di Pauli può essere riformulato *permettendo soltanto un elettrone su ogni orbita*, se si tiene conto della lieve scissione dell'orbita primitiva.

Pauli e la fisica nucleare.

Ci occuperemo ora di un campo del tutto diverso dell'attività scientifica di Pauli: il suo contributo al campo della fisica nucleare. Come tutti sanno — o almeno dovrebbero sapere — gli elementi radioattivi emettono tre tipi di radiazione: alfa (α), beta (β) e gamma (γ). Il più importante processo della disintegrazione radioattiva è l'emissione di particelle α , grossi pezzi di nuclei instabili: Rutherford dimostrò che si trattava di nuclei di atomi di elio. Le particelle β , invece, sono elettroni emessi talvolta dai nuclei in seguito al decadimento α , per ristabilire l'equilibrio tra la carica e la massa turbato dall'espulsione di una particella α . I raggi γ infine sono onde corte elettromagnetiche risultanti dalle perturbazioni interne dovute all'emissione di particelle α e β . Per un dato elemento radioattivo le particelle α hanno energia esattamente uguale alla differenza di energia esistente fra il nucleo progenitore e il nucleo discendente. I raggi γ presentano righe complicate e nette, molto più nette delle righe degli spettri ottici.

Tutta questa attività indica che i nuclei atomici sono sistemi quantizzati, simili agli atomi ma molto più piccoli; dato che i nuclei sono più piccoli, le loro trasformazioni, in base ai principi quantistici, comportano energie molto maggiori. Ma i fisici ebbero una grossa sorpresa quando, nel 1914, James Chadwick scoprì che, contrariamente alle particelle α e ai raggi γ emessi dai nuclei radioattivi, le particelle β non hanno energie ben definite, anzi il loro spettro di energia si estende in modo continuo praticamente da zero a valori altissimi (fig. 17). La possibilità che questa emissione di energia fosse dovuta a qualche perdita interna subita dalle particelle β nella fuga dal materiale radioattivo venne esclusa

decisamente in seguito a esperimenti accurati. Ci si trovava così di fronte a una situazione in cui il bilancio nucleare delle entrate e delle uscite di energia non era in pareggio. Niels Bohr, che fu il primo a essere colpito da questi risultati de-

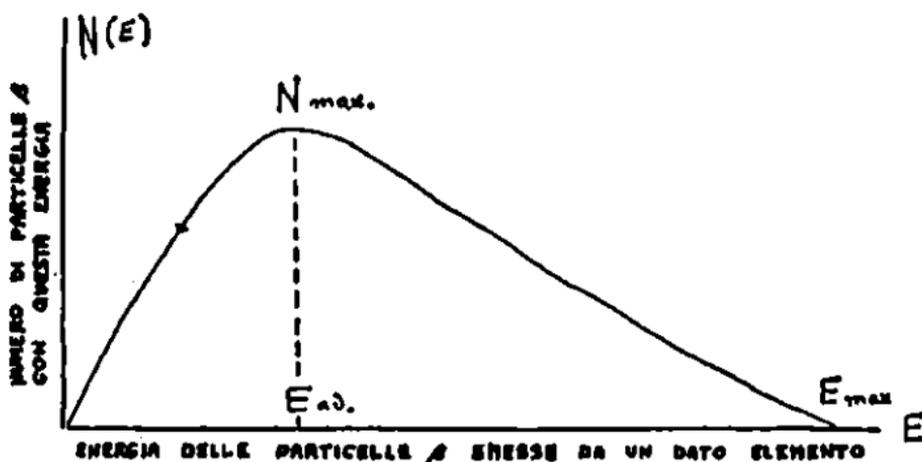


Fig. 17. Curva di distribuzione dell'energia di un tipico emettitore di radiazione β .

gli esperimenti, adottò un punto di vista radicale: se questo era quello che dicevano gli esperimenti, il Principio di Conservazione dell'Energia non valeva in realtà per l'emissione o (presumibilmente) per i processi di assorbimento di particelle β . A onor del vero in quell'epoca erano tanti i principi della fisica classica demoliti dallo scontro con la Teoria della Relatività e la Teoria dei Quanti recentemente elaborate, che nessun principio della fisica classica sembrava incrollabile. Bohr cercò addirittura di usare questa pretesa non conservazione dell'energia nei processi di decadimento β per spiegare la produzione apparentemente eterna di energia nelle stelle. Secondo queste idee poco conosciute, e mai pubblicate, all'interno delle stelle vi sarebbero noccioli di materia nucleare, dotati delle stesse proprietà dei comuni nuclei atomici ma molto più grandi (con diametri di molti chilometri anziché di 10^{-12} centimetri). Questi nuclei stellari, che dovevano essere instabili, emettevano particelle β di energia ben definita ed erano circondati dalla solita materia, però in uno stato

completamente ionizzato (oggi lo chiamiamo plasma), consistente di elettroni liberi, forniti di alta energia, e di nuclei ordinari nudi. L'energia degli elettroni costituenti lo strato piú basso di questi involucri stellari era determinata dalla relazione classica:

$$E = \frac{3}{2} kT$$

dove k è la costante di Boltzmann e T la temperatura alla base dell'involucro *. Invece la particella β emessa dalla superficie praticamente piatta del nucleo stellare aveva sempre la *stessa energia* determinata dalle caratteristiche interne del fluido nucleare.

Doveva dunque esistere un equilibrio dinamico tra il nucleo stellare e il circostante gas ionizzato (plasma), simile all'equilibrio esistente fra l'acqua e il vapore acqueo saturo sopra di essa. Il numero di particelle β emesse dal nucleo radioattivo era uguale al numero di elettroni liberi provenienti dall'involucro e assorbiti dal nucleo. Ma mentre l'energia degli elettroni liberi assorbiti provenienti dall'involucro era determinata dalla sua temperatura T , l'energia delle particelle β emesse dal nucleo era sempre la stessa e corrispondeva a una certa temperatura nucleare universale T_0 . Perciò per $T < T_0$ c'era una corrente di energia costante diretta dal nucleo all'involucro e questa corrente, affiorando alla superficie della stella, ne manteneva alta la temperatura. In virtù della non conservazione dell'energia nei processi di emissione di particelle β nulla cambiava nel nucleo e le stelle potevano brillare eternamente. Bohr parlava di questa sua teoria in modo un tantino critico, ma dando l'impressione che non si sarebbe molto stupito se fosse risultata vera.

* Secondo la teoria meccanica del calore elaborata da Boltzmann e Maxwell alla metà del secolo scorso « il calore non è altro che il moto delle molecole costituenti i corpi materiali ». Essi trovarono che l'energia di ciascuna molecola nel moto termico è direttamente proporzionale alla sua temperatura assoluta, cioè la temperatura calcolata partendo dallo « zero assoluto » (-273°C). Il coefficiente di proporzionalità calcolato empiricamente (o piú esattamente i due terzi di esso) fu chiamato costante di Boltzmann.

Il neutrino.

Pauli, che non poteva certo essere definito conservatore in nessun senso della parola, era ciò nondimeno decisamente contrario all'opinione di Bohr: preferiva supporre che l'equilibrio energetico violato dalla continuità degli spettri dei raggi β venisse ristabilito dall'emissione di qualche altro tipo di particelle ancora sconosciute che egli chiamava « neutroni ». Il nome di questo « neutrone di Pauli » fu successivamente cambiato in « neutrino », dopo che Chadwick ebbe scoperto quello che oggi si chiama neutrone. Pauli suppose che i neutrini fossero particelle prive di carica elettrica e di massa (o almeno con massa assolutamente trascurabile), e che inoltre venissero emessi in coppia con le particelle β in modo che la somma della loro energia e di quella delle particelle β fosse sempre uguale: questo avrebbe naturalmente ripristinato il buon vecchio principio della Conservazione dell'Energia. I neutrini però, avendo carica nulla e massa nulla, in pratica non si potevano rivelare e sfuggivano fra le dita dei più abili fisici sperimentali. Oltre a Bohr, un altro neutrinofobo era P. Ehrenfest e su questo argomento i tre ebbero accese discussioni e un voluminoso scambio di corrispondenza mai pubblicato. Col passare degli anni andarono accumulandosi prove a favore dei neutrini di Pauli, sebbene fossero prove indirette. Fu soltanto nel 1955 che due fisici di Los Alamos, F. Reines e C. Cowan, accertarono senza ombra di dubbio l'esistenza dei neutrini catturandoli mentre stavano sfuggendo dalle pile atomiche del Savannah River Atomic Energy Commission Project. Essi trovarono che l'interazione fra i neutrini e la materia era così piccola che sarebbe stato necessario uno schermo di ferro dello spessore di diversi anni luce per ridurre alla metà l'intensità del fascio di neutrini. Oggi i neutrini hanno un posto di sempre maggior rilievo nello studio delle particelle elementari e dei fenomeni astrofisici, e diventeranno forse le particelle elementari più importanti della fisica.

Si è scoperto che al pari degli elettroni i neutrini si comportano come piccole trottole rotanti e i loro momenti della

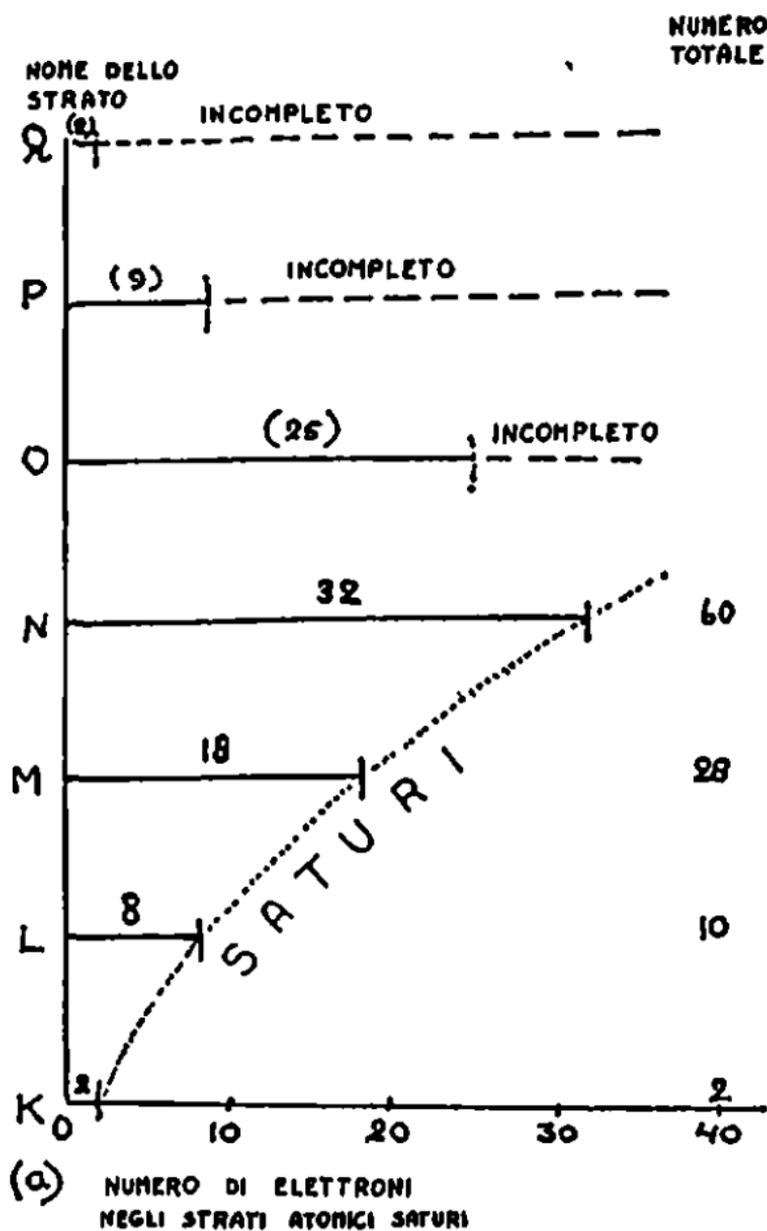
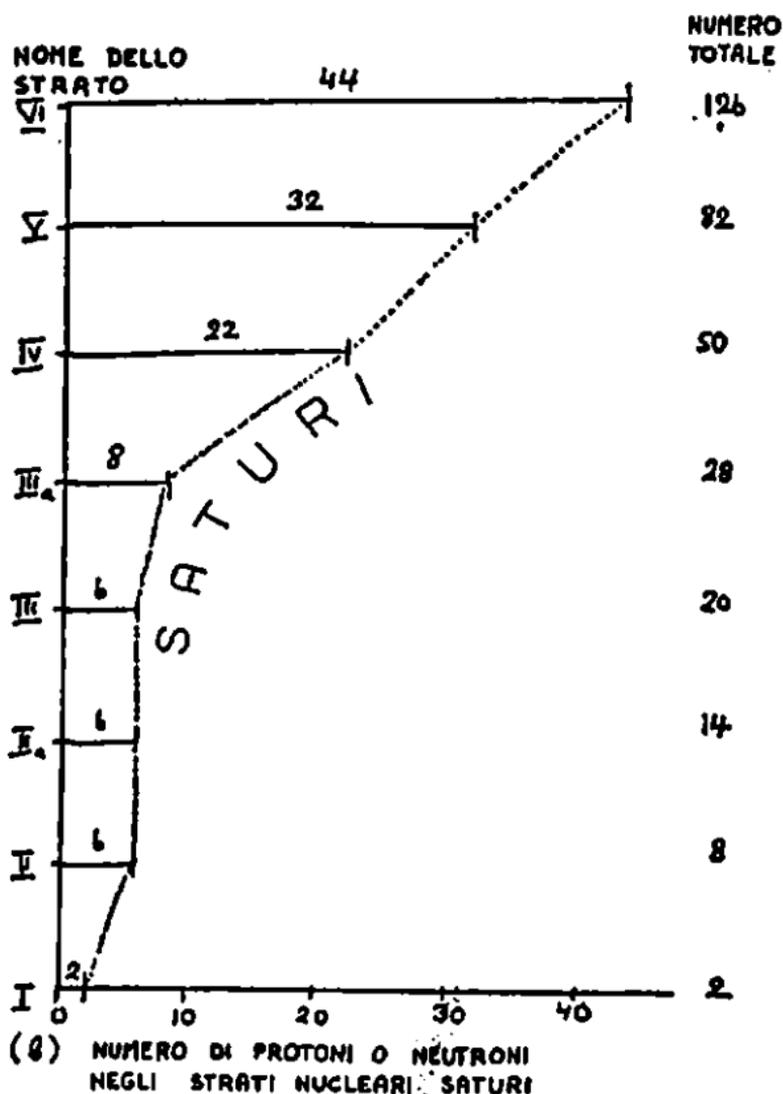


Fig. 18. Confronto tra (a) la saturazione degli strati elettronici, secondo lo schema di Bohr e Coster della sequenza degli atomi e (b) lo schema di Mayer e Jensen per la saturazione degli strati di protoni e neutroni nella sequenza dei nuclei atomici.

quantità di moto sono esattamente uguali a quelli di un elettrone; ma dato che i neutrini non hanno carica elettrica il loro momento magnetico è uguale a zero. In seguito si è trovato sperimentalmente che anche i neutroni e i protoni



hanno lo stesso spin degli elettroni e che anche per loro vale il Principio di Pauli. Quest'ultimo fatto è molto importante per quanto riguarda la struttura interna dei nuclei atomici che sono formati da un agglomerato di diverse quantità di protoni e neutroni tenuti strettamente uniti dalle forze nucleari. Come dimostrò per primo G. Gamow nel 1934, la sequenza naturale dei nuclei atomici dall'idrogeno agli isotopi dell'uranio mostra, nelle diverse proprietà dei nuclei, cambiamenti periodici simili ma molto più piccoli dei cambiamenti delle proprietà chimiche degli atomi nel Sistema Periodico degli Elementi di Mendeleev. Questa periodicità indica che i nuclei atomici devono avere una struttura a strati

simile a quella degli elettroni atomici, ma probabilmente piú complicata. Qui la situazione si complica per il fatto che mentre gli involucri atomici sono composti da un solo tipo di particelle, cioè da elettroni, i nuclei sono composti da due tipi di particelle, neutroni e protoni, e il Principio di Esclusione di Pauli si applica a ciascun tipo separatamente. Così ogni livello energetico individuato da tre numeri quantici può ospitare due protoni (con spin opposto) insieme a due neutroni (anch'essi con spin opposto), e abbiamo in realtà due sistemi di strati, uno per i protoni e uno per i neutroni, che si sovrappongono l'uno all'altro. C'è un'altra difficoltà: il calcolo dei livelli di energia diventa notevolmente complicato perché protoni e neutroni sono stipati uno accanto all'altro nel nucleo. Il problema fu finalmente risolto nel 1949 da M. Goeppert Mayer, H. Jensen e altri: essi riuscirono a dimostrare che gli strati di protoni e neutroni entro i nuclei possono contenere 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82 e 126 particelle rispettivamente, come mostra in modo schematico la figura 18. Questi numeri, conosciuti col nome di « Numeri Magici », hanno permesso ai fisici di capire a fondo la periodicità osservata nella struttura nucleare.

Un'altra importante applicazione del Principio di Pauli si può trovare nel lavoro di P. A. M. Dirac che se ne è servito per spiegare la stabilità della materia, come si dirà nel capitolo 6. Seguendo la sua teoria Dirac giunse alla conclusione che per « ogni particella normale », come l'elettrone, il protone, il neutrone e le schiere di altre particelle scoperte negli ultimi dieci anni, deve esistere un'antiparticella avente uguali proprietà fisiche ma carica elettrica opposta. Questo argomento sarà trattato con maggiori particolari nei capitoli 6 e 8.

Per terminare questo capitolo basti dire che è tanto difficile trovare un ramo della fisica moderna in cui non venga utilizzato il Principio di Esclusione di Pauli quanto trovare un uomo pieno di talento, gradevole e divertente come era Wolfgang Pauli.

4 De Broglie e le onde-pilota



Louis Victor, Duca di de Broglie, nato a Dieppe nel 1892, divenuto Principe di de Broglie alla morte del fratello maggiore, ebbe una carriera scientifica piuttosto insolita. Quando era studente alla Sorbonne decise di dedicarsi alla storia medievale ma lo scoppio della prima guerra mondiale lo spinse ad arruolarsi nell'esercito francese. Essendo un uomo colto fu assegnato a un reparto di radiotelegrafisti, una novità a quell'epoca, e i suoi interessi si spostarono dalle cattedrali gotiche alle onde elettromagnetiche. Nel 1925 presentò una tesi di dottorato che conteneva idee talmente rivoluzionarie sulle modifiche della teoria originaria di Bohr sulla struttura atomica che la maggior parte dei fisici fu piuttosto scettica: qualche bello spirito infatti soprannominò la teoria di de Broglie « *la Comédie Française* ».

Avendo lavorato con le radioonde durante la guerra ed essendo conoscitore di musica da camera, de Broglie si mise a considerare l'atomo come una specie di strumento musicale che, a seconda di come è costruito, può emettere una certa

nota fondamentale e una sequenza di armoniche. Dato che a quell'epoca le orbite elettroniche di Bohr si erano bene affermate come elementi per individuare i diversi stati quantici di un atomo, le prese come modello fondamentale del suo modello di onde. Immaginò che ogni elettrone, muovendosi lungo una data orbita, fosse accompagnato da alcune misteriose « onde-pilota » (conosciute ora col nome di onde di de Broglie) distribuite lungo tutta l'orbita. La prima orbita quantica portava soltanto un'onda, la seconda due, la terza tre e così via. Così la lunghezza della prima onda deve essere uguale alla lunghezza $2\pi r_1$ della prima orbita quantica, quella della seconda deve essere uguale alla metà della lunghezza della seconda orbita, $2\pi r_2/2$ e così via. In generale la n -esima orbita quantica porta n onde, ciascuna di lunghezza $2\pi r_n/n$.

Come abbiamo visto nel capitolo 2, il raggio della n -esima orbita nell'atomo di Bohr è

$$r_n = \frac{1}{4\pi^2} \frac{h^2}{me^2} n^2.$$

Dato che la forza centrifuga dovuta al moto orbitale, deve essere uguale all'attrazione elettrostatica fra particelle cariche otteniamo:

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{r_n^2}$$

$$\text{cioè } e^2 = mv_n^2 r_n.$$

Sostituendo questo valore di e^2 nella formula precedente abbiamo:

$$r_n = \frac{1}{4\pi^2} \frac{h^2 n^2}{m} \cdot \frac{1}{mv_n^2 r_n}$$

$$\text{cioè } (2\pi r_n)^2 = \frac{h^2 n^2}{m^2 v^2}.$$

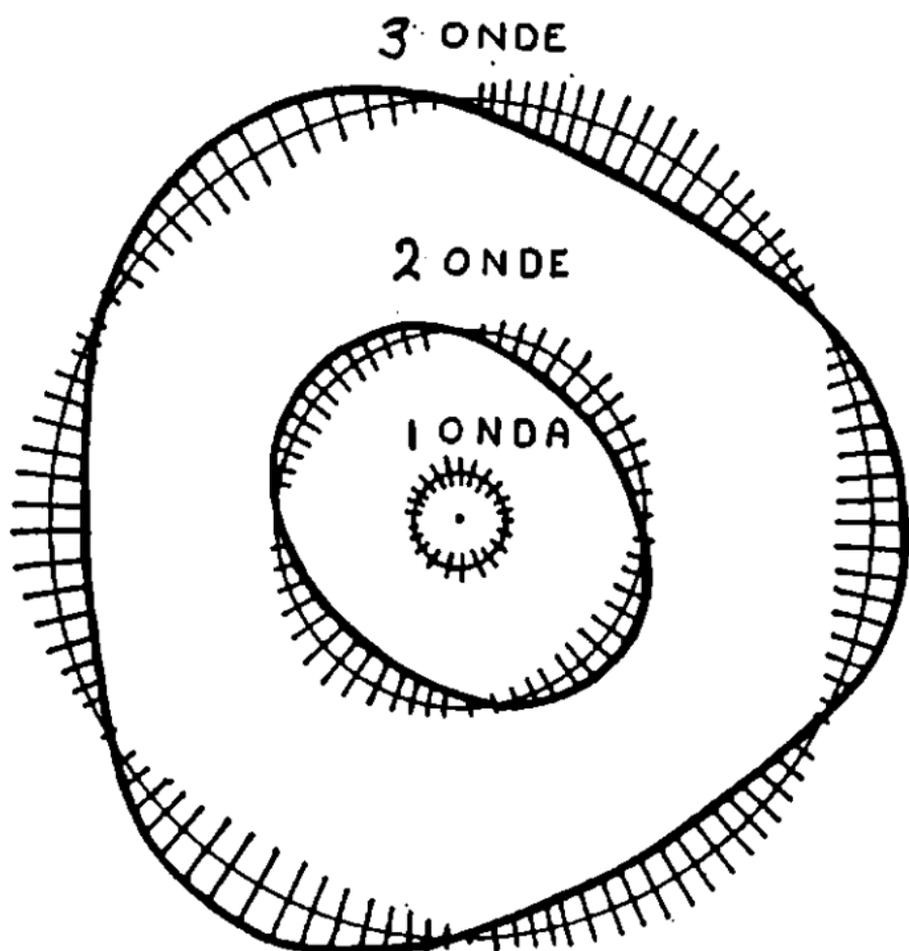


Fig. 19. Le onde di de Broglie adattate alle orbite quantiche nel modello atomico di Bohr.

Estraendo la radice quadrata da entrambi i membri di questa equazione otteniamo infine:

$$2\pi r_n = n \frac{h}{mv_n}$$

Così, se ora la lunghezza λ dell'onda che accompagna un elettrone fosse uguale alla costante di Planck, h , divisa per la quantità di moto mv della particella, cioè $\lambda = h/mv$, allora de Broglie potrebbe soddisfare il suo desiderio di introdurre onde di tale natura che 1, 2, 3, ... di esse si adattassero perfettamente alla prima, seconda, terza orbita quantica di Bohr (fig. 19). Il risultato ottenuto è matematicamente

equivalente alla condizione quantica originale di Bohr e non introduce nulla di nuovo dal punto di vista fisico, nulla, tranne *un'idea*: il moto degli elettroni lungo le orbite quantiche di Bohr è accompagnato da onde misteriose la cui lunghezza d'onda è determinata dalla massa e dalla velocità delle particelle in movimento. Se queste onde fossero un tipo di realtà fisica dovrebbero accompagnare anche particelle che si muovono liberamente nello spazio, nel qual caso la loro esistenza o non esistenza potrebbe essere verificata con esperimenti diretti. Infatti se il moto degli elettroni fosse sempre guidato dalle onde di de Broglie, un fascio di elettroni in condizioni adatte mostrerebbe fenomeni di diffrazione simili a quelli caratteristici dei fasci di luce. Secondo la formula di de Broglie, fasci di elettroni accelerati da tensioni elettroniche di diversi chilovolt (comunemente usate negli esperimenti di laboratorio) dovrebbero essere accompagnati da onde di de Broglie aventi lunghezza d'onda di circa 10^{-8} cm, paragonabile alla lunghezza d'onda dei comuni raggi X. Questa lunghezza d'onda è troppo corta per mostrare una diffrazione nei normali reticoli ottici e si potrebbe studiare con la tecnica comunemente usata della spettroscopia ai raggi X. In questa tecnica il fascio incidente viene riflesso dalla superficie di un cristallo e gli strati cristallini adiacenti, distanti tra loro circa 10^{-8} cm, funzionano come le righe dei reticoli di diffrazione ottici, rispetto alle quali però sono molto più ravvicinati (fig. 20). Questo esperimento fu eseguito contemporaneamente e indipendentemente da Sir George Thomson (figlio di Sir J. J. Thomson) in Inghilterra, e da G. Davisson e L. H. Germer negli Stati Uniti: essi si servirono di un cristallo nello stesso modo usato dai Bragg, ma sostituirono al fascio di raggi X un fascio di elettroni che si muovevano a una data velocità. Negli esperimenti appariva una caratteristica figura di diffrazione sullo schermo (o sulla lastra fotografica) posto sul percorso del fascio riflesso, e le bande di diffrazione si allargavano e restringevano a seconda che la velocità degli elettroni incidenti aumentasse o diminuisse. La lunghezza d'onda misurata coincideva esattamente in tutti i casi con quella data dalla formula di de Broglie:

così le onde di de Broglie divennero un'indiscutibile realtà fisica sebbene nessuno capisse che cosa fossero.

In seguito un fisico tedesco, Otto Stern, dimostrò l'esistenza dei fenomeni di diffrazione nel caso di fasci atomici. Poiché

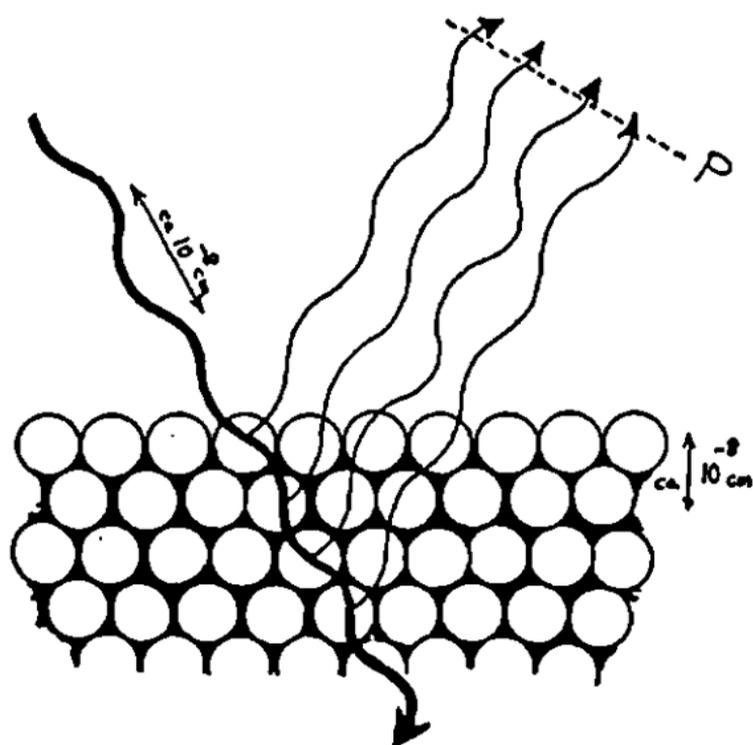


Fig. 20. Un'onda incidente, sia essa un'onda elettromagnetica corta (raggi X) o un'onda di de Broglie associata a un fascio di elettroni veloci, nel passare attraverso i successivi strati del reticolo di un cristallo produce delle ondine. A seconda dell'angolo di incidenza appaiono frange di interferenza scure e chiare (P è il fronte dell'onda piana emergente).

gli atomi sono migliaia di volte più pesanti degli elettroni si prevedeva che le loro onde di de Broglie, a parità di velocità, fossero corrispondentemente più corte. Per rendere le onde atomiche di de Broglie di lunghezza confrontabile con le distanze fra strati cristallini (circa 10^{-8} cm), Stern decise di ricorrere al moto termico degli atomi, dato che poteva rego-

larne la velocità semplicemente variando la temperatura del gas. La sorgente consisteva in un cilindro di ceramica scaldato da un filo elettrico avvolto a spirale intorno ad esso. A un'estremità del cilindro chiuso c'era un forellino minuscolo attraverso cui gli atomi sfuggivano alla loro velocità termica in un recipiente molto piú grande, in cui era stato fatto il vuoto spinto, e nel volo attraverso lo spazio urtavano contro un cristallo posto sul loro percorso. Gli atomi riflessi in diverse direzioni si appiccicavano a piastre metalliche raffreddate con aria liquida; il numero di atomi sulle diverse piastre veniva contato per mezzo di un complicato sistema di microanalisi chimica. Riportando in un grafico su un asse il numero di atomi deviato in diverse direzioni e sull'altro l'angolo di deviazione, Stern otteneva di nuovo una figura di diffrazione perfetta, corrispondente esattamente alla lunghezza d'onda calcolata in base alla formula di de Broglie. Inoltre le bande diventavano piú larghe o piú strette quando si variava la temperatura del cilindro.

Quando lavoravo con Rutherford presso l'Università di Cambridge, sul finire degli anni venti, decisi di passare le vacanze di Natale a Parigi (dove non ero mai stato prima) e scrissi a de Broglie che mi sarebbe piaciuto moltissimo incontrarlo e discutere con lui alcuni problemi della Teoria dei Quanti. Mi rispose che l'Università in quel periodo era chiusa ma che lui sarebbe stato lieto di ricevermi a casa sua.

Viveva in una splendida dimora di famiglia nell'elegante periferia parigina di Neuilly-sur-Seine. La porta mi venne aperta da un solenne maggiordomo.

« *Je veux voir Professeur de Broglie* ».

« *Vous voulez dire Monsieur le Duc de Broglie* », ribatté il maggiordomo.

« *O.K., le Duc de Broglie* », dissi e mi lasciò entrare.

De Broglie, con indosso una veste da camera di seta, mi ricevette nel suo studio riccamente ammobiliato e cominciammo a discutere di fisica. Non parlava una parola di inglese e il mio francese era piuttosto modesto, ma in parte usando il mio scorretto francese e in parte scrivendo le for-

mule su un pezzo di carta riuscii in qualche modo a trasmettergli quello che volevo dirgli e a capire i suoi commenti. Meno di un anno dopo de Broglie venne a Londra per tenere una conferenza alla Royal Society e io naturalmente mi trovavo nel pubblico: pronunciò una conferenza brillante, in perfetto inglese, con appena un leggero accento francese. Capii allora un altro dei suoi principi: quando gli stranieri vanno in Francia devono parlare in francese.

Parecchi anni dopo quando, sapendo che avevo progettato un viaggio in Europa, de Broglie mi chiese di tenere una conferenza all'Istituto di Henri Poincaré, di cui era uno dei direttori, decisi di arrivare ben preparato. Pensai di scrivere la conferenza nel mio francese (ancora scadente) a bordo della nave, durante la traversata dell'Atlantico, di farmi correggere il testo da qualcuno a Parigi e di servirmi di questi appunti durante la conferenza. Però, come tutti possono immaginare, ogni buon proposito crolla durante una traversata oceanica ricca di tante distrazioni, e dovetti affrontare il pubblico della Sorbonne completamente impreparato. La conferenza andò avanti incespicando un po', ma il mio francese resse e tutti capirono quello che volevo dire. Dopo la conferenza dissi a de Broglie che mi dispiaceva molto di non aver attuato il mio piano originale di farmi riscrivere il testo in buon francese. « *Mon Dieu!* » esclamò, « per fortuna non lo ha fatto ».

De Broglie mi raccontò di una conferenza tenuta dal famoso fisico inglese R. H. Fowler. È noto che essendo l'inglese la migliore lingua del mondo gli Inglesi sono del parere che tutti gli stranieri dovrebbero impararla, liberando loro dalla necessità di imparare le lingue degli altri. Poiché la conferenza alla Sorbonne doveva essere in francese, Fowler aveva scritto tutto il testo in inglese e l'aveva mandato in anticipo a de Broglie che l'aveva tradotto personalmente in francese. Fowler tenne dunque la conferenza in francese servendosi del testo dattiloscritto. De Broglie raccontava che dopo la conferenza era andato da lui un gruppo di studenti: « *Monsieur le Professeur* », gli avevano detto, « siamo molto perplessi. Credevamo che il Professor Fowler avrebbe parlato

in inglese, che conosciamo tutti quanto basta per capirlo. Invece lui non ha parlato in inglese ma in un'altra lingua e non siamo riusciti a capire che lingua fosse ». « E io », aggiunse de Broglie, « dovetti spiegar loro che il Professor Fowler aveva parlato in francese ».

L'equazione d'onda di Schrödinger.

Concepita l'idea rivoluzionaria che il moto delle particelle atomiche fosse guidato da misteriose onde-pilota, de Broglie fu troppo lento nell'elaborare una rigorosa teoria matematica del fenomeno e nel 1926, circa un anno dopo la sua pubblicazione, apparve un articolo di un fisico austriaco, Erwin Schrödinger, che scrisse un'equazione generale per le onde di de Broglie e ne dimostrò la validità per tutti i tipi di moto elettronico. Mentre il modello atomico di de Broglie assomigliava piú a un inconsueto strumento musicale a corda, o meglio a un insieme di anelli metallici vibranti, concentrici e di diverso diametro, il modello di Schrödinger aveva piú stretta analogia con gli strumenti a fiato: nel suo atomo le vibrazioni si manifestano in ogni punto dello spazio che circonda il nucleo atomico.

Immaginiamo un disco metallico piatto, un po' simile a un cembalo fissato nel centro (fig. 21a): se lo colpiamo comincerà a vibrare con l'orlo che si muove periodicamente su e giù (fig. 21b). Esistono anche tipi di vibrazione piú complicati (armoniche) come quello rappresentato nella figura 21c, dove il centro del disco e tutti i punti situati lungo la circonferenza, indicata nella figura con una linea piú scura e che sta fra il centro e la circonferenza del disco, restano fermi; cosí che quando il materiale all'interno di questa circonferenza minore si gonfia verso l'alto, il materiale all'esterno di essa si muove verso il basso e viceversa. I punti e le linee immobili di una superficie elastica vibrante si chiamano punti e linee nodali.

Si può sviluppare la figura 21c disegnando armoniche piú alte, corrispondenti a due o piú cerchi nodali, intorno al punto nodale centrale.

Oltre a queste vibrazioni « radiali » esistono anche « vibrazioni azimutali » in cui le linee nodali sono linee rette passanti per il centro, come mostrano le figure 21d e 21e in cui le frecce indicano se la membrana sale o scende rispetto alla posizione orizzontale di equilibrio. Naturalmente le vibrazioni radiali e azimutali possono esistere contemporanea-

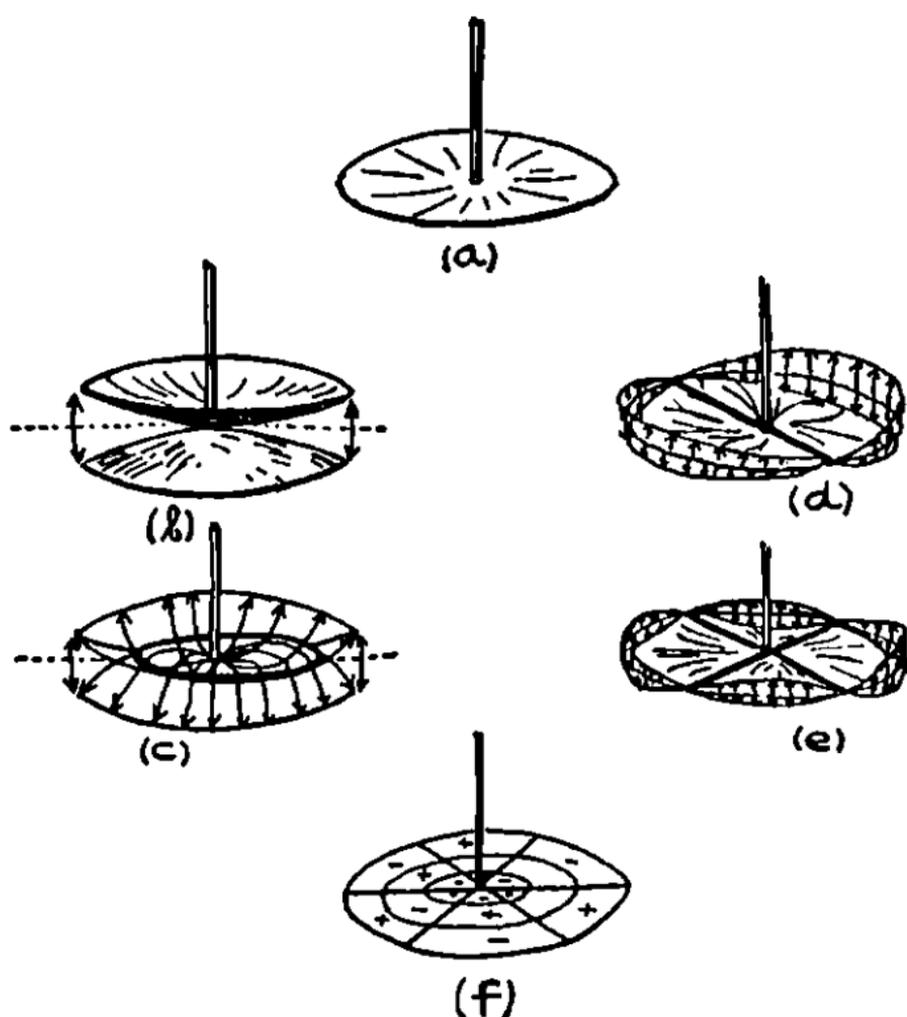


Fig. 21. Diversi modi di vibrazione di un disco elastico fissato nel centro: (a) stato di quiete; (b) punto nodale nel centro; (c) una sola linea nodale circolare; (d) una sola linea nodale radiale; (e) due linee nodali radiali; (f) tre linee nodali radiali e due linee nodali circolari.

mente in una stessa membrana. Il complicato stato di moto risultante potrebbe essere descritto da due interi n_r e n_ϕ , che rappresentano il numero di linee nodali e azimutali.

Subito dopo in ordine di complessità vengono le vibrazioni a tre dimensioni come, per esempio, le onde sonore nell'aria che riempie una sfera di metallo rigida: in questo caso diventa necessario introdurre il terzo tipo di linee nodali, e anche il terzo intero n_θ , che rappresenta il loro numero.

Questo tipo di vibrazioni è stato studiato in acustica teorica molti anni fa; in particolare Hermann von Helmholtz fece nel secolo scorso studi minuziosi sulle vibrazioni dell'aria chiusa in sfere metalliche rigide (i risonatori di Helmholtz). Praticava un forellino nella sfera per lasciare entrare il suono dall'esterno, e si serviva di una sirena che emetteva una nota pura la cui altezza poteva essere cambiata con continuità cambiando la velocità di rotazione del disco della sirena. Quando la frequenza del suono della sirena coincideva con una delle possibili vibrazioni dell'aria all'interno della sfera si osservava la risonanza. Questi esperimenti concordavano perfettamente con le soluzioni matematiche dell'equazione d'onda per il suono, che però è troppo complicata per trattarne in questo libro.

L'equazione scritta da Schrödinger per le onde di de Broglie è molto simile alle ben note equazioni d'onda relative alla propagazione delle onde sonore e delle onde luminose o elettromagnetiche, tuttavia per alcuni anni *che cosa vibrasse* rimase un mistero. Torneremo su questo argomento nel prossimo capitolo.

Quando un elettrone si muove intorno a un protone in un atomo di idrogeno la situazione assomiglia un po' a quella che si ha per un gas che vibri entro un recipiente sferico rigido. Ma mentre per le vibrazioni di Helmholtz c'è una parete rigida che impedisce al gas di espandersi di là da essa, l'elettrone atomico è soggetto all'attrazione elettrica del nucleo centrale e rallenta il suo moto tanto più quanto più si allontana dal centro, e si arresta quando va di là dal limite permesso dalla sua energia cinetica! La figura 22 mostra gra-

ficamente la situazione nei due casi. Nella figura di sinistra la « buca di potenziale » (cioè la diminuzione di energia potenziale nelle vicinanze di un certo punto) assomiglia a un pozzo cilindrico; la figura di destra assomiglia piuttosto a

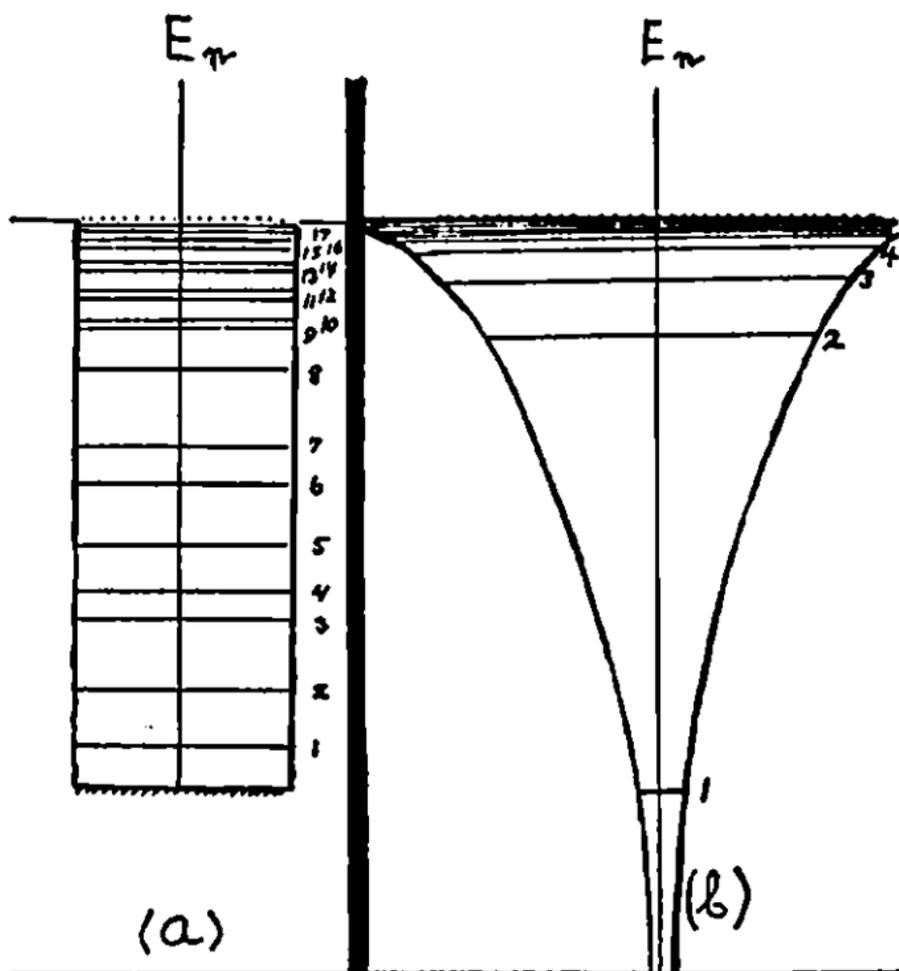


Fig. 22. Livelli energetici quantizzati in una buca di potenziale cilindrica (a) e in una buca di potenziale imbutiforme (b).

un cratere imbutiforme. Le linee orizzontali rappresentano i livelli di energia quantizzati: il più basso corrisponde all'energia minima che può avere la particella. Confrontando la figura 22b con la figura 12 del capitolo 2 troviamo che i livelli dell'atomo di idrogeno calcolati sulla base dell'equa-

zione di Schrödinger sono identici a quelli ottenuti in base alla vecchia teoria di Bohr delle orbite quantiche. Ma l'aspetto fisico è molto diverso: invece delle nette orbite circolari ed ellittiche lungo cui ruotano elettroni puntiformi, abbiamo ora un atomo tutto pieno rappresentato da vibrazioni multiformi di qualcosa che nei primi anni della meccanica ondulatoria fu chiamata, in mancanza di un nome migliore, funzione ψ (psi).

È bene ricordare che la distribuzione di potenziale nel pozzo cilindrico della figura 22a risultò utilissima per una descrizione del moto dei protoni e dei neutroni nel nucleo atomico, e in seguito fu usata con successo da Maria Goepper Mayer e, indipendentemente, da Hans Jensen per spiegare i livelli di energia nei nuclei atomici e l'origine degli spettri dei raggi γ delle specie nucleari radioattive.

Le frequenze dei diversi modi di vibrazione di ψ non corrispondono alle frequenze dell'onda luminosa emessa dall'atomo, ma ai valori energetici dei diversi stati quantici divisi per h . L'emissione di una riga spettrale rendeva dunque necessario l'eccitamento di due modi di vibrazione, cioè ψ_m e ψ_n con la frequenza risultante

$$\nu_{m,n} = \frac{E_m}{h} - \frac{E_n}{h} = \frac{E_m - E_n}{h},$$

che è uguale all'espressione di Bohr per la frequenza di un quanto di luce risultante dal passaggio dell'elettrone atomico dal livello di energia E_m al livello di energia piú basso E_n .

Applicazioni della meccanica ondulatoria.

La meccanica ondulatoria, oltre a dare basi piú razionali alla primitiva idea di Bohr delle orbite quantiche e a eliminare alcune discordanze, poteva spiegare alcuni fenomeni molto fuori della portata della vecchia Teoria dei Quanti. Come si è accennato nel capitolo 2, l'autore di questo libro e, indipendentemente, un gruppo composto da Ronald Gurney e Edward Condon, applicarono con successo l'equazione d'on-

da di Schrödinger per spiegare l'emissione di particelle α da parte di elementi radioattivi e la loro penetrazione nei nuclei di altri elementi piú leggeri con la conseguente trasformazione di elementi. Per capire questo fenomeno alquanto complicato, paragoneremo un nucleo atomico a una fortezza circondata su tutti i lati da alte muraglie: nella fisica nucleare l'analogia delle muraglie della fortezza si conserva nella denominazione di *barriera di potenziale*. Dato che il nucleo atomico e la particella α portano entrambi una carica elettrica positiva esiste una energica forza di repulsione coulombiana * agente sulla particella α che si avvicina a un nucleo. Sotto l'azione di questa forza, una particella α sparata contro il nucleo può essere fermata e respinta prima di entrare in contatto diretto con il nucleo. Invece alle particelle α che si trovano dentro i vari nuclei come parti componenti viene impedito di sfuggire da forze nucleari di attrazione molto intense (analoghe alle forze di coesione esistenti nei liquidi ordinari); ma queste forze nucleari agiscono soltanto quando le particelle sono molto stipate e si trovano in diretto contatto fra di loro. Queste due forze combinate costituiscono una barriera di potenziale che impedisce alle particelle interne di uscire e a quelle esterne di entrare, a meno che la loro energia cinetica sia così alta da superare la sommità della barriera di potenziale.

Rutherford scoprì, per mezzo di esperimenti, che le particelle α emesse da vari elementi radioattivi, come l'uranio e il radio, hanno energia cinetica molto inferiore a quella necessaria per scavalcare la barriera. Si sapeva anche che quando le particelle vengono sparate dall'esterno contro i nuclei, con energia cinetica inferiore a quella necessaria per raggiungere la sommità della barriera di potenziale, spesso penetrano nei nuclei producendo trasformazioni nucleari artificiali. Secondo i principi fondamentali della meccanica classica entrambi i

* Durante i primi studi sui fenomeni elettrici, il fisico francese Charles de Coulomb scoprì che le forze che agiscono tra le particelle cariche sono direttamente proporzionali al prodotto delle loro cariche elettriche e inversamente proporzionali al quadrato della loro distanza: questo principio va sotto il nome di Legge di Coulomb.

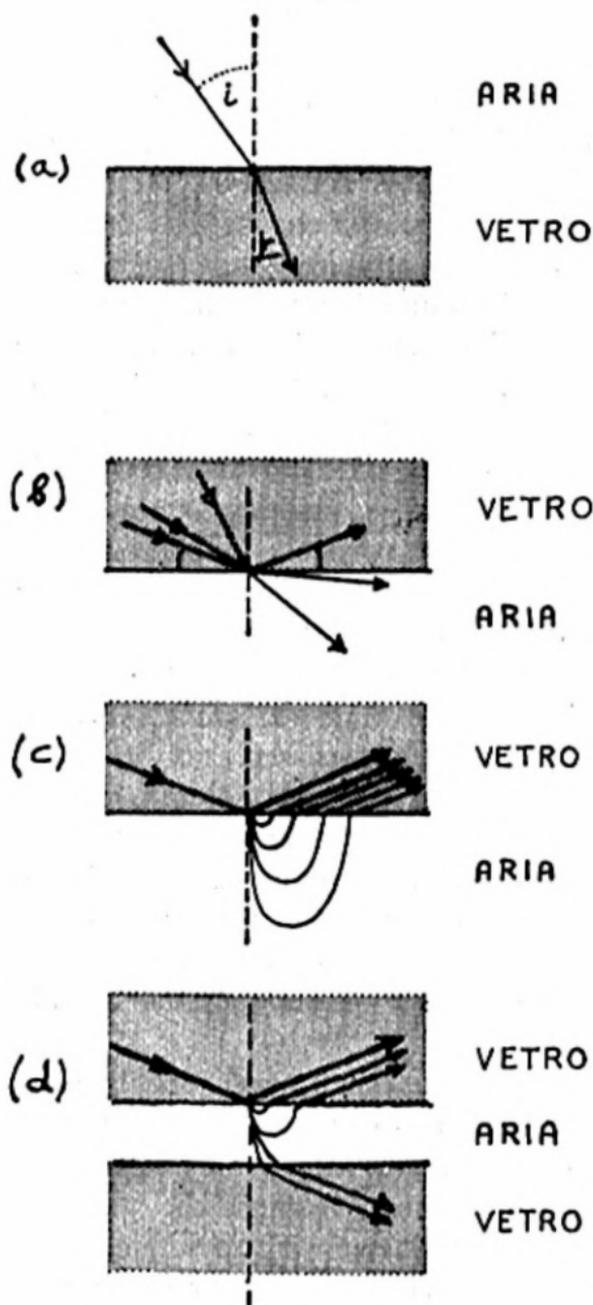


Fig. 23. Analogia fra la Meccanica Ondulatoria e l'Ottica Ondulatoria. In (a) abbiamo la rappresentazione abituale della rifrazione della luce nel passaggio dal mezzo piú rarefatto al mezzo piú denso. In (b) il caso opposto: la luce entrando dal mezzo piú denso in quello piú rarefatto può essere riflessa totalmente dall'interfacie se l'angolo di incidenza supera un certo valore critico. Secondo la teoria ondulatoria della luce, la riflessione non ha luogo sulla superficie matematica che separa i due mezzi, ma

fenomeni sarebbero stati assolutamente impossibili, così che non avrebbe dovuto assolutamente verificarsi una disintegrazione nucleare spontanea, con conseguente emissione di particelle α , né una trasformazione nucleare artificiale per effetto del bombardamento con particelle α . Eppure entrambe sono state osservate in esperimenti!

Considerata dal punto di vista della meccanica ondulatoria, la situazione appare molto diversa perché il moto delle particelle è regolato dalle onde di de Broglie. Per capire come la meccanica ondulatoria spieghi questi eventi impossibili per le teorie classiche, bisogna ricordare che essa ha rispetto alla meccanica tradizionale newtoniana la stessa posizione che l'ottica ondulatoria ha nei confronti della vecchia ottica geometrica. Secondo il Principio di Snellius * un raggio luminoso che cada su una superficie di vetro con un certo angolo di incidenza i (fig. 23a) viene rifratto con un angolo più piccolo r , soddisfacendo la condizione: $\sin i / \sin r = n$, dove n è l'indice di rifrazione del vetro. Se capovolgiamo la situazione (fig. 23b) e prendiamo un raggio di luce che attraversi un vetro ed esca nell'aria, l'angolo di rifrazione sarà più grande di quello di incidenza e avremo $\sin i / \sin r = 1/n$. Dunque un raggio di luce che cada sull'interfaccia tra il vetro e l'aria con un angolo di incidenza maggiore di un certo valore critico non penetrerà affatto nell'aria ma sarà completamente riflesso indietro nel vetro. Secondo la teoria ondulatoria della luce la

* Nome umanistico del matematico olandese Willebrord Snell van Royen (N.d.T.).

entro un certo strato di diverse lunghezze d'onda di spessore. Così se il secondo strato del mezzo più denso si trova a qualche lunghezza d'onda oltre il primo strato, una frazione della luce incidente non verrà riflessa completamente ma penetrerà nel secondo strato più denso propagandosi nella direzione originaria. Similmente, secondo la meccanica ondulatoria alcune particelle possono penetrare nelle regioni proibite dalla meccanica classica, in cui il potenziale è più alto dell'energia cinetica originaria delle particelle.

situazione è diversa. Le onde luminose che subiscono una riflessione totale verso l'interno non vengono riflesse dal confine matematico fra le due sostanze, ma penetrano nel secondo mezzo (in questo caso l'aria) a una profondità di varie lunghezze d'onda λ e vengono poi rigettate nel mezzo originario (fig. 23c). Per ciò se sistemiamo un'altra lastra di vetro a qualche lunghezza d'onda di distanza (qualche micron nel caso della luce visibile), una parte della luce che entra nell'aria raggiungerà la superficie di questo vetro e continuerà a propagarsi nella direzione originaria (fig. 23d). La teoria relativa a questo fenomeno si può trovare nei libri di ottica pubblicati un secolo fa e costituisce una dimostrazione tipica in molti corsi universitari di ottica.

Analogamente le onde di de Broglie, che guidano il moto delle particelle α e di altri proiettili atomici, possono penetrare in regioni dello spazio che sono vietate alle particelle dalla meccanica newtoniana classica, e particelle α , protoni ecc., possono attraversare una barriera di potenziale di altezza superiore all'energia della particella incidente. Ma la probabilità di penetrazione ha importanza dal punto di vista fisico soltanto per particelle aventi massa atomica e per barriere non più larghe di 10^{-12} o 10^{-13} centimetri. Prendiamo come esempio un nucleo di uranio che emetta una particella α dopo un intervallo di circa 10^{10} anni. Una particella α imprigionata entro la barriera di potenziale dell'uranio colpisce la muraglia della barriera circa 10^{21} volte al secondo, ciò significa che le probabilità di sfuggire dopo un semplice urto sono una su $10^{10} \times 3 \times 10^7 \times 10^{21} \cong 3 \times 10^{38}$ urti (3×10^7 è il numero di secondi in un anno). Analogamente le probabilità che un proiettile atomico penetri nel nucleo sono molto piccole a ogni colpo, ma possono diventare considerevoli se interviene un grandissimo numero di collisioni nucleari. Nel 1929 Fritz Houtermans e Robert Atkinson dimostrarono che le collisioni nucleari causate da intenso moto termico, conosciute col nome di *reazioni termonucleari*, sono responsabili della produzione di energia nel Sole e nelle Stelle. I fisici stanno ora lavorando intensamente per produrre le co-

siddette « reazioni termonucleari controllate » che dovrebbero fornirci fonti di energia nucleare a buon mercato, inesauribili e innocue. Tutto ciò sarebbe stato impossibile se la meccanica newtoniana classica non fosse stata sostituita dalla meccanica ondulatoria di de Broglie e di Schrödinger.

5 Heisenberg e il principio di indeterminazione



Contemporaneamente allo scritto di Schrödinger sulla meccanica ondulatoria, pubblicato su *Annalen der Physik*, su un'altra rivista tedesca, *Physikalische Zeitschrift*, apparve un lavoro di Werner Heisenberg, dell'Università di Gottinga, dedicato allo stesso argomento e che portava esattamente agli stessi risultati. Ma, con grande stupore dei fisici che lessero i due lavori, partivano da presupposti fisici completamente diversi, si servivano di metodi matematici completamente diversi e sembravano non aver nulla a che vedere l'uno con l'altro. Come è stato detto nel capitolo precedente, Schrödinger immaginava il moto degli elettroni atomici governato da un sistema di onde di de Broglie a tre dimensioni generalizzate che circondavano il nucleo atomico, le cui forme e frequenze di vibrazioni erano determinate dal campo di forze elettriche e magnetiche. Heisenberg invece ideò un modello più astratto: trattava l'atomo come se fosse composto di un numero infinito di oscillatori « virtuali » lineari, con frequenze coincidenti con tutte le possibili frequenze che l'atomo in que-

sione potesse emettere. Dunque, mentre nella descrizione di Schrödinger l'emissione di una riga spettrale con frequenza $\nu_{m,n}$ era considerata « risultato della collaborazione » di due funzioni di vibrazione ψ_m e ψ_n^* , nel modello di Heisenberg la stessa riga spettrale era emessa da un singolo oscillatore che possiamo chiamare $O_{m,n}$.

Nella meccanica classica un oscillatore lineare è individuato da due numeri: il suo spostamento dalla posizione di equilibrio q e la sua velocità v , due quantità che cambiano periodicamente nel tempo. Nella meccanica analitica c'è l'abitudine di usare invece della velocità v la quantità di moto ** p , definita come prodotto della massa della particella per la sua velocità ($p = mv$). Se una forza agisce sull'oscillatore seguendo una determinata legge, questo avrà una frequenza ben definita ν . Ma lo spettro ottico ha frequenze che possono essere rappresentate da una tabella bidimensionale:

$\nu_{m,n}$	ν_{11}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{14}	ν_{15}	ν_{16}	ecc.
	ν_{21}	ν_{22}	ν_{23}	ν_{24}	ν_{25}	ν_{26}	ecc.
	ν_{31}	ν_{32}	ν_{33}	ν_{34}	ν_{35}	ν_{36}	ecc.
	ν_{41}	ν_{42}	ν_{43}	ν_{44}	ν_{45}	ν_{46}	ecc.
	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.

* Per semplicità usiamo qui per ogni modo di vibrazione soltanto un numero quantico invece di tre.

** Isaac Newton introdusse la nozione che egli chiamò quantità di moto nel suo libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (I principi matematici della filosofia naturale): era il risultato della combinazione della Seconda e della Terza Legge del Moto. Se due particelle originariamente in quiete interagiscono fra loro, le forze agenti F_1 e F_2 hanno valore assoluto uguale e sono dirette in senso opposto. Le velocità raggiunte durante il periodo di interazione (v_1 e v_2) sono inversamente proporzionali alle masse (m_1 e m_2) delle due particelle. Dunque le quantità di moto hanno valore assoluto uguale e direzioni opposte: questo è il famoso *Principio della Conservazione della Quantità di Moto*.

Schieramenti di numeri di questo genere erano noti da lungo tempo ai matematici col nome di *matrici* e venivano usati con successo nella soluzione di vari problemi algebrici. Le matrici possono essere *finite*, se gli indici m e n vanno da 1 a un numero dato, o *infinite*, se m e n vanno all'infinito. Si sviluppò uno speciale ramo della matematica in cui ogni data matrice (finita o infinita) poteva essere rappresentata da un semplice simbolo stampato in neretto. Così \mathbf{a} indica una matrice:

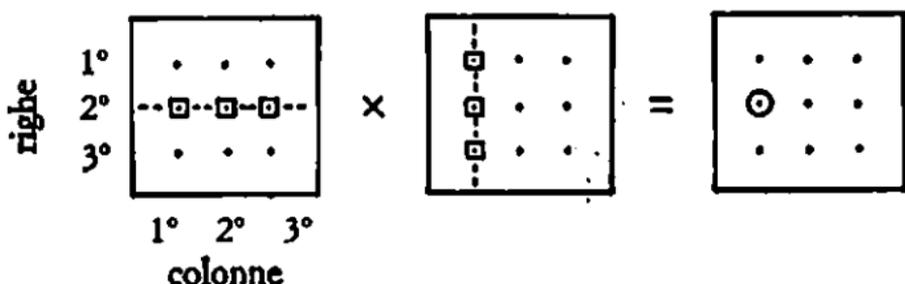
\mathbf{a}_{11}	\mathbf{a}_{12}	\mathbf{a}_{13}	\mathbf{a}_{14}	\mathbf{a}_{15}	\mathbf{a}_{16}	\mathbf{a}_{17}	ecc.
\mathbf{a}_{21}	\mathbf{a}_{22}	\mathbf{a}_{23}	\mathbf{a}_{24}	\mathbf{a}_{25}	\mathbf{a}_{26}	\mathbf{a}_{27}	ecc.
\mathbf{a}_{31}	\mathbf{a}_{32}	\mathbf{a}_{33}	\mathbf{a}_{34}	\mathbf{a}_{35}	\mathbf{a}_{36}	\mathbf{a}_{37}	ecc.
ecc.	ecc.						

Come i numeri ordinari, le matrici possono essere sommate, sottratte, moltiplicate e divise fra loro. Le regole di addizione e sottrazione sono simili a quelle che servono per i numeri ordinari: si sommano e si sottraggono termine a termine. Per esempio:

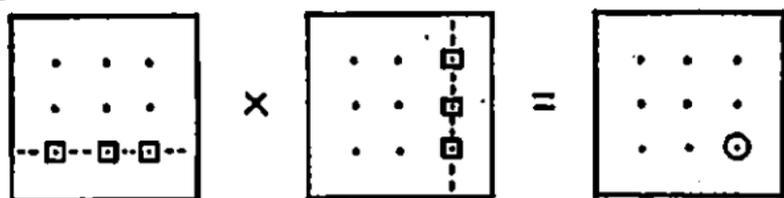
$\mathbf{a} \pm \mathbf{b} =$	$\mathbf{a}_{11} \pm \mathbf{b}_{11}$	$\mathbf{a}_{12} \pm \mathbf{b}_{12}$	$\mathbf{a}_{13} \pm \mathbf{b}_{13}$	ecc.
	$\mathbf{a}_{21} \pm \mathbf{b}_{21}$	$\mathbf{a}_{22} \pm \mathbf{b}_{22}$	$\mathbf{a}_{23} \pm \mathbf{b}_{23}$	ecc.
	$\mathbf{a}_{31} \pm \mathbf{b}_{31}$	$\mathbf{a}_{32} \pm \mathbf{b}_{32}$	$\mathbf{a}_{33} \pm \mathbf{b}_{33}$	ecc.
	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.

Ne segue che l'addizione delle matrici gode della proprietà commutativa, cioè $\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a}$ proprio come $3 + 7 = 7 + 3$, oppure $a + b = b + a$. Ma le regole di moltiplicazione e divi-

sione sono piú complicate. Per ottenere il termine che si trova nella m -esima riga e nella n -esima colonna del prodotto ab si deve moltiplicare, termine a termine, l'intera sequenza di termini della m -esima riga di a per l'intera sequenza di termini della n -esima colonna di b , e sommare insieme tutti questi prodotti. Questa regola può essere rappresentata schematicamente dai seguenti disegni, dove il punto racchiuso in un circoletto — che sta nel prodotto — si ottiene sommando i prodotti dei punti racchiusi nei quadrati.



oppure



Per familiarizzarci con questo sistema usiamo come elementi della matrice numeri invece di lettere e calcoliamo il prodotto di due matrici:

per

1	3	5
2	5	1
4	3	2

×

3	5	4
1	1	1
2	3	5

otteniamo :

16	23	32
13	18	18
19	29	29

perché $1 \times 3 + 3 \times 1 + 5 \times 2 = 16$; $1 \times 5 + 3 \times 1 + 5 \times 3 = 23$; e così via.

Adesso invertiamo l'ordine dei moltiplicandi e facciamo il calcolo:

$$\text{per } \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3 & 5 & 4 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 2 & 3 & 5 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 3 & 5 \\ \hline 2 & 5 & 1 \\ \hline 4 & 3 & 2 \\ \hline \end{array} \text{ otteniamo : } \begin{array}{|c|c|c|} \hline 29 & 46 & 28 \\ \hline 7 & 11 & 8 \\ \hline 28 & 36 & 23 \\ \hline \end{array}$$

Il risultato è molto diverso dal primo caso! *La proprietà commutativa della moltiplicazione, di uso tanto corrente in aritmetica e in algebra elementare, non vale nel calcolo matriciale!* Ecco perché il calcolo matriciale è chiamato *algebra non commutativa*. È bene notare che non tutte le coppie di matrici danno necessariamente risultati diversi quando si inverte l'ordine della moltiplicazione: se il risultato è uguale si dice che le due matrici *commutano*; se il risultato è diverso esse *non commutano*.

La divisione delle matrici è definita come nell'algebra elementare dove $a:b = a \cdot 1/b$, e il valore di $1/b$ (l'inverso di b) soddisfa la condizione $b \cdot 1/b = 1$. Nell'algebra non commutativa $a/b = a \cdot 1/b$ in cui $1/b$ soddisfa la condizione $b \cdot 1/b = 1$ e

$$\mathbf{1} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{ecc.} \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \text{ecc.} \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \text{ecc.} \\ \hline \text{ecc.} & \text{ecc.} & \text{ecc.} & \text{ecc.} & \text{ecc.} & \text{ecc.} \\ \hline \end{array}$$

Secondo Heisenberg, poiché le frequenze delle righe spettrali emesse da un atomo costituiscono una matrice infinita:

$\nu_{m,n}$	ν_{11}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{14}	ecc.
	ν_{21}	ν_{22}	ν_{23}	ν_{24}	ecc.
	ν_{31}	ν_{32}	ν_{33}	ν_{34}	ecc.
	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.

anche le quantità meccaniche, come le velocità, le quantità di moto, e così via, si dovrebbero scrivere in forma di matrice. Così le quantità di moto e le coordinate sarebbero date dalle matrici:

$p =$	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}	ecc.
	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}	ecc.
	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{34}	ecc.
	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.

e

q	q_{11}	q_{12}	q_{13}	q_{14}	ecc.
	q_{21}	q_{22}	q_{23}	q_{24}	ecc.
	q_{31}	q_{32}	q_{33}	q_{34}	ecc.
	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.	ecc.

dove i singoli valori delle p_{mn} e delle q_{mn} oscillano con le frequenze ν_{mn} indicate nella tabella precedente.

Sostituendo p e q nelle equazioni della meccanica classica, Heisenberg prevedeva di ottenere le singole frequenze e ampiezze dei diversi oscillatori « virtuali ». C'era però un altro

passo da compiere per ottenere il risultato finale. Nella meccanica classica p e q di solito sono numeri ordinari, perciò ai fini del calcolo è indifferente scrivere pq o qp . Le matrici p e q non commutano ($pq \neq qp$), si deve perciò introdurre un altro postulato che stabilisca quale è la differenza tra pq e qp . Heisenberg suppose che questa differenza, che è anche una matrice, sia uguale alla matrice unitaria \mathbf{I} , con un coefficiente numerico ordinario per il quale scelse il valore di $h/2\pi i$. Per cui la condizione ulteriore diventò:

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} \mathbf{I}.$$

Aggiungendo questa condizione all'equazione classica della meccanica, scritta sotto forma di matrice, Heisenberg ottenne un sistema di equazioni che descrivevano i valori esatti delle frequenze e delle rispettive intensità delle righe spettrali, con risultati identici a quelli ottenuti da Schrödinger usando la sua equazione d'onda.

L'inaspettata coincidenza dei risultati ottenuti per mezzo della meccanica ondulatoria di Schrödinger e della meccanica delle matrici di Heisenberg, che sembravano non avere nulla in comune sia nei presupposti fisici sia nel metodo matematico seguito, fu spiegata da Schrödinger in un suo lavoro successivo. Egli riuscì a dimostrare che, anche se a prima vista poteva sembrare incredibile, la sua meccanica ondulatoria era identica, dal punto di vista matematico, alla meccanica delle matrici di Heisenberg e che, di fatto, l'una poteva essere dedotta dall'altra. Era un'affermazione tanto sconcertante quanto la scoperta che le balene e i delfini non sono pesci come gli squali o le aringhe, bensì mammiferi come gli elefanti e i cavalli! Ma era la verità, e oggi si usano un po' la meccanica ondulatoria e un po' la meccanica delle matrici secondo i gusti e la convenienza: in particolare nel calcolo delle intensità di radiazione si adoperano elementi di matrice calcolati in base alla meccanica ondulatoria.

Si abbandonano le traiettorie lineari classiche.

Sebbene la nuova Teoria dei Quanti, nella forma ondulatoria o matriciale, desse una descrizione matematica perfetta dei fenomeni atomici, non riusciva tuttavia a far luce sul loro aspetto fisico. Che significato fisico si poteva attribuire a queste onde misteriose, a queste sconcertanti matrici? In che modo potevano essere messe in relazione con le nostre nozioni derivate dal senso comune sulla materia e il mondo in cui viviamo? La risposta a queste domande fu data da Heisenberg in un lavoro pubblicato nel 1927. Heisenberg esordiva con un'allusione alla Teoria della Relatività di Einstein che all'epoca della sua pubblicazione (e in molti casi perfino oggi) era considerata da alcuni eminenti fisici in contraddizione col senso comune. Che cosa è il « senso comune »? Il famoso filosofo tedesco Immanuel Kant (con le cui opere l'autore ha solo una vaga dimestichezza) lo avrebbe probabilmente definito in questo modo: « "Senso comune"? Ebbene il senso comune è come le cose dovrebbero essere ». E poi, se gli avessero domandato: « Che cosa significa "come le cose dovrebbero essere"? », avrebbe forse risposto: « Bene, significa "come sono sempre state" »*.

Einstein fu probabilmente il primo a rendersi conto di un fatto importante: le nozioni fondamentali e le leggi della natura, per quanto bene affermate, erano valide soltanto nei limiti dell'osservazione e non restavano necessariamente valide al di là di questi. Per i popoli delle antiche civiltà la Terra era piatta, ma non lo era certamente per Magellano né lo è per i moderni astronauti. Le nozioni fisiche fondamentali di spazio, tempo e moto erano solidamente affermate e in armonia col senso comune, finché la scienza non superò i limiti che imprigionavano gli scienziati del passato. Sorse allora una netta contraddizione, dovuta soprattutto agli esperimenti di Michelson sulla velocità della luce, che costrinse Einstein ad abbandonare le vecchie idee di « senso comune » sul computo del tempo, la misura della distanza e la mecca-

* Questa conversazione immaginaria è inventata di sana pianta dall'Autore e non può essere attribuita a Kant.

nica, e lo portarono alla formulazione della « insensata » Teoria della Relatività. Risultò che per velocità molto alte, distanze molto grandi e periodi di tempo molto lunghi le cose non erano come « avrebbero dovuto essere ».

Heisenberg ne dedusse che la stessa situazione esistesse nel campo della Teoria dei Quanti, e cominciò a cercare che cosa c'era di sbagliato nella meccanica tradizionale delle particelle quando si entrava nel campo dei fenomeni atomici. Proprio come Einstein iniziò l'analisi critica del fallimento della fisica classica nel campo relativistico, criticando nozioni fondamentali come la *simultaneità* di due eventi distanti, così Heisenberg attaccò la nozione basilare della meccanica classica, la nozione di *traiettoria* di un corpo materiale in movimento. La traiettoria era stata definita da tempo immemorabile come il percorso lungo cui si muove un corpo nello spazio. Nel caso limite usato nei calcoli matematici, il « corpo » era un punto matematico (privo di dimensioni, secondo la definizione di Euclide) mentre il percorso era una linea matematica (priva di spessore secondo la stessa autorità). Nessuno metteva in dubbio che questo caso limite fosse la migliore descrizione possibile del moto e che, diminuendo gli errori sperimentali sulle coordinate e la velocità della particella in movimento, ci si potesse avvicinare sempre più alla esatta descrizione del moto.

Heisenberg sollevò delle obiezioni: egli fece notare che questa affermazione sarebbe stata senza dubbio vera se il mondo fosse stato governato dai principi della fisica classica; però l'esistenza dei fenomeni quantici poteva capovolgere la situazione. Cominciamo col prendere in esame un esperimento ideale in cui si cerchi di determinare la traiettoria di una particella pesante in movimento, per esempio nel campo gravitazionale della Terra. A questo scopo costruiamo una camera e pompiamone via l'aria finché non ne rimane neppure una molecola (fig. 24). Sulla parete della camera installiamo un cannoncino *C*, che spara un proiettile di massa *m* e di velocità *v*, ad esempio in direzione orizzontale. Sulla parete opposta della camera è sistemato un piccolo teodolite *T* che può essere puntato in direzione della particella che cade e

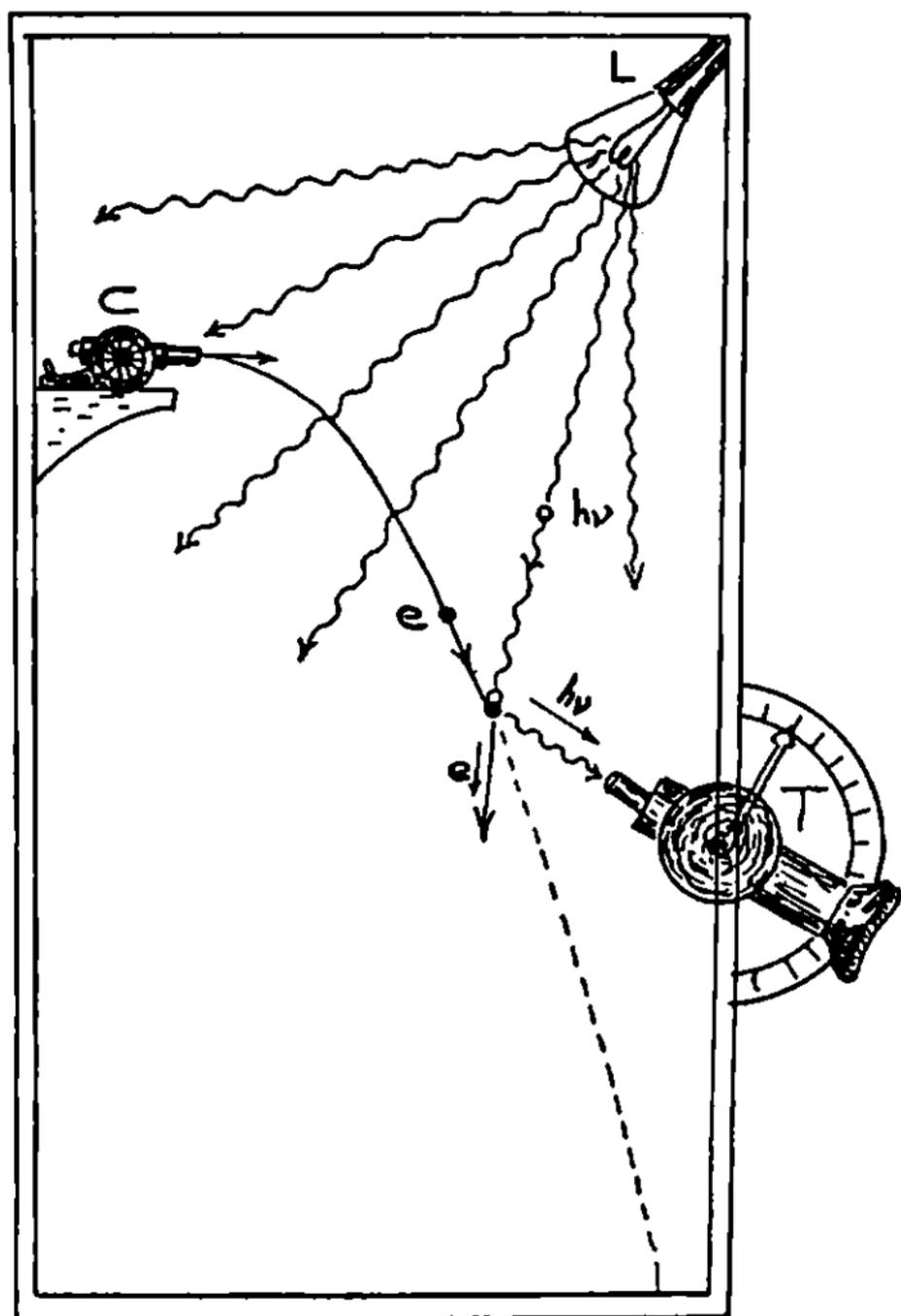


Fig. 24. Microscopio quantistico ideale di Heisenberg che interpreta le relazioni di indeterminazione: $\Delta p \Delta q \geq h$.

seguirne il percorso. La camera è illuminata da una lampadina elettrica L posta nel soffitto. La luce proveniente dalla lampadina è riflessa dalla particella che cade ed entra nel tubo del teodolite, e la posizione della particella che cade lascia una traccia o sulla retina dell'occhio dell'osservatore o su una lastra fotografica.

Poiché stiamo eseguendo un esperimento ideale dobbiamo tenere conto di ogni possibile effetto capace di disturbare il moto della particella, infatti ne troviamo uno, sebbene sia stata eliminata tutta l'aria: dato che la luce proveniente dalla lampadina è riflessa nel tubo del teodolite, esercita sulla particella una certa pressione che può deviare la particella dalla traiettoria parabolica prevista. È possibile rendere questo disturbo tanto piccolo da essere trascurabile? infinitamente piccolo?

Procediamo un po' alla volta e valutiamo dapprima soltanto dieci posizioni della particella: facciamo lampeggiare la lampadina soltanto dieci volte durante il tempo di caduta, ed eliminiamo così l'effetto di pressione della luce mentre non guardiamo la particella. Supponiamo che nel primo esperimento l'effetto delle dieci spinte causate dalla luce riflessa faccia deviare troppo la particella dalla traiettoria prevista. C'è un rimedio semplice: possiamo ridurre l'intensità della luce in proporzione di un opportuno coefficiente, perché nella fisica classica non c'è limite inferiore alla quantità di energia raggiante che può essere emessa in un solo lampeggiamento, e non c'è neppure limite alla sensibilità del rivelatore della luce riflessa. Riducendo l'intensità possiamo rendere la perturbazione complessiva durante il volo della particella inferiore a un qualsiasi piccolo numero ϵ da noi scelto. Se ora decidiamo di aumentare di dieci volte il numero di posizioni osservate, per ottenere una definizione più precisa della traiettoria, dobbiamo far lampeggiare la lampadina cento volte durante il rapido passaggio della particella. L'effetto della pressione della radiazione durante il percorso complessivo crescerà corrispondentemente e il disturbo totale potrà diventare superiore a ϵ . Per rimediare a questo inconveniente usiamo una lampadina dieci volte più debole e un rivelatore

dieci volte piú sensibile. I passi successivi consisteranno nell'eseguire 1 000, 10 000, 100 000 osservazioni e cosí via, servendoci corrispondentemente di lampadine piú deboli e rivelatori piú sensibili. Al limite otteniamo un numero infinito di osservazioni senza perturbare la traiettoria per piú di un ϵ . C'è un altro fatto da tener presente: per quanto piccolo sia il punto che si muove la sua immagine ottica sullo schermo non può essere piú piccola della lunghezza d'onda λ della luce usata, a causa dei fenomeni di diffrazione. Si può rimediare anche a questo diminuendo λ e impiegando, invece della luce visibile, luce ultravioletta, raggi X e raggi γ sempre piú duri. Non essendovi nella fisica classica un limite inferiore per la lunghezza delle onde elettromagnetiche, il diametro di ogni figura di diffrazione può essere reso piccolo a piacere. Continuando su questa strada si può osservare un percorso sottile come si vuole, senza apportare al moto complessivo un disturbo superiore a ϵ . Dunque entro i confini della fisica classica possiamo costruire idealmente la nozione di traiettoria come linea nel senso euclideo della parola.

Ma questo stato di cose euclideo trova qualche corrispondenza nella realtà? No, disse Heisenberg. Egli sosteneva che la procedura del nostro esperimento ideale diventa impossibile a causa dell'esistenza dei quanti di luce. Infatti la piú piccola quantità di energia portata da un « lampo di luce » è uguale a $h\nu$, che corrisponde alla quantità di moto $h\nu/c$. Nella riflessione dei lampi verso il teodolite una parte di questa quantità di moto verrà comunicata alla particella, cambiando la sua quantità di moto in

$$\Delta p \cong h\nu/c$$

Cosí il numero di osservazioni aumenta il disturbo causato alla traiettoria illimitatamente e invece di muoversi lungo la parabola la particella eseguirà un moto browniano scagliata come è avanti e indietro entro la camera in tutte le direzioni. L'unico modo per diminuire il disturbo consiste nel diminuire ν , il che, per la relazione $\nu=c/\lambda$, significherebbe un

aumento della lunghezza d'onda fino a farla diventare grande come la camera. Allora, invece di vedere piccole scintille saltellanti ovunque sullo schermo, osserveremmo un sistema di grandi cerchi di diffrazione sovrappoventisi, che coprirebbero l'intero schermo. Con questo metodo non si può dunque ottenere nulla che assomigli a linee matematiche.

La sola alternativa consiste nel cercare un compromesso: dobbiamo usare fotoni con una frequenza non troppo alta e una lunghezza d'onda non troppo lunga. L'indeterminazione Δq , nella nostra conoscenza della posizione della particella, è $\cong \lambda = c/\nu$; otteniamo allora:

$$\Delta p \cong h\nu/c = h/\lambda$$

cioè

$$\Delta p \Delta q \cong h^*,$$

che è la famosa relazione di indeterminazione di Heisenberg. Facendo comparire la velocità questa relazione diventa

$$\Delta v \Delta q \cong h/m,$$

indicando che le deviazioni dalla meccanica classica diventano importanti soltanto per masse piccolissime. Per una particella di 1 mg ** otteniamo la relazione

$$\Delta v \Delta q \cong 10^{-27}/10^{-3} = 10^{-24},$$

che può essere soddisfatta prendendo per esempio:

$$\Delta v \cong 10^{-12} \text{ cm/sec}; \Delta q = 10^{-12} \text{ cm.}$$

Dunque per questa relazione l'errore con cui possiamo misurare la velocità di un pallino di piombo (di quelli con cui

* Questa relazione è spesso indicata con il segno \cong , che significa « approssimativamente uguale a », o con il segno \sim che significa « dell'ordine di », oppure, come nella figura 25, con il segno \cong , che significa « maggiore o uguale a ».

** Un milligrammo (mg) è la millesima parte del grammo, cioè la massa di un millimetro cubo di acqua a 4 °C.

si riempiono le cartucce da caccia) è inferiore a 0,3 metri al secolo, e l'indeterminazione della sua posizione è paragonabile al diametro del nucleo atomico. È evidente che nessuno si preoccuperà di indeterminazioni come queste! Invece per un elettrone avente una massa di 10^{-27} grammi abbiamo:

$$\Delta v \Delta q \cong 10^{-27} / 10^{-27} \cong 1.$$

Poiché dire che un elettrone si trova all'interno dell'atomo significa che $\Delta q \cong 10^{-8}$ cm, troviamo che l'indeterminazione della sua velocità è

$$\Delta v = 1 / 10^{-8} = 10^8 \text{ cm/sec.}$$

L'indeterminazione dell'energia cinetica corrispondente a questa indeterminazione della velocità è

$$\begin{aligned} \Delta E_c &\cong mv \Delta v \cong 10^{-27} \times 10^8 \times 10^8 \cong 10^{-11} \text{ erg} \cong \\ &\cong 10 \text{ elettron-volt,} \end{aligned}$$

che è paragonabile all'energia di legame totale di un elettrone nell'atomo. Naturalmente in queste circostanze non ha senso disegnare in forma di linee le orbite dell'elettrone nell'atomo, perché lo spessore di queste linee dovrebbe essere pressappoco uguale ai diametri delle orbite quantiche di Bohr!

Si può pensare di osservare la traiettoria di una particella non col metodo ottico, che porta alle suddette difficoltà, ma con qualche tipo di congegni meccanici, disseminandoli nello spazio e registrando il passaggio delle particelle con cui entrano in contatto; potrebbero essere dei campanellini che si mettano a suonare quando sono colpiti al passaggio della particella. Ma nasce di nuovo una difficoltà: immaginiamo che il congegno registratore sia una particella mobile entro un ambiente di raggio l : dato che questa particella è quantizzata ha una serie discontinua di stati quantici che differiscono l'uno dall'altro nella quantità di moto di $\Delta p \cong h/l$. Così, se l'urto della particella incidente porta il congegno da uno stato quantico a un altro, la particella incidente perde una parte sostanziale della propria quantità di moto. Ma l è

l'indeterminazione Δq nella posizione della particella incidente, perché la particella può colpire il congegno di registrazione in qualunque punto della sua superficie. Con le misure eseguite con metodi meccanici otteniamo dunque di nuovo $\Delta p \Delta q \cong h$. È da notare che questo « metodo dei campanellini » è largamente usato negli esperimenti di fisica nucleare nell'apparecchio noto col nome di camera a nebbia o Camera di Wilson, in cui gli atomi di gas ionizzati (su cui si condensa il vapore acqueo) formano lunghe tracce che mostrano il moto delle varie particelle atomiche. Ma le tracce della camera a nebbia non sono linee matematiche e sono anzi molto più spesse di quanto permetterebbe la relazione di indeterminazione.

Poiché in fisica atomica e nucleare la nozione di traiettorie lineari classiche perde inevitabilmente ogni valore, è evidentemente necessario studiare un altro metodo per descrivere il moto delle particelle materiali, e qui ci vengono in aiuto le funzioni ψ . Esse non rappresentano nessuna realtà fisica: le onde di de Broglie non hanno una massa come quella che possiamo attribuire anche alle onde elettromagnetiche e, mentre in teoria si può comprare un chilo di luce rossa, non esiste al mondo un etto di onde di de Broglie. Esse non sono più materiali delle traiettorie lineari della meccanica classica e in vero possono essere definite « linee matematiche allargate »: guidano il moto delle particelle della meccanica quantistica allo stesso modo che le traiettorie lineari guidano il moto delle particelle della meccanica classica. Ma proprio come non consideriamo le orbite dei pianeti del Sistema Solare come una specie di rotaia che obbliga Venere e Marte e la nostra stessa Terra a muoversi lungo orbite ellittiche, così non possiamo considerare le funzioni continue della meccanica ondulatoria come una specie di campo di forze che influisce sul moto degli elettroni. Le funzioni d'onda di de Broglie e Schrödinger (o piuttosto il quadrato dei loro valori assoluti, cioè $|\psi|^2$) determinano appunto la *probabilità* che la particella si trovi in una parte dello spazio piuttosto che in un'altra, e che si muova con una velocità piuttosto che con un'altra.

Non possiamo terminare questo capitolo senza riferire una discussione appassionante tra Niels Bohr, che era il grande paladino delle relazioni di indeterminazione, e Albert Einstein, che restò fino alla morte un loro fiero avversario. L'incidente ebbe luogo a Bruxelles, durante il Sesto Congresso Solvay (1930) dedicato ai problemi della Teoria dei Quanti, e coinvolse (come era prevedibile data la presenza di Einstein!) la relazione di indeterminazione in *quattro* dimensioni.

In questo libro abbiamo scritto finora la relazione $\Delta p \Delta q \cong h$ nel caso unidimensionale di una coordinata e di una sola corrispondente quantità di moto. In un sistema di coordinate cartesiane a tre dimensioni, però, ci sono tre relazioni indipendenti:

$$\Delta p_x \Delta x \cong h$$

$$\Delta p_y \Delta y \cong h$$

$$\Delta p_z \Delta z \cong h$$

Poiché nella Teoria della Relatività il *tempo* (nella forma ct *) serve da quarta coordinata e l'*energia* (nella forma E/c) da quarta componente della quantità di moto, si poteva prevedere che esistesse una quarta relazione di indeterminazione

$$\Delta E \Delta t \cong h,$$

e fu su questo che nacque l'incidente durante il Congresso. Einstein si fece avanti per annunciare che poteva proporre un esperimento ideale per contraddire questa quarta relazione. Pensava, disse, a una scatola tappezzata di specchi ideali (come la scatola di Jeans descritta nel capitolo 1) e piena di una certa quantità di energia raggiante. In una parete c'era un tipo ideale di otturatore fotografico connesso con una sveglia ideale, regolabile in modo che l'otturatore funzionasse in un qualsiasi momento stabilito, dopo che la

* Dove $c = 3 \times 10^{10}$ cm/sec è la velocità della luce nel vuoto.

scatola era stata riempita di radiazione (fig. 25). Dato che la sveglia si trovava dentro la scatola e l'otturatore era chiuso, l'interno della scatola era completamente isolato dal mondo esterno. Einstein proponeva di pesare la scatola prima che la

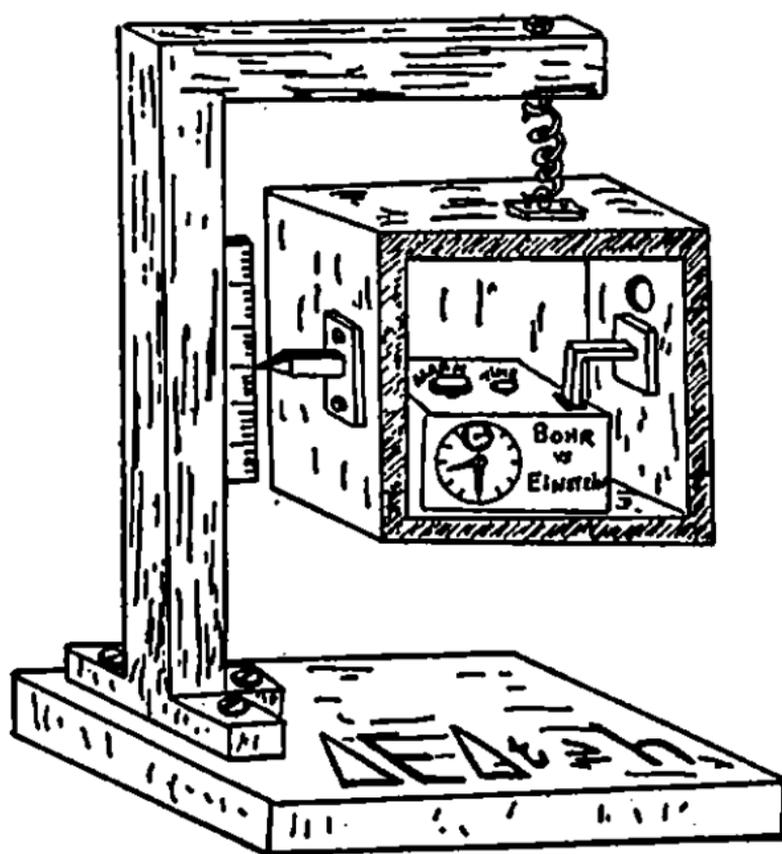


Fig. 25. Esperimento ideale di Bohr per confutare l'affermazione di Einstein secondo cui la relazione $\Delta E \Delta t \geq h$ è sbagliata.

sveglia suonasse; la pesata poteva essere eseguita con tutta la precisione desiderabile, bastava disporre di tempo sufficiente. L'otturatore si sarebbe aperto nel momento esatto su cui era stata regolata la sveglia, lasciando uscire una certa quantità di energia raggiante E . Dopo aver chiuso l'otturatore si poteva pesare di nuovo la scatola con tutta la precisione desiderabile. Il cambiamento della massa della scatola $M_2 - M_1$ si poteva ricavare con precisione dalle due

pesate e moltiplicato per c^2 avrebbe dato la quantità esatta di energia emessa, così che $\Delta E=0$. D'altra parte la sveglia ideale avrebbe dovuto funzionare in modo perfetto, così che non ci sarebbe stata incertezza sul momento in cui l'energia veniva emessa, e quindi anche $\Delta t=0$. Il fatto di avere $\Delta E=0$ e insieme $\Delta t=0$ distruggeva la quarta relazione di indeterminazione.

Gli argomenti sembravano molto persuasivi e Bohr non trovò niente da dire. Ma la mattina successiva, dopo una notte quasi insonne, Bohr, la faccia raggiante, si presentò nella sala del congresso con una spiegazione. Per pesare la scatola, fece notare, bisognava permetterle di muoversi in direzione verticale, qualunque fosse il tipo di bilancia usato, a molla o a piatti. La sveglia, cambiando posizione nel campo gravitazionale della Terra, andava avanti o ritardava conformemente al principio di Einstein relativo all'influsso del potenziale di gravitazione sul ritmo dell'orologio. Si sarebbe introdotta un'indeterminazione Δt circa il momento in cui sarebbe scattato l'otturatore. D'altra parte l'ampiezza delle oscillazioni verticali della scatola, che determina Δt , è connessa attraverso la già vista relazione

$$\Delta p_z \times \Delta z \cong h,$$

con il cambiamento di massa che fa oscillare la scatola quando viene persa energia. Destreggiandosi con le equazioni Bohr giunse facilmente a concludere che $\Delta E \Delta t \cong h$, smantellando così gli argomenti di Einstein servendosi delle più importanti scoperte di Einstein stesso.

Questo capitolo è centrato sul Principio di Heisenberg più che sulle caratteristiche dell'uomo, tuttavia l'autore desidera aggiungere che Heisenberg era uno sciatore provetto, giocava il ping-pong con la mano sinistra e, malgrado la sua grande fama di fisico, a Lipsia (dove era professore) era più conosciuto come eccellente pianista.

6 Dirac e le antiparticelle



La Teoria della Relatività e la Teoria dei Quanti, che apparvero quasi contemporaneamente all'inizio di questo secolo, furono due grandi esplosioni del pensiero umano e scossero le basi stesse della fisica classica: la relatività nel campo delle velocità vicine a quella della luce: i quanti nel campo dei moti confinati a dimensioni piccolissime (atomiche). Ma per quasi trent'anni queste due grandi teorie restarono più o meno indipendenti l'una dall'altra. La teoria originaria di Bohr di orbite quantizzate, come l'equazione d'onda di Schrödinger in cui si evolvette, erano sostanzialmente non relativistiche: entrambe erano applicabili soltanto a particelle che si muovessero con velocità piccola in confronto a quella della luce. Le velocità degli elettroni all'interno degli atomi non sono tanto piccole: per esempio l'elettrone sulla prima orbita dell'idrogeno, calcolata in base alla teoria di Bohr, ha una velocità di $2,2 \times 10^8$ cm/sec, che è soltanto un po' meno dell'un per cento della velocità della luce; la velocità degli elettroni in atomi più pesanti è notevolmente più grande. Naturalmente una piccola percentuale non è poi molto, e il valore

calcolato poteva essere migliorato introducendo « correzioni relativistiche » che avrebbero reso un po' migliore la concordanza con le misure dirette eseguite negli esperimenti. Ma questo era solo un miglioramento e non ancora la teoria completa.

Sorse un'altra difficoltà con il momento magnetico dell'elettrone. Nel 1925 Goudsmit e Uhlenbeck dimostrarono che per spiegare certi particolari degli spettri atomici è necessario assegnare all'elettrone un momento della quantità di moto (comunemente noto come *spin elettronico*) e un momento magnetico *. A quell'epoca l'elettrone veniva ingenuamente immaginato come una sferetta carica, con un diametro di circa 3×10^{-13} cm. Si supposeva che la veloce rotazione di questa sfera intorno al suo asse producesse un momento magnetico, che dava luogo a un'ulteriore interazione col suo moto orbitale e con i momenti magnetici di altri elettroni. Risultò però che per produrre il campo magnetico necessario l'elettrone avrebbe dovuto ruotare così in fretta che i punti situati sul suo equatore si sarebbero mossi a velocità molto superiori a quella della luce! Anche qui la fisica quantistica e la fisica relativistica si trovavano in conflitto. Diventava chiaro che non si potevano sommare semplicemente l'una all'altra: c'era bisogno di una teoria più generale che contenesse in forma armoniosamente unificata le idee relativistiche e le idee quantistiche.

Il passo più importante in questa direzione fu compiuto nel 1928 dal fisico britannico P. A. M. Dirac, che cominciò la carriera come ingegnere elettrotecnico, ma non riuscendo a trovare un impiego soddisfacente, fece domanda per una borsa di studio di fisica all'Università di Cambridge. La sua domanda (che venne accettata) è adesso appesa ben incorniciata nella Biblioteca dell'Università, accanto al certificato del Premio Nobel che ricevette non molti anni dopo essere passato dall'elettrotecnica alla fisica quantistica.

Accade spesso che si raccontino aneddoti sugli scienziati fa-

* Cfr. FRANCIS BITTER, *Magnets*, Doubleday, Science Study Series, 1959. Trad. ital. *Vita coi Magneti*, Einaudi, Torino 1960.

mosi e con la testa fra le nuvole; nella maggior parte dei casi non sono veri, ma sono soltanto invenzioni di qualche burlone; nel caso di Dirac però le storie che si raccontano sono proprio vere, almeno secondo l'opinione di chi scrive. Ne citerò qui alcune, a beneficio degli storici futuri.

Essendo un grande fisico teorico Dirac amava teorizzare su tutti i problemi della vita quotidiana, anziché trovare soluzioni per esperimento diretto. Una volta, durante un trattamento a Copenaghen, espose una teoria secondo cui doveva esistere una certa distanza migliore delle altre per guardare il volto di una donna. Egli sosteneva che per $d = \infty$ non si può vedere assolutamente niente, mentre per $d = 0$ l'ovale è deformato a causa della piccola apertura dell'occhio umano, e vengono esagerate molte altre imperfezioni (per esempio le piccole rughe). C'è dunque una distanza ottima a cui il viso appare più bello.

« Dimmi Paul », gli domandai, « quale è la distanza minima a cui hai visto il viso di una donna? ».

« Oh », rispose Dirac indicando con le mani allargate una distanza di più di mezzo metro, « all'incirca questa ».

Alcuni anni più tardi Dirac sposò la « sorella di Wigner », conosciuta tra i fisici con questo nome perché era la sorella del noto fisico teorico ungherese Eugene Wigner. Quando un vecchio amico di Dirac, che non sapeva niente dal matrimonio, capitò a casa sua trovò Dirac in compagnia di una bella signora che servì loro il tè e poi si sedette comodamente sul divano. L'amico la salutò domandandosi chi mai potesse essere. « Oh! Scusa », esclamò Dirac, « ho dimenticato di presentarvi. Questa è... questa è la sorella di Wigner* ».

L'umorismo quantico di Dirac si manifestava spesso nei convegni scientifici. Una volta, a Copenaghen, Klein e Nishina spiegarono come avevano dedotto la famosa formula di Klein e Nishina, che descrive le collisioni fra elettroni e raggi gamma. Quando la formula finale fu scritta sulla lavagna, uno

* In una recente conversazione con la signora Dirac (a Austin, nel Texas) le domandai se la storia era proprio vera; rispose che in realtà Dirac aveva detto: « Questa è la sorella di Wigner, che adesso è mia moglie ».

dei presenti, che aveva già letto il manoscritto del lavoro, osservò che nella formula scritta sulla lavagna il secondo termine aveva il segno negativo mentre nel manoscritto il segno era positivo.

« Oh », disse Nishina, che faceva la comunicazione, « nel manoscritto i segni sono certamente giusti, ma qui sulla lavagna devo aver fatto qualche errore di segno in alcuni punti ».

« In un numero *dispari* di puntili » commentò Dirac.

Un altro esempio delle osservazioni acute di Dirac ha un gusto letterario. Il suo amico Piotr Kapitza, il fisico russo, gli dette da leggere una traduzione inglese di *Delitto e Castigo* di Dostoevskij.

« Ti è piaciuto? », gli domandò quando Dirac gli restituì il libro.

« È grazioso », disse Dirac. « Ma in un capitolo l'autore ha commesso un errore: descrive il sole come se nascesse due volte nello stesso giorno ».

Questo fu il suo solo e unico commento al romanzo di Dostoevskij*.

Un'altra volta Dirac era andato a trovare Kapitza a casa sua e, mentre parlava di fisica con Piotr, aveva osservato Anya Kapitza che faceva la maglia. Dopo un paio d'ore si precipitò di nuovo eccitatissimo da Kapitza. « Sai Anya », disse, « guardando il modo in cui facevi quel maglione ho incominciato a interessarmi all'aspetto topologico del problema. Ho trovato che c'è un altro modo per farlo e che ci sono due soli modi possibili. Uno è quello che hai usato tu, l'altro è questo... », e ne dette una dimostrazione servendosi delle sue lunghe dita sottili. « L'altro modo » da lui scoperto, lo informò Anya, le donne lo conoscono bene e non è altro che la maglia « a rovescio ».

Per finire con gli aneddoti su Dirac, prima di passare alle sue realizzazioni scientifiche, ne ricorderò ancora uno. Alla

* L'autore, a cui Kapitza raccontò questa storia, è troppo pigro per rileggere *Delitto e Castigo* e scoprire in quale capitolo si trova l'errore. Ma forse qualche lettore di questo libro avrà voglia di cercarlo.

fine di una conferenza di Dirac all'Università di Toronto, quando il pubblico fu invitato a porre delle domande, qualcuno osservò: « Professor Dirac, non capisco come abbia dedotto la formula in alto a sinistra sulla lavagna ».

« Questa non è una domanda », rispose secco Dirac, « è una affermazione. La domanda successiva, per piacere ».

Unificazione della Teoria della Relatività e della Teoria dei Quanti.

Vediamo ora l'opera di Dirac come fisico. Come abbiamo detto all'inizio del capitolo la Teoria dei Quanti e la Teoria della Relatività non potevano adattarsi esattamente l'una all'altra come i pezzi di un rompicapo: ci si poteva andare molto vicino, ma c'erano sempre alcune piccole discordanze che rendevano la soluzione imperfetta. L'equazione d'onda di Schrödinger nella Teoria dei Quanti sembrava molto simile alla equazione d'onda classica, che descrive la propagazione delle onde sonore o elettromagnetiche, ma...

Nella fisica classica le quantità considerate, siano esse la densità dell'aria o le forze elettromagnetiche, entrano sempre nell'equazione d'onda sotto forma di *derivate seconde**: misure della variazione di una variazione, e più esattamente derivate della derivata prima rispetto a x , y , z e t che per convenzione si scrivono:

$$\partial^2 u / \partial x^2; \partial^2 u / \partial y^2; \partial^2 u / \partial z^2 \text{ e } \partial^2 u / \partial t^2.$$

La soluzione matematica esatta di queste equazioni porta sempre a onde armoniche propagantisi nello spazio. L'equazione d'onda di Schrödinger conteneva le derivate seconde rispetto a x , y e z , ma soltanto la derivata prima rispetto a t . Il motivo di ciò stava nel fatto che era ricavata dalla meccanica classica newtoniana, in cui l'accelerazione di una particella materiale in movimento è proporzionale alla forza

* Una spiegazione elementare delle derivate si trova nel capitolo 3 (« Calculus ») del mio libro *Gravity*, pubblicato nel 1962 nella « Science Study Series ». Si veda anche FRANCIS BITTER, *Mathematical Aspects of Physics*, Doubleday, « Science Study Series », 1963.

agente. Infatti se x è la posizione della particella, la sua velocità v (cioè il tasso di variazione della sua posizione al variare del tempo) è la derivata *prima* di x rispetto a t :

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right),$$

mentre la sua *accelerazione* a (cioè il tasso di variazione della sua velocità al variare del tempo) è la derivata *seconda*:

$$\frac{\partial \left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)}{\partial t}$$

che di solito si scrive nella forma

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

La forza F d'altra parte è la derivata prima del potenziale P rispetto alla posizione:

$$\frac{\partial P}{\partial x}; \quad \frac{\partial P}{\partial y} \quad \text{e} \quad \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Dunque la fondamentale legge del moto di Newton, che afferma che l'accelerazione è direttamente proporzionale alla forza, conteneva le derivate prime rispetto alle coordinate spaziali e la derivata seconda rispetto al tempo. Questo rendeva non omogenea dal punto di vista matematico, l'equazione newtoniana del moto di una particella, dando al tempo t una posizione diversa da quella delle coordinate x , y e z . Questa situazione, che esisteva da secoli nella meccanica classica, si riflette nella meccanica ondulatoria non relativistica di Schrödinger, in cui lo spazio e il tempo sono trattati come entità completamente diverse.

Ma non appena cerchiamo di formulare i principi della Teoria dei Quanti su base relativistica, incorriamo in una difficoltà: spazio e tempo sono molto più strettamente connessi l'uno con l'altro. Infatti H. Minkowski, seguendo le idee

fondamentali di Einstein, giunse all'idea di un continuo spazio-temporale a quattro dimensioni in cui il tempo, moltiplicato per l'unità immaginaria $i = \sqrt{-1}$, è considerato equivalente alle tre coordinate spaziali. Nel mondo di Minkowski non c'è differenza tra x , y , z e ict (dove c viene introdotto per considerazioni puramente dimensionali). (In questo libro dedicato alla Teoria dei Quanti non abbiamo spazio per discutere nei particolari la Teoria della Relatività; il lettore che voglia conoscere questo argomento deve ricorrere ad altri libri *. L'autore deve comunque supporre che chi legge i capitoli successivi abbia almeno una conoscenza elementare delle idee fondamentali della teoria di Einstein). Come abbiamo detto poc'anzi, l'equazione della meccanica ondulatoria deve contenere le stesse derivate rispetto a tutte e quattro le coordinate. Ma l'equazione di Schrödinger, essendo dedotta dall'equazione di Newton, non soddisfa tale condizione.

I primi tentativi per correggere questo difetto vennero fatti indipendentemente da O. Klein e W. Gordon che trasformarono l'equazione d'onda non relativistica di Schrödinger in una di forma relativistica, introducendo semplicemente le derivate seconde rispetto al tempo invece delle derivate prime. Ma sebbene l'equazione d'onda di Klein e Gordon avesse un aspetto molto grazioso e molto relativistico, risentiva di numerose contraddizioni interne e tutti i tentativi per introdurre lo spin elettronico in modo ragionevole fallirono completamente.

Poi, una sera del 1928, seduto in una poltrona nel suo studio al St. John's College, con le lunghe gambe stese dinanzi al fuoco che ardeva nel caminetto, Paul Adrien Maurice Dirac incappò in un'idea semplicissima e brillantissima.

Se non si può ottenere nessun buon risultato usando nell'equazione d'onda relativistica le derivate seconde rispetto alla coordinata temporale, perché non servirsi delle deri-

* Cfr. HERMANN BONDI, *Relativity and Common Sense*, « Science Study Series », Doubleday, 1964. Trad. ital. *La relatività e il senso comune*, « Biblioteca di Monografie Scientifiche », Zanichelli, Bologna 1965.

vate prime rispetto alle coordinate spaziali? Naturalmente ciò significava introdurre altre unità immaginarie i , ma l'equazione d'onda sarebbe stata resa simmetrica nello spazio e nel tempo. Fece così la sua comparsa l'equazione lineare di Dirac (contenente soltanto derivate prime) che applicata all'atomo di idrogeno dette immediatamente ottimi risultati. Tutte le scissioni delle righe dello spettro, che avevano resistito ostinatamente a ogni interpretazione espressa in funzione di spin e di momento magnetico dell'elettrone, risultarono perfettamente giuste in base alla nuova teoria. Questo successo fu sorprendente soprattutto perché, nel formulare la sua equazione, Dirac cercava soltanto di fare in modo che risultasse esatta dal punto di vista relativistico: l'elettrone rotante fu il premio da lui ottenuto per aver unito in modo appropriato la Teoria della Relatività e la Teoria dei Quanti. E non era una sferetta elettricamente carica e in rapida rotazione, ma una carica puntiforme che grazie all'equazione di Dirac, si comportava *come se fosse* un minuscolo magnete. Ma, scritta l'equazione d'onda che rappresentava la fusione perfetta della Teoria della Relatività e della Teoria dei Quanti, Dirac dovette affrontare un'altra difficoltà, caratteristica di qualsiasi tentativo per unificare queste due teorie. Per la famosa relazione di Einstein, una massa a riposo m_0 (espressa in grammi) era equivalente all'energia m_0c^2 (espressa in erg), dove c è la velocità della luce. Se questa massa si muove con una certa velocità v , avendo quindi (in prima approssimazione) l'energia cinetica $E_c = m_0v^2/2$ * l'energia complessiva è:

$$E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong m_0c^2 + \frac{1}{2} m_0v^2 **$$

* O più esattamente: $m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$

che diventa uguale a $m_0v^2/2$ se $v \ll c$.

** Per $v \ll c$.

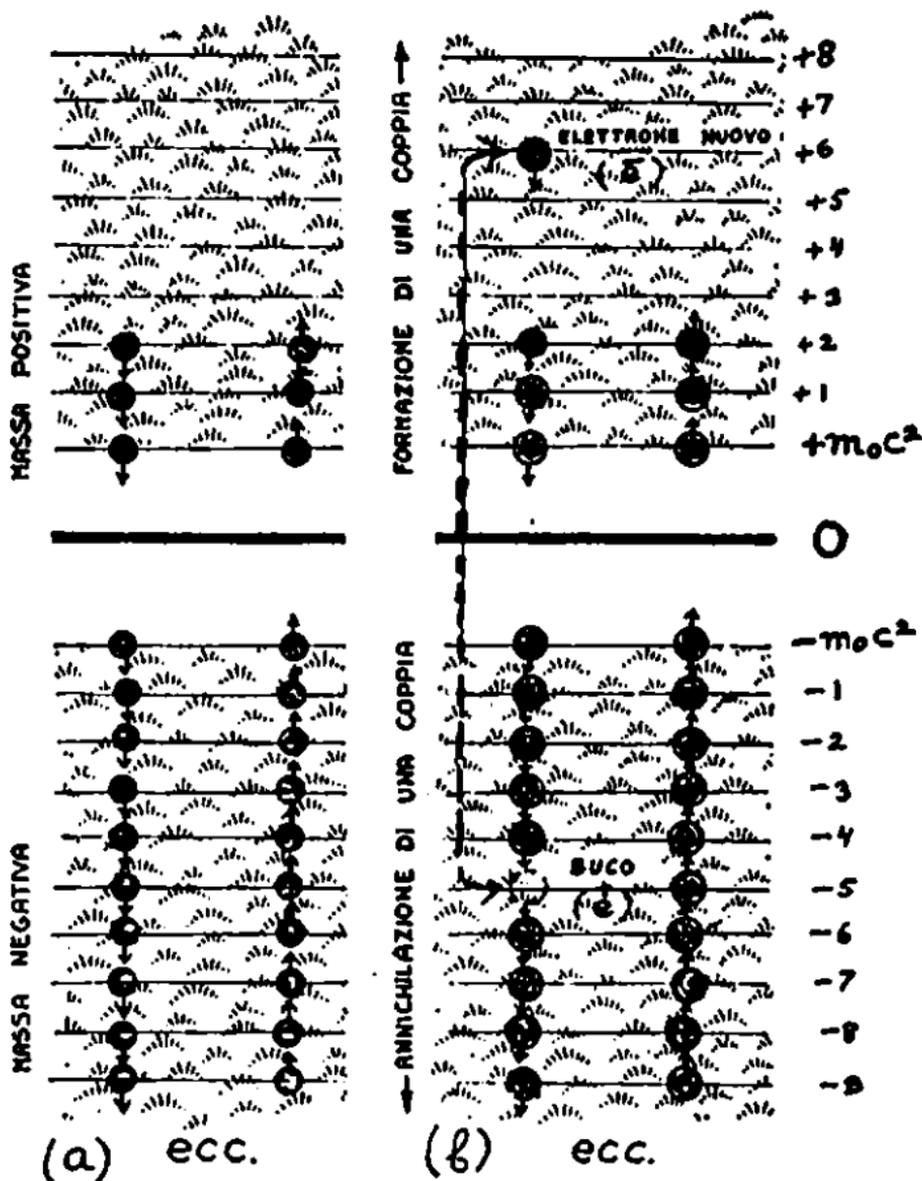


Fig. 26. Rappresentazione secondo Dirac della distribuzione dei livelli energetici delle particelle con massa positiva e massa negativa. A sinistra (a) tutti i livelli energetici negativi sono completamente occupati e soltanto sei elettroni ordinari possono esistere nei livelli normali positivi. A destra (b) un elettrone proveniente da un livello negativo è innalzato a un livello positivo, lasciando dietro di sé un « buco » che si comporta come un elettrone positivo ordinario con massa positiva. Se questo elettrone supplementare cade di nuovo da un livello positivo nel buco (processo di annichilazione di \bar{e} ed e) la differenza di energia verrà emessa sotto forma di radiazione γ .

Ma, per le proprietà matematiche della meccanica relativistica di Einstein, ci si aspetterebbe anche un tipo di moto corrispondente all'energia totale:

$$E = - \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong - m_0 c^2 - \frac{1}{2} m_0 v^2 *.$$

Questa equazione si può ricavare dalla prima scrivendo $-m_0$ invece di $+m_0$, che dal punto di vista fisico significa introdurre una *massa negativa*. La meccanica relativistica permette dunque in linea di principio due serie distinte di livelli: quelli aventi energia a riposo $+m_0 c^2$ o energie più alte, e quelli aventi energia a riposo $-m_0 c^2$ o energie più basse (fig. 26).

Mentre i livelli di energia che si vedono nella parte superiore del disegno ($E > 0$) corrispondono a tipi familiari di moto di particelle materiali (elettrone, protone ecc.), i livelli di energia nella parte inferiore del disegno ($E < 0$) non corrispondono ad alcuna realtà fisica. Particelle con massa inerziale negativa non corrispondono ad alcuna cosa osservata in natura: infatti dato il valore negativo della loro massa sarebbero accelerate in direzione *opposta* a quella della forza che agisce su di esse e per arrestare una particella di questo tipo in movimento bisognerebbe spingerla in direzione del suo moto e non contro di esso! Immaginate due particelle, per esempio due elettroni, con masse di valore assoluto uguale ma di segno opposto ($+m$ e $-m$). Per la legge di Coulomb saranno respinte una lontano dall'altra da forze elettrostatiche aventi valori assoluti uguali ma agenti in direzioni opposte. Se entrambe le particelle avessero masse positive l'interazione darebbe luogo ad accelerazioni uguali ma opposte (fig. 27a), ed esse fuggirebbero l'una lontano dall'altra con velocità crescenti. Se invece una delle particelle ha massa negativa (fig. 27b) sarà accelerata nella stessa direzione dell'altra particella e fuggiranno insieme mantenendosi fra di loro

* Per $v \ll c$.

a distanza costante e aumentando indefinitamente la velocità (che resta sempre $< c$, naturalmente). Non c'è contraddizione con il Principio di Conservazione dell'Energia perché

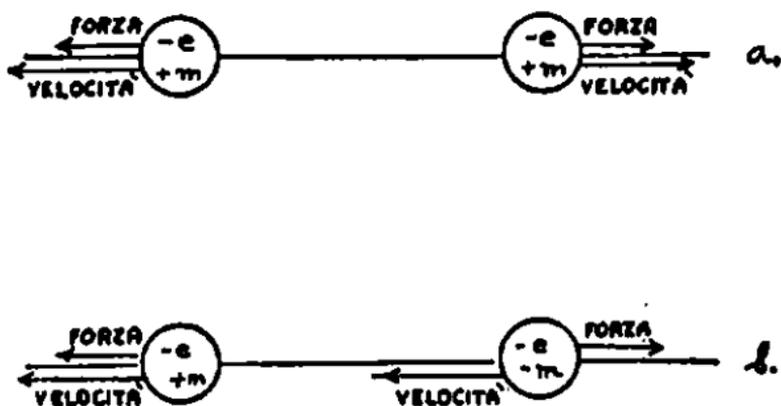


Fig. 27. Interazione fra le particelle con massa positiva e quelle con massa negativa.

la somma delle energie cinetiche delle due particelle sarà:

$$\frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} (-m)v^2 = 0,$$

la stessa che si aveva prima che il moto cominciasse. Tutto ciò appare assolutamente stravagante e non sono state mai osservate in natura particelle con queste caratteristiche.

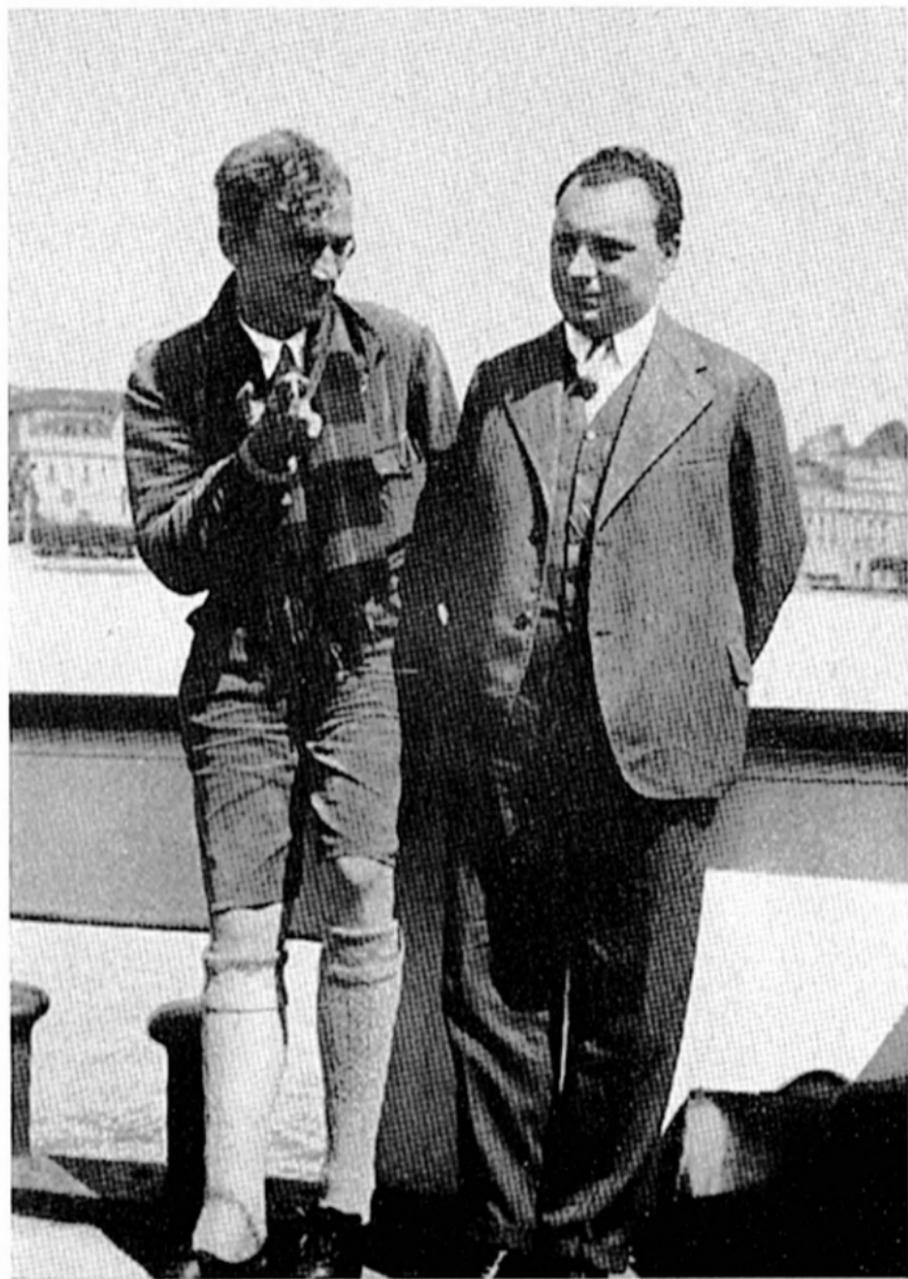
Nella meccanica relativistica classica (che non prende in considerazione i fenomeni quantistici) si può eliminare facilmente la difficoltà rappresentata da particelle con massa negativa; infatti, come si può vedere dalla figura 26, la regione di energia positiva e quella di energia negativa sono separate da un intervallo $2m_0c^2$ (circa un milione di elettron-volt nel caso degli elettroni). Poiché nella meccanica non quantistica (classica e relativistica) i cambiamenti di energia devono essere continui, una particella proveniente dalla parte superiore del disegno non può trasferirsi nella parte inferiore perché questo richiederebbe un cambiamento discontinuo della sua energia. Dunque nella descrizione fisica della natura gli stati con massa negativa potrebbero essere rifiutati come possibi-



Tav. I. Copenaghen 1931. L'autore è il motociclista al centro; a sinistra L. Landau (U.R.S.S.) su uno scooter a pedali e a destra E. Teller (Ungheria) sugli sci. Il ragazzo vicino a Landau è Aage Bohr, ora direttore dell'istituto di suo padre; il ragazzo vicino a Teller è Ernest Bohr. (Fotografia eseguita probabilmente dal Dr. H. A. Casimir).



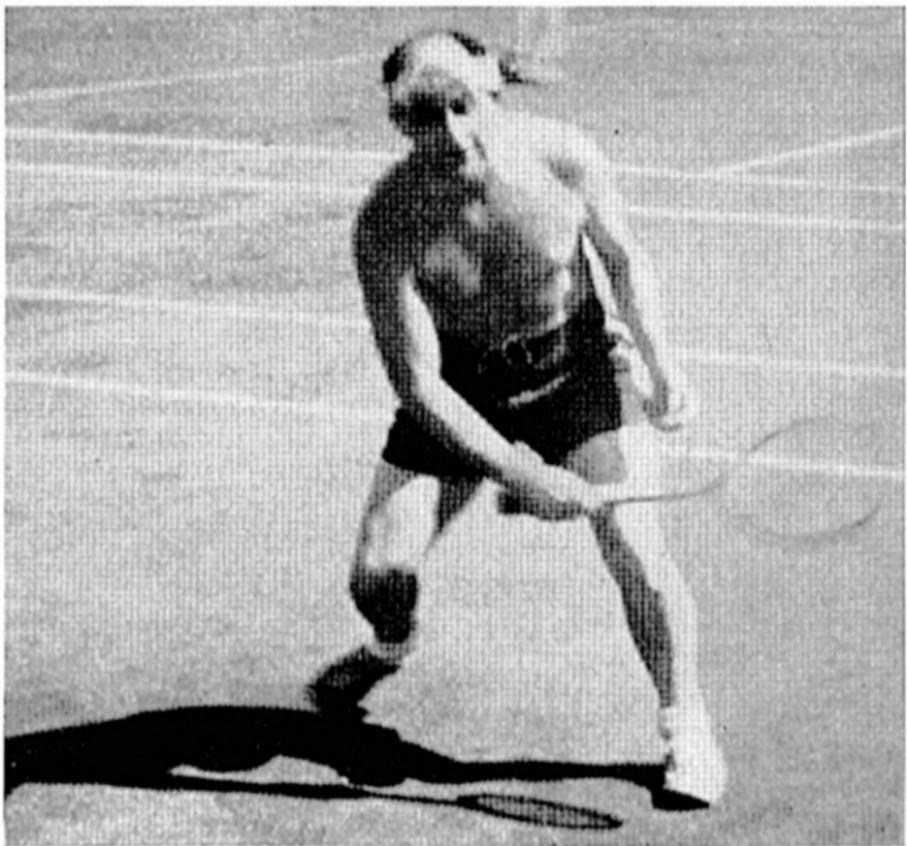
Tav. II. Niels Bohr e sua moglie durante una corsa di motociclette. (Fotografia dell'autore).



*Tav. III. G. Gamow e W. Pauli in vaporetto su un lago svizzero.
(Fotografo sconosciuto).*



Tav. IV. W. Heisenberg se la prende calma. (Fotografo sconosciuto).



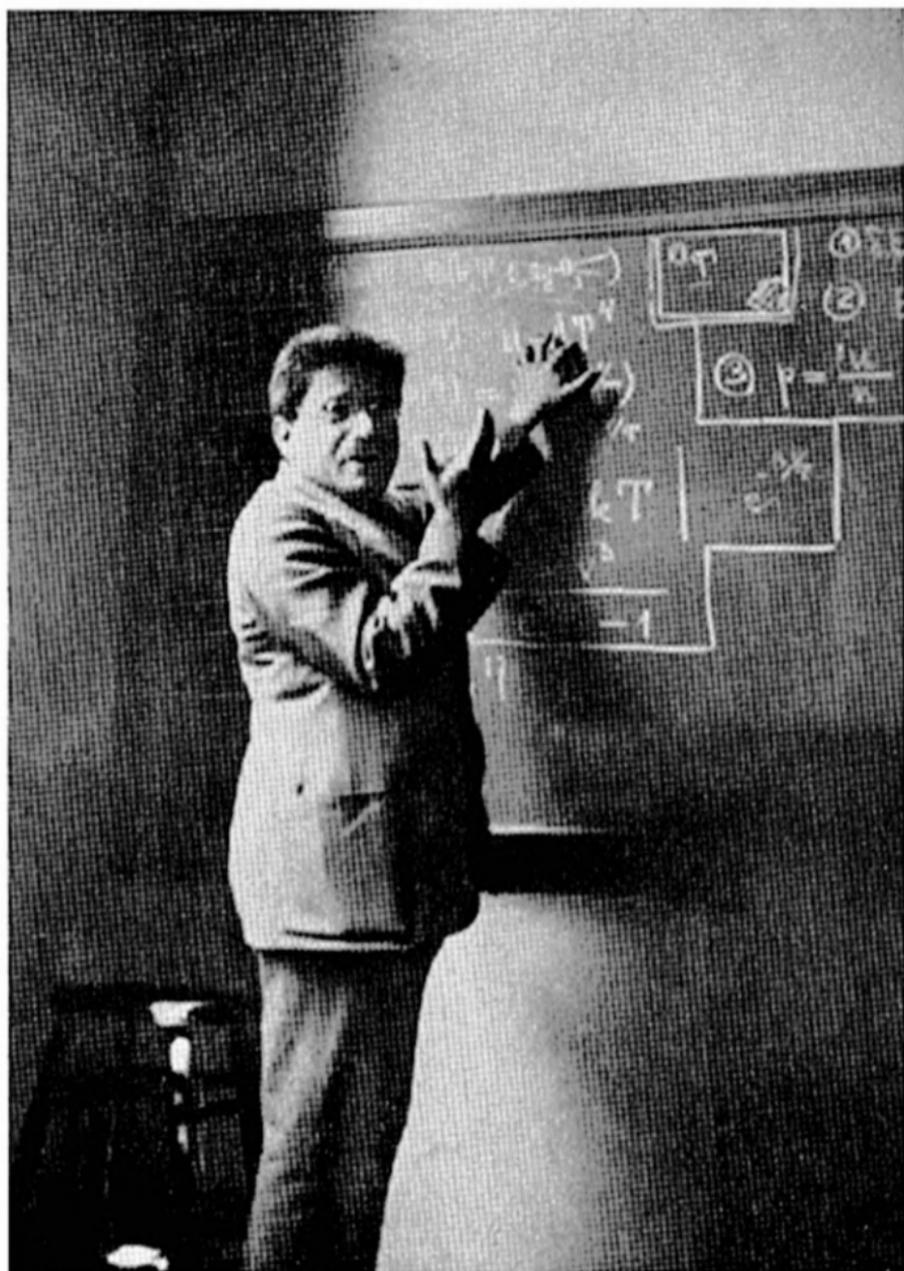
Tav. V. E. Fermi, se la prende calda. (Fotografia dell'autore).



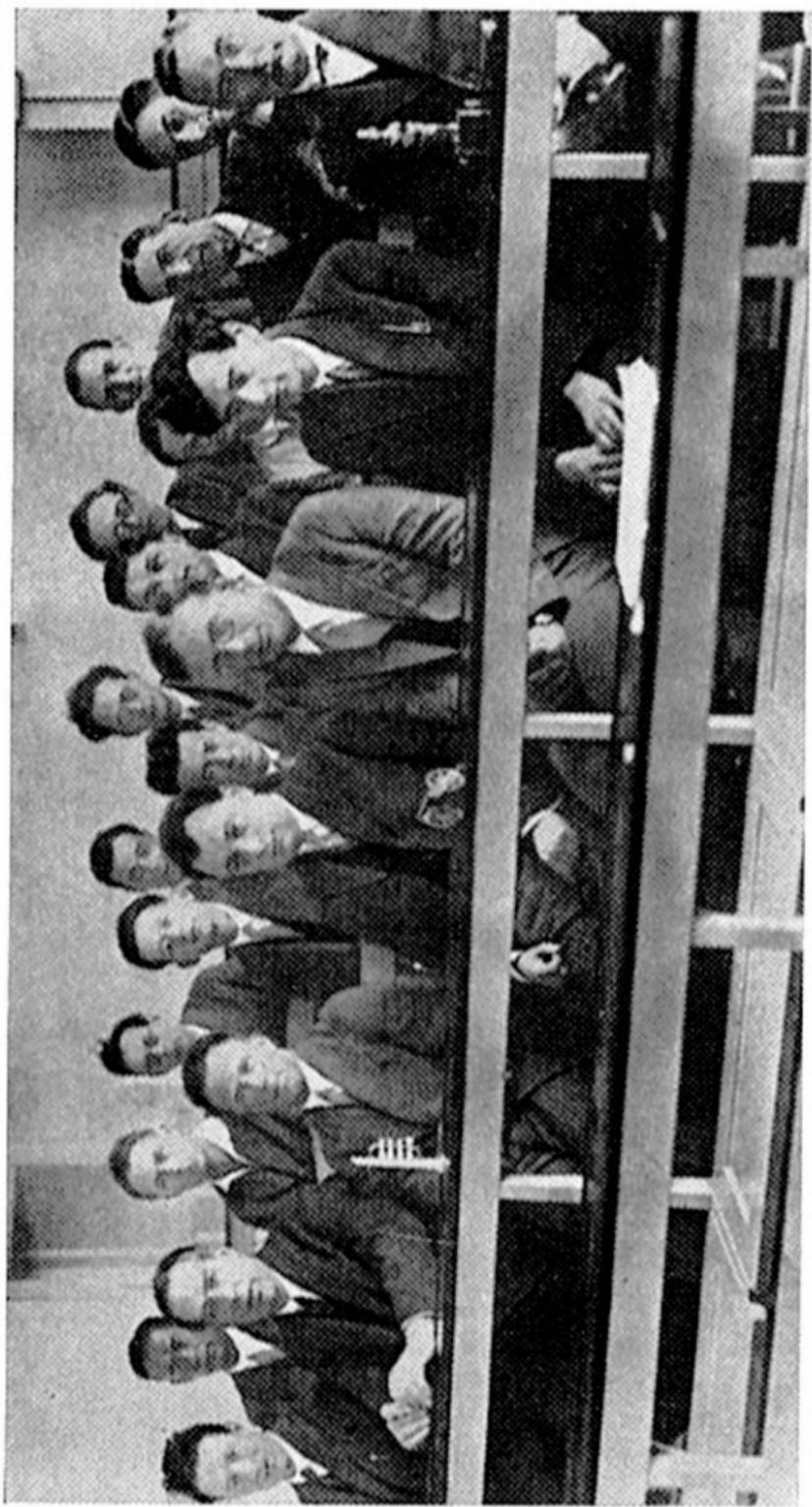
Tav. VI. N. Bohr e A. Einstein, probabilmente durante il Congresso Solvay a Bruxelles nel 1930. (Fotografo sconosciuto).



Tav. VII. George Gamow sulla cima di una montagna discute di fisica nucleare con Leon Rosenfeld. (Fotografia di Rudolph Peierls).



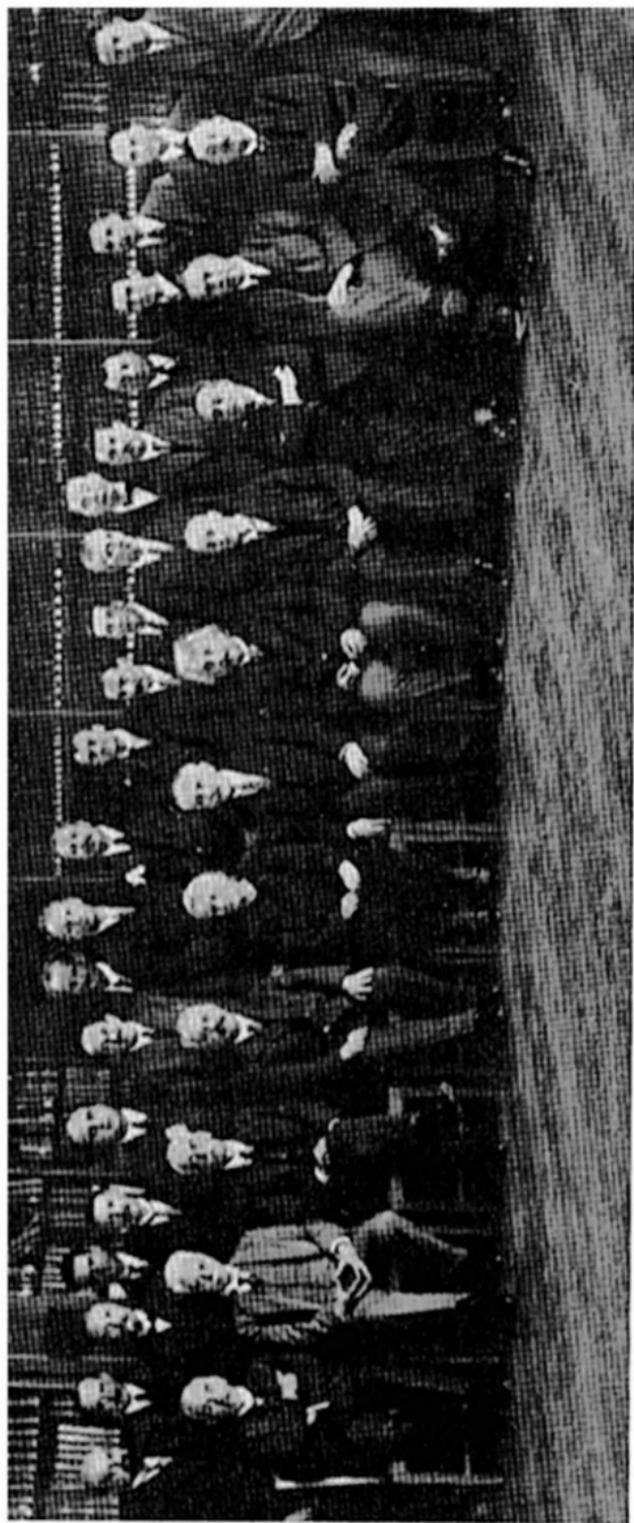
Tav. VIII. Il Professor Paul Ehrenfest mentre spiega un passaggio difficile al suo uditorio. (Fotografia eseguita probabilmente dal Dr. S. Goudsmit).



Tav. IX. 1930, un tipico convegno di Copenhagen. In prima fila Klein, Bohr, Heisenberg, Pauli, Gamow, Landau e Kramers.



Tav. X. Un tipico convegno di primavera a Copenaghen (1932). Durante questo convegno venne rappresentato il Faust (parodia). In prima fila: N. Bohr, P. A. M. Dirac, W. Heisenberg, P. Ehrenfest, M. Delbrück, Lisa Meitner, e nelle file successive molti altri cervelloni (cercate di riconoscerli). (L'autore di questo libro non prese parte al convegno essendo stato trattenuto in U.R.S.S.).



Tav. XI. Istituto Internazionale di Fisica Solvay, Sesto Convegno di Fisica, Bruxelles 20-26 ottobre 1930. In prima fila: Th. De Donder, P. Zeeman, P. Weiss, A. Sommerfeld, M.me Curie, P. Langevin, A. Einstein, O. Richardson, B. Cabrera, N. Bohr, W. J. De Haas. In seconda fila: E. Herzen, E. Henriot, J. Verschaaffelt, Manneback, A. Cotton, J. Errera, O. Stern, A. Piccard, W. Gerlach, C. Darwin, P. A. M. Dirac, H. Bauer, P. Kapitza, L. Brillouin, H. A. Kramers, P. Debye, W. Pauli, J. Dorfman, J. H. Van Vleck, E. Fermi, W. Heisenberg. (Fotografia di Benjamin Coupric).



Tav. XII. Istituto Internazionale di Fisica « Solvay », Settimo Congresso di Fisica, Bruxelles 22-29 ottobre 1933.
In prima fila: E. Schrödinger, M.me I. Joliot, N. Bohr, A. Joffé, M.me Curie, O. W. Richardson, P. Langevin,
Lord Rutherford, Th. De Donder, M. de Broglie, L. de Broglie, M.lle L. Meitner, J. Chadwick. In seconda fila:
E. Henriot, F. Perain, F. Joliot, W. Heisenberg, H. A. Kramers, E. Stabel, E. Fermi, E. T. S. Walton, P. A. M.
Dirac, P. Debye, N. F. Mott, B. Cabrera, G. Gamow, W. Bethe, P. Blackett, M. S. Rosenblum, J. Errera,
Ed. Bauer, W. Pauli, J. E. Verschaffelt, M. Cosyns (dietro), E. Herzen, J. D. Cockroft, C. D. Ellis, R. Peterls,
Aug. Piccard, E. O. Lawrence, L. Rosenfeld. (Fotografia di Benjamin Couprie).

lità matematiche indesiderabili. Tuttavia non appena si introducono i fenomeni quantistici la situazione cambia radicalmente: nella Teoria dei Quanti agli elettroni e alle altre particelle elementari piace proprio *saltare* dai livelli piú alti a quelli piú bassi. Così nella Teoria dei Quanti relativistica si avrebbe un evento paradossale: tutti gli elettroni normali salterebbero dagli stati di massa positiva a quelli di massa negativa e l'Universo intero impazzirebbe!

La sola via che Dirac vedesse per evitare questo paradosso stava nell'uso del Principio di Pauli e nel presupposto che tutti gli stati corrispondenti alla massa negativa fossero già occupati (due elettroni con spin opposto per ogni stato), non permettendo agli elettroni provenienti dagli stati di massa positiva di saltarci dentro. La situazione è simile a quella degli strati elettronici a noi familiari in cui l'elettrone proveniente dallo strato M non può saltare negli strati piú bassi L o K perché questi sono completamente occupati dagli elettroni che ci sono entrati prima. Ma mentre gli atomi sono strutture limitate, contenenti un numero finito di elettroni, la teoria di Dirac si riferiva allo spazio illimitato e richiedeva un numero infinito di elettroni per ogni centimetro cubo di vuoto. Fin qui tutto bene se non si tiene conto della massa infinita di questi elettroni che, secondo la teoria relativistica della gravità di Einstein (che si chiama anche Teoria della Relatività Generale) renderebbe il raggio di curvatura dello spazio vuoto uguale a zero!

Accantonata questa difficoltà Dirac si domandò se questa distribuzione di elettroni carichi negativamente e con massa negativa fosse osservabile, cioè rivelabile con qualche strumento di misura realizzabile praticamente. La risposta fu no: con nessun tipo di apparecchio elettrico è possibile rivelare una distribuzione uniforme di cariche nello spazio, per quanto alta sia la sua densità. Per capire questa affermazione pensiamo a un pesce d'alto mare che non raggiunga mai la superficie dell'oceano e non si immerga mai fino al fondo dell'oceano. Se supponiamo che l'acqua del mare sia priva di attrito (qualcosa come l'elio liquido) dobbiamo concludere che il pesce, per quanto intelligente sia, non può capire se si sta

muovendo nell'acqua o nel vuoto assoluto. E se qualcosa non si può osservare non dovrebbe essere usata nella descrizione fisica della natura. Il nostro pesce d'alto mare è abituato a vedere gli oggetti che si muovono verso il basso, che si tratti di rifiuti gettati in mare dalle navi di passaggio o, in casi rari, delle navi stesse che affondano. Così, d'accordo con Aristotele, il pesce concepirà l'idea di gravità che fa muovere tutti gli oggetti materiali verso il basso.

Ma supponiamo ora che una bottiglia di Coca Cola vuota o un transatlantico affondino e che contengano dell'aria che sfugge quando toccano il fondo: che cosa vedrà il nostro pesce intelligente? un grappolo di sfere d'argento (bolle d'aria nel linguaggio comune degli uomini) che salgono verso l'alto. Che cosa penserà il nostro pesce intelligente osservando quegli oggetti? Ebbene, sarà stupito perché si muovono in direzione opposta a quella della forza di gravità e sarà quindi propenso ad attribuire loro una massa di segno opposto rispetto agli oggetti ordinari che si muovono verso il basso. Un'analogia un po' più stretta si può trovare in un atomo complesso, con gli strati K , L e M al completo di elettroni, che sia stato colpito da un raggio X duro e abbia perso uno dei due elettroni dello strato K . Ci sarà uno spazio vuoto (lacuna di Pauli) nello strato K e uno degli elettroni dello strato L ci salterà dentro lasciando al posto suo uno spazio vuoto nel proprio strato. Il passo successivo consisterà nel passaggio di un elettrone più agile dallo strato M nel posto vacante dello strato L . Naturalmente c'è anche la possibilità che lo strato M batta in prontezza lo strato L e il posto vuoto nello strato K venga occupato direttamente da un elettrone dello strato M .

La fisica delle antiparticelle.

Possiamo però esaminare il problema anche da un altro punto di vista. Il fatto che un elettrone negativo venga a mancare nello strato K equivale all'installazione in esso di una carica positiva. La discesa di un elettrone negativo dallo strato L in quello K equivale all'ascesa di questa carica po-

sitiva dallo strato K allo strato L e successivamente a quello M . Da questo punto di vista abbiamo una particella fittizia carica positivamente che si sposta dal livello piú basso K al livello M molto piú alto e poi fuori, nello spazio interatomico. Poiché, per la legge di Coulomb, il nucleo carico positivamente deve respingere l'elettrone fittizio carico positivamente, il tutto risulta molto elegante e raffinato.

Tornando al mare di Dirac, pieno di elettroni carichi negativamente e aventi massa negativa, possiamo domandarci come un fisico sperimentale percepirà la situazione in cui un elettrone negativo con massa negativa viene perduto dal suo livello. Evidentemente si hanno due chiari risultati. Primo, l'assenza della carica negativa sarà osservata sotto forma di presenza di una carica positiva: lo sperimentatore osserverà dunque una particella con carica elettrica $+e$. Secondo, l'assenza di massa negativa è equivalente alla presenza di massa positiva: la particella si comporterà dunque in modo normale e sarà osservata sotto forma di particella ordinaria carica positivamente. Una volta spintosi così lontano Dirac esagerò: pensò che si potesse dimostrare che il valore numerico della massa di questo buco nel mare degli elettroni con massa negativa è pari a circa 1 840 volte la massa di un elettrone ordinario. Se le cose stessero veramente così i buchi nel mare di Dirac sarebbero osservabili sotto forma di comuni protoni.

Il lavoro di Dirac, pubblicato nel 1930 (o piuttosto le conversazioni private e la corrispondenza precedenti alla sua pubblicazione), sollevarono una violenta opposizione. Niels Bohr, che per qualche motivo a me sconosciuto si interessava di elefanti, scrisse un racconto di caccia: « Come prendere vivi gli elefanti ». Proponeva, nell'interesse di chi amava la caccia grossa in Africa, il seguente sistema. In riva a un fiume, nel punto in cui vanno a bere e a lavarsi gli elefanti, bisognerebbe mettere un cartello che spieghi in poche parole la proposta di Dirac. Quando l'elefante, che è proverbiale per la sua saggezza, viene ad abbeverarsi legge la scritta sul cartello e resta stupefatto per qualche minuto. Approfittando di questa sua distrazione i cacciatori nascosti nella macchia

sgusceranno fuori e legheranno saldamente le zampe dell'elefante con grosse funi e poi spediranno l'elefante al giardino zoologico Hagenbeck di Amburgo.

Pauli, anch'egli amante degli scherzi, eseguì alcuni calcoli che mostravano che se i protoni negli atomi di idrogeno erano i buchi come voleva Dirac, gli elettroni sarebbero saltati dentro di essi in una frazione trascurabile di secondo e l'atomo di idrogeno (non meno degli atomi di tutti gli altri elementi) sarebbe stato annichilato sull'istante con un improvviso irrompere di radiazioni ad alta frequenza. Pauli propose quello che venne chiamato « Secondo Principio di Pauli », in base al quale ogni teoria suggerita da un teorico avrebbe dovuto essere immediatamente applicabile al suo corpo: così Dirac sarebbe stato trasformato in raggi γ prima di poter comunicare a qualcuno la sua idea.

Si scherzò molto sull'argomento, ma un anno dopo la pubblicazione dello scritto di Dirac un fisico americano, Carl Anderson, studiando gli elettroni dei raggi cosmici che attraversavano un intenso campo magnetico scoprì che, mentre una metà era deviata nella direzione prevista per particelle di carica negativa che si comportino come si deve, l'altra era deviata con lo stesso angolo *nella direzione opposta*: erano gli elettroni carichi positivamente, chiamati talvolta positroni, previsti dalla teoria di Dirac. Studi sperimentali eseguiti sui positroni hanno dimostrato che si comportano esattamente come avrebbero dovuto fare i buchi di Dirac. Sebbene i positroni fossero stati scoperti per la prima volta nei raggi cosmici, si trovò subito che era possibile produrli in laboratorio in condizioni sperimentali preordinate, semplicemente sparando raggi γ duri contro piastre metalliche. Entrando in collisione con il nucleo atomico un quanto di raggio γ scompare e tutta la sua energia si trasforma in due elettroni, uno negativo e uno positivo, come mostra la figura 28a. Poiché la massa di un elettrone espressa in unità di energia è 0,5 MeV (milioni di elettron-volt) il processo ha luogo soltanto se l'energia $h\nu$ del raggio γ è superiore a 1,0 MeV. L'energia in eccesso $h\nu - 2m_0c^2$ viene comunicata alla coppia di elettroni (e^-, e^+) creata nella collisione. Le sorti di questi due

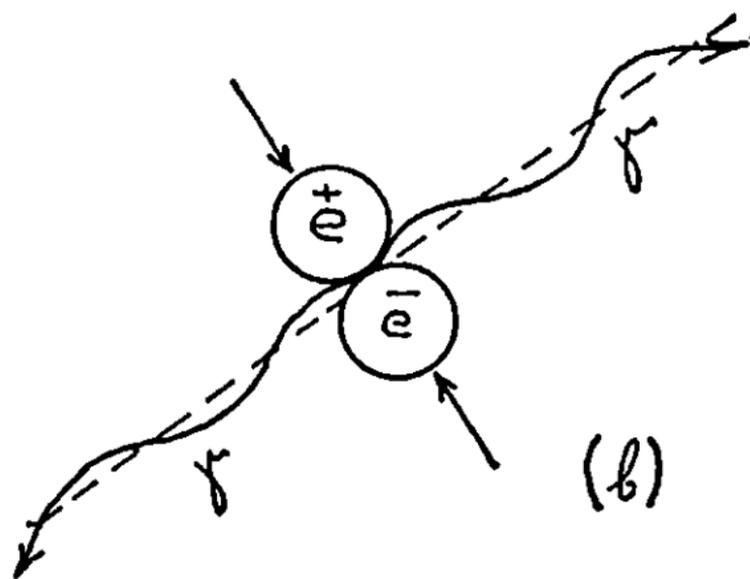
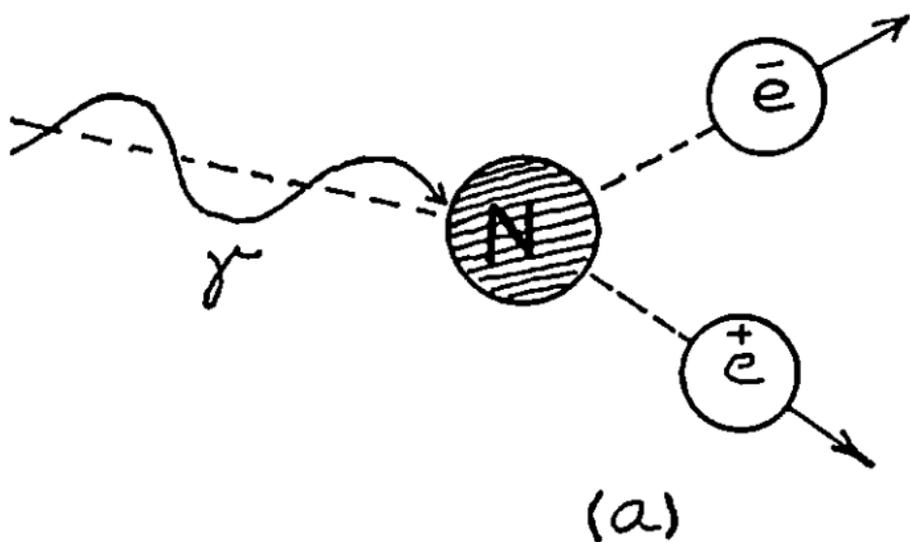


Fig. 28. La « creazione » e l'« annichilazione » di elettroni negativi e positivi (e, e^+) secondo la teoria di Dirac: (a) un raggio γ di alta energia colpisce un nucleo (N) e si trasforma nella coppia e, e^+ ; (b) una coppia e, e^+ entra in collisione nello spazio libero e produce due raggi γ che si muovono in direzioni opposte.

elettroni sono molto diverse: l'elettrone negativo (ordinario) e^- viene gradualmente rallentato nelle collisioni con gli altri elettroni negativi che formano la materia e diventa uno di essi; l'elettrone positivo e^+ non dura a lungo, ma viene annichilato dall'urto con uno degli elettroni negativi (ordinari) emettendo due quanti di raggi γ (fig. 28b). Le parole « creato » e « annichilato » non vanno intese in senso metafisico: si può dire altrettanto bene che il ghiaccio è « creato » dall'acqua portata sotto il punto di congelamento, e « annichilato » a una temperatura superiore quando si trasforma in acqua. In entrambi i processi il Principio di Conservazione della Massa e il Principio di Conservazione dell'Energia (che in realtà sono un unico principio per la formula di Einstein $E=mc^2$) non sono contraddetti; quel che capita è la trasformazione di radiazioni in particelle e la trasformazione di particelle in radiazioni con processi simmetrici.

La scoperta degli antielettroni (positroni) fece nascere una domanda: esistevano anche antiprotoni, cioè particelle aventi la massa di un protone ma carica negativa? Poiché un protone è circa 1840 volte più pesante di un elettrone la produzione di coppie protone-antiprotone richiede energie di miliardi anziché di milioni di elettron-volt. La Commissione per l'Energia Atomica, tenendo questo ben presente, ha speso somme adeguate per costruire acceleratori in grado di trasmettere ai proiettili nucleari l'energia necessaria. Nel giro di pochi anni sono stati costruiti negli Stati Uniti due giganteschi acceleratori di particelle: il *Bevatrone*, presso il Radiation Laboratory dell'Università di California, a Berkeley, e il *Cosmotrone* presso il Laboratorio Nazionale di Brookhaven nel Long Island, New York. Subito dopo macchine simili furono costruite in Europa, presso il CERN, vicino a Ginevra, e in Russia vicino a Mosca. Fu una dura gara che alla fine fu vinta dai californiani quando Emilio Segré e i suoi collaboratori annunciarono, nell'ottobre del 1955, di aver rivelato protoni negativi emessi dai bersagli bombardati. In seguito trovarono anche gli antineutroni, le particelle che vengono annichilate nello scontro con i neutroni ordinari.

Come vedremo, anche tutte le altre particelle scoperte piú di recente (vari tipi di mesoni e iperoni) posseggono le loro antiparticelle.

Cosí, sebbene Dirac non fosse riuscito nel suo primitivo intento di spiegare il protone come antielettrone, aprí un vasto campo alla fisica delle antiparticelle.

Ci sono due problemi irrisolti relativi alle antiparticelle. Gli atomi che formano il nostro pianeta sono composti di elettroni negativi, protoni positivi e neutroni ordinari; secondo gli studi astronomici eseguiti questo vale anche per l'intero sistema planetario e per il Sole stesso. Infatti i protoni e gli elettroni emessi dal Sole che penetrano nell'atmosfera terrestre sono protoni positivi ed elettroni negativi (ordinari). Piú incerta, ma probabilmente rispondente a verità, è l'affermazione secondo cui tutte le stelle e la materia interstellare della Via Lattea sono formate di materia ordinaria, perché altrimenti si osserverebbe una intensa radiazione γ proveniente da tutti i diversi punti della nostra galassia. Ma che dire dei miliardi di altre galassie che sono separate dalla nostra Via Lattea da milioni di anni luce? Il nostro universo è asimmetrico, formato interamente da materia « ordinaria », oppure è una raccolta di galassie delle quali metà è composta di materia « ordinaria » mentre l'altra metà è composta di « antimateria »? Non lo sappiamo e non sembra ci sia modo di saperlo.

C'è un altro enigma: non si sa se le particelle prodotte in abbondanza nei nostri moderni acceleratori abbiano massa gravitazionale positiva o negativa. A prima vista sembra che sia possibile risolverlo facilmente per mezzo di un esperimento diretto. Si produce semplicemente un fascio di antiprotoni in un acceleratore ad alta energia, lo si manda orizzontalmente lungo un tubo in cui sia stato fatto il vuoto e si osserva se sotto l'azione della gravità terrestre devia verso il basso come una pietra lanciata orizzontalmente, oppure piega verso l'alto: in quest'ultimo caso sarebbe giustificato dedurre che le particelle sono respinte dalla massa della Terra. Il guaio è però che le antiparticelle prodotte nei nostri laboratori si muovono con velocità quasi uguale a quella della

luce (3×10^{10} cm/sec). Così se per esempio il tubo è lungo 3 km (3×10^5 cm), le antiparticelle lo percorreranno in un intervallo di 10^{-5} sec: per il principio della caduta libera esse saranno deviate verso il basso (o verso l'alto in caso di massa gravitazionale negativa) di $(1/2)gt^2$ cm, dove g è circa 10^3 cm/sec². Se $t=10^{-5}$ sec, lo spostamento verticale sarà dell'ordine di $10^3 \times 10^{-10} = 10^{-7}$ cm, che è paragonabile al diametro atomico! È chiaro che nessuna apparecchiatura sperimentale può rivelare deviazioni del fascio così piccole. Per eseguire l'esperimento si potrebbe tentare di rallentare l'antiparticella portandola a velocità più ragionevoli, per esempio a pochi centimetri al secondo, e allora la deviazione verso il basso o verso l'alto si noterebbe facilmente. Ma come ci si può arrivare? Nelle pile atomiche si rallentano i neutroni facendoli passare attraverso vari « attenuatori » (carbonio o acqua pesante) dove i neutroni perdono poco alla volta la loro energia in scontri con gli altri atomi. Ma non possiamo far questo nel caso delle antiparticelle, perché passando attraverso un qualunque attenuatore formato di materia ordinaria sarebbero annichilate al primo urto. Così il problema resta ancora senza risposta.

In conclusione si può affermare che per la soluzione di vari problemi cosmologici sarebbe utilissimo dimostrare che le antiparticelle hanno massa gravitazionale negativa. Se tanto le particelle ordinarie quanto le antiparticelle venissero create uniformemente nello spazio dell'universo l'attrazione gravitazionale fra le particelle dello stesso tipo e l'ipotetica repulsione gravitazionale fra le particelle di tipo opposto darebbe luogo a mutua separazione. Si formerebbero grandi regioni dello spazio occupate esclusivamente di materia ordinaria e altre regioni occupate esclusivamente da antimateria. Questa separazione appagherebbe la nostra nozione di simmetria della natura; ma non sappiamo se è così e non sappiamo nemmeno se lo sapremo mai.

7 Fermi e le trasformazioni delle particelle



Nei tempi antichi qualunque fisico poteva occuparsi sia di fisica teorica sia di fisica sperimentale: ne è un esempio eminente Sir Isaac Newton che creò la Teoria della Gravitazione Universale (inventando a questo scopo una disciplina matematica conosciuta oggi col nome di calcolo infinitesimale); egli eseguì anche importanti studi sperimentali, dimostrando che la luce bianca è formata dalla sovrapposizione dei vari colori che costituiscono lo spettro e fu il primo a costruire un telescopio riflettore. Ma via via che il campo della fisica andava allargandosi, le tecniche sperimentali e i metodi matematici diventavano sempre più complicati, troppo complicati perché un uomo solo fosse in grado di adoperarli tutti. La professione di fisico si divise in due rami: quello degli « sperimentali » e quello dei « teorici ». Il grande teorico Albert Einstein non fece mai un esperimento con le proprie mani (almeno per quanto ne sa l'autore), mentre il grande sperimentatore Lord Rutherford era così debole in matematica

che la famosa formula di Rutherford per la deviazione delle particelle α fu dedotta per lui da un giovane matematico, R. H. Fowler. Oggi di solito un fisico teorico si guarda bene dal toccare i dispositivi da esperimenti per paura di romperli (si veda nel capitolo 3 l'Effetto Pauli), mentre i fisici sperimentali si sentono perduti nel mare tumultuoso dei calcoli matematici.

Enrico Fermi, nato a Roma nel 1901, rappresentava un raro esempio di eccellente teorico ed eccellente sperimentatore. Uno dei suoi importanti contributi alla fisica teorica fu lo studio del gas degenere di elettroni che ebbe conseguenze importanti nella teoria elettronica dei metalli non meno che nella comprensione delle stelle estremamente dense note col nome di Nane Bianche. Un altro lavoro importante fu la formulazione della teoria matematica della trasformazione delle particelle, che implica l'emissione delle misteriose particelle prive di carica e di massa la cui esistenza era stata precedentemente suggerita da Pauli.

Fermi era un vigoroso ragazzo romano dotato di un grande senso dell'umorismo. Quando era ancora professore all'Università di Roma Mussolini gli conferì il titolo di « Eccellenza » *. Una volta dovette assistere a una riunione dell'Accademia d'Italia a Palazzo Venezia, e c'era una stretta sorveglianza perché Mussolini stesso doveva parlare in quella riunione. Tutti gli altri membri arrivarono su grandi limousine straniere guidate da autisti in uniforme, mentre Fermi guidava egli stesso la sua piccola Fiat: sulla porta venne fermato da due carabinieri * che sbarrarono l'accesso con i fucili alla sua automobilina e chiesero a Fermi per quale motivo fosse lì. Secondo quello che egli stesso narrò all'autore di questo libro, Fermi non se la sentì di dire alle guardie « Sono Sua Eccellenza Enrico Fermi », temendo che non lo credessero. Perciò, per togliersi d'imbarazzo, disse: « Sono l'autista di Sua Eccellenza Enrico Fermi ». « Ebbene * », dissero le guardie, « entra, parcheggia e aspetta il tuo padrone ».

* In italiano nel testo (N.d.T.)

Sebbene l'idea di particelle senza carica e senza massa che accompagnino gli elettroni emessi nelle trasformazioni β fosse stata concepita in origine da Pauli, Fermi fu il primo a sviluppare la teoria strettamente matematica dell'emissione β associata all'emissione delle particelle predilette di Pauli e a dimostrare che si adatta perfettamente ai dati ricavati con l'osservazione. A lui è dovuto anche il loro nome attuale di *neutrini*. Pauli aveva chiamato il suo beniamino *neutrone*, nome che andò benissimo finché non fu scoperta la particella chiamata oggi « neutrone » (il protone privo di carica). Questo nome però non era protetto da diritti d'autore dato che veniva usato soltanto in conversazioni e corrispondenze private ma non era stato mai stampato. Quando nel 1932 James Chadwick dimostrò che esisteva una particella priva di carica, con massa quasi uguale a quella di un protone, la chiamò *neutrone* nel suo lavoro pubblicato nei *Proceedings of the Royal Society*. Fermi, che era ancora professore a Roma, riferì sulla scoperta di Chadwick nel seminario settimanale di fisica, e qualcuno nel pubblico gli chiese se « il neutrone di Chadwick » era la stessa cosa del « neutrone di Pauli ». « No », rispose Fermi, « i neutroni di Chadwick sono grandi e pesanti. I neutroni di Pauli sono piccoli e leggeri; essi debbono essere chiamati neutrini * ».

Dato questo contributo filologico, Fermi si dedicò a sviluppare una teoria matematica della trasformazione β in cui un elettrone (positivo o negativo) e un neutrino sono emessi simultaneamente da nuclei atomici instabili spartendosi a caso l'energia disponibile. Modellò la sua teoria seguendo linee simili a quelle della teoria dell'emissione di luce da parte di atomi, quando un elettrone eccitato passa a uno stato di energia più basso liberando l'eccesso di energia sotto forma di un unico quanto di luce. Il moto dell'elettrone prima della transizione discontinua era descritto dalla funzione d'onda estesa su un'area relativamente grande. Dopo la transizione la funzione d'onda si contraeva riducendosi a dimensioni più piccole e l'energia liberata formava un'onda elettromagnetica

* La frase è in italiano nel testo (N.d.T.).

divergente che si diffondeva nello spazio circostante. Le forze responsabili di questa trasformazione erano le forze familiari che agiscono tra un campo elettromagnetico e una carica puntiforme: così se ne poteva calcolare facilmente l'effetto in base alla teoria esistente. Si trovò che le probabilità di transizione degli elettroni, quali risultavano dal calcolo, concordavano perfettamente con le intensità delle righe spettrali quali appaiono all'osservazione.

Nella sua teoria del decadimento β Fermi affrontò una situazione molto piú complicata. Un neutrone che occupava un certo stato energetico nel nucleo si trasformava in un protone, cambiando così la sua carica elettrica. Inoltre, invece di un singolo quanto di luce, venivano emesse simultaneamente due particelle (un elettrone e un neutrino).

Le forze responsabili della trasformazione β .

La difficoltà principale, però, stava nel fatto che mentre nel caso di emissione di luce le forze che governavano il processo erano le note forze elettromagnetiche, le forze responsabili della trasformazione β erano assolutamente sconosciute e Fermi dovette formulare un'ipotesi su cosa potessero essere. Nel modo caratteristico dei geni, decise di fare la supposizione piú semplice possibile: suppose che la probabilità che un neutrone si trasformi in un protone (o viceversa) dando luogo alla formazione di un elettrone (negativo o positivo) e di un neutrino * sia semplicemente proporzionale al prodotto delle intensità di quattro corrispondenti funzioni d'onda, in qualunque punto dato all'interno del nucleo. Il coefficiente di proporzionalità, che Fermi indicò con la lettera g , doveva essere determinato per confronto con i dati sperimentali. Servendosi di procedimenti matematici piuttosto complicati, Fermi riuscì a valutare quale dovesse essere la forma dello spettro energetico dei raggi β e la relazione tra

* Non ci soffermiamo qui sulla distinzione fra un neutrino e un antineutrino.

la probabilità del decadimento β e la quantità di energia in giuoco, se la sua semplice ipotesi di interazione era giusta. Il risultato concordava brillantemente con le curve osservate.

La sola incrinatura nella teoria di Fermi sul decadimento β stava nel fatto che il valore numerico della costante g (circa 10^{-49} erg \cdot cm³ oppure 3×10^{-14} , in forma adimensionale) non poté essere dedotto dalla teoria e dovette essere ricavato direttamente dall'osservazione. L'estrema piccolezza del valore assoluto di g è responsabile del fatto che, mentre l'emissione di un quanto di raggi γ da parte di un nucleo avviene entro 10^{-11} secondi, l'emissione di una coppia elettrone-neutrino può avvenire dopo ore, mesi o addirittura anni. Ecco perché tutte le trasformazioni di particelle sono note nella fisica moderna col nome di *interazioni deboli*. È compito del fisico dell'avvenire spiegare queste interazioni estremamente deboli in tutti i processi che coinvolgono l'emissione o l'assorbimento dei neutrini.

Utilizzazione delle leggi di interazione di Fermi.

Analoghi ai processi di decadimento β *

$$n \longrightarrow p + \bar{e} + \nu + \text{energia}$$

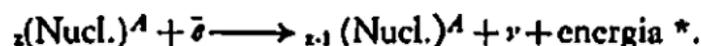
e

$$p + \text{energia} \longrightarrow n + e^+ + \nu$$

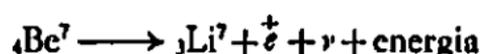
sono altri processi, anch'essi soggetti alle leggi di interazione di Fermi. Uno è l'assorbimento dell'elettrone atomico da parte di un nucleo instabile rispetto al decadimento β positivo: invece di emettere un elettrone positivo e un neutrino, un nucleo può assorbire un elettrone negativo dal

* Per il principio di conservazione dell'energia il primo processo ha luogo nel caso del neutrone libero, come pure nel caso di neutroni legati all'interno del nucleo, mentre il secondo avviene soltanto entro nuclei complessi dove si può ottenere da altri nucleoni un rifornimento ulteriore di energia.

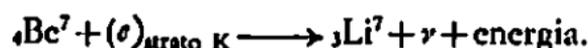
proprio strato elettronico, emettendo un neutrino secondo la formula



Dato che l'elettrone atomico assorbito dal nucleo in tale processo è uno degli elettroni provenienti dallo strato K (il più vicino al nucleo), di solito viene chiamato « cattura K ». L'esempio più semplice di questo processo è l'isotopo instabile del berillio, Be^7 , che può trasformarsi o secondo la formula



oppure secondo la formula



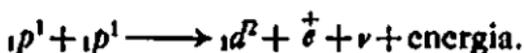
In quest'ultimo caso le fotografie nella camera a nebbia mostrano appena una sola traccia (quella del ${}_3\text{Li}^7$) e la situazione assomiglia a un incidente descritto da H. G. Wells nel famoso libro *L'uomo invisibile*, dove un poliziotto londinese viene preso a calci nel sedere e, voltatosi, non riesce a vedere nessuno che possa averlo colpito. Studi basati sull'osservazione dei processi di « cattura K » mostrarono che la frequenza con cui si verificano concorda perfettamente con quella prevista dalla teoria di Fermi.

Rientra nella stessa categoria un altro processo interessante, proposto per primo da Charles Critchfield: la reazione H-H (Idrogeno-Idrogeno) responsabile della produzione di energia nel Sole e in altre stelle più deboli **. Nel breve intervallo di tempo in cui due protoni che si scontrano sono in stretto contatto, uno di essi si trasforma in neutrone tramite l'emissione di un elettrone positivo e di un neutrino, formando il

* L'indice a sinistra in basso dà il numero atomico mentre l'indice in alto a destra dà il numero di massa.

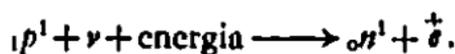
** Nel caso delle stelle più luminose, per esempio Sirio, la principale reazione produttrice di energia è il cosiddetto ciclo del carbonio, proposto indipendentemente da C. von Weizsäcker e H. Bethe.

nucleo del deuterio (idrogeno pesante) conformemente all'equazione:



Le probabilità che si verifichi questo processo possono essere previste esattamente in base alla teoria di Fermi.

L'ultimo ma non il meno importante esempio dell'interazione di Fermi è il processo per mezzo del quale F. Reines e C. Cowan hanno dimostrato sperimentalmente l'esistenza dei neutrini:



Reines e Cowan lo osservarono in una camera situata vicina a una « pila atomica », al Savannah River Atomic Energy Project. Il numero di neutroni ed elettroni positivi osservati, formati simultaneamente nella camera sottoposta a intenso bombardamento di neutrini, risultò esattamente uguale a quello previsto dalla teoria di Fermi. La probabilità di una interazione tuttavia è così piccola che per assorbire la metà dei neutrini emessi si dovrebbe usare uno spessore di idrogeno liquido di parecchi anni luce. La teoria di Fermi sui processi che coinvolgono i neutrini si applica anche a molti casi di decadimento di nuove particelle elementari scoperte negli anni successivi, e oggi si parla di « Interazione di Fermi Generalizzata ».

Le ricerche di Fermi sulle reazioni nucleari.

Pur occupandosi dei suoi studi teorici, Fermi era immerso in grandi ricerche sperimentali sulle reazioni nucleari negli elementi pesanti bombardati da neutroni lenti, e sulla formazione di elementi transuranici ($Z > 92$), e per questo lavoro ricevette il Premio Nobel nel 1938. Subito dopo andò a vivere negli Stati Uniti e nel 1939 era presente al convegno tenutosi presso l'Università George Washington in cui Niels Bohr (vedi capitolo 2) lesse il telegramma di Lise Meitner che annunciava la scissione dell'uranio e l'inizio di quella che

è spesso chiamata Era Atomica (e sarebbe più giusto dire Era Nucleare).

Fermi assunse la guida del laboratorio segretissimo dell'Università di Chicago, e il 2 dicembre 1942 annunciò che in

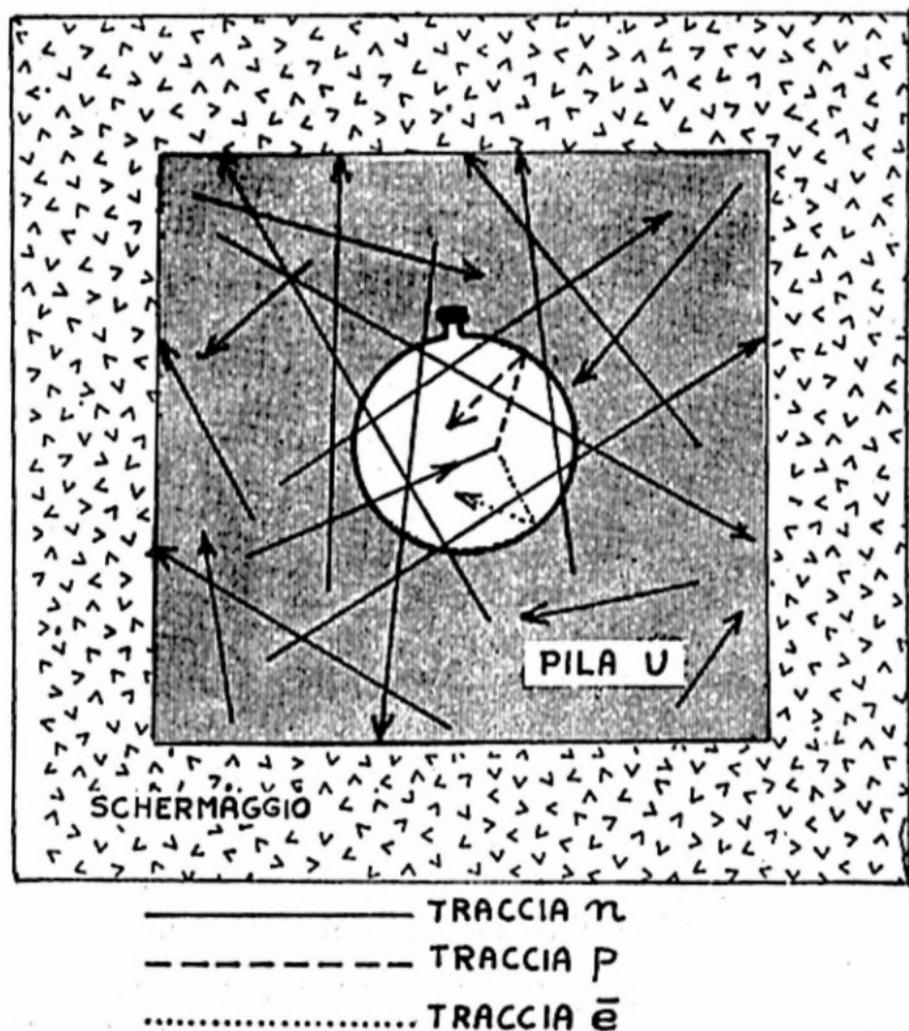


Fig. 29. Bottiglia di Fermi in una pila a uranio per la misura della vita media del neutrone.

quel pomeriggio era stata ottenuta la prima reazione a catena dell'uranio, dando così inizio alla prima liberazione di energia nucleare controllata dall'uomo.

Essendo questo libro dedicato al progresso nella compren-

sione della natura delle cose e non alle applicazioni pratiche, non parleremo della reazione a catena e termineremo questo capitolo descrivendo un interessante esperimento eseguito da Fermi nel reattore a fissione di recente invenzione. Per la prima volta divenne possibile misurare la vita media di un neutrone, che alla fine decade in un protone, un elettrone e un neutrino. Il dispositivo usato in questo esperimento è conosciuto col nome di « bottiglia di Fermi », sebbene fosse in realtà un recipiente sferico in cui era stato fatto il vuoto, un po' simile a un fiasco senza collo. Come mostra la figura 29, questa sfera venne posta dentro una pila atomica; vi fu lasciata per un periodo notevolmente lungo, mentre la pila era in funzione. I neutroni generati nella fissione, andando su e giù nella pila in grandi quantità, per lo più entravano e uscivano dalla « bottiglia di Fermi » passando senza molte difficoltà attraverso le sue pareti. Una volta ogni tanto però un neutrone nell'attraversare la « bottiglia » si rompeva in un protone e in un elettrone per i quali le pareti della « bottiglia » erano impenetrabili. Così, un po' alla volta, nella « bottiglia » si accumulava comune idrogeno gassoso e la quantità accumulatasi nell'unità di tempo dipendeva dalla probabilità che un neutrone si rompesse nell'attraversamento. Misurando la quantità di idrogeno accumulata nella « bottiglia » in un dato periodo di tempo si poté facilmente stimare la vita media del neutrone, che è risultata di circa quattordici minuti.

Maggiori informazioni sulle attività di Fermi in questo campo si possono trovare nel libro *Atomi in Famiglia* * scritto dopo la sua morte dalla moglie Laura.

* LAURA FERMI, *Atomi in Famiglia*, « Il Bosco », Milano, Arnoldo Mondadori, 1965.

8 Yukawa e i mesoni



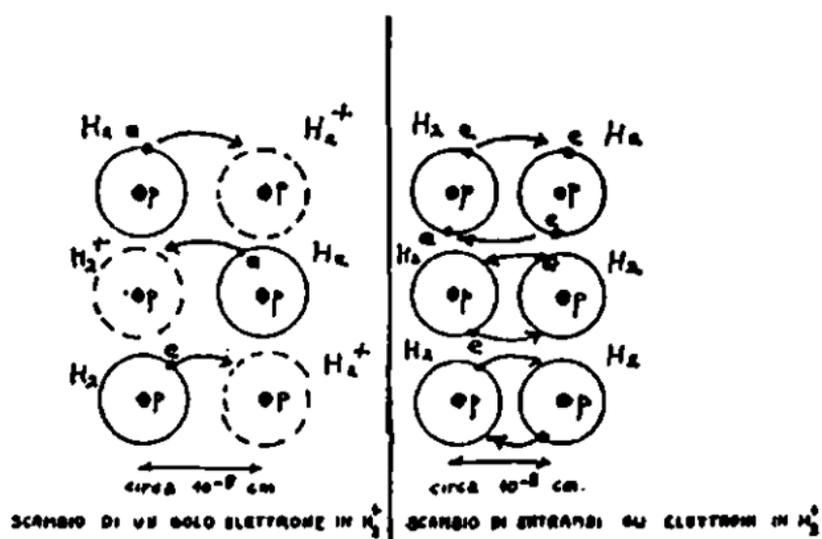
Il grande successo della teoria del decadimento β di Fermi fece nascere un problema: ci si domandò se era possibile applicarla per spiegare le forze di attrazione che tengono insieme i nucleoni. Si sapeva a quell'epoca che le forze tra due nucleoni — siano essi due neutroni, o un neutrone e un protone, o due protoni — sono identiche, solo che nell'ultimo caso si deve aggiungere la comune repulsione coulombiana fra le cariche dei protoni. Gli esperimenti hanno dimostrato che, contrariamente alle forze coulombiane che diminuiscono con andamento relativamente lento al crescere della distanza (con l'inverso del quadrato della distanza, $1/r^2$), le forze nucleari sono più simili alle forze di coesione della fisica classica. Proprio come due pezzi di nastro adesivo non esercitano alcuna forza l'uno sull'altro per quanto vengano avvicinati, ma si attaccano strettamente non appena entrano in contatto, così le forze tra i nucleoni si manifestano d'improvviso non appena « si toccano », il che accade alla distanza di circa 10^{-13} cm. Quando questo accade, occorrono poi circa dieci milioni di elettron-volt di energia per separarli di nuovo. Forze

simili agenti fra gli atomi sono attribuite allo scambio di elettroni fra gli strati atomici che si verifica non appena questi entrano in contatto. La teoria di queste « forze di scambio » secondo la meccanica ondulatoria fu elaborata nel 1927 da W. Heitler e F. London che dimostrarono come il problema potesse essere risolto in modo esatto nel caso semplice di due atomi di idrogeno costituenti una molecola biatomica *. Heitler e London presero in considerazione due casi: (a) quello di una molecola ionizzata di idrogeno, H_2^+ , composta di due protoni e di un elettrone; (b) quello di una molecola neutra di idrogeno, H_2 , formata da due protoni e da due elettroni (figg. 30a e 30b).

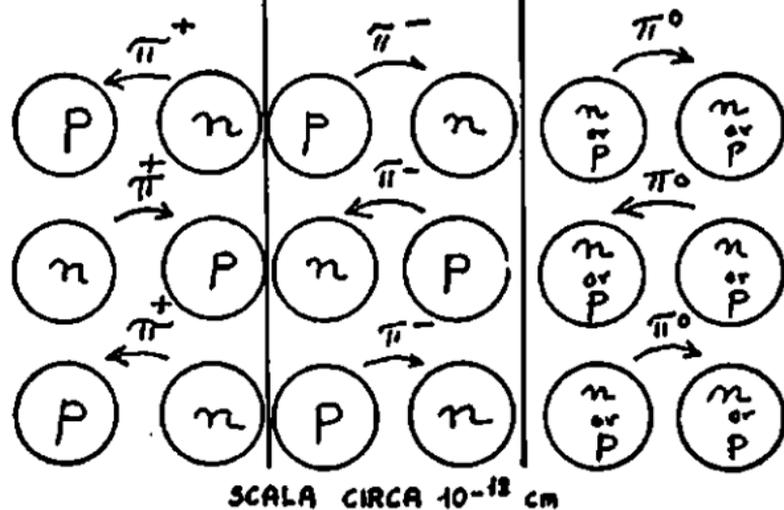
L'equazione d'onda di Schrödinger per il moto dell'elettrone era risolta esattamente in entrambi i casi. Il risultato analitico dimostrò che si raggiunge uno stato di equilibrio dell'energia minima a certe distanze R e R' tra i due nuclei. L'energia calcolata per questi stati di equilibrio è risultata perfettamente concordante con le energie di dissociazione misurate per le molecole H_2^+ e H_2 . Così l'idea di forze di scambio tra due atomi identici si affermò saldamente nel campo della chimica quantistica.

Era più che naturale supporre che si potessero capire le forze di attrazione tra due nucleoni partendo da una base simile. Quando due nucleoni venivano avvicinati molto fra loro, un elettrone accompagnato da un neutrino saltava avanti e indietro dall'uno all'altro producendo così una forza di scambio con effetto di attrazione. Era una splendida idea, ma (ahimè!) non funzionava. Quando, nel 1934, D. Ivanenko e I. Tamm calcolarono la forza di scambio tra due nucleoni, risultante dall'interazione di Fermi, scoprirono che l'energia di legame prevista era dell'ordine di grandezza di 10^{-8} elettron-volt! No, non è un errore di stampa: un centomillesimo di elettron-volt invece di dieci milioni di volt; appena quindici zeri di differenza! Evidentemente l'interazione « debole » di Fermi non poteva essere responsabile del forte legame tra protoni e neutroni all'interno del nucleo atomico.

* Si chiama molecola biatomica quella composta di due atomi.



(a)



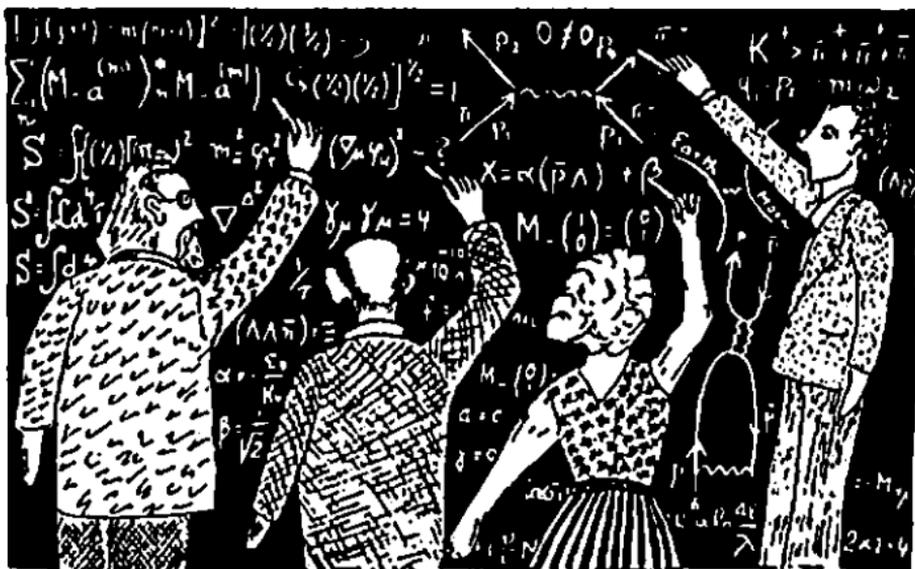
(b)

Fig. 30. Forze di scambio: (a) teoria di Heitler e London sulle forze che tengono insieme due protoni in una molecola di idrogeno ionizzata e in una molecola di idrogeno neutra; (b) tre diverse possibilità per spiegare le forze nucleari per mezzo dello scambio di pioni (π^+ , π^- , π^0).

Un anno dopo (nel 1935) un fisico giapponese, Hideki Yukawa, propose un'idea rivoluzionaria per spiegare le forti interazioni tra i nucleoni. Se queste interazioni non potevano essere spiegate da forze di scambio originate dai salti avanti e indietro delle coppie elettrone-neutrino, doveva esistere una particella completamente nuova, non rivelata fino allora, che veniva scambiata. Per avere la forza richiesta dai risultati degli esperimenti questa particella doveva essere circa duecento volte piú pesante di un elettrone (cioè circa dieci volte piú leggera di un protone). Inoltre la sua interazione coi nucleoni, caratterizzata dalla costante di interazione di Yukawa, g , deve essere circa 10^{14} volte piú grande della costante di interazione di Fermi, g , responsabile delle trasformazioni β , e quindi paragonabile alle comuni interazioni coulombiane tra cariche elettriche. Questa particella ipotetica venne conosciuta sotto molti pseudonimi: Yukon, elettrone giapponese, elettrone pesante, mesotrone e infine mesone. Due anni dopo la proposta di Yukawa, particelle con massa 207 volte piú grandi di quella degli elettroni furono trovate nei raggi cosmici da C. Anderson e S. Neddermeyer presso il California Institute of Technology e sembrarono confermare brillantemente le ipotesi di Yukawa. Ma seguí una temporanea battuta d'arresto; esperimenti eseguiti da M. Conversi, E. Pancini e O. Piccioni dimostrarono senza possibilità di dubbio che, sebbene le nuove particelle avessero la massa dei mesoni ipotetici di Yukawa, la loro interazione con i nucleoni era 10^{12} volte inferiore a quella necessaria per spiegare le forze nucleari. Fu soltanto nel 1947 che il fisico britannico C. F. Powell, mandando delle lastre fotografiche nell'alta atmosfera, scoprí che i mesoni osservati a livello del mare (207 volte la massa dell'elettrone) erano in realtà prodotti di decadimento di mesoni piú pesanti (264 volte la massa dell'elettrone) formati dai raggi cosmici nelle regioni piú alte dell'atmosfera terrestre. Vi sono dunque due tipi di mesoni: quelli pesanti e quelli leggeri. I primi sono noti oggi col nome di mesoni π o semplicemente pioni, mentre i secondi vanno sotto il nome di mesoni μ , abbreviato in muoni. I pioni mostrano interazioni fortissime con i nucleoni e quasi

senza alcun dubbio essi *sono* le particelle che Yukawa fin dall'inizio aveva indicato come responsabili delle forze nucleari. Tuttavia finora su questi processi non è stata elaborata nessuna teoria precisa (paragonabile per esempio alla teoria delle antiparticelle di Dirac).

9 Uomini al lavoro



Il lettore avrà notato che i capitoli di questo libro sono diventati piú brevi: ciò non è dovuto a una crescente stanchezza dell'autore, ma piuttosto al fatto che, dopo i gloriosi sviluppi dei primi trenta anni, la Teoria dei Quanti si trova in gravi difficoltà e i suoi progressi sono notevolmente rallentati. L'ultimo « capitolo veramente concluso » di questo periodo fu l'unificazione a opera di Dirac della meccanica ondulatoria e della Relatività Ristretta, che dette luogo all'elegante teoria delle antiparticelle. Le antiparticelle, dopo essere state trovate sperimentalmente, dimostrarono di comportarsi esattamente come prevedeva la teoria.

La teoria di Fermi sui processi implicanti le emissioni e gli assorbimenti di coppie elettrone-neutrino diventa un po' vaga quando si applica a processi piú complicati come, per esempio, il decadimento di un muone in un elettrone e *due* neutrini. Inoltre il valore numerico della costante di Fermi, g , non può ancora essere dedotto dai valori delle altre costanti naturali fondamentali. (Allo stesso modo, la costante di Rydberg, R , della vecchia spettroscopia rimase una costante empirica finché Bohr non pubblicò la sua teoria dell'atomo di idrogeno).

Difficoltà simili esistono nella teoria di Yukawa sulle interazioni forti tra particelle elementari, e finora il valore numerico della costante γ non è stato spiegato.

Grazie alla ricerca sperimentale si scopre continuamente un numero enorme di dati nuovi, e un gran numero di regole empiriche vengono formulate introducendo idee nuove come « parità », « stranezza », ecc. Nell'insieme la situazione odierna somiglia sotto molti aspetti a quella esistente in ottica e in chimica verso la fine del secolo scorso, quando le regolarità nelle serie spettrali e le caratteristiche della valenza chimica dei diversi elementi erano ben note empiricamente ma assolutamente incomprensibili dal punto di vista teorico. La situazione migliorò bruscamente quando fu elaborata la teoria quantistica della struttura atomica che fece luce su tutti i dati sperimentali faticosamente raccolti. A parere dell'autore l'attuale punto morto nella teoria delle particelle elementari sarà superato — forse tra un anno, forse nel 2000 — grazie a un'idea completamente nuova, diversa dall'attuale modo di pensare proprio come il pensiero attuale differisce da quello classico. Non abbiamo una sfera di cristallo per predire gli sviluppi futuri della fisica teorica, ma al suo posto possiamo usare una disciplina nota col nome di « analisi dimensionale ». Ognuno sa che tutte le misure fisiche sono basate su *tre unità fondamentali*:

lunghezza (metri, stadi, miglia, leghe, ecc.)

tempo (anni, giorni, millisecondi, ecc.)

massa (grammi, stones, libbre, drachms, ecc.).

Ogni quantità fisica può essere espressa per mezzo di queste tre con le cosiddette « formule dimensionali ». Per esempio, *velocità* (V) è la lunghezza o distanza percorsa nell'unità di tempo; *densità* (ρ) è la massa per unità di volume (cioè per il cubo di una lunghezza); *energia* (E) è la massa per il quadrato della velocità, e così via. Si scrive:

$$[V] = \frac{[L]}{[T]}; [\rho] = \frac{[M]}{[L]^3}; [E] = [M] \cdot \frac{[L]^2}{[T]^2}$$

dove le parentesi quadre indicano che questa non è una rela-

zione numerica ma una relazione fra la natura fisica delle quantità considerate. Qui non importa quali particolari unità vengano usate, e si può scrivere

[lire] = [\$] = [£] = [marchi] = [franchi] = [rubli] = ecc.

oppure

[metri] = [yarde] = [piedi] = [arshin] = [anni-luce] = ecc.

Lunghezza, tempo e massa (o, meno esattamente, peso) sono state scelte nella fisica classica facendo in qualche modo riferimento all'uomo, cioè in base a nozioni che noi esseri umani incontriamo nella vita di tutti i giorni. (« È lontano cinque chilometri », « Tornerò fra un'ora », « Mi dia tre chili di carne con l'osso »). Ma in realtà non è necessario scegliere in particolare queste unità, e una terna qualunque di unità anche complesse, si tratti dell'intensità della corrente elettrica (ampere), della potenza di un motore (H.P.) o della intensità luminosa (candela) possono servire da unità fondamentali purché siano indipendenti l'una dall'altra. Tuttavia per costruire una teoria coerente di tutti i fenomeni fisici è razionale scegliere tre unità fondamentali in modo che ognuna governi un vasto campo della fisica ed esprimere tutte le altre unità per mezzo loro. Quali unità formeranno questo terzetto? Una di esse potrebbe essere senza dubbio la velocità della luce nel vuoto (c), che governa tutto il campo dell'elettrodinamica e la Teoria della Relatività. Infatti se si supponesse che la luce si propaga con velocità infinita ($c = \infty$), tutta la teoria di Einstein si ridurrebbe alla meccanica tradizionale di Isaac Newton.

Un altro componente del Terzetto Universale è, naturalmente, la costante di Planck (h) che governa tutti i fenomeni atomici. Se si suppone che h sia uguale a zero si torna di nuovo alla meccanica newtoniana. Il grande merito di Dirac è quello di essere riuscito a mettere d'accordo la Teoria della Relatività e la Teoria dei Quanti, e il fatto che nelle sue equazioni c e h occupino posti ugualmente onorevoli.

Ma quale è la terza costante universale di cui c'è bisogno per rendere completo il sistema della fisica teorica? Una delle

possibili e auguste candidate è, naturalmente, la costante di gravitazione di Newton. Ma se si guarda meglio questa costante non appare molto adatta a collaborare con le altre due per spiegare i fenomeni atomici e nucleari. Le forze gravitazionali sono importantissime in astronomia, e spiegano i moti dei pianeti, delle stelle e delle galassie; ma nel nostro mondo di dimensioni umane l'attrazione gravitazionale tra i corpi materiali è trascurabilmente piccola e ci sorprenderebbe molto vedere due mele, distanti tra loro pochi centimetri, rotolare l'una verso l'altra spinte dall'attrazione newtoniana. Soltanto strumenti estremamente sensibili ci permettono di misurare l'attrazione gravitazionale fra due corpi di dimensioni normali *. Nel mondo atomico e nucleare le forze di gravità sono affatto trascurabili; sono circa 10^{50} volte più piccole delle forze elettriche e magnetiche! Dirac una volta avanzò l'ipotesi che la « costante di gravitazione » di Newton non fosse in realtà una costante ma una variabile che diminuisce in proporzione inversa all'età dell'Universo. E può benissimo avere ragione!

E allora? Quale costante universale occuperà il terzo posto? Possiamo rifarci addirittura agli antichi filosofi greci, che concepirono per primi l'idea di atomo: la più piccola quantità di materia. Nel suo libro *The Analysis of Matter* **, Bertrand Russell scrive:

Possiamo supporre, come suggerì una volta Henri Poincaré e come a quanto pare credeva Pitagora, che spazio e tempo siano granulari, non continui. Cioè che la distanza fra due particelle possa sempre essere un multiplo intero di qualche unità, e tale possa essere il tempo fra due eventi. La continuità nella percezione dell'oggetto non è prova di continuità nel processo fisico.

Nel suo libro *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie* ***, Werner Heisenberg scriveva:

Sebbene in teoria sia forse possibile diminuire illimitatamente gli intervalli di spazio e di tempo perfezionando gli strumenti di

* Cfr. G. GAMOW, *Gravity*, « Science Study Series », Doubleday 1962.

** Trad. ital. *L'Analisi della Materia*, Longanesi, Milano 1964.

*** Trad. ital. *I Principi Fisici della Teoria dei Quanti*, Boringhieri, Torino 1963.

misura, nondimeno per la discussione principale delle idee della teoria ondulatoria conviene introdurre valori finiti per gli intervalli di spazio e di tempo che intervengono nelle misure, e passare al limite zero [$\Delta x \rightarrow 0$; $\Delta t \rightarrow 0$] per questi intervalli soltanto alla fine dei calcoli. È possibile che ulteriori sviluppi della teoria quantistica mostrino che il limite zero per tali intervalli sia un'astrazione priva di significato fisico; tuttavia oggi non sembra esserci motivo di porre alcuna limitazione.

Sei anni dopo però Heisenberg cambiò parere sulle nove parole che facevano seguito a quel « tuttavia » del passaggio citato, e suggerì la possibilità di eliminare le « divergenze » che si verificavano nei vari campi della Teoria dei Quanti, introducendo una lunghezza elementare dell'ordine di grandezza di 10^{-13} cm.

Che cosa significa la parola « divergenza »? In matematica si riferisce alle « serie infinite », cioè alle successioni di infiniti numeri da aggiungere insieme. Possiamo per esempio scrivere:

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \text{(e così via all'infinito)}.$$

Evidentemente il risultato della somma sarà infinito. Ma che succede nel caso di:

$$1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + \text{(e così via all'infinito)?}$$

Si può dimostrare che anche questa somma diventa infinita, o *diverge*, come si dice in linguaggio matematico. Invece la serie:

$$1 + 1/1! + 1/2! + 1/3! + 1/4! + 1/5! + \text{(e così via all'infinito)}$$

(dove $n!$ indica il prodotto di tutti i numeri interi da 1 a n) converge, ed è uguale a 2,718 28... Allo stesso modo la serie

$$1 - 1/3! + 1/5! - 1/7! + \text{(e così via all'infinito)} \text{ converge al valore } 0,841 5...$$

I risultati dei calcoli eseguiti nella fisica teorica sono spesso rappresentati sotto forma di serie infinite. Se convergono, come fanno spesso, abbiamo una soluzione chiara e otteniamo il valore numerico definito per la quantità fisica che cerchia-

mo di misurare. Ma se la serie diverge, il risultato è privo di senso e porta ad attribuire un valore infinito alla quantità considerata. Come esempio di tali divergenze prendiamo in considerazione un problema che riguarda la massa di un elettrone. Se immaginiamo l'elettrone come una minuscola sfera carica elettricamente, con la carica $e = 4,80 \times 10^{-10}$ unità elettrostatiche e il raggio r_0 , l'elettrostatica classica ci dice che l'energia del campo elettrico che lo circonda è uguale a $e^2/2r_0$. Per la legge dell'Equivalenza di Massa ed Energia di Einstein la massa di questo campo è $e^2/2 r_0 c^2$. Dato che questa massa non può superare la massa osservata m_0 di un elettrone ($= 0,9 \times 10^{-27}$ grammi) ne segue che

$$\frac{e^2}{2r_0 c^2} \leq m_0 \text{ ossia } r_0 \geq \frac{e^2}{2m_0 c^2} = 2,82 \times 10^{-13} \text{ cm.}$$

Se però si suppone che l'elettrone sia una carica puntiforme ($r_0 = 0$), la massa del campo elettrico circostante diventa infinita! D'altra parte ci sono molte buone ragioni teoriche per ritenere che l'elettrone sia una carica puntiforme. Contraddizioni simili cominciarono a nascere numerose nel corso del successivo sviluppo della fisica delle particelle elementari, e si arrivava sempre a risultati divergenti (infiniti) a meno che si interrompesse a un certo punto, senza un motivo valido per farlo, la serie matematica infinita derivante dai calcoli condotti avanti normalmente. Pauli chiamava scherzosamente il lavoro in questa direzione « *Die Abschneidungsphysik* » (La Fisica del Troncamento).

Era singolare che il troncamento dovesse sempre essere fatto a distanze dell'ordine di 10^{-13} cm. Quando, negli anni successivi, la distanza massima entro cui agiscono le forze fra nucleoni venne misurata sperimentalmente con buona approssimazione, risultò di $2,8 \times 10^{-13}$ cm: cioè esattamente uguale al cosiddetto « raggio classico dell'elettrone », calcolato teoricamente partendo dal presupposto che la sua massa sia dovuta interamente al campo elettrostatico che lo circonda. Diventa sempre più evidente che c'è un limite inferiore di distanza, la lunghezza elementare λ prevista da Pitagora,

Henri Poincaré, Bertrand Russell, Werner Heisenberg e altri, che è fondamentale nella fisica. Proprio come nessuna velocità può superare quella della luce c , nessuna azione meccanica può essere inferiore all'azione elementare h , nessuna distanza può essere più piccola della lunghezza elementare λ e nessun intervallo di tempo più breve della durata elementare λ/c . Quando sapremo come introdurre λ (e λ/c) nelle equazioni fondamentali della fisica teorica potremo affermare orgogliosamente: « Ora finalmente capiamo come funzionano materia ed energia! ».

Ma dopo i trenta anni grassi all'inizio di questo secolo, stiamo ora trascinandoci negli anni magri e sterili: speriamo di avere miglior fortuna negli anni a venire. Malgrado tutti gli sforzi di veterani come Pauli, Heisenberg e altri, e di quelli della generazione più giovane, come Feynman, Schwinger e Gell-Mann, la fisica teorica ha fatto pochissimi progressi negli ultimi trenta anni in confronto ai trenta anni precedenti. La situazione è descritta probabilmente nel modo migliore in una lettera che Pauli inviò all'autore di questo libro a proposito di un tentativo fatto da lui e da Heisenberg per spiegare le masse delle varie particelle elementari che a quell'epoca si stavano moltiplicando come conigli. La figura 31 contiene un estratto della lettera, di cui la maggior parte (non riportata qui) è dedicata ai fondamenti della biologia. Eccone il testo:

Caro Gamow,

grazie per la lettera del 24 febbraio. La roba di cui ci occupiamo Heisenberg ed io è così complicata, credo, soltanto perché entrambi non l'abbiamo ancora capita quanto basta. (Non c'è ancora un « saggio » definitivo; ma qualche altra bozza, non ancora a posto per la pubblicazione, può essere mandata quanto prima ai fisici per soddisfare la loro curiosità ed evitare chiacchiere avventate). A questo scopo troverai accluso il mio commento all'annuncio di Heisenberg alla radio. (Per piacere non pubblicarlo sui giornali ma mostralo agli altri fisici e diffondilo tra loro).

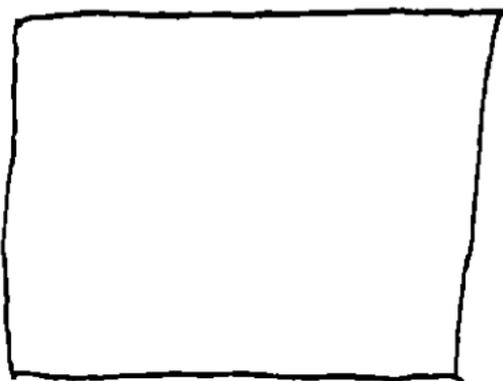
March 1st, 1958

Dear Janow,

Thanks for your letter of Feb. 24th. The stuff of Heisenberg and me is, as I believe, only so complicated for the reason, that we both have not yet understood it sufficiently. (There is no "paper" yet; but some other preprint, not yet determined for the publication, may be sent to physicists, soon, to satisfy their curiosity and to prevent wild rumors.) In this sense you find enclosed my comment on Heisenberg's radio advertisement. (Please don't publish it in the press, but please do show it to other physicists and make it popular among them.)

Comment on Heisenberg's radio advertisement:

"This is to show the world, that I can paint like Titian!"



Only technical details are missing.

V. Pauli

Fig. 31. Lettera di Pauli.

Commento all'annuncio radio di Heisenberg:

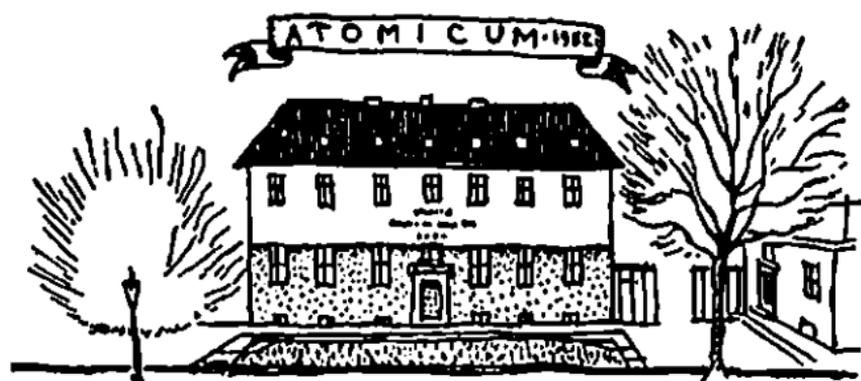
« Questo è per mostrare al mondo che io so dipingere come Tiziano »:

[segue il disegno]

Mancano soltanto i particolari tecnici.

V. PAULI

Sette anni sono passati da quando è stata scritta questa lettera; sono stati pubblicati centinaia di articoli sul problema delle particelle elementari e in proposito ci dibattiamo ancora nelle tenebre e nell'incertezza. Speriamo che in dieci o vent'anni al massimo, prima dell'inizio del ventunesimo secolo, finiscano questi anni magri della fisica teorica in una esplosione di idee completamente nuove e rivoluzionarie, simili a quelle che hanno annunciato l'inizio del ventesimo secolo.



FAUST

E I N E H I S T O R I E

MANOSCRITTO DI: J. W. von Goethe

PRESENTATO DA: Il Gruppo d'Assalto
dell'« Istituto di Fisica Teorica »
di Copenaghen



MOTTO

Non per criticare...

N. BOHR

Osservazioni preliminari

I primi decenni di questo secolo videro lo sviluppo impetuoso della teoria quantistica dell'atomo e durante questo periodo le strade dei teorici di qualunque nazionalità portavano tutte, non a Roma, ma a Copenaghen, la città di Niels Bohr che fu il primo a formulare l'esatto modello dell'atomo. Alla fine di ogni convegno primaverile in Blegdamsvej * 15 (che era allora l'indirizzo dell'Istituto di Fisica Teorica di Bohr) si prese l'abitudine di eseguire una rappresentazione satirica che alludesse a sviluppi recenti della fisica. Il convegno del 1932, che coincise con il decimo anniversario dell'Istituto di Bohr, seguiva a breve distanza la scoperta del fisico inglese James Chadwick di una nuova particella *avente massa uguale a quella di un protone, ma priva di carica elettrica*. Chadwick la chiamò *neutrone*, nome oggi familiare a chiunque si interessi di fisica nucleare e di quella che viene chiamata, un po' impropriamente, « energia atomica ». Ma ci fu qualche confusione di terminologia: alcuni anni prima Wolfgang Pauli aveva adoperato lo stesso nome per una particella ipotetica *priva di massa e di carica*, necessaria a suo parere per spiegare la violazione del principio di Conservazione dell'Energia osservata sperimentalmente nel processo del decadimento radioattivo β .

Il « Neutrone di Pauli » fu oggetto di accese discussioni tra i fisici, ma queste discussioni erano esclusivamente verbali o svolte attraverso corrispondenze private, e il nome non era protetto da « diritti d'autore », non figurando in nessuna pubblicazione. Perciò, quando nel 1932 Chadwick annunciò in un articolo la sua scoperta del neutrone pesante, si dovette cambiare il nome al neutrone senza peso di Pauli. Enrico Fermi propose di usare la parola italiana *neutrino*, come a dire piccolo neutrone. Nel tradurre il testo della rappresentazione il nome di « neutrone » di Pauli che figurava nell'originale è stato cambiato in quello attuale di « neutrino ». L'esistenza del neutrino allora non era stata ancora dimostrata: parecchi fisici, e specialmente Paul Ehrenfest di Leida, erano molto scettici sull'ipotetico neutrino di Pauli, e fu soltanto nel 1955 che la sua esistenza fu dimostrata

* Si pronuncia Bldamsvi.

inoppugnabilmente dagli esperimenti di Fred Reines e Cloyd Cowan dei Laboratori Scientifici di Los Alamos.

Le pagine seguenti contengono il testo di un dramma scritto e recitato da diversi allievi di Bohr, e rappresentato in occasione del convegno di primavera del 1932. (L'autore di questo libro non poté prendervi parte perché il Governo Sovietico gli aveva rifiutato il passaporto per assistere al convegno di Copenaghen). In questo capolavoro teatrale Pauli (*Mefistofele*) cerca di vendere all'incredulo Ehrenfest (*Faust*) l'idea del neutrino senza peso (*Gretchen*).

Il Faust della Blegdamsvej è riprodotto in questo libro come documento importante di quegli anni turbolenti per lo sviluppo della fisica. Gli autori e gli esecutori preferirono restare anonimi, tranne J. W. von Goethe, e dato che non siamo in grado di identificarli abbiamo suggerito all'editore di dedurre una somma adeguata dai diritti d'autore che devono essere pagati per questo libro, e di tenerla in deposito per due o tre anni, nella speranza che la pubblicazione del libro porti alla loro scoperta. In mancanza di ciò la somma potrebbe essere donata alla biblioteca dell'Istituto per l'acquisto di nuovi libri.

Ringrazio il Professor Max Delbrück per il suo gentile aiuto nell'interpretazione di certi passaggi del dramma.

G. G.

Nota all'edizione Italiana

Il testo originale è in tedesco, ricalcato più o meno approssimativamente su versi del *Faust*. Questa traduzione è fatta sulla traduzione inglese di Barbara Gamow, che — avverte la traduttrice — ha dovuto in qualche punto scostarsi dall'originale.

Nella doppia traduzione molti giochi di parole sono andati irrimediabilmente perduti. Certe confusioni di identità fra Gretchen e Il Neutrino, Faust e Ehrenfest, erano già nell'originale (sempre secondo quanto avverte la traduttrice).

I personaggi rappresentano:

ARCANGELO EDDINGTON	E. Eddington, astronomo britannico
ARCANGELO JEANS	J. Jeans, astronomo britannico
ARCANGELO MILNE	E. A. Milne, astronomo britannico
MEFISTOPELE	W. Pauli, fisico austriaco
IL SIGNORE	Niels Bohr, fisico danese
LE MILIZIE CELESTI	Comparse
FAUST	P. Ehrenfest, fisico olandese
GRETCHEN	Il Neutrino
OPPIE	R. Oppenheimer, fisico americano
UN UOMO ALTO	R. C. Tolman, fisico americano
MILLIKAN-ARIELE	R. A. Millikan, fisico americano
LANDAU (DAU)	L. Landau, fisico russo
GAMOW	G. Gamow, fisico russo
SLATER	J. C. Slater, fisico americano
DIRAC	P. A. M. Dirac, fisico britannico
DARWIN	C. Darwin, fisico britannico
FOWLER	R. H. Fowler, fisico britannico
QUATTRO DONNE IN GRIGIO	L'Invariante di « Gauge », la Costante di Struttura Fine, l'Energia Negativa, la Singolarità

UN FOTOGRAFO CORDIALE

Un fotografo cordiale

WAGNER

J. Chadwick, fisico britannico

CORO MISTICO

Chiunque sappia cantare

(Il MAESTRO DI CERIMONIE è impersonato dal fisico tedesco Max Delbrück).

Prologo

Tra cielo e inferno.

I TRE ARCANGELI, il SIGNORE, le MILIZIE CELESTI e MEPISTOFELE.



ARCANGELO EDDINGTON. Come ben sappiamo il Sole è destinato a splendere nelle sfere politropiche ¹; il suo viaggio, da lungo predestinato, conferma le *mie teorie* su tutta la linea. Salutiamo l'espansione di *Lemaître* ² (anche se nessuno di noi riesce a capirla)! Le Opere splendide sono misteriose e sublimi, come nel mattino della Creazione.

ARCANGELO JEANS. E sempre affrettandosi e girando le stelle doppie brillano e fuggono, lo splendore delle Giganti si alterna con la notte completa dell'eclissi. Fluidi ideali, caldi e ruotanti assumono per fissione una forma a pera ³. *Sono mie le teorie* vincenti! L'atomo non può cambiare le regole.

ARCANGELO MILNE. Gli uragani si scatenano a gara (e anche il *Monthly Notices!* ⁴) e ardono per l'ambizione violenta di predire le notizie importanti. A una temperatura di dieci alla settima il gas degenera in fiamma, concedendoci la nostra ora luminosa di volo più libero in nome di Fermi ⁵.

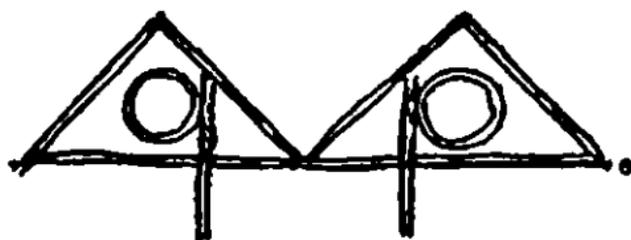
I TRE INSIEME. Questa visione ci colma di ebbrezza (anche se nessuno di noi può capire). Le Opere splendide sono ancora misteriose e sublimi come nel giorno della Pubblicazione.

MEFISTOFELE (*balzando avanti*). Poiché tu, o Signore, hai ora ritenuto giusto farci visita e apprendere come si comporta ciascuno di noi, e poiché sembri avere una piccola preferenza per me, ebbene – adesso eccomi qua (*rivolto al pub-*



blico) tra gli schiavi. Non so dire nulla alla giuria di Stelle e di Mondi; tutto quel che so è che la gente si lamenta. Secondo me la teoria è tutta baccano e furore, eppure tu vai di nuovo in estasi, approvi idee che si distruggono come bolle di sapone e cacci il naso in tutti i pasticci.

IL SIGNORE.



Devi proprio interrompere i festeggiamenti solo per lamentarti, Principe dei Demoni? La Fisica Moderna non ti commuove mai?

MEFISTOFELE. No, Signore! La fisica mi fa soltanto pena per lo stato in cui si trova e nei miei giorni colmi di tristezza ciò mi addolora e mi affligge amaramente. Non c'è da stupirsi se mi lamento, ma chi mi crede?

IL SIGNORE. Conosci quell'Ehrenfest?...

MEFISTOFELE. Il critico ?
(Appare l'immagine di EHRENFEST).



IL SIGNORE. Il mio cavaliere!

MEFISTOFELE. Tuo cavaliere, tuo schiavo e tuo accolito. Che scommetti? Perderai di nuovo, ti avverto, se mi lasci tentare questo cavaliere e traviarlo.

IL SIGNORE. Oh, è veramente terribile! Debbo dire... *Jah, muss Ich sagen* ?... C'è un fallimento sostanziale di concetti

classici – un pantano. Fra parentesi – ma è una cosa confidenziale – che proponi di fare con la Massa?

MEFISTOFELE. Con la Massa? Dimenticala.

IL SIGNORE. Ma.. ma questo... È molto in-te-res-san-te. Almeno provare...

MEFISTOFELE. Oh, *Quatsch!* Che stupidaggini dici oggi! Zitto!

IL SIGNORE. Ma... ma... ma... ma...

MEFISTOFELE. *Questa è la mia ipotesi!*

IL SIGNORE. Ma Pauli, Pauli, Pauli, siamo praticamente d'accordo. Non ci sono malintesi – te lo garantisco. *Natürlich, Ich bin einig.* Possiamo buttar via la *Massa*, ma la *Carica* è qualcosa di diverso: la *Carica* deve proprio restare!

MEFISTOFELE. Che capriccio, che idiozia! Perché *non* sbarazzarsi della *Carica*?

IL SIGNORE. Capisco, capisco, ma *maa jeg spørge* ⁹, amico mio,

MEFISTOFELE. Zitto!

IL SIGNORE. Ma Pauli, vuoi starmi a sentire fino in fondo? Se *Massa* e *Carica* fanno fagotto che ci resta alla fine?

MEFISTOFELE. Vecchio mio, è elementare! Mi domandi che ci resta? Ma, per l'amor di Dio, il *Neutrino*! Svegliati e adopera il cervello!

(*Pausa, camminano entrambi su e giù.*)

IL SIGNORE. Non per criticare ¹⁰, lo dico piuttosto per imparare... Ma ora devo lasciarti. Addio! Ci rivedremo! (*Esce.*)

MEFISTOFELE. Di tanto in tanto rivedo volentieri il caro vecchio, mi piace trattarlo con garbo – con tutto il garbo che



posso. È affascinante e così signore che sarebbe una vergogna trattarlo male, e – chi l'immaginerebbe? – è così umano che parla perfino a Pauli! (*Esce*).

Parte prima

Lo studio di Faust.



FAUST. Ahimè, ho imparato la Chimica della Valenza, la Teoria dei Gruppi, la Teoria del Campo elettrico e la Teoria delle Trasformazioni rivelata da Sophus Lie nel milleottocentonovantatré. Eppure, con tutta la mia scienza, non sono piú saggio di quanto fossi prima. Mi chiamano Dottore. Gli scolari sono stati menati su e giù, avanti e indietro da questo povero Faust errante, da questo stupido pagliaccio; si rompono la testa sulla Fisica proprio come ho fatto io. Ma io sono ancora meglio dei maniaci, dei Pezzi Grossi, delle scimmie, dei ciarlatani. Mi assale *ogni* dubbio, *ogni* scrupolo, e temo Pauli come il Diavolo stesso. Afferro la gomma come uno scolaretto spaventato, prima che i magici « ixismi »¹¹ si cancellino, perché ciò che è scritto nero su bianco può essere accettabile e giusto. *Du Lieber Gott!* Potrei ancora insegnare qualcosa. Non ho né Guth né Breit¹² al mio fianco, ma potrei usare la loro intelligenza per predicare e diffondere il vangelo riconosciuto *buono e largo*. Né Hund¹³ né un cane sopporterebbe la mia sorte, così io sono il Critico, triste e disgraziato.

(*Irrompe come un uragano MEFISTOPELE vestito da commesso viaggiatore*).



Perché tutto questo baccano?

MEFISTOFELE. Ai tuoi ordini, signore!

FAUST. Per chi mi prendi? Per un cliente?

MEFISTOFELE. Un tempo eri ricettivo e cortese... Queste teorie oggi giorno sono stupide come la pioggia; perciò voglio mostrarti qualcosa di più elevato, con cui puoi dare fuoco al mondo: « la Danza del Vitello d'Oro » (caleidoscopica); la *Teoria della Radiazione* è il mio soggetto.



(Canone, cantato da tutti).

Born - Heisenberg

Heisenberg - Pauli

Pauli - Jordan

Jordan - Wigner

Wigner - Weisskopf

Weisskopf - Born

Born - Heisenberg¹⁴

(ecc.).

MEFISTOFELE. Questi sono i miei, carne della mia carne. Ascolta come danno precocemente consigli, con collera e malizia. Qui la larghezza delle linee diverge nell'immensa lunghezza del campo ondulatorio.

(Il MAESTRO DI CERIMONIE fa dei gesti di protesta; MEFISTOFELE ripete)

Qui la larghezza delle linee diverge nella perdita di forza del campo ondulatorio.

FAUST. Basta! Non mi sedurrai. Sono guarito. Non toccherò mai gli estratti delle tue pubblicazioni, siine certo.

MEFISTOFELE. Me ne compiaccio. (*A parte*). (I suoi argomenti hanno un certo vigore. Il primo vecchio con cui si possa ragionare!).

(*Mostrando la sua merce*) Una Psi-Psi Stern ¹⁵?

FAUST. Non compro!

MEFISTOFELE. Una Psi-Psi Gerlach?

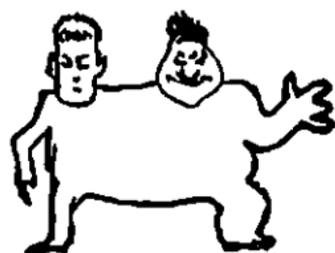
FAUST. Non compro!

MEFISTOFELE. Elettrodinamica?

FAUST. Non compro!

MEFISTOFELE. Di Heisenberg e Pauli?

FAUST. Non compro!



MEFISTOFELE. Con autoenergia infinita?

FAUST. Non compro!

MEFISTOFELE. Elettrodinamica?

FAUST. Non compro!

MEFISTOFELE. Di Dirac?

FAUST. Non compro!



MEFISTOFELE. Con autoenergia infinita?

FAUST. La solita solfa!

MEFISTOFELE. Allora devo mostrarti qualcosa di unico!

FAUST. Non mi sedurrai, per dolci che siano le tue parole. Se mai dovessi dire a una teoria: « Sei così bella! » e « Arrestati! Deh, arrestati! » allora potresti gettarmi in catene e dirmi addio, allora sarei contento di strisciare via e morire.

MEFISTOFELE. Guardati soltanto dalla Ragione e dalla Scienza, supremi poteri dell'uomo, in empia alleanza. Hai ceduto, abbagliato da un incantesimo, a tutte le tentazioni del campo quantistico. Ascolta! Ora abbatti gli ostacoli e conoscerai il bel Neutrino del tuo destino!

GRETCHEN (*entra e canta a FAUST sull'aria di « Margherita all'arcolaio » di Schubert*)



La mia Massa è zero,
la mia Carica pure.
Tu sei il mio eroe,
il mio nome è Neutrino.

Io sono il tuo destino,
e la tua chiave.
La porta è chiusa
perché manco io.

I raggi beta ¹⁶ si affollano
per accoppiarsi con me.
Lo spin dell'azoto è sbagliato ¹⁷
se non ci sono io.



La mia Massa è zero,
la mia Carica pure.
Tu sei il mio eroe,
il mio nome è Neutrino.

La mia anima anela
verso di te, amor mio.
Il mio povero cuore si strugge
per te solo.

La mia anima consunta d'amore
ti appartiene.
Non posso dominare
il mio trepido spin.

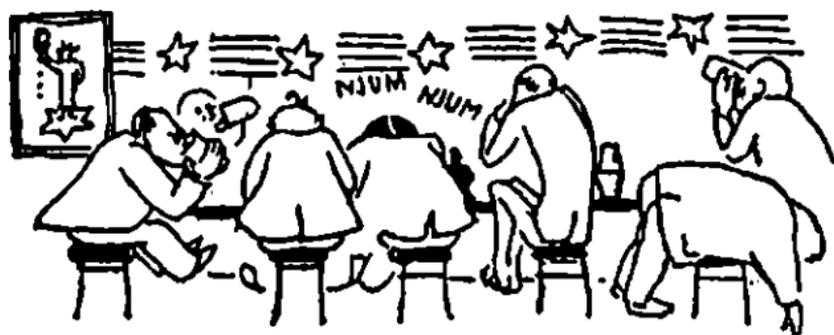
La mia Massa è zero,
la mia Carica pure.
Tu sei il mio eroe,
il mio nome è Neutrino.

(Escono tutti).

La cantina clandestina della signora Ann Arbor¹⁸.

(nota anche col nome di Auerbachs Keller)

(Fisici americani siedono tristi al bar).



MEFISTOFELE (spuntando dietro al bar). Nessuno beve? Nessuno ride? Io vi insegnerò la fisica in un batter d'occhio... (strizza l'occhio ai fisici ostentatamente e con l'aria di chi la sa lunga). Vergogna, starvene là istupiditi mentre di solito siete tutti così brillanti!



OPPIE (deglutendo - gnam, gnam - prima di parlare). Colpa tua! Non hai portato una sola parola di conforto - nessuna novità, nessun ixismo. Bah!

MEFISTOFELE (presentando GRETCHEN). Eccovi l'una e l'altro! (Vivaci applausi e tumulto generale).



UN UOMO ALTO. Una *Signorina* ben fatta e attraente... (a MEFISTOFELE) Ma dimmi, sei stato a Pasadena?

MEFISTOFELE. Sì, con Einstein. Vi manda a salutare nel vostro rifugio, questo *wunder-bar* della signora Annie Arbor.

UN UOMO ALTO. Einstein! Le sue curve! I suoi campi! Tutta la sua arena!

MEFISTOFELE (*canta*). Un Monarca amava teneramente una *Pulce*¹⁹, proprio come una figlia e come – o quasi – la



Gra-vi-ta-zio-ne. Il Monarca fece venire Mayer²⁰; Mayer disse: « Certo! Sire, le farò i tensori²¹ con la curvatura da *junker* ». Vestita come un figurino, la Pulce venne allora esi-

bita in pubblico. La gente se la sarebbe mangiata come una chicca tanto era diventata dolce. La Pulce crebbe e in se-



guito le nacque una *Figlia*²². La figlia cominciò a sfidare la madre ma non riuscì mai a correre. Pulci mezze nude furono



scodellate dalla gioia e dall'orgoglio di Berlino, chiamate dai blasfemi: « Teorie del Campo Unificato ». Ora, o Fisici, state

$$\Gamma_{st}^i = \Gamma_{st}^i + \Gamma_{st,r}^i \xi^r$$

$$\int \mathcal{M}_i \xi^i d\tau$$

$$\mathcal{R} \nabla_s^i = 0$$

attenti, imparate da questo serio esperimento... assicuratevi che le nuove pulci nascano completamente vestite!

TUTTI. Per quanto ubriachi ci sentiamo bene come – hic!
– cinquecento scrofe!

FAUST (*noto per essere contrario all'alcool, avanza e canta rivolto a MEFISTOPELE*). Ti aspetti che mi trovi bene in tutto questo caos, in questo baccano e in questo inferno? (*A GRETCHEN*) Tu Scheletro, Mostro, io sono qui, ma tu riconosci il tuo signore e padrone? Che cosa mi trattiene? Guarda, ti prendo la mano e ti *sbriciolo!*



GRETCHEN. Faust, Faust, temo un disastro!

(Escono tutti).

Parte seconda

Una ridente contrada.

(FAUST dorme su un letto di rose. Sulla destra c'è una quercia. Un terribile strepito annuncia l'avvicinarsi di MILLIKAN-ARIELE).



MILLIKAN-ARIELE (*dall'alto*). Ascolta, o ascolta le parole dei contadini (Camere di Wilson, Contatori²¹)! Come un tuono per l'orecchio dello spirito arriveranno ora i *Raggi Cosmici*! I protoni cigolano e vibrano, gli elettroni ruotano e strepitano. La luce irrompe - verso dove? da dove? Heisenberg²⁴ è veramente di cattivo umore; Rossi e Hoffmann²⁵, sono entrambi nervosi. Tutte queste assurdità non hanno alcun senso!



FAUST (*destandosi*). Dolce campo di rose - quale terreno sto accarezzando? E perché m'è familiare? Rosenfeld²⁶, dicono, benedice il verde invariante di « gauge »²⁷. Questa è la sua quercia.

(*Appare il MAESTRO DI CERIMONIE*).

(*al M. C.*) Che c'è in programma oggi?

M. C. *Notti di Valpurga: quella Poetica Classica, e poi quella Teoretica Quantistica.*

FAUST. *Magnifico! Mi va!*

La notte di Valpurga classica.

M. C. (*fa un gesto di presentazione*). *La Classica, un pot-pourri!*



FAUST (*si sporge in avanti in attesa. Una lunga pausa indica che non succede niente*). *Ma non sta succedendo niente!*

M. C. *Aspetta e vedrail*

FAUST (*aspetta; un'altra lunga pausa e di nuovo non succede niente*). *Bada, Delbrück!...*

M. C. *Faust, devi ben aspettarti che con la Classica non ci siano effetti sul pubblico.*

(Entra DIRAC).

DIRAC. Giusto! Giusto!

FAUST. Perché non la saltiamo e passiamo alla T.Q.?

M. C. Perché in tal caso verrei meno al mio compito di M. C., dato che prima la Classica deve finire come si conviene.

FAUST. Ho due diverse scale di tempi da proporre per queste Notti di Valpurga. Come ho già dichiarato la Prima dovrebbe andare al limbo.

DIRAC. Non concesso!

FAUST. Allora propongo che la Classica sia portata molto più in là nel tempo e nello spazio.

M. C. Accordato!

La notte di Valpurga Teoretica Quantistica.

(Da un lato del palcoscenico, sul fondo, compaiono IL SIGNORE e LANDAU^{2a}, quest'ultimo legato e imbavagliato).



IL SIGNORE. Sta calmo, Dau!... Ora, infatti, la sola teoria giusta, o alle cui lusinghe potrei cedere è...

LANDAU. Mmm-mmm! Mmm-mmm!

IL SIGNORE. Non interrompere questo colloquio! Sarò io a parlare. Vedi, Dau, la sola vera regola pratica è...

LANDAU. Mmm-mm! Mmm-mm!

(dall'altro lato del palcoscenico, sul fondo, compare la faccia di GAMOW dietro delle sbarre).



GAMOW. Non posso andare a Blegdamsvej (la barriera di potenziale è troppo alta). Questa conversazione è un imbroglio. Il Signore sta davvero scherzando: legato e imbavagliato com'è dalla testa ai piedi Dau non può dire « *Nyet!* » e neppure « *Horosho!* ».

M. C. (al centro del palcoscenico). Attenzione, *Achtung!*

State attenti: questi Buchi di P. Dirac²⁹ possono farvi inciampare e mandarvi in men che non si dica a gambe all'aria!

(Alza un cartello con scritto « Attenzione »).

IL MONOPOLO (avanza e canta). Due Monopoli si adoravano e andavano d'accordo su tutto. Eppure un fratello non poteva avvicinarsi all'altro, Dirac era così terribilmente severo!



(al M. C.). Ma dimmi (Attento, c'è un Buco) dov'è il mio amato Antipolo?

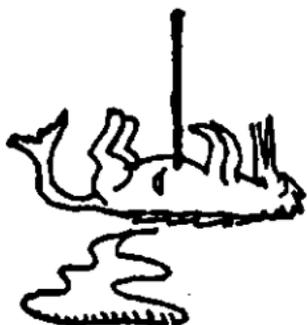
M. C. (a parte). (Un Buco, mamma mia! Sembra piuttosto un cratere!). (Al MONOPOLO) Un momento, arriva Slater.

(SLATER avanza con una lancia insanguinata e il DRAGO DEI GRUPPI³⁰).



M. C. (vedendo i personaggi correre qua e là sul palcoscenico). Perché corrono? Perché barcolla? Chi l'ha colpito con l'asta insanguinata? Con questo colpo mortale ti abbiamo abbattuto, o Drago dei Gruppi! Irto di indici è colui che è morto di Antisimmetria; ridotto a nulla, giace spogliato del

suo stato e del suo travestimento. Con questo colpo mortale ti abbiamo abbattuto, o Drago dei Gruppi!



(Si fa avanti il SEGNO FALSO).

IL SEGNO FALSO³¹. Tutte le teorie finiscono oppure arrecano delusioni. Il Segno è sempre l'inezia che rovina tutto. Il cal-



colo è magnifico, tutto va bene: non di meno, sul piú bello, salta fuori il Segno!

(Vengono portati avanti DIRAC e DARWIN).



M. C. Ecco qui ora il venerato *Caso Unidimensionale*: si chiama Dirac - vi ricordate la sua faccia. Segue il Darwin *tridimensionale*.

(Il SEGNO FALSO cammina pavoneggiandosi intorno a DIRAC e lo tira da parte. DARWIN però non gli dà retta).

Guardate il Segno Falso: è seccato e perplesso, si sente offeso nel suo amor proprio. Può manovrare Dirac ma Darwin è un osso duro per lui, perché finora Darwin è come un uccellino in cielo: è soltanto un luccichio nell'occhio di un fisico. (Solleva un cartello con la scritta):

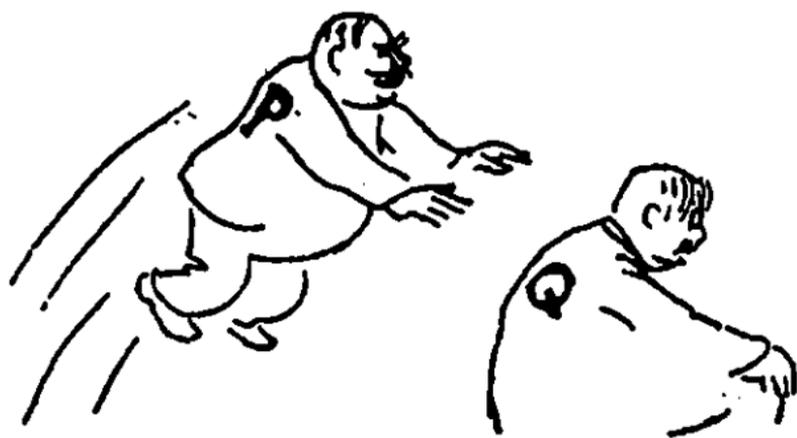
RELAZIONE DI SCAMBIO ³²

$$PQ - QP = h/2\pi i$$

Guardate qua! Darwin si è trasformato in P.

(Entra in scena FOWLER).

Ed è arrivato Fowler (lui è una Q). Come vedrete essi spiegano la Relazione scritta sul cartello saltando alla cavallina come matti per tutto il palcoscenico.



(A ogni scambio la scritta, « $h/2\pi i$ » lampeggia; contemporaneamente si canta).

Dunque P e Q si scambiano, continuano a scambiarsi, continuano a scambiarsi, eppure risulta sempre $h/2\pi i$, $h/2\pi i$!



Non possono star fermi, finché non se ne sono andati come oche, finché non se ne sono andati come oche, eppure risulta sempre $h/2\pi i$, $h/2\pi i$!



Attenzione! Attenzione! Adesso si sono trasformati.

(P. e Q. subiscono ora la dolorosa metamorfosi in ELETTRONI ASINELLI e cadono in uno dei Buchi di Dirac).

in Elettroni Asinelli³³. Osservate: barcollano e cadono, per sbadataggine (vecchi, goffi amici!) in uno di quei Buchi disseminati dappertutto come trappole.

(Lo SPIN DEL FOTONE, vestito in foggia indiana, attraversa rapidamente la scena, accompagnato da una musica fugace).



Attenzione! Ecco lo Spin del Fotone³⁴ con una specie di sari indiano e con la giacca. (È evidente che nessun modesto e rispettabile Bosone³⁵ traverserebbe nudo il palcoscenico!).

(DIRAC avanza seguito da QUATTRO DONNE IN GRIGIO).

PRIMA DONNA. Mi chiamo Invariante di « Gauge »!

SECONDA DONNA. Io sono la Costante di Struttura Fine³⁶.

TERZA DONNA. Mi presento, sono l'Energia Negativa³⁷.

QUARTA DONNA (*alla TERZA*). Bada a quel che dici, Numero Tre! (*alle altre*) Sorelle, voi non potete cacciarvi nel conto; alla fine invece io ci sarò, perché io sono la Singolarità ³⁸!

(*Le quattro si fermano da un lato del palcoscenico; e successivamente si mescoleranno di nuovo agli altri*).

FAUST. Ne ho viste arrivare quattro e ne ho vista andar via una sola; e non so che cosa cercassero di dire. L'aria adesso è talmente piena di spettri e apparizioni che faremmo bene a tenerci stretti alle nostre parrucche.

DIRAC. C'è uno strano uccello che gracida. A proposito di che? Porta sfortuna! Le nostre teorie signori sono diventate pazze furiose. Dobbiamo ritornare al 1926 ³⁹; tutto il lavoro che abbiamo fatto dopo è buono solo per far fuoco.

FAUST. Allora non può nascere nulla oggi?



DIRAC (*alla QUARTA DONNA IN GRIGIO*). Tu, Singolarità, *vattene via!*

QUARTA DONNA. Il mio posto è qui e, per piacere, *non urlare!*

DIRAC. Strega, ti farò sparire col mio potere magico!

QUARTA DONNA. Non sono forse nei campi Eigen? La Radiazione non mi contiene? La mia forma è disposta a cambiare eternamente, il mio potere è tale che nessuno può incatenarmi. Nella traccia non meno che sulle onde sto tra schiavi spaventati, sempre trovata, mai cercata, maledetta ancor prima di essere presa.

DIRAC. Non ti capisco! (*Viene cacciato via dalla SINGOLARITÀ*).

M. C. (*in direzione di DIRAC*). Lo capirai subito: questa donna ti sta mandando sulla Luna! (*al pubblico*) A meno che, naturalmente, le sue lunghe gambe non lo salvino. Tre ipotesi! Riuscirà a decollare?

(*Compare MEFISTOFELE. Qualcuno bussava alla porta: un FOTOGRAFO CORDIALE guarda dentro interrogativamente*).



MEFISTOFELE. Avanti, avanti! Entra, entra! Zoticone sbracato, con lastre e pellicole e click e baccano! (*Additando FAUST*) Senza di te avvizzisce.

FAUST (*eccitatissimo si mette in posa per una fotografia per la stampa*). Lasciatemi dire a questo bel momento « Sei

così bello: deh, arrestati! ». Una traccia di me resterà tra i Grandi, negli Annali del Quarto Stato. Nel presentimento di una sorte così benigna godo fin d'ora il mio attimo supremo! (*Muore e il suo corpo è portato via dalla Stampa*).

MEFISTOFELE. Nessun piacere gli bastava, non c'era fortuna che lo placasse; le forme mutevoli che corteggiava non gli hanno dato mai piacere. Il pover'uomo si attaccava a quelli che lo evitavano. Adesso tutto è finito. A cosa gli è servito il suo sapere?

M. C. (*rivolto alla macchina del fotografo*). Via luce irresistibile! divoratrice di magnesio, scatenatrice di nubi temporalesche, distruggitrice dell'Ego, fetida, dannata, non ci opprimere oltre!

Finale

Apoteosi del vero neutrone.

WAGNER ⁴⁰ (appare come la personificazione dello sperimentatore ideale; tiene in equilibrio su un dito una palla nera e parla con orgoglio). È nato il Neutrone, pieno di Massa e privo in eterno di Carica. Sei d'accordo, Pauli?



MEFISTOFELE. Quello che l'esperimento ha trovato – anche se la teoria non vi ha preso parte – ha sempre qualche valore sicuro e val la pena di darcisi anima e corpo. Buona fortuna a te, Ersatz ⁴¹, peso massimo: ti diamo con piacere il benvenuto! Ma la passione fila sempre le nostre trame, e Gretchen è il mio tesoro!



CORO MISTICO

Adesso realtà,
un tempo visione.
Che classicità,
grazia e precisione!
Accolta con cordialità,
onorata nei canti,
Eterna Neutralità
portaci con te!



Note al testo

Prologo

¹ Le sfere politropiche sono modelli matematici di sfere gassose calde rappresentanti stelle.

² L'Abbé Georges Lemaitre, astronomo belga che formulò la prima teoria dell'Universo in Espansione.

³ ... forma a pera. La teoria di Jeans sull'origine delle stelle doppie.

⁴ Il *Monthly Notices* della Royal Astronomical Society, in cui viene pubblicata la maggior parte degli articoli britannici di astrofisica teorica.

⁵ Il gas elettronico degenere di Fermi costituisce l'interno di certe classi di stelle (cfr. capitolo 7).

⁶ Simbolo che riassume la relazione di indeterminazione della Teoria dei Quanti $\Delta q \cdot \Delta p$, che si incontrerà più avanti nel testo.

⁷ Il Critico: il Professor Ehrenfest aveva un atteggiamento critico nei confronti di molte idee teoriche, in particolare nei confronti dell'ipotesi di Pauli sull'esistenza del neutrino.

⁸ *Jah, muss Ich sagen...* La lingua corrente nell'Istituto di Bohr era per lo più il tedesco, a causa dei numerosi visitatori provenienti dall'Europa centrale. Bohr lo parlava quasi perfettamente, però con dei danesismi. Una delle sue espressioni tipiche era « *muss Ich sagen* » (« debbo dire ») che in corretto tedesco avrebbe dovuto essere « *darf Ich sagen* » (« posso dire »: questo perché in danese « *darf* » si dice « *maa* » che si avvicina di più al tedesco « *muss* »).

⁹ « *Maa jeg spørge* » in danese significa « posso chiedere ».

¹⁰ « ... non per criticare ». Un'altra tipica espressione di Bohr che egli usava spesso quando non era d'accordo con il parere di un altro.

Parte prima

¹¹ « Ixismi » (in tedesco *Ixerei*) è una parola inventata da Einstein ed era usata spesso parlando di lavori che contenevano troppe complicazioni matematiche ma poca fisica (« *x* » è l'incognita dell'algebra elementare).

¹² E. Guth (che significa « buono ») e G. Breit (che significa « largo »).

¹³ Il fisico tedesco F. Hund, il cui nome (che significa « cane ») era spesso usato nell'espressione « lavorare come un cane ».

¹⁴ Fisici tedeschi che lavoravano alla Teoria Quantistica della Radiazione.

¹⁵ Psi-Psi Stern (in italiano Psi Psi-Stellato, $\psi\psi^*$) è una quantità importante nella fisica quantistica. Qui ci si riferisce a Otto Stern e W. Gerlach, fisici sperimentali molto noti.

¹⁶ Raggi beta: secondo l'ipotesi di Pauli il neutrino è una particella che accompagna sempre l'emissione di raggi beta provenienti dal nucleo.

¹⁷ Spin dell'azoto: secondo le idee di quel tempo, lo spin (rotazione assiale) del nucleo di azoto non poteva essere spiegato senza prendere in considerazione lo spin dell'ipotetico neutrino.

¹⁸ Si allude all'Università di Michigan, ad Ann Arbor, nel Michigan.

¹⁹ La Pulce del Monarca (Einstein) è la Teoria della Relatività Generale.

²⁰ Walter Mayer, matematico che aiutava Einstein nello sviluppo delle sue teorie.

²¹ I tensori sono simboli matematici usati nella Teoria degli Spazi Curvi.

²² La Figlia è la Teoria del Campo Unificato a cui Einstein lavorò negli ultimi trent'anni della sua vita, ma senza molto successo.

Parte seconda

²³ Camere di Wilson, ecc.: strumenti fisici usati nello studio dei raggi cosmici.

²⁴ W. Heisenberg (cfr. capitolo 5), che a quell'epoca si interessava alla Teoria dei Raggi Cosmici.

²⁵ Bruno Rossi e G. Hoffmann, fisici sperimentali che studiavano i raggi cosmici.

²⁶ Leon Rosenfeld, fisico teorico belga.

²⁷ Invariante di Gauge, una complicata nozione della fisica teorica: in tedesco si chiama *Eiche invariant*; la parola tedesca *eiche* significa anche quercia.

²⁸ Landau, cfr. W. PAULI, *Niels Bohr and Development of Physics*, New York, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1955, p. 70.

²⁹ I Buchi di Dirac (per la spiegazione si veda il capitolo 6).

³⁰ La Teoria dei Gruppi, ramo complicato della matematica usato nella Teoria dei Quanti.

³¹ Il Segno Falso allude all'errore che si fa quando si mette un + al posto di un —, o viceversa; errore che si commette spesso per distrazione nei calcoli matematici e porta naturalmente a risultati sbagliati.

³² La Relazione di Scambio (o Regola di commutazione): postulato fondamentale della meccanica quantistica di Heisenberg.

³³ Elettroni asinelli: espressione scherzosa per indicare un elettrone con massa negativa.

³⁴ Un fotone, o quanto di luce, può essere considerato un pacchetto rotante di energia.

³⁵ I bosoni sono particelle che si comportano secondo la statistica di Bose.

³⁶ Costante di Struttura Fine: il numero $1/137$ molto importante nella teoria dell'atomo.

³⁷ Energia negativa: una delle difficoltà matematiche che si incontrano nella Teoria dei Quanti.

³⁸ Singolarità: un'altra difficoltà matematica che si incontra nella Teoria dei Quanti.

³⁹ Nel 1926 fu scoperta la meccanica ondulatoria.

Finale

⁴⁰ Wagner: James Chadwick, fisico britannico che scoprì il neutrone (particella pesante neutra) nell'anno in cui fu presentato questo spettacolo.

⁴¹ *Ersatz*: il neutrone con la sua grande massa non può essere considerato un sostituto (*Ersatz*) del neutrino privo di peso.

Indice analitico

- Acido idrofluoridrico, 22
Addizione e sottrazione
 principio di, 102
 matrici, 102-106
Algebra non commutativa, 13,
 104-106
Analisi dimensionale, 152-154
Anderson, Carl, 149
 esperimento, 132
Antiparticelle, 14, 82, 118-136,
 150, 151
 esperimenti, 135-136
 teoria delle, 14, 131-136, 151
Aristotele, 130
Atkinson, Robert, 98
Azimutali, 54, 72
 linee nodali, 91
 vibrazioni, 91
- Balmer, J. J., 47, 48
 formula, 47-50, 52
Barriera di potenziale, 95-97, 98
Bethe, H., 142
Bevatrone, 134
Bitter, Francis, 119, 122
Bjerknes, 62
Bohr, Niels, 11, 12, 13, 26, 27,
 37-65, 65-66, 69, 72-73, 77, 78,
 79, 80, 83, 84, 94, 115-117,
 118, 131, 143
 Istituto, 10, 55, 64, 74
 modello atomico, 12, 47, 73
 teorie di, 27, 94, 118, 151
Boltzmann, Ludwig, 15, 58, 78
Bottiglia di Fermi, 144-145
Brackett, Frederick, 48
Bragg, W. e Bragg, W. L., 86
Broglie, Louis Victor de, 12, 83-99
 modello atomico, 90
 onde-pilota, 12, 84, 90, 97,
 100, 114, 115
Camera a nebbia, 113-114, 142
Camera di Wilson (*cfr.* Camera
 a nebbia)
Carlsberg
 borse di studio, 56, 61
 laboratorio di ricerca, 56
Casimir, H., 58, 59, 63
Catastrofe Ultravioletta, 25, 27,
 44
Cattura K, processo di, 115-116
Chadwick, James, 163, 165
 esperimenti, 79, 139
 scoperta del neutrone, 79
Clausius, Rudolph, 25
Compton, Arthur, esperimenti,
 11, 35-36
Condon, E. U., 60, 95
Conversi, M., esperimenti, 149
Coordinate cartesiane, 115
Cosmotrone, 134
Costante di Boltzmann, 78
Costante di gravitazione, 44, 154-
 155
Costante di Planck, h , 29, 85,
 141, 153
Costante di Rydberg, R , 48, 151
Costante di struttura fine, 55,
 191, 200
Costante di Yukawa, y , 149, 150,
 152
Coulomb, Charles de, 38, 43, 69,
 95, 126, 131, 146, 149
Cowan, C., 79, 143, 164
Critchfield, Charles, reazione H-H,
 142
- Darwin, C., 165
Davisson, G., 86
Decadimento beta, teoria di Fer-
 mi, 139-141, 146, 163
Delbrück, Max, 58, 61, 164, 166
Derivate
 prime, 123-124
 secondo, 122-124

- Diagramma**
 Bohr-Coster, 80
 Mayer-Jensen, 80
Dirac, P. A. M., 13, 58, 74, 82, 118, 119-136, 150, 153, 154, 165
 equazione lineare, 124-125
 esperimenti, 131
 teoria delle antiparticelle, 131-136, 150-151
 unificazione della Meccanica ondulatoria della Teoria della Relatività Ristretta, 151
 unificazione della Teoria della Relatività e della Teoria dei Quanti, 153
 « Divergenza », 155-156
Eddington, A., 165
Effetto Compton, 35-36
Effetto fotoelettrico, 29-34
 esperimenti, 15
 leggi, 11, 31-34
 Einstein, 34
Effetto Zeeman, 73
Ehrenfest, Paul, 58, 59, 79, 164, 165
 meccanica statistica, 58
 teoria degli invarianti adiabatici, 58
Einstein, Albert, 11, 27, 31, 34, 54, 56, 107-108, 115-117, 124-125, 137, 153
 effetto fotoelettrico
 formula, 32-33
 principi, 32-34
 meccanica relativistica, 125
 Principio di Conservazione di Massa ed Energia, 77, 79, 126, 134, 156, 163
 Teoria della Relatività, 26-27, 44, 107
 Teoria Generale della Relatività, 43, 129
Elettrodinamica, 63, 153
Electrone rotante, 73-76, 80 (*cf.* anche Spin elettronico)
Elio, atomi, 41, 76
Emissione beta, teoria di Fermi, 139
Emissione elettromagnetica, teoria classica, 43
Energia cinetica, 16-17
Energia elettromagnetica quantizzata, 44
Energia raggiante, 11, 20, 24-25, 27, 110, 115-116
 quanti dei luci, 11, 12
Esperimento ideale (*Gedankenexperiment*), 21-23
Euclide, 108, 111
Fermi, E., 137-146, 147, 163
 costante g , 141, 149, 151
 esperimenti sull'energia nucleare, 64-65, 143
 interazioni deboli, 147
 studi sul gas degenerare di elettroni, 138
 teoria della trasformazione delle particelle, 138-143
Feynman, Richard, 157
Formule dimensionali, 152-153
Forze di scambio
 calcolo di Ivabienko e Tamm, 147-149
 teoria di Heitler e London, 147-149
Fowler, R. H., 89-90, 138, 165
Franck, J., 69
Frisch, Otto, 65
Gamow, Barbara, 164
Gamow, George, 27, 58-63, 64, 88-90, 95, 164, 165
Geissler, Heinrich, 46
Gell-Mann, 157
Germer, L. H., 86
Gibbs, Josiah Willard, 15
Gordon, W., equazione d'onda, 124
Goudsmit, Samuel, 73, 119
Gurney, R. W., 60, 95
Hann, Otto, 65
 esperimenti, 65-66
Heisenberg, Werner, 56, 100, 155, 157
 algebra non commutativa, 13
 esperimenti, 108-111
 meccanica delle matrici, 101-106
 modello atomico, 100

- principio di indeterminazione, 100-117
 formulazione, 63
 Heitler, W., 147
 Helmholtz, Hermann von, 25, 92
 esperimenti, 92-93
 Houtermans, Fritz, 98

 Idrogeno, 12, 16, 22, 71, 80, 142, 145, 147
 atomo, 47-50, 54, 70, 92, 132, 142, 147
 equazione lineare di Dirac, 125
 orbite, 37, 66, 118
 teoria di Bohr, 151
 Interazione di Fermi generalizzata, 143
 Interazioni deboli, 141, 147
 Iperoni, 135
 Ivanienko, D., 147

 Jeans, Sir James, 18, 23, 24, 27, 165
 cubo di, 20, 23, 24, 27, 115
 formula di, 29
 Jensen, Hans, 80, 81, 94

 Kapitza, Piotr, 121
 Kirchhoff, Gustav, 25
 Klein, O., 58, 62
 equazione d'onda, 124
 formula, 120
 Kramers, H. A., 58

 Landau, L., 58, 165
 Lavoro di estrazione, energia, 34
 Leggi del Moto di Newton (Prima e Seconda), 101
 Leggi di interazione di Fermi, 141-143, 147, 152
 costante di Fermi, 141, 149, 151
 costante di Yukawa, 149
 Linderström, Lang, 56
 Livelli elettronici, quote per, 69-73
 London, F., teoria delle forze di scambio, 147
 Lyman, Theodor, 48

 Magellano, 107
 Massa negativa, 126-129, 131-133
 Matrici, 101-106
 Maupertuis, P. L. M., 51
 Maxwell, James C., 15, 78
 curve, 17
 Mayer, M. Goepfert, 80, 81, 94
 Meccanica classica (*cf.* Meccanica newtoniana)
 Meccanica newtoniana, 16, 38, 40, 97, 98, 99, 101-107, 112, 114, 122, 123, 153
 equazione, 50, 106, 122, 124
 Meccanica ondulatoria, 12, 60, 63, 92-98, 99-101, 106
 equazione, 13, 106, 123, 124
 Meccanica statistica, principi fondamentali, 16, 18, 58
 Meitner, Lise, 64, 143
 Mendeleev, D. I., 73
 Sistema Periodico degli Elementi, 80
 Mesoni, 135, 138, 149-150
 Michelson, A. A., 44
 esperimenti, 107
 Millikan, Robert A., 31, 165
 Milne, E. A., 165
 Minkowski, H., 123
 Modelli atomici, 11, 12, 73
 Bohr, 9, 47, 65
 de Broglie, 90
 Heisenberg, 100
 Pauli, 73
 Rutherford, 11, 40-43, 44-45
 Schrödinger, 90
 Thomson, 37-42
 Moto termico, 15-17
 Mott, N. F., 58
 Muoni, 149, 151

 Neddermeyer, S., 149
 Neutrino, 79-81, 139-145, 147, 151, 163, 165
 anti-, 140
 Newton, Sir Isaac, 9, 101
 costante di gravitazione, 44, 154-155
 legge del moto, 123
 equazione, 123
 Legge di Gravitazione Universale, 27, 43, 137

- Nishina, Y., 58, 120
 formula, 120
 Numeri magici, 80
 Numero quantico principale, 54
- Onde elettromagnetiche, 18, 32, 83, 92, 111, 114, 122, 139
 corte, 27
 energia, 27
 vibrazioni, 19-20
- Onde-pilota (*cf.* Broglie, Louis Victor de)
- Oppenheimer, J. Robert, 58, 165
- Orbite, 33-66, 118
 circolari, 43, 50, 51, 53, 94
 elettrone, 84, 113
 ellittiche, 43, 52-55, 94
 energia, 53-54
 quanti, 12, 37, 50, 69, 72, 74, 84-85, 94, 113
- Pacchetti di energia (*cf.* Quanti di luce)
- Pancini, E., 149
- Particella (*cf.* anche Antiparticelle)
 traiettoria, 113
 trasformazioni, 137-145
- Particelle alfa, 40-43, 76, 95-98
 diffusione, 19, 43, 138
 formula di Fowler, 138
 moto, 98
 Rutherford, 41
 esperimenti, 95
- Particelle browniane, 22
 moto, 111
- Paschen, Friedrich, 48
- Pauli, Wolfgang, 58, 59, 67-82, 157, 158, 163, 165
 Effetto, 69, 138
 lacuna, 130
 modello atomico, 73
 neutrino, 79, 164
 Principio, 68-82, 129
 emendato, 74
 secondo, 132
- Piccioni, O., esperimenti, 149
- Pioni, 149
- Pitagora, 154, 156
- Planck, Max, 11, 13, 14, 15-36, 40, 44
 costante h , 29, 85, 141, 153
 curve teoriche, 29
 effetto fotoelettrico, 30-34
 formula, 29
 legge dei quanti di luce, 40, 50-52
 teoria dei quanti, 26-29
 teoria del corpo nero, 25
- Planckiana, asteroide, 26
- Poincaré, Henri, 154, 157
- Powell, C. F., 149
- Principio della Minima Azione (*cf.* anche Maupertuis), 29
- Principio di Equipartizione, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 25, 29
- Principio di Esclusione (*cf.* Principio di Pauli)
- Principio di Indeterminazione di Heisenberg, 100-117
- Principio di Snellius, 97
- Quanti di luce, 15-36, 37, 40, 44, 46, 48, 49, 50, 63, 111, 139
- Quantità di moto, 14, 101, 105, 111-115
- Radiazione, 18, 19, 29, 30, 76, 115
 effetto della pressione della, 110
 frequenza di, 12
 infrarossa, 18
 quanto, 29
 termale, 18, 19
 ultravioletta, 18
- Raleigh, Lord, 18, 27
 formula, 29
- Reattore a fissione, 144
- Reazione a catena, 143
- Reazione H-H, 142
- Reazioni termonucleari, 98-99
- Reines, Fred, 79, 143, 164
- Righe spettrali, 12, 13, 38, 47-48, 55, 73, 101, 106, 125, 140
- Ritz, W., 47
- Rosenfeld, L., 58, 63
- Rosseland, S., 58, 62
- Russell, Bertrand, 157
- Rutherford, Lord Ernest, 40, 76, 88

- modello atomico, 11, 40, 43-44
 particelle alfa, 40-43
 esperimenti, 95
 formula per la deviazione, 138
 primi studi sulle reazioni nucleari, 63-65
 teoria del nucleo atomico, 40-44
- Schrödinger, Erwin, 99, 100, 114
 equazioni, 90-94, 106, 118, 122, 124, 147
 meccanica ondulatoria non relativistica, 123
 equazione, 124
 modello atomico, 90
 teoria della meccanica ondulatoria, 13, 99, 106
- Schwinger, Julian, 157
- Seconda Legge di Keplero, 54
- Segré, Emilio, 131
- Slater, J. C., 58, 165
- Solberg, 62
- Sommerfeld, Arnold, 26
 orbite ellittiche, 52-55
 formula, 52-54
- Spettri, 13, 38-40, 44, 55, 137
 energia delle particelle beta, 76, 140
 idrogeno, 47
 raggi beta, 79
- Spin elettronico (*cf. anche* Elettrone rotante), 119, 124, 125, 129
- Stern, Otto, esperimenti, 87
- Struttura fine, 55
 costante, 55, 191, 200
- Tamm, I., 147
- Teller, Edward, 64
- Teoria Cinetica del Calore, 15
- Teoria della Gravitazione Universale, 137
- Teoria della Relatività, 9, 27, 44, 77, 107, 118, 119, 122, 124, 125, 153
- Teoria della Relatività Ristretta, 9
- Teoria Generale della Relatività, 9
- Teoria matematica delle trasformazioni, 139, 140
- Termodinamica, 23-26
- Thomson, J. J., 37-40, 86
 esperimenti, 37-40
 modello atomico, 38-40, 42-43
- Thomson, Sir George, 86
- Tolman, R. C., 58, 165
- Traiettorie, 51, 52, 108-113
 esperimenti, 108-111
 lineari, 107, 114
- Tubi di Geissler, 46
- Tuve, Merle, esperimenti, 64-65
- Uhlenbeck, George, 73, 119
- Unificazione della Teoria della Relatività e della Teoria dei Quanti, 119, 122-130
- Uranio, 95
 isotopi, 80
 modello atomico, 73
 nuclei, 98
 prima reazione a catena, 143
- Weizsäcker, Carl von, 58, 142
- Yukawa, Hideki, 146, 149-150
 costante, γ , 149, 150, 152
 mesoni, 149-150
 teoria delle interazioni forti, 151
- Zeeman, effetto, 73