

ATTI
DELLA
SOCIETÀ ITALIANA PER IL PROGRESSO DELLE SCIENZE

pubblicati per cura

del Segretario Prof. LUCIO SILLA

DICIOTTESIMA RIONIONE

FIRENZE - 18-25 Settembre 1929

VOLUME I.



ROMA

SOCIETÀ ITALIANA PER IL PROGRESSO DELLE SCIENZE

Via del Collegio Romano 26

1930

VIII

I Fondamenti sperimentali delle nuove teorie fisiche.

Prof. E. FERMI.

Nella conferenza precedente sono state mostrate le profonde innovazioni concettuali che stanno a fondamento dei principi della nuova fisica. Esse, a chi vi si trovi di fronte per le prime volte, saranno sembrate certamente talmente vaste e sconvolgenti da far sorgere spontanea la curiosità di sapere quali siano i risultati che le nuove teorie hanno permesso di raggiungere; poichè una simile rivoluzione nei concetti più fondamentali della fisica può giustificarsi soltanto con molti, vari ed importanti risultati. Io cercherò di esporre in modo sintetico questi risultati. Per la ristrettezza del tempo non potrò spiegare la catena logica che conduce dalle premesse della teoria alle sue applicazioni; dovrò invece limitarmi a metterle in evidenza il significato e la portata.

Nella vecchia teoria dei quanti si erano potuti interpretare, e, in parte, anche prevedere un grande numero di fenomeni, tanto da non lasciar dubbio che si fosse sulla buona strada. Non si poteva però illudersi che bastassero perfezionamenti e ritocchi per correggerla delle sue manchevolezze; poichè la teoria conteneva in sè delle contraddizioni logiche che, poco osservate nei primi tempi, nella foga di scoprire nuovi risultati, diventavano col passare del tempo, sempre più sgradevoli.

Citerò l'esempio della notissima discussione tra la teoria elettromagnetica ondulatoria e la teoria dei quanti di luce. Anche la stessa teoria dell'atomo di Bohr era del resto piena di contraddizioni; in quanto che, mentre da una parte si applicava la meccanica ordinaria al calcolo del movimento degli elettroni, se ne negava d'altra parte la validità in moltissimi casi e non si avevano chiare idee sopra le leggi che avrebbero dovuto sostituirsi ad essa.

Nonostante queste manchevolezze, certamente gravissime, si era riusciti a interpretare qualitativamente, tra l'altro, quasi tutti i fenomeni della spettroscopia; in molti casi anzi si arrivava perfino a calcoli quantitativi, come, p. e., per l'atomo di idrogeno. Per gli altri atomi invece si ottenevano soltanto risultati approssimati; e ciò non solo per difetto dei metodi matematici di appros-

simazione, ma anche per un'evidente insufficienza delle premesse fisiche per il calcolo completo dei fenomeni.

Prima di parlare dei nuovi risultati che si sono ottenuti con la meccanica quantistica dirò che essa ha permesso di confermare tutti i risultati della vecchia teoria dei quanti che erano d'accordo con l'esperienza, per mezzo di una teoria completamente priva di interne contraddizioni. Nello stesso ordine di fenomeni, dove la vecchia teoria dava e poteva dare soltanto risultati qualitativi, la nuova ha portato la precisione quantitativa. Valga ad esempio il calcolo quantitativo dell'energia di ionizzazione dell'atomo di elio, problema che si è tentato a lungo e vanamente di risolvere con la vecchia teoria; il calcolo fatto col metodo di Schroedinger e spinto fino alla quarta approssimazione ha invece già permesso di ottenere teoricamente un valore discosto da quello sperimentale di poco più dell'1‰. Come questo, si potrebbero citare altri numerosi esempi in cui la meccanica quantistica porta alla precisione quantitativa, dove la vecchia teoria dava soltanto risultati qualitativi. Così nella teoria degli spettri di bande, nella teoria degli atomi con più elettroni, e perfino nella stessa teoria dell'atomo di idrogeno, che era sempre stata considerata, per così dire, la rocca forte della vecchia teoria dei quanti. Notiamo incidentalmente che il fatto che la vecchia teoria dei quanti, pur non arrivando a dare risultati quantitativamente esatti, avesse tuttavia permesso di raggiungere conclusioni assai importanti, non sembra oggi casuale; si può infatti dimostrare che essa rappresenta una prima approssimazione dei risultati della meccanica quantistica, prima approssimazione che in parecchi casi si avvicina già abbastanza alla realtà.

Ma non vogliamo qui soffermarci sopra quelle conclusioni della meccanica quantistica, che possono in qualche modo considerarsi come un perfezionamento di quelle della vecchia teoria, per passare invece all'esame di quanto vi è in essa di essenzialmente nuovo. Tra questi risultati, uno dei più caratteristici ed importanti è la spiegazione della possibilità delle combinazioni chimiche omeopolari. Le molecole, come tutti sanno, si possono suddividere in polari, rappresentate tipicamente dalle molecole saline, e in omeopolari, che comprendono gli altri tipi di legame chimico. Le molecole polari si possono considerare costituite schematicamente dall'insieme di due o più ioni, tenuti insieme dall'attrazione elettrostatica che si esercita tra di essi. È impossibile però spiegare mediante una attrazione elettrostatica molecole, quali p. es. quella di idrogeno, che sono costituite dalla riunione di due atomi neutri.

E anche se si tiene conto delle forze mutue che si esercitano fra i due nuclei e i due elettroni dei due atomi di idrogeno, si trova che tali forze sono assolutamente insufficienti a spiegare la stabilità del legame della molecola H_2 . A questo punto interviene la meccanica quantistica. Secondo questa non esiste alcun criterio per distinguere tra di loro i due elettroni dei due atomi. Non posso qui entrare in dettagli per la brevità del tempo disponibile. Accennerò soltanto al risultato, che può interpretarsi come se avvenisse un continuo scambio tra gli elettroni dei due atomi. Si trova che, per effetto di questo ha origine tra i due atomi una forza attrattiva, sufficientemente grande per spiegare come la molecola stia insieme. Sopra queste stesse basi non si è solamente riusciti a spiegare la possibilità della molecola d'idrogeno, ma anche di un grande numero di altre molecole e si è riusciti inoltre a chiarire il significato della valenza chimica dal punto di vista elettronico, anche per quegli atomi, come p. es., il Cloro, che hanno diverse valenze, alcune elettropositive e altre elettronegative.

Naturalmente esistono alcuni composti chimici che non possono propriamente considerarsi nè polari nè omeopolari, ma rappresentano dei casi intermedi tra questi due.

Un'altra applicazione molto recente, che non trova, essa pure, corrispondente nella teoria classica è quella fatta da Gamow sulla disintegrazione dei nuclei radioattivi. Consideriamo un punto che si trovi in una posizione di equilibrio stabile; p. es., un punto pesante mobile lungo una linea avente in A un minimo e dalle due parti di A due massimi B e C di eguale altezza. Supponiamo che inizialmente il punto si trovi nella posizione di equilibrio stabile A ed imprimiamogli una certa velocità, non sufficiente però per fargli scavalcare le due punte B e C, il punto, secondo la meccanica classica, si metterà a compiere delle oscillazioni intorno ad A, che hanno ampiezza tanto maggiore quanto maggiore è l'energia che è stata impressa al punto. In ogni modo esso non potrà mai uscire, per quanto si aspetti, dal tratto B C, scavalcando una delle due punte B oppure C.

Le cose vanno in modo differente secondo la meccanica quantistica. Per rendercene conto basta che pensiamo alla sua interpretazione ondulatoria, datane da Schroedinger. Secondo tale interpretazione, una differenza di potenziale corrisponde a una differenza di indice di rifrazione, in modo che, grossolanamente, possiamo pensare che la linea su cui si muove il punto rappresenti il grafico dell'indice di rifrazione. Ora si sa che quando la luce incontra una

brusca variazione dell'indice di rifrazione una parte di essa viene riflessa; la frazione riflessa è tanto più grande quanto maggiore è la variazione dell'indice di rifrazione. Per quanto sia grande la variazione, però, una parte della luce viene sempre trasmessa.

Supponiamo ora di avere della luce nel tratto compreso tra B e C. Essa si rifletterà sopra le due variazioni di potenziale rappresentate da B e C. Se le riflessioni potessero considerarsi perfette la luce verrebbe riflessa alternativamente tra B e C senza uscir mai da questo intervallo. Questo caso corrisponderebbe alla meccanica classica, secondo cui il punto materiale non può uscire dal tratto B C. Abbiamo detto però che le riflessioni non sono perfette e che una parte, se pure molto piccola vien sempre trasmessa, per modo che la luce seguita per un po' a riflettersi tra B e C, ma ad ogni riflessione la quantità che si riflette diventa minore, perchè una piccola parte della luce viene trasmessa all'esterno di B C. In questo modo, aspettando un tempo sufficientemente lungo, tutta la luce che li trovava tra B e C verrà infine a passare all'esterno. Ciò si interpreta nella meccanica quantistica di un punto materiale dicendo che la probabilità che il punto si trovi tra B e C, la quale corrisponde, nel paragone ottico alla energia luminosa contenuta sul tratto B C, va diminuendo col tempo e finisce col ridursi a 0. Il caso delle particelle α è, secondo Gamow, simile a quello qui descritto. La particella è legata al nucleo in modo tale che, secondo la meccanica classica, non ne potrebbe mai uscire anche aspettando un tempo infinitamente lungo. Ma siccome abbiamo visto che, nella meccanica quantistica un punto materiale può traversare in determinate circostanze, una soglia di potenziale più alta della sua energia cinetica, troviamo che esiste una certa probabilità che la particella α abbandoni il nucleo e che l'atomo si disintegri.

La teoria, svolta su queste basi da Gamow, ha permesso così di spiegare, almeno nelle sue linee essenziali, il processo della disintegrazione radioattiva, ritrovando tra l'altro la legge di Geiger, che collega tra di loro la vita media con la velocità di emissione della particella α .

Un'altra teoria caratteristica della meccanica quantistica, è quella dell'effetto Ramsauer.

Se si proiettano degli elettroni molto veloci contro degli atomi gli elettroni li traversano senza venire molto deviati dalla loro traiettoria, per effetto della loro grande velocità.

Se la velocità degli elettroni diminuisce, la deviazione prodotta nel passaggio attraverso l'atomo diventa maggiore. Sembra che, via via che diminuisce la velocità, la deviazione dovesse sempre aumentare. Ramsauer ha invece trovato che, per il caso di molti atomi, particolarmente quelli dei gas nobili, le cose vanno in modo affatto diverso, e precisamente la deviazione che subiscono gli elettroni traversando gli atomi col decrescere della velocità degli elettroni, va in un primo tempo aumentando, come si sarebbe indotti a prevedere, ma, quando la velocità è molto piccola, torna di nuovo a diminuire, tanto che gli elettroni molto lenti possono traversare gli atomi senza venire praticamente deflessi. Questo fenomeno, incomprensibile dal punto di vista della meccanica classica, trova una naturalissima interpretazione nella meccanica ondulatoria.

Risulta infatti che a un elettrone in moto corrisponde, nella meccanica ondulatoria, un sistema di onde di lunghezza d'onda tanto minore quanto più grande è la velocità del punto. Se l'elettrone è molto lento, la lunghezza d'onda corrispondente è assai grande e, per elettroni lentissimi la lunghezza d'onda diventa notevole più grande delle dimensioni di un atomo. Ora è chiaro, pensando al paragone ottico, che un sistema di onde viene poco disperso da un ostacolo, come sarebbe nel caso nostro l'atomo, piccolo in confronto alla lunghezza d'onda. Ciò corrisponde appunto al fatto che gli elettroni lenti vengono poco deviati dagli atomi.

Un'altra teoria che presenta notevole analogia con quella dell'effetto Ramsauer, ma che ha già e soprattutto avrà forse in futuro importanza molto maggiore è relativa al calcolo del cammino libero medio degli elettroni nei metalli. È noto che la teoria della conduzione dei metalli ha compiuto negli ultimi anni un grande progresso soprattutto in seguito ai lavori di Sommerfeld, che ha ripreso valendosi delle moderne statistiche, l'antica concezione del gas elettronico di Drude, ottenendo così la spiegazione di svariati fenomeni della conduzione metallica che sembravano, colle vecchie teorie, condurre a contraddizioni insolubili.

Uno dei problemi più essenziali per la teoria dei metalli era quello del calcolo della loro conducibilità elettrica. Per risolvere questo problema è necessario conoscere il valore del cammino libero medio degli elettroni interni del metallo. È facile convincersi che se gli atomi del metallo fossero disposti in un reticolo perfettamente regolare, la diffusione degli elettroni interni al metallo, per effetto degli urti contro gli atomi dovrebbe ridursi a 0. Infatti,

considerando al solito le proprietà di un elettrone analoghe a quelle di un'onda che si muova in un mezzo di indice di rifrazione variabile, abbiamo una diffusione nulla se il reticolato è perfetto. Alla diffusione nulla corrisponde cammino libero medio infinito e quindi conducibilità elettrica infinita. Naturalmente, anche se consideriamo un cristallo costruito in modo perfetto, i suoi atomi non saranno situati esattamente ai vertici del reticolo altro che allo 0 assoluto; per tutte le altre temperature essi si scosteranno di un po' dalle posizioni di equilibrio dando luogo a un reticolato tanto più irregolare quanto più elevata è la temperatura. La diffusione delle onde che rappresentano gli elettroni dei metalli è dovuta appunto a questa irregolarità ed è perciò più intensa per temperature elevate che per temperature basse.

Sopra queste basi è stato possibile svolgere la teoria della conducibilità elettrica, spiegandone la dipendenza dalla temperatura. Si noti anche che questa teoria rende conto in modo naturale del fatto che la conducibilità elettrica delle leghe è in generale minore di quella dei metalli puri. Infatti nel mescolare i metalli si viene ad avere un reticolato atomico alquanto irregolare, poichè sono mescolati irregolarmente gli atomi dei due metalli che costituiscono la lega.

A questa irregolarità del reticolo atomico corrisponde una forte diffusione degli elettroni e quindi una bassa conducibilità. Sempre a proposito della diffusione degli elettroni da parte di un reticolato cristallino ricorderò anche la celebre esperienza di Davisson e Germer, di cui ha già parlato il prof. Persico, e che porta forse la prova più diretta e impressionante della teoria ondulatoria della materia.

Già prima che Heisenberg e Schrödinger fondassero la nuova meccanica, era stato enunciato da Pauli, in base all'osservazione della struttura del sistema periodico degli elementi il così detto principio di esclusione. L'importanza di questo principio, per la comprensione dei fenomeni atomici, può considerarsi fondamentale. Esso dà infatti la ragione per cui gli elettroni di un atomo non si precipitano tutti nell'orbita più stabile che è quella più prossima al nucleo ma si dispongono intorno ad esso in varie orbite dando luogo a tutte le diverse particolarità del sistema periodico degli elementi. Anche la teoria degli spettri degli atomi e delle molecole con più elettroni di valenza si appoggia in gran parte sopra il principio di Pauli, che ha infine permesso di costruire la teoria del gas elettronico sul quale si fonda la moderna teoria dei metalli. Il

principio di Pauli afferma che ogni orbita elettronica quantisticamente possibile può contenere al massimo un solo elettrone. Anche questo principio non è comprensibile altro che con l'aiuto della meccanica quantistica. Per mezzo di questa teoria si può infatti dimostrare che se un gruppo di elettroni soddisfa inizialmente al principio di Pauli, il principio resta automaticamente soddisfatto anche in seguito.

L'interpretazione delle proprietà spettroscopiche ha anche reso necessario attribuire agli elettroni un momento magnetico (ipotesi dell'elettrone rotante di Uhlenbeck e Goudsmit); se non si ammettesse questa proprietà dell'elettrone resterebbe inspiegata tutta la struttura del sistema periodico, poichè i periodi, invece che di otto atomi, verrebbero a essere costituiti da quattro soltanto. Ora nella vecchia teoria dei quanti il momento magnetico dell'elettrone doveva essere postulato come una proprietà indipendente non collegata in alcun modo alle altre proprietà dell'elettrone. Un grande progresso a questo proposito è stato fatto dalla teoria dell'elettrone rotante di Dirac, basata sui concetti della meccanica quantistica.

Non potendo qui entrare in dettagli sopra questa teoria, mi limiterò ad eccennare che il momento magnetico dell'elettrone non si presenta in essa come una ipotesi supplementare, ma come una conseguenza naturale della fusione della meccanica quantistica e della teoria della relatività.

Accenniamo da ultimo al fatto che anche i due gruppi di fenomeni dei quanti di luce e della teoria ondulatoria trovano oggi, nella meccanica quantistica, una interpretazione unitaria e armonica grazie al principio, introdotto da Dirac, di considerare come un unico sistema il campo di radiazione e gli atomi emittenti o assorbenti.

Ho cercato di dare con questo una idea sommaria delle più importanti applicazioni della meccanica quantistica. Tali risultati, torno a ripeterlo, sono ottenuti con un processo rigorosamente logico, senza i continui compromessi e le continue ipotesi supplementari che hanno caratterizzato lo sviluppo della vecchia teoria dei quanti e si ha perciò oggi molto più che in passato, la sensazione di una costruzione teorica stabile.
