

I fondamenti sperimentali della nuova meccanica atomica

Quando, nei primi anni del nostro secolo, i fisici incominciarono a interessarsi seriamente ai problemi atomici, due questioni principali si presentarono al loro studio. Occorreva infatti in primo luogo ricercare quali fossero gli elementi costitutivi dell'atomo; in secondo luogo scoprire le leggi e il comportamento di tali elementi. Il primo problema, già in parte affrontato dai fisici del secolo scorso, trovò la sua risoluzione definitiva grazie principalmente ai lavori di Rutherford. Secondo i suoi risultati, che sono poi sempre stati confermati dalle indagini ulteriori, dobbiamo distinguere nell'atomo un nucleo centrale, cioè un corpuscolo carico di elettricità positiva, ed un certo numero di elettroni carichi negativamente. Ciò che distingue gli uni dagli altri gli atomi dei diversi elementi chimici, è il numero di elettroni che essi contengono, e che prende il nome di *numero atomico*. Così nell'atomo di idrogeno, che ha numero atomico 1, abbiamo il nucleo e un solo elettrone; siccome l'atomo, nel suo complesso, deve essere elettricamente neutro, la carica positiva del nucleo di idrogeno dovrà essere eguale alla carica negativa del suo unico elettrone. L'atomo di elio ha numero atomico 2, e contiene quindi due elettroni e il nucleo; siccome l'atomo deve essere neutro, il nucleo di elio dovrà dunque avere carica doppia, salvo il segno, di quella dell'elettrone. Se si considera infine l'atomo più complesso, l'uranio, si trova che esso contiene 92 elettroni, in modo che la carica elettrica del nucleo di uranio dovrà equivalere a 92 volte la carica elettrica dell'elettrone. In tutti gli atomi la massa del nucleo è sempre molto grande (qualche migliaio di volte) in con-

fronto alla massa di tutti gli elettroni dell'atomo presi insieme; per modo che il centro di gravità dell'atomo viene praticamente a coincidere col nucleo. In conseguenza, se tutto l'atomo non è animato da un movimento di insieme, il nucleo starà fermo, mentre gli elettroni gireranno intorno ad esso in orbite più o meno complicate.

Trovati così gli elementi di cui sono costituiti gli atomi, restava il più arduo problema di determinare le leggi a cui essi soddisfano. Questo secondo problema è ancora in evoluzione, e soltanto oggi si incomincia ad avere la sensazione di non essere lontani dalla sua soluzione.

L'ipotesi più naturale che si è indotti a fare quando ci si trova di fronte a qualche cosa di sconosciuto, è che il suo comportamento sia analogo a quello di cose simili meglio note. Così la prima ipotesi sul comportamento dell'atomo che abbiamo descritto, sarà che il suo nucleo e i suoi elettroni si muovono, sotto l'azione delle forze attrattive e repulsive che si esercitano tra di essi, secondo la legge di Coulomb, obbedendo ai principi della meccanica classica. Secondo questa ipotesi l'atomo ci si presenterà dunque come un minuscolo sistema planetario (avente il diametro dell'ordine di grandezza di un centomillesimo di cm.) in cui il nucleo, che sta fermo nel centro dell'atomo, corrisponde al Sole, mentre gli elettroni che girano intorno ad esso corrispondono ai pianeti. Siccome poi gli elettroni non sono altro che delle cariche elettriche in movimento, potremo pensare che essi producano degli effetti magnetici ed elettromagnetici, calcolabili per mezzo delle consuete leggi dell'elettrologia.

Non sfuggerà a nessuno che in questo complesso di ipotesi è contenuta una ardita e pericolosa estrapolazione. Le leggi della meccanica e dell'elettrologia sono state infatti dedotte in base ad esperienze fatte su corpi aventi dimensioni enormi a confronto di quelle di un atomo; e generalizzare tali leggi alla fisica dell'atomo potrà essere lecito soltanto dopo che esse, anche nel campo dell'atomo, saranno state assoggettate a un accurato controllo sperimentale.

Ora è senz'altro evidente che le leggi dell'elettrologia e della meccanica non possono essere valide senza modificazioni nel mondo atomico. Consideriamo p. es. il caso di un atomo di idrogeno; il suo unico elettrone, attirato dal nucleo con

forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza, descriverà attorno ad esso, secondo le leggi della meccanica, un'orbita ellittica, di cui il nucleo occupa uno dei fuochi. Si sa d'altra parte dalle leggi dell'elettrologia che una carica elettrica, che non si muova di moto rettilineo ed uniforme, irradia sempre nello spazio una certa quantità di energia elettromagnetica; concludiamo dunque che anche l'elettrone che gira intorno al nucleo dell'atomo di idrogeno dovrebbe perdere continuamente energia irradiandola nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche. In conseguenza di questa perdita di energia, l'orbita dell'elettrone dovrebbe andare via via restringendosi, fino a che l'elettrone andrebbe a cadere nel nucleo. Siccome questo fatto, che porterebbe a un completo cambiamento di natura dell'atomo, certamente non avviene, si deve dedurre che, o le leggi della meccanica, o le leggi dell'elettrologia, oppure le une e le altre, non sono applicabili senza modificazioni nel mondo atomico.

Nel 1913 Niels Bohr di Copenaghen tentò di risolvere queste difficoltà proponendo le sue celebri ipotesi per il calcolo dei fenomeni atomici. Secondo queste ipotesi il calcolo delle orbite degli elettroni di un atomo viene ancora fatto in base alle leggi della meccanica ordinaria: si ammette però che, non tutte le orbite prevedibili per mezzo della meccanica possano venire effettivamente descritte dagli elettroni, ma soltanto una successione discreta, che costituisce la successione degli stati quantici dell'atomo. Ad ogni stato quantico corrisponde anche naturalmente una determinata energia dell'atomo, la cui energia è pertanto suscettibile di assumere soltanto certi valori discreti, detti livelli energetici.

Bohr ammette che quando l'atomo si trova in uno stato quantico, esso non irradia energia; ciò è in contraddizione coi principî ordinari dell'elettrodinamica, poichè, secondo questi, al movimento degli elettroni dell'atomo dovrebbe necessariamente corrispondere una emissione di onde elettromagnetiche. Invece secondo Bohr l'emissione di radiazioni da parte dell'atomo avviene con un processo discontinuo che prende il nome di salto quantico; egli ammette infatti che, quando l'atomo non si trova nello stato quantico di minima energia, esso possa passare bruscamente dallo stato in cui si trova a uno stato di energia inferiore, emettendo, sotto forma di

radiazione, la differenza tra le energie dei due stati. Secondo la ordinaria elettrodinamica, la frequenza della radiazione emessa dall'atomo, dovrebbe essere eguale a quella dei movimenti degli elettroni interni all'atomo; invece secondo Bohr la frequenza emessa si calcola semplicemente dividendo la quantità di energia emessa nel salto quantico (cioè la differenza tra le energie dei due stati tra cui avviene il salto) per la costante universale h di Planck. La frequenza così calcolata è differente da quella dei moti descritti dagli elettroni, e si può dimostrare che le due frequenze vengono a coincidere solo nel caso limite di frequenze molto piccole.

Il complesso delle ipotesi di Bohr, che abbiamo qui brevemente elencate, si presenta assai insoddisfacente dal lato logico, poichè si ha in esso una mescolanza dei concetti classici e dei nuovi concetti quantistici, senza che sia chiaro il criterio che limita l'applicabilità degli uni e degli altri. Ciò nonostante le ipotesi di Bohr hanno costituito il cardine dello sviluppo della fisica atomica fino agli ultimissimi anni, e si sono mostrate di una fecondità enorme, conducendo qualitativamente all'interpretazione degli spettri di tutti gli atomi e di alcune loro proprietà chimiche; e da esse si è tratto continuamente suggerimento per escogitare nuove esperienze che hanno valso a portare sempre maggior luce nelle nostre conoscenze sul mondo atomico.

Restava tuttavia sempre un notevole disagio concettuale che si andava sempre più accentuando man mano che la teoria veniva applicata a fenomeni sempre più complessi; poichè la soluzione dei diversi problemi si otteneva sempre a prezzo di qualche compromesso tra la teoria classica e quella quantistica, oppure di ipotesi supplementari logicamente in disaccordo tra di loro. Citerò il notissimo esempio della controversia tra la teoria elettromagnetica ondulatoria e la teoria dei quanti di luce, secondo cui è necessario attribuire alla luce una specie di natura corpuscolare. Le due teorie avevano ciascuna il proprio campo di applicazione; precisamente la teoria ondulatoria serviva per l'interpretazione dei fenomeni di interferenza ed affini, mentre la teoria dei quanti di luce veniva applicata quando si dovevano studiare gli scambi energetici tra luce e materia. E non sem-

brava possibile arrivare alla costruzione di una teoria unica che spiegasse insieme le due classi di fenomeni.

È stato principalmente da questo disagio concettuale che si è maturata poco per volta nei fisici la convinzione che fosse necessario riprendere fin dalle basi lo studio della fisica dell'atomo, costruendo una nuova meccanica atomica, invece di cercare di adattare, con continue ipotesi supplementari la ordinaria meccanica ai fenomeni dell'atomo. Dopo svariati tentativi infruttuosi, che ben presto si mostrarono in disaccordo con l'esperienza, si arrivò infine alla costruzione di una meccanica atomica, che sembra rendere conto in modo assai soddisfacente di tutti i fenomeni dell'atomo che oggi conosciamo.

Che i tempi fossero maturi per la costruzione della meccanica atomica, è, del resto, avvalorato in qualche modo dal fatto che ad essa si è giunti quasi contemporaneamente seguendo vie affatto diverse in due luoghi differenti. Heisenberg a Copenaghen vi arrivava partendo dal concetto che nella nuova meccanica dovessero trovar posto soltanto grandezze accessibili, almeno in linea teorica, a una misura effettiva (grandezze direttamente osservabili); mentre Schroedinger a Zurigo, perfezionando e sviluppando alcune idee espresse per primo da Louis de Broglie di Parigi, costruiva la nuova meccanica basandosi sopra una analogia formale tra la meccanica classica e l'ottica geometrica. Come si vede da questo accenno, le due vie per la costruzione della nuova meccanica non hanno apparentemente nulla a che vedere tra di loro; e anche gli strumenti matematici di cui esse si servono sono totalmente differenti, poichè Heisenberg usa la teoria delle matrici infinite, mentre Schroedinger si serve solo delle ordinarie equazioni differenziali. Ciò nonostante si è potuto dimostrare che le due teorie sono matematicamente equivalenti tra di loro, e cioè conducono, in tutti i casi possibili, agli identici risultati. Così che ormai non occorre più distinguere tra le due teorie, ma si applica, caso per caso, quella di esse che è matematicamente più comoda. Siccome in quasi tutti i casi il metodo più facile a seguire e più accessibile all'intuito è quello di Schroedinger, accennerò qui ad esso in poche parole. Si può stabilire tra l'ottica geometrica e la meccanica una analogia molto stretta, facendo corri-

spondere alla traiettoria di un punto materiale il percorso di un raggio di luce. Se il punto materiale si muove senza che su di esso agiscano forze, cioè se esso attraversa una regione dello spazio in cui il potenziale è costante, la sua traiettoria è una linea retta: similmente un raggio di luce che attraversi una regione di indice di rifrazione costante, segue un cammino rettilineo. Dunque a una regione in cui il potenziale è costante corrisponde, nel paragone ottico, una regione in cui è costante l'indice di rifrazione. In una regione dello spazio in cui il potenziale è variabile, un punto materiale descrive una traiettoria curva; e similmente in una regione dello spazio in cui l'indice di rifrazione varia da punto a punto, i raggi di luce seguono dei cammini curvi (si pensi p. es. al fenomeno del miraggio). Data una qualsiasi distribuzione di potenziale, si può sempre immaginare che, in una regione dello spazio, l'indice di rifrazione vari da punto a punto in modo tale che il cammino percorso dalla luce risulti identico a quello percorso da un punto materiale sotto l'azione del dato potenziale. Resta così sviluppata in modo completo l'analogia tra la meccanica classica e l'ottica geometrica. È noto però che tutte le volte che la luce incontra degli ostacoli aventi dimensioni dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda, le leggi dell'ottica geometrica perdono la loro validità, e avvengono i fenomeni di diffrazione, che possono spiegarsi soltanto ammettendo una natura ondulatoria della luce. Ora Schroedinger osserva che anche la meccanica classica si mostra in difetto quando si cerca di applicarla a sistemi di dimensioni molto piccole, come sono gli atomi; in questo caso infatti avvengono i fenomeni peculiari della teoria dei quanti. Egli cerca perciò di spingere oltre l'analogia che abbiamo osservata tra la meccanica e l'ottica ed arriva a costruire la così detta meccanica ondulatoria, analoga all'ottica ondulatoria invece che all'ottica geometrica. Naturalmente come l'ottica ondulatoria, quando viene applicata a problemi di dimensioni grandi, finisce per dare gli stessi risultati dell'ottica geometrica, così anche la meccanica ondulatoria di Schroedinger, applicata allo studio della meccanica di corpi di dimensioni apprezzabili, dà risultati che coincidono con quelli della meccanica classica. Le differenze si manifestano invece quando

si studiano, con la meccanica ondulatoria, problemi di dimensioni estremamente piccole, come p. es. i problemi della fisica dell'atomo. E in questo campo la nuova meccanica portò ben presto a risultati brillantissimi, poichè i diversi fenomeni atomici, e, in primo luogo, il fatto che l'atomo è suscettibile soltanto di certi stati energetici discreti, risultarono spontaneamente come conseguenze matematiche della teoria, senza bisogno di alcuna ipotesi supplementare; come si è detto, si potè poi dimostrare che la meccanica ondulatoria di Schrodinger è identica all'altra forma della nuova meccanica ideata da Heisenberg.

Da quanto si è detto potrà forse sembrare molto strana l'idea di considerare i fatti meccanici come una manifestazione di un fenomeno ondulatorio. La stessa idea però può venir suggerita anche da un altro tipo di fenomeni. Abbiamo già accennato infatti alla teoria dei quanti di luce che, per la spiegazione di un certo gruppo di fenomeni, era indotta a postulare una specie di natura corpuscolare della luce, e cioè, in qualche modo, a ricondurre i fenomeni dell'ottica a quelli di uno sciame di corpuscoli; anche questo fatto servì certamente a suggerire che l'analogia tra i fenomeni meccanici e quelli ondulatori è più profonda di quanto non sembri a prima vista. Poco dopo la pubblicazione della teoria di Schrodinger, si ebbe del resto, per opera di Davisson e Germer, una brillante conferma sperimentale di questa profonda analogia. Questi fisici poterono infatti osservare che, lanciando un fascetto di elettroni contro un cristallo di nichel, gli elettroni venivano riflessi all'indietro solo in certe direzioni ben determinate. Questo non è altro che un fenomeno di diffrazione degli elettroni, completamente analogo, anche dal lato quantitativo, ai fenomeni di diffrazione presentati dai raggi X che colpiscono un cristallo. In seguito queste esperienze di diffrazione dei fascetti di elettroni nei cristalli furono ripetute anche da altri in svariate condizioni, e risultarono sempre fenomeni analoghi a quelli che si osservano adoperando, invece di un fascetto di elettroni, un raggio di luce di opportuna lunghezza d'onda.

Ma certamente la migliore conferma del fatto che la nuova meccanica ci abbia veramente avvicinati alla comprensione dei fenomeni atomici, sta nell'esame dell'imponente numero

di fatti sperimentali svariati che essa ha permesso di interpretare. Senza entrare in particolari circa la spiegazione dei diversi fenomeni, mi propongo qui di passare in rassegna alcuni dei principali di essi.

Dirò anzi tutto che la nuova meccanica ha permesso di confermare tutti i numerosissimi risultati qualitativi che erano stati già interpretati con la vecchia teoria dei quanti; ciò è stato possibile senza alcun bisogno di quelle ipotesi supplementari continue che erano necessarie nella vecchia teoria, ma semplicemente con una applicazione conseguente dei postulati fondamentali della teoria. Nei casi in cui si è potuto sormontare le difficoltà matematiche, arrivando ad un calcolo quantitativo si è sempre trovato l'accordo quantitativo con i risultati sperimentali; valga l'esempio del calcolo dell'energia dell'atomo di elio, che è stato spinto fino all'approssimazione di oltre l'1‰ al valore sperimentale. Come questo si potrebbero citare altri numerosi esempi in cui la nuova meccanica ha portata la precisione quantitativa dove la vecchia teoria dava solo dei risultati qualitativi. Così nella teoria degli spettri delle molecole, 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, pur non arrivando quasi mai a dare risultati quantitativi, avesse tuttavia permesso di raggiungere conclusioni assai importanti, non sembra oggi casuale; si può infatti dimostrare che la vecchia teoria dei quanti rappresenta una prima approssimazione della nuova meccanica, prima approssimazione che in parecchi casi già si avvicina considerevolmente alla realtà.

Ma non vorrei qui soffermarmi sopra quelle conclusioni della meccanica quantistica che possono in qualche modo considerarsi soltanto come un perfezionamento dei risultati della vecchia teoria; preferisco invece passare all'esame di quanto vi è in essa di essenzialmente nuovo anche dal lato qualitativo.

Nel 1921 Ramsauer scoprì un fenomeno che sembrò al suo tempo inesplicabile. Se si fanno passare degli elettroni attraverso a un gas, le deviazioni che essi subiscono per effetto degli urti contro le molecole del gas dipendono, come è natu-

rale, dalla velocità degli elettroni; elettroni molto veloci non vengono quasi deflessi dall'effetto degli urti contro le molecole, mentre gli elettroni un po' più lenti subiscono una deviazione maggiore. Si penserebbe naturalmente che la deviazione dovesse crescere sempre col diminuire della velocità. Ramsauer scoprì invece che accade l'opposto, e che cioè, quando la velocità degli elettroni scende al di sotto di un certo limite, essi vengono tanto meno deviati quanto più piccola è la loro velocità; in modo che si può dire che elettroni di piccolissima velocità possono attraversare le molecole del gas senza venir in alcun modo deviati dalla loro traiettoria. L'interpretazione di questo fenomeno, incomprendibile nella meccanica classica, si presenta assai semplice e spontanea nella meccanica ondulatoria. Abbiamo detto infatti che, secondo questa teoria, l'elettrone deve farsi corrispondere a un treno di onde; la lunghezza d'onda dipende dalla velocità dell'elettrone e risulta tanto maggiore quanto minore è la velocità. Ad elettroni molto lenti corrisponderanno quindi onde di grande lunghezza. Ora la deviazione che l'elettrone subisce nell'urtare contro una molecola corrisponde alla diffrazione che subisce il treno d'onde quando investe la molecola. È ben noto che la diffrazione subita da un treno di onde che urta un ostacolo di dimensioni molto piccole è considerevole finché la lunghezza d'onda è dell'ordine di grandezza delle dimensioni dell'ostacolo, mentre diventa trascurabile per lunghezze d'onda molto grandi rispetto a tali dimensioni. Segue quindi che, quando la velocità dell'elettrone diventa piccola, e quindi diventa grande la lunghezza delle onde che ad esso corrispondono, l'effetto degli urti dovrà farsi sempre più piccolo, appunto come risulta dalle esperienze di Ramsauer.

Un'altra applicazione della meccanica ondulatoria, che presenta notevole analogia con quella che abbiamo qui esposto, ma che ha ben maggiore importanza, consiste nel calcolo del cammino libero medio degli elettroni liberi nell'interno dei metalli e nella conseguente determinazione teorica della conducibilità elettrica. La teoria dei metalli ha compiuto negli ultimi anni dei progressi assai importanti, specialmente in seguito ai lavori di Sommerfeld, che ha ripreso, valendosi delle moderne teorie statistiche, la concezione di Drude del

gas di elettroni. Sommerfeld ha così potuto interpretare molti fenomeni che sembravano irrisolubili alla luce delle vecchie teorie.

Uno dei problemi più essenziali per la teoria dei metalli era naturalmente quello del calcolo della loro conducibilità elettrica; e per risolverlo era necessario conoscere il valore del cammino libero medio degli elettroni liberi nell'interno del metallo, poichè la resistenza elettrica risulta inversamente proporzionale al cammino libero medio. Ora è facile convincersi che, se gli atomi del metallo fossero disposti in un reticolato perfettamente regolare, la diffusione degli elettroni per effetto degli urti contro di essi dovrebbe annullarsi. Considerando infatti, secondo la concezione di Schroedinger, le proprietà di un elettrone analoghe a quelle di un'onda che si muova in un mezzo di indice di rifrazione variabile, troviamo che la diffusione prodotta da un reticolato perfetto è nulla, così come è nulla la diffusione della luce prodotta da un cristallo perfetto. Alla diffusione nulla corrisponde cammino libero medio degli elettroni infinito, e quindi conducibilità elettrica infinita. Se anche consideriamo però un cristallo costruito in modo perfetto, i suoi atomi non saranno situati perfettamente nei vertici del reticolo, altro che alla temperatura dello zero assoluto. Per tutte le altre temperature essi si discosteranno più o meno da tali posizioni, per effetto dell'agitazione termica, e daranno perciò luogo a un reticolato tanto meno regolare quanto più elevata è la temperatura. L'intensità della diffusione degli elettroni crescerà perciò col crescere della temperatura e si avrà quindi in corrispondenza un aumento della resistenza elettrica. Sopra queste basi è stato possibile costruire una teoria della conducibilità elettrica che si mostra in soddisfacente accordo con l'esperienza. Si osservi anche che, in base ai principi esposti, si spiega il fatto che la conducibilità elettrica delle leghe metalliche è in generale minore di quella dei metalli puri. Infatti, nel mescolare i metalli, si viene a costituire un reticolato atomico alquanto irregolare. A questa irregolarità corrisponde, come abbiamo spiegato, una forte diffusione degli elettroni e quindi una forte resistenza elettrica.

La nuova meccanica ha permesso di raggiungere dei risultati di grande interesse nello studio dei sistemi che conten-

gono due o più corpuscoli identici tra di loro. Tali sono per es. tutti gli atomi, ad eccezione dell'idrogeno; essi contengono infatti almeno due elettroni e tutti gli elettroni sono eguali. Similmente, in una molecola costituita da due atomi eguali, come per es. H_2 , N_2 , O_2 , abbiamo, oltre a tutti gli elettroni, che sono eguali tra di loro, anche i due nuclei eguali.

Consideriamo per es. un atomo che contenga due elettroni. Abbiamo osservato che ogni elettrone può trovarsi soltanto in certi determinati stati quantici. A priori si penserebbe possibile che tutti e due gli elettroni del nostro sistema potessero, in determinate condizioni, trovarsi nello stesso stato quantico. Ora Pauli, dall'osservazione di svariati fatti spettroscopici, era arrivato, già prima che Heisenberg e Schrodinger fondassero la nuova meccanica, ad enunciare il suo principio di esclusione che afferma che non può mai accadere che due elettroni si trovino nello stesso stato quantico. Questo principio è importantissimo e certamente tutte le proprietà della materia resterebbero sostanzialmente modificate, se esso non fosse verificato. Esso ci dà in particolare la ragione per cui tutti gli elettroni di un atomo non si precipitano nell'orbita più stabile, che è quella più vicina al nucleo, ma si dispongono intorno ad esso in orbite svariate, determinando così le particolarità chimiche, che differenziano gli elementi uno dall'altro. Nella vecchia teoria dei quanti il principio di Pauli non poteva in alcun modo venire spiegato; era necessario ammetterlo come una ipotesi supplementare, non sempre conciliabile con le altre ipotesi della teoria. La nuova meccanica ha permesso invece di dimostrare che se si ammette che, ad un certo istante iniziale, ogni stato quantico sia occupato al massimo da un solo elettrone, non può mai accadere, negli istanti successivi, che due elettroni vengano a trovarsi nel medesimo stato quantico; in altre parole, se si ammette che il principio di Pauli sia verificato allo stato iniziale, si è sicuri che esso sarà sempre verificato anche in seguito.

Dalla nuova meccanica risulta anche spontaneamente un'altra importante proprietà dell'elettrone e cioè quella di possedere un momento magnetico. Questa proprietà invece doveva venire postulata nella vecchia teoria. Anche l'esistenza del momento magnetico ha, sulle proprietà della materia, una importanza assai maggiore di quanto non possa sembrare a

prima vista. Se non se ne ammettesse l'esistenza infatti si troverebbe per es. che l'idrogeno invece di essere, come è, un gas chimicamente molto attivo, si comporterebbe come un gas inerte, press'a poco analogo all'elio. In modo simile verrebbero totalmente alterate le proprietà chimiche di tutte le sostanze; il sistema periodico degli elementi avrebbe i suoi periodi di quattro invece che di otto, così che per es. il boro, che è una sostanza solida di grande durezza, sarebbe invece un gas nobile. Similmente sarebbe un gas nobile il fluoro, che è invece una delle sostanze chimicamente più attive che si conoscono.

Notevolissimi sono anche gli studi, basati sopra la nuova meccanica, e relativi alle proprietà dei composti chimici omeopolari. È noto che i composti chimici si possono classificare in due grandi categorie: composti polari e composti omeopolari. I più caratteristici esempi di composti polari ci sono dati dalle molecole dei sali, degli acidi e delle basi. Per es. si trova che la molecola di cloruro di sodio, NaCl , è costituita da uno ione positivo di sodio, cioè da un atomo di sodio che, avendo perduto un elettrone, è restato carico di elettricità positiva, e da uno ione negativo di cloro, cioè da un atomo di cloro che si è appropriato l'elettrone perduto dall'atomo di sodio, restando perciò carico negativamente. I due ioni, carichi di elettricità di segno opposto, si attraggono, per la legge di Coulomb; è appunto questa attrazione elettrostatica che serve a tenere insieme la molecola. Non è invece possibile spiegare per mezzo di un semplice gioco di attrazioni elettrostatiche l'esistenza delle molecole, come per es. la molecola di idrogeno H_2 , o di ossigeno O_2 , le quali non sono costituite da due ioni, ma da due atomi, entrambi allo stato neutro; a questa seconda classe di composti chimici si dà il nome di composti omeopolari. Non mi è qui possibile spiegare in poche parole attraverso a quale serie di considerazioni è stato possibile, per mezzo della meccanica quantistica, dimostrare che, in determinate condizioni, anche due atomi, entrambi elettricamente neutri, si possono attirare riunendosi per formare una molecola omeopolare; mi limito ad accennare che tale possibilità è determinata dal fatto che gli elettroni dei due atomi sono assolutamente identici tra di loro, per modo che, senza in alcun modo alterare il sistema, si possono

scambiare tra di loro due elettroni uno appartenente al primo atomo e l'altro al secondo. È stato così possibile abbozzare una teoria quantistica delle valenze chimiche omeopolari, che rende conto in modo soddisfacente dei principali fatti osservati. Così per es. risulta dalla teoria che tra due atomi di idrogeno si esercita una forza attrattiva che determina la formazione della molecola di idrogeno; mentre non esiste una simile forza attrattiva tra due atomi di elio, per modo che, almeno in condizioni normali, non si ha la formazione di una molecola di elio.

Accennerò per concludere a un certo numero di risultati che la nuova meccanica ha permesso di raggiungere nel campo della fisica nucleare, e cioè nello studio di quei corpuscoli, carichi di elettricità positiva che si trovano nel centro dell'atomo ed hanno dimensioni alcune migliaia di volte minori di esso. Abbiamo detto più sopra che gli elettroni hanno tutti un loro momento magnetico proprio. Ora è risultato da studi recenti che anche i nuclei atomici, o meglio alcuni di essi, hanno pure un momento magnetico, che è circa mille volte più piccolo del momento magnetico degli elettroni. L'esistenza di questo momento si manifesta in svariati fenomeni. Così per es. si osserva che le righe spettrali di molti elementi, specialmente di quelli aventi peso atomico elevato, sono costituite da alcune componenti, assai vicine tra di loro, e distinguibili una dall'altra solo con mezzi spettroscopici di elevatissima risoluzione. Queste diverse righe spettrali corrispondono alle diverse orientazioni che il momento magnetico del nucleo può assumere rispetto al resto dell'atomo. Un'altra manifestazione, anche più appariscente, si ha negli spettri delle molecole costituite da due atomi eguali; si trova infatti che essi sono costituiti in molti casi da successioni di righe aventi alternativamente intensità forte e debole. La nuova meccanica ha permesso di spiegare queste alternanze di intensità, osservate già da molto tempo. Risulta infatti che i momenti magnetici dei due nuclei degli atomi che costituiscono la molecola si possono disporre uno rispetto all'altro parallelamente oppure antiparallelamente; le righe forti o deboli corrispondono all'una o all'altra di queste due possibili orientazioni dei due nuclei. In altre parole la molecola può trovarsi in due stati che hanno proprietà notevolmente diverse

tra di loro; e cioè lo stato in cui i due momenti nucleari sono paralleli e quello in cui essi sono antiparalleli. Così per es. l'ordinario idrogeno è un miscuglio di molecole coi nuclei paralleli (ortoidrogeno) e molecole coi nuclei antiparalleli (paraidrogeno). In condizioni normali i numeri delle molecole di questi due tipi stanno nel rapporto 3:1. Solo a bassissime temperature si ha una prevalenza delle molecole del para-idrogeno, che hanno una energia un po' minore, sopra quelle dell'ortoidrogeno. Così se si mantiene per alcuni giorni dell'idrogeno allo stato liquido, le sue molecole poco alla volta si vanno tutte trasformando in molecole di paraidrogeno. Quando si fa rievaporare questo idrogeno liquido, si ottiene per qualche tempo del paraidrogeno gassoso quasi puro le cui proprietà fisiche (per es. il calore specifico) sono diverse dalle proprietà dell'ordinario idrogeno, miscuglio di para e orto-idrogeno.

Oltre a questi fenomeni che descrivono, per così dire, delle proprietà esterne dei nuclei, ne sono noti, già da molto tempo, altri che ci mettono in presenza di fatti che avvengono nell'interno del nucleo. Intendo parlare dei fenomeni radioattivi, che consistono in una disintegrazione del nucleo atomico che proiettando all'esterno una particella alfa oppure un elettrone, si trasforma in un nucleo differente.

La nuova meccanica ha permesso anche di costruire una teoria, se pure necessariamente molto schematica, dei fenomeni della disintegrazione radioattiva, spiegando come possa accadere che una particella alfa resti in alcuni casi legata nell'interno di un nucleo per anni o per secoli e poi venga proiettata all'esterno senza l'intervento di alcuna ragione apparente.

Con i nuovi metodi dunque, dopo aver studiato con successo i problemi della fisica dell'atomo, si incomincia ora a trattare la fisica dei nuclei. E come le leggi classiche dovettero venir modificate e approfondite per poter essere applicate allo studio dell'atomo e della molecola, così c'è da attendersi che sia necessario modificare le leggi che valgono per l'atomo prima di poter ottenere una teoria soddisfacente dei fenomeni del nucleo. E così, estendendo il proprio studio a una classe sempre più larga di fenomeni, la Fisica farà forse nell'avvenire un nuovo passo verso la comprensione sempre più profonda delle leggi della natura.