

Meccanica quantistica

<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/2155/meccanicaquantistica.html>

Teoria fondamentale della fisica moderna, detta anche teoria dei quanti perché assume il concetto di "quanto" nella descrizione delle proprietà dinamiche delle particelle subatomiche e delle interazioni tra radiazione e materia. Le basi della meccanica quantistica furono poste dal fisico tedesco Max Planck il quale, nel 1900, ipotizzò che l'energia venisse emessa o assorbita dalla materia sotto forma di piccole unità indivisibili chiamate appunto quanti. Fondamentale per lo sviluppo della teoria è stato inoltre il principio di indeterminazione, formulato nel 1927 dal fisico tedesco Werner Heisenberg, secondo cui la posizione e il momento di una particella subatomica non possono essere determinati contemporaneamente.

La fisica prima della nascita della meccanica quantistica

Tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX alcuni risultati sperimentali misero in dubbio la completezza della meccanica newtoniana. In particolare, l'insieme delle righe spettrali ottenute dall'analisi della luce emessa da gas incandescenti o da gas sottoposti a scarica elettrica era in disaccordo con il modello atomico di Ernest Rutherford. Lo studio dello spettro del corpo nero e dell'effetto fotoelettrico suggeriva che la radiazione elettromagnetica avesse un duplice comportamento (ondulatorio e corpuscolare) durante i processi di interazione con la materia.

Inoltre l'assenza di una base molecolare per la termodinamica si rispecchiava in andamenti dei calori specifici non giustificabili alla luce della teoria classica.

La formulazione di Planck del concetto di quanto

Il primo passo verso lo sviluppo della nuova teoria fu l'introduzione da parte di Planck del concetto di quanto nell'ambito degli studi sulla radiazione di corpo nero condotti alla fine del XIX secolo. (Il termine corpo nero indica un corpo o una superficie ideale capace di assorbire tutta la radiazione incidente). I grafici sperimentali ottenuti dall'analisi dell'emissione di radiazione elettromagnetica di un corpo incandescente erano infatti in disaccordo con le previsioni teoriche della fisica classica.

Planck, dopo aver determinato una relazione matematica che interpolasse correttamente le curve sperimentali, cercò un modello fisico che potesse giustificarne la forma. Egli ipotizzò che l'interazione tra radiazione e materia avvenisse per trasferimento di quantità discrete di energia che chiamò quanti, ciascuno di energia pari a $h\nu$, dove ν rappresenta la frequenza e h il quanto d'azione, il cui valore è ora noto come costante di Planck.

Il contributo di Einstein

Il passo successivo nello sviluppo della meccanica quantistica si deve ad Albert Einstein. Egli ricorse al concetto di quanto introdotto da Planck per spiegare alcune proprietà dell'effetto fotoelettrico, il fenomeno per cui una superficie metallica colpita da radiazione elettromagnetica emette elettroni.

Contrariamente alle previsioni della teoria classica secondo cui l'energia degli elettroni emessi doveva dipendere dall'intensità della radiazione, le osservazioni sperimentali mostrarono che l'intensità della radiazione incidente influiva sul numero di elettroni emessi ma non sulla loro energia; questa risultò invece dipendere dalla frequenza della radiazione: all'aumentare della frequenza aumentava l'energia degli elettroni emessi. Inoltre, in corrispondenza di frequenze inferiori a un valore critico, non si osservava alcuna emissione di elettroni. Einstein spiegò questi risultati descrivendo il fenomeno come un insieme di urti tra i quanti di energia radiante e gli elettroni del metallo: durante l'urto un quanto cede tutta o parte della sua energia a un elettrone del metallo provocandone l'estrazione; essendo poi l'energia del quanto proporzionale alla frequenza della radiazione, ciò avviene anche per l'energia dell'elettrone emesso.

L'atomo di Bohr

Nel 1911 Rutherford analizzando i risultati sperimentali ottenuti dallo scattering di particelle alfa su atomi di oro, formulò il suo celebre modello atomico; esso prevedeva che gli elettroni con carica negativa ruotassero intorno al nucleo denso e positivamente carico come pianeti intorno al Sole. Tuttavia secondo la teoria elettromagnetica classica di James Clerk Maxwell, un elettrone orbitante intorno a un nucleo dovrebbe consumare progressivamente la sua energia emettendola con continuità sotto forma di radiazione elettromagnetica fino a collassare sul nucleo; l'atomo di Rutherford risulterebbe di conseguenza instabile. Due anni dopo Niels Bohr propose un nuovo modello che prevedeva che gli elettroni occupassero orbite fisse ben determinate; inoltre ogni cambiamento di orbita da parte di un elettrone corrispondeva all'emissione o all'assorbimento di un quanto di radiazione.

La teoria di Bohr diede risultati corretti per l'atomo di idrogeno, ma per atomi con più di un elettrone si rivelò problematica. Le equazioni per l'atomo di elio portarono risultati in disaccordo con i dati sperimentali; inoltre per gli atomi più complessi erano possibili solo soluzioni approssimate.

Meccanica ondulatoria

Nel 1924 Louis-Victor de Broglie estese alla materia il concetto del dualismo onda-corpuscolo messo in evidenza per la radiazione elettromagnetica e suggerì che le particelle materiali potessero assumere un comportamento di tipo ondulatorio in determinate situazioni. La prova sperimentale di questa affermazione venne dopo pochi anni quando Clinton Joseph Davisson e Lester Halbert Germer mostrarono che un fascio di elettroni diffuso da un cristallo produce una figura di diffrazione simile a quella ottenuta dalla diffrazione di un'onda. La concezione ondulatoria della materia portò il fisico austriaco Erwin Schrödinger a formulare l'equazione d'onda per descrivere le proprietà ondulatorie di una particella e la sua evoluzione a partire da uno stato iniziale.

L'equazione di Schrödinger, a eccezione di pochi casi particolari che meriterebbero una discussione a parte, ammette solo un numero discreto di soluzioni, dette autofunzioni; esse sono espressioni matematiche in cui compaiono i cosiddetti numeri quantici, cioè dei parametri il cui valore dipende da grandezze caratteristiche del sistema, come ad esempio l'energia o il momento angolare. L'equazione per l'atomo di idrogeno diede risultati in sostanziale accordo con quelli di Bohr e venne risolta con successo anche per l'atomo di elio. Inoltre confermò sul piano formale il principio di esclusione enunciato da Wolfgang Pauli nel 1925, secondo cui due elettroni non possono essere specificati dallo stesso insieme di numeri quantici.

Meccanica delle matrici

Parallelamente allo sviluppo della meccanica ondulatoria di Schrödinger, Heisenberg propose, con la collaborazione di Max Born ed Ernst Pascual Jordan, un nuovo metodo di analisi basato sul calcolo matriciale. Ogni osservabile fisica associata a una particella corrisponde a una matrice; inoltre lo stato o l'evoluzione di un sistema sono determinati dalle soluzioni di equazioni matriciali. La teoria di Heisenberg fornì gli stessi risultati della meccanica quantistica ordinaria e permise una descrizione più completa di alcuni fenomeni.

Significato della meccanica quantistica

Poco tempo dopo Schrödinger dimostrò che la meccanica ondulatoria e la meccanica matriciale sono formulazioni diverse ma equivalenti della meccanica quantistica. Entrambe purtroppo sono estremamente complicate dal punto di vista algebrico e matematico, anche per un sistema semplice come l'atomo di idrogeno; tuttavia accanto alla descrizione formale completa è spesso possibile un'analisi qualitativa soddisfacente capace di fornire, anche se in modo approssimato, le principali informazioni sul sistema.

Secondo il punto di vista della meccanica quantistica il nucleo è circondato da una serie di onde stazionarie, ciascuna rappresentante un'orbita. Il modulo elevato al quadrato dell'ampiezza

dell'onda in ogni punto e a un certo istante fornisce la probabilità di trovare l'elettrone in quel punto e in quell'istante. Non si parla più quindi di posizione dell'elettrone, ma di probabilità che l'elettrone occupi una data posizione.

Il principio di indeterminazione

L'impossibilità di identificare con esattezza la posizione di un elettrone in un certo istante fu analizzata da Werner Heisenberg che nel 1927 enunciò il principio di indeterminazione. Tale principio afferma l'impossibilità di determinare contemporaneamente con precisione la posizione e il momento di una particella. Si dice quindi che la conoscenza della posizione e della velocità di una particella sono complementari; in altre parole, i fisici non possono misurare la posizione di una particella, senza alterarne la velocità.

Risultati della teoria quantistica

La meccanica quantistica ha risolto tutti i problemi della fisica dell'inizio del XX secolo, ha accresciuto il livello di conoscenza della struttura della materia e ha fornito una base teorica per la comprensione della struttura dell'atomo e del fenomeno delle righe spettrali: ogni riga spettrale corrisponde all'energia di un fotone emesso o assorbito quando un elettrone compie una transizione da un livello energetico a un altro. Anche la conoscenza dei legami chimici è stata completamente rivoluzionata. La fisica dello stato solido, la fisica della materia condensata, la superconduttività, la fisica nucleare, e la fisica delle particelle elementari sono fondate sui principi della meccanica quantistica.

Sviluppi ulteriori

Negli anni Trenta l'applicazione della meccanica quantistica e della relatività speciale alla teoria dell'elettrone ha permesso al fisico britannico Paul Dirac di formulare un'equazione in cui comparisse anche la variabile di spin dell'elettrone; l'equazione di Dirac prevedeva su base teorica l'esistenza del positrone, poi provata sperimentalmente dal fisico statunitense Carl David Anderson.

L'applicazione della meccanica quantistica nel campo della radiazione elettromagnetica permise di spiegare molti fenomeni, come per esempio il *Bremsstrahlung*, cioè la radiazione emessa dagli elettroni rallentati durante la penetrazione nella materia, e la produzione di coppie (la formazione di un positrone e di un elettrone da parte di radiazione sufficientemente energetica). Essa condusse però anche al problema della divergenza: alcuni parametri, come la massa e la carica nuda dell'elettrone risultano infiniti nelle equazioni di Dirac. (I termini massa nuda e carica nuda si riferiscono a elettroni che non interagiscono né con la materia né con la radiazione; in realtà gli elettroni interagiscono sempre con il proprio campo elettrico). Questo problema è stato parzialmente risolto negli anni 1947-49 in un programma chiamato di rinormalizzazione, sviluppato da Sin Itiro Tomonaga, Julian S. Schwinger, Richard Feynman e Freeman Dyson. La teoria della rinormalizzazione ha reso notevolmente più accurati i calcoli sulla struttura atomica.

Prospettive future

La meccanica quantistica ha permesso la descrizione del mondo microscopico inaccessibile con i mezzi forniti dalla meccanica classica e ancora oggi fornisce la base concettuale fondamentale per ogni sviluppo nell'ambito della fisica moderna. Tuttavia lo studio di problematiche particolari, come la divergenza nell'elettrodinamica quantistica o gli effetti dei processi di misurazione ha suscitato animate discussioni sulla completezza della teoria.

Proprio come la meccanica newtoniana venne corretta dalla meccanica quantistica e dalla relatività, molti scienziati sono convinti che anche la teoria quantistica sia destinata a subire profonde modifiche negli anni a venire. Ad esempio, sussistono gravi difficoltà per conciliare la meccanica quantistica e la teoria del caos, che iniziò a svilupparsi negli anni Ottanta. Fisici teorici come Stephen Hawking stanno tuttora cercando di elaborare un sistema che comprenda sia la relatività sia la meccanica quantistica.