

Ann. Mus. civ. Rovereto	Sez.: Arch., St., Sc. nat.	Vol. 22 (2006)	287-294	2007
-------------------------	----------------------------	----------------	---------	------

MAURIZIO DAPOR

CENNI DI STORIA DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Abstract - MAURIZIO DAPOR - An outline of the history of quantum mechanics.

Beyond the patient work of research, the history of the birth of modern physics and, in particular, of quantum mechanics is interwoven of passions, antagonisms, rivalries, fulminating insights, human aversions and fascinating strokes of genius. It is a tale marked by great names and by the corresponding theories: Plank, Bohr, Schrödinger, Heisenberg. Addressing to the students of the high schools, the author recalls the vicissitudes of these brilliant and resolute men, often in disagreement with each other but joined by a main aim: to unfold to the knowledge the frontiers of the atomic and subatomic world.

Key words: Quantum mechanics, modern physics.

Riassunto - MAURIZIO DAPOR - Cenni di storia della meccanica quantistica.

La storia degli albori della fisica moderna e, in particolare, della meccanica quantistica, si rivela intessuta di passioni, antagonismi, fulminanti intuizioni, umane antipatie e affascinanti colpi di genio, oltre che di paziente lavoro di ricerca. È un racconto segnato da grandi nomi e dalle corrispondenti teorie: Plank, Bohr, Schrödinger, Heisenberg. Rivolgendosi agli studenti delle scuole superiori, l'autore rievoca le vicende di questi uomini brillanti e determinati, spesso in disaccordo tra loro ma accomunati da un principale obiettivo: schiudere alla conoscenza le frontiere del mondo atomico e subatomico.

Parole chiave: Meccanica quantistica, fisica moderna.

I

Durante il Natale del 1925 il fisico Erwin Schrödinger decise di trascorrere le vacanze in una località sciistica svizzera, nelle vicinanze di Davos. La storia narra che fosse accompagnato da una misteriosa signora, sulle cui generalità ben

poco si sa: quanto si racconta, al proposito, è che costei sarebbe stata l'ispiratrice dell'equazione che porta il nome del grande fisico austriaco. Rapito in una sorta di tardivo incantesimo erotico-sentimentale il nostro Erwin, allora trentottenne, con pochi semplici segni di inchiostro mise ordine in una teoria quantistica che, nata nel 1900 ad opera delle illuminate argomentazioni di Max Planck e successivamente sviluppata grazie ai decisivi contributi di Albert Einstein e Niels Bohr, era manifestamente alla ricerca di un quadro coerente che ne chiarisse definitivamente i contorni. Con la sua equazione, Schrödinger effettuò nel mondo atomico e subatomico un'operazione del tutto analoga a quella svolta, nel mondo macroscopico, dalle equazioni della meccanica classica di Isaac Newton.

Qualche mese prima, il ventiquattrenne fisico tedesco dell'università di Göttingen Werner Heisenberg aveva formulato una teoria che, anch'essa, era in grado di rendere conto dei fenomeni quantistici secondo una struttura matematica coerente e rigorosa. La teoria di Heisenberg, a differenza di quella di Schrödinger, non offriva però alcun appiglio alla visualizzazione dei fenomeni atomici. Essa costituiva, piuttosto, una descrizione formale dei fatti quantistici basata su una struttura matematica assai astratta e priva di qualunque riferimento all'intuizione fisica. Sembra che l'antipatia di Schrödinger per tale approccio abbia contribuito al suo desiderio di trovare un'alternativa teorica capace di spiegare i processi quantistici ricorrendo, oltre che al rigore matematico e formale, ad una immagine intuitiva degli stessi. Grazie al particolare momento di grazia che lo ispirava in quel periodo, poco tempo dopo Schrödinger riuscì a dimostrare che le due teorie, la sua e quella di Heisenberg, erano perfettamente equivalenti, sottintendendo in tal modo che la sua, essendo quella più intuitiva, a parità di condizioni doveva essere anche quella preferibile. Il fatto che Heisenberg non fosse di questo parere costituisce di certo un capitolo assai interessante della storia della fisica e dei suoi protagonisti: i due scienziati provarono per anni una reciproca antipatia, certo più manifesta nei comportamenti del più giovane Heisenberg, ma di sicuro presente anche nei sentimenti di Schrödinger.

L'equazione di Schrödinger regola, in modo deterministico, l'evoluzione temporale di una grandezza, la funzione d'onda, la cui interpretazione è tutt'oggi argomento di animate discussioni nell'ambito della comunità dei fisici. A parere di Schrödinger tale funzione avrebbe rappresentato una sorta di diffusione dell'elettrone attorno al nucleo atomico. Heisenberg, infastidito da quella che percepiva come un'indebita ingerenza dell'intuizione – ispirata dall'esperienza della realtà macroscopica – nel mondo subatomico, espresse in più occasioni il suo disaccordo e, va riconosciuto, lo stesso Schrödinger non fu mai completamente convinto né della sua né delle interpretazioni successive relative al significato fisico di tale funzione.

Alcuni anni prima, nel 1913, Niels Bohr aveva formulato la prima teoria atomica degna di tale nome, secondo la quale l'atomo veniva rappresentato come

un piccolo sistema solare. L'atomo più semplice della tavola periodica, si sa, è quello di idrogeno. Esso è costituito da un singolo elettrone che trasporta una carica elettrica elementare negativa e da un nucleo atomico che, in questo caso particolare, è costituito da un singolo protone, una particella che possiede una carica elettrica elementare positiva. Se si immagina che, come in un minuscolo sistema solare, l'elettrone orbiti attorno al protone, allora, applicando la teoria elettromagnetica e le leggi della meccanica classica di Newton, si nota immediatamente che un tale sistema sarebbe altamente instabile. Poiché infatti l'elettrone, orbitando attorno al nucleo, emetterebbe radiazioni, esso perderebbe progressivamente energia. Non descriverebbe un'orbita con raggio fisso: la traiettoria dell'elettrone sarebbe una spirale rapidamente convergente nel nucleo atomico. Tutta la materia è costituita da atomi. Se le cose della natura stessero in questo modo la materia non sarebbe stabile come invece, evidentemente, è.

La teoria della radiazione di Planck suggerì a Bohr di caratterizzare il suo sistema atomico definendo alcune orbite consentite agli elettroni, note come livelli energetici stazionari. In altri termini, secondo Bohr, l'elettrone dell'atomo di idrogeno non può, letteralmente, esistere se non in alcune orbite permesse. Secondo il modello di Bohr tutte le altre regioni di spazio attorno al nucleo non sono accessibili. Di tutte le orbite possibili, quella più vicina al nucleo rappresenta lo stato di minima energia, nel quale si trova di solito l'atomo quando non è sottoposto a sollecitazioni esterne. Qualora un evento esterno, costituito ad esempio da un fotone della giusta frequenza, fornisca all'elettrone l'energia sufficiente, quest'ultimo può «saltare» su un'orbita più distante dal nucleo – corrispondente ad una maggiore energia. L'atomo passa, in tal modo, in uno stato eccitato assorbendo il fotone. Fotoni potranno nel seguito essere emessi dall'atomo eccitato: esso si «diseccita» quando l'elettrone torna nello stato di minima energia. Le energie dei fotoni emessi saranno pari alle differenze di energia tra i livelli atomici coinvolti nelle transizioni. Poiché la transizione dell'elettrone al livello energetico più basso può avvenire mediante un certo numero di passaggi attraverso livelli energetici intermedi, ci aspettiamo di assistere all'emissione di radiazioni discontinue, corrispondenti a tali salti quantici. Come si sa, questo è esattamente quello che si osserva. Il notevole successo della teoria di Bohr fu costituito proprio dalla spiegazione di tali emissioni di fotoni dagli atomi di idrogeno: il modello di Bohr era in grado di predire in modo assai soddisfacente le osservazioni sperimentali relative alla frequenza delle radiazioni elettromagnetiche emesse dall'idrogeno.

Era tuttavia chiaro che il modello di Bohr, in realtà, non costituiva una teoria definitiva e completamente convincente: di fatto Bohr, anziché arrovellarsi alla ricerca di spiegazioni sulla stabilità della materia, la utilizzò per assumere l'esistenza di orbite atomiche permesse e di regioni vietate. In altri termini, Bohr ignorò il problema relativo al perché dovessero esistere orbite stazionarie e, in particolare,

ne dovesse esistere una di minima energia. Si trattava di un dato di fatto che la natura ci imponeva di accettare. Erano dunque necessari interventi decisivi che andassero più a fondo nella spiegazione della vera natura dell'atomo.

II

La teoria di Bohr fu accolta con grande favore dai fisici dell'epoca. Secondo il padre della relatività, Albert Einstein, essa costituiva un risultato di grande importanza mentre, a parere di Max Born, Bohr aveva operato una vera e propria magia, radicando la struttura dell'atomo nella «superstizione secondo la quale il destino dell'umanità può essere letto nelle stelle».

Nonostante tutti i suoi indubbi successi, il modello atomico di Bohr cominciò tuttavia a mostrare i suoi limiti a partire, all'incirca, dal 1923: da quell'anno molti laboratori iniziarono a pubblicare evidenze sperimentali, relative all'interazione luce-materia, che mostravano come il modello di un sistema solare in miniatura fosse, per la gran parte degli atomi, improprio e inadeguato. In definitiva, a parte il più semplice sistema atomico, quello cioè dell'idrogeno, divenne sempre più manifesta l'incapacità del modello di Bohr di descrivere accuratamente l'universo microscopico. Si iniziarono a intravedere i limiti, in particolare, del suo tentativo di visualizzazione intuitiva della struttura atomica.

Ne nacque, di lì a un paio d'anni, una versione ibrida della teoria di Bohr, che pur non corrispondendo ancora alla teoria oggi universalmente accettata, introdusse alcuni elementi fondamentali della descrizione contemporanea della struttura atomica e dell'interazione luce-materia.

Innanzitutto ci si rese conto della necessità di rinunciare a descrizioni prese a prestito dal mondo macroscopico: la struttura dell'atomo doveva essere caratterizzata da proprietà che nulla avevano a che vedere con le idee ed i preconcetti derivanti dall'osservazione del comportamento degli oggetti quotidiani, così come di quelli astronomici. Era necessario prendere le distanze da teorie ben note e consolidate e affrontare con coraggio l'ipotesi che la realtà microscopica potesse e dovesse essere rappresentata da un approccio completamente nuovo.

Lo spirito dell'epoca era tale da consentire un tale atteggiamento che imponeva una radicale revisione dei concetti e delle teorie esistenti. Certamente un contributo filosofico decisivo a questo mutamento di prospettiva si deve ad Albert Einstein che, con la sua teoria della relatività, aveva osato mettere in discussione, qualche anno prima, concetti solidi e apparentemente indiscutibili come quello del carattere assoluto della simultaneità e del trascorrere del tempo. «Newton, perdonami!» aveva dichiarato Einstein immaginando di rivolgersi al grande fisico britannico che, duecento anni prima della pubblicazione della teoria della relatività, aveva sostenuto il carattere assoluto di spazio e tempo.

Ma Einstein diede anche un impulso diretto alla nascente teoria quantistica allorché introdusse, nel 1916, una nuova teoria dell'interazione radiazione-materia basata sul concetto di «probabilità di un evento». E quello di probabilità fu, in effetti, il secondo elemento di novità che apparve nella teoria ibrida di Bohr.

Il terzo elemento, quello di salto quantico, derivò direttamente dalle osservazioni effettuate dai vari laboratori sparsi per il mondo. Le sempre più numerose evidenze sperimentali inducevano a riassumere i fatti osservati come segue: gli atomi potevano perdere energia mediante transizioni tra livelli energetici e la conseguente emissione di luce la cui frequenza dipendeva dalla differenza di energia tra i livelli coinvolti. Analogamente, fotoni di luce di date frequenze potevano essere assorbiti dagli atomi con conseguente guadagno d'energia da parte di questi ultimi. Le righe spettrali trovavano una semplice spiegazione, senza dover ricorrere ad alcuna descrizione della struttura atomica che la facesse assomigliare ad un sistema planetario. Queste transizioni avvenivano senza che fosse possibile predire l'istante in cui si sarebbero verificate. Allo sperimentatore era dunque consentito di conoscere esclusivamente la probabilità che, in ogni fissato istante, un salto quantico potesse verificarsi.

La probabilità iniziò così ad entrare a far parte della teoria fisica. Essa diventava un concetto fondante e fondamentale. Va riconosciuto che, all'epoca, le idee in proposito non erano molto chiare: si continuava ancora a ritenere, confusamente, che la necessità di introdurre la probabilità fosse l'esito una conoscenza incompleta e imperfetta della struttura atomica e dei processi d'interazione luce-materia. In altre parole, si riteneva che fosse l'ignoranza dei dettagli a condizionare i teorici, costringendoli a trattare con concetti vaghi come quello di probabilità piuttosto che con equazioni in grado di predire esattamente ed in ogni istante, almeno in linea di principio, posizione e velocità di tutte le particelle coinvolte nei processi.

All'inizio del 1925, l'accumularsi di numerosi dati sperimentali relativi all'interazione tra la luce e gli atomi e, coerentemente con tali dati, la teoria ibrida di Bohr avevano posto le premesse per la successiva rivoluzione scientifica che condusse alla moderna visione della struttura atomica e subatomica.

III

Nel 1925 la versione ibrida di Bohr si rivelò infine inadeguata. Ma lasciò un segno profondo. Se la gran parte dei fisici dell'epoca considerò l'introduzione della probabilità nella teoria con un certo sospetto, ritenendo che ulteriori studi futuri avrebbero aggiustato le cose eliminando le leggi del caso dalle equazioni fondamentali che descrivono la materia, ci fu chi non si lasciò impressionare e decise di approfondire gli argomenti di Bohr.

Werner Heisenberg pubblicò un lavoro di difficilissima comprensione, per l'epoca, che descriveva le transizioni atomiche tra stati stazionari mediante una teoria basata su particelle non visualizzabili. La teoria era fondata su un approccio matematico il cui utilizzo presentava, per lo stesso Heisenberg, notevoli difficoltà tecniche.

In particolare egli dimostrò che un modo assai naturale per trattare con accuratezza e precisione le proprietà delle righe spettrali era quello di ricorrere a oggetti matematici noti come matrici, tabelle di elementi numerici ognuno dei quali si dimostrò essere in relazione con le varie transizioni atomiche. Inoltre, usando la teoria matematica delle matrici, era possibile calcolare le energie degli atomi (gli autovalori). La teoria delle matrici di Heisenberg, per quanto difficile dal punto di vista tecnico e assai poco intuitiva, permise di venire a capo di molti problemi che la teoria ibrida di Bohr aveva lasciato irrisolti.

Ma Heisenberg non fu il solo ricercatore che, all'epoca, aveva deciso di approfondire le idee di Bohr. Qualche anno prima, nel 1923, Louis de Broglie aveva proposto, nella sua tesi di dottorato, l'idea che gli elettroni potessero avere una natura ondulatoria. Ispirato da questa profonda intuizione, Erwin Schrödinger, un fisico quasi quarantenne i cui numerosi interessi scientifici spaziavano dalla relatività generale alla trasmissione del suono in mezzi elastici, immaginò che gli elettroni legati nelle strutture atomiche potessero essere trattati come corde vibranti, e che i modi di oscillazione fossero in relazione con le loro energie. Si pensi, per fissare le idee, all'atomo più semplice, quello di idrogeno in cui un solo elettrone «orbita» attorno ad un protone. L'elettrone, secondo Schrödinger, può essere trattato come una corda i cui estremi siano fissati. Tra gli estremi si stabilisce un'onda stazionaria. La distanza tra gli estremi è pari a mezza lunghezza d'onda nel caso in cui l'onda si trovi nel suo stato di minima energia. Due mezze lunghezze d'onda corrispondono al livello energetico superiore, tre al successivo e così via. Pur utilizzando una descrizione dell'elettrone assai diversa da quella consueta per l'epoca, e quindi in un certo senso rivoluzionaria, Schrödinger spiegava i misteriosi salti quantici mediante una visualizzazione intuitiva di onde di densità di carica elettronica disposte su orbite distribuite attorno al nucleo. Schrödinger ebbe anche il merito di dimostrare l'equivalenza matematica tra la sua teoria (nota come meccanica ondulatoria) e di quella delle matrici di Heisenberg.

Heisenberg non poteva tollerare la teoria di Schrödinger proprio in ragione del ricorso fatto da quest'ultimo alla visualizzazione e all'intuizione. Schrödinger, d'altra parte, riteneva che la teoria di Heisenberg fosse letteralmente brutta. L'algebra trascendentale (o delle matrici) turbava il suo innato senso estetico. I due fisici non si amavano. Schrödinger dichiarò in più occasioni che la sua teoria era stata ispirata da de Broglie e da Einstein. Non riconobbe invece mai alcun merito a Heisenberg, che pure lo aveva preceduto, se pur di poco. A que-

sto proposito egli constatò: «Non mi è nota alcuna relazione genetica con Heisenberg. Io sapevo, ovviamente, della sua teoria, ma mi sentivo scoraggiato, per non dire respinto, dai metodi dell'algebra trascendentale, che mi sembravano molto difficili, e dalla mancanza di visualizzabilità».

Heisenberg, per parte sua, scrisse a Wolfgang Pauli, nel giugno del 1926, che considerava vere e proprie «cretinate» le idee di Schrödinger in merito alla visualizzazione. Nella stessa lettera egli non nascose la sua irritazione nei confronti del collega allorché osservò: «Quanto più penso agli aspetti fisici della teoria di Schrödinger, tanto più repellenti li trovo».

Nel luglio dello stesso anno Max Born, un fisico quarantacinquenne direttore dell'Istituto di Fisica di Göttingen (nonché futuro nonno materno di Olivia Newton-John) pubblicò un articolo in cui suggeriva un'ipotesi assai destabilizzante, per l'epoca. La funzione d'onda di Schrödinger doveva essere interpretata non tanto come la distribuzione della carica elettrica che circonda il nucleo atomico ma, piuttosto, come una grandezza matematica astratta collegata alla densità di probabilità che l'elettrone si trovi in una data regione di spazio. L'equazione di Schrödinger, con questa nuova interpretazione, perdeva i suoi aspetti intuitivi e rappresentava invece uno strumento per calcolare l'evoluzione temporale della probabilità di trovare la particella nei vari punti dello spazio.

Heisenberg, sempre più irritato dal successo dell'equazione di Schrödinger, pubblicò nel 1927 un articolo che aveva lo scopo di esplorare i concetti di posizione, velocità, energia, eccetera: «Finora – dichiarava il fisico – l'interpretazione intuitiva della meccanica quantistica è stata piena di contraddizioni interne, che diventano evidenti nella lotta tra le diverse opinioni concernenti la teoria del discreto e del continuo, delle onde e delle particelle».

La sua nuova interpretazione intuitiva era basata sull'idea che in fisica atomica le incertezze nelle misure di posizione e quantità di moto non potessero essere ridotte contemporaneamente a zero a causa dell'inevitabile interazione tra l'oggetto da misurare e gli strumenti necessari ad osservarlo. Quanto più è nota la posizione di una particella, tanto meno sarà nota la sua quantità di moto. Quanto più esattamente si misura la quantità di moto, d'altra parte, tanto più incerta è la conoscenza della posizione della particella in esame. Si tratta del celeberrimo principio di indeterminazione, che ha svolto una funzione importantissima nell'interpretazione della realtà microscopica.

Oggi molti fisici ritengono che la meccanica quantistica sia una teoria completa e consolidata. In realtà i problemi aperti sono numerosi. Perlopiù sono in relazione con la sua interpretazione.

BIBLIOGRAFIA

- AA.Vv., 1976 - in *Enciclopedia della fisica*, a cura di Roberto Fieschi, ISEDI, Milano.
- DAPOR M., 1998 - *L'orologio di Albert*, La Stampa, Torino.
- DAPOR M., 2002 - *L'intelligenza della vita*, Springer-Verlag Italia, Milano.
- GREENE B., 2000 - *L'universo elegante*, Einaudi, Torino.
- GREENE B., 2004 - *La trama del cosmo*, Einaudi, Torino.
- MILLER A.I., 2005 - in *Equilibrio perfetto*, a cura di Graham Farmelo, Il Saggiatore, Milano.
- PENROSE R., 2005 - *La strada che porta alla realtà*, Rizzoli, Milano.
- TORALDO DI FRANCA G., 1976 - *L'indagine del mondo fisico*, Einaudi, Torino.

Indirizzo dell'autore:

Maurizio Dapor - Fondazione Bruno Kessler - Via Sommarive, 18 - I-38050 Povo (TN);
dapor@itc.it