SANDRO PETRUCCIOLI (*)

Discontinuità fisica e modello intuitivo nella teoria quantistica dell'atomo

Nell'articolo del 1927 « The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory », rimasto famoso come il « manifesto » dell'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica, Bohr afferma:

Da una parte, la definizione di uno stato di un sistema fisico, come viene comunemente inteso, richiede la eliminazione di tutte le perturbazioni esterne. Ma in questo caso, ogni osservazione sarebbe impossibile, e, soprattutto, i concetti di spazio e di tempo perderebbero il loro significato immediato. Dall'altra, se al fine di rendere possibile l'osservazione ammettiamo certe interazioni con opportuni dispositivi di misura, non appartenenti al sistema, non è più possibile ovviamente fornire una definizione non ambigua dello stato del sistema, e non si può parlare di causalità nel significato ordinario del termine.

Sono queste le idee che stanno alla base della prima formulazione del principio di complementarità secondo cui si afferma che, con l'introduzione del quanto di Planck nella fisica, esiste un'incompatibilità di principio tra « osservazione » e « definizione », o meglio che nel caso dei fenomeni quantistici occorre ammettere l'impossibilità di costruire un sistema di concetti definiti in modo operativo. Da questa caratterizzazione dell'idea di complementarità si ricava poi un'analoga relazione di esclusione reciproca tra descrizione spazio-temporale e causalità e tra immagine ondulatoria e immagine corpuscolare degli oggetti microscopici.

Come è noto, con questa interpretazione, sulla quale si innestarono vivaci discussioni e accese polemiche, Bohr ritenne di aver svelato il « vero significato fisico » del quanto di azione di Planck e di aver portato alla luce il reale nocciolo teorico dell'idea di discontinuità. Questa idea aveva fatto il suo ingresso in fisica, almeno sotto l'aspetto formale, con i lavori dello stesso Planck sulla teoria della radiazione termica all'inizio del secolo.

Tredici anni prima della Conferenza di Como, la « Trilogia » di Bohr si apriva con un giudizio sulle concezioni quantistiche di Planck che alimentava la fiducia in una loro diretta applicazione al modello nucleare di Rutherford e in una rapida soluzione del problema dell'instabilità delle orbite elettroniche.

(*) S. Petruccioli, Dipartimento di Fisica, Università di Roma « La Sapienza ».

In realtà, Bohr fu costretto a ridimensionare nel corso dello stesso anno il 1913, le possibilità di costruire una teoria della costituzione dell'atomo all'ombra del « paradigma » quantistico di Planck e a proporre addirittura — come hanno mostrato T. Kuhn e J. Heilbron in un famoso articolo del 1969, « The Genesis of the Bohr Atom » — tre differenti versioni della stessa teoria. Due di queste versioni sono presenti all'interno della « Trilogia » e la terza fu esposta da Bohr nella Conferenza che egli tenne alla Società danese di fisica il 20 dicembre del 1913. La causa principale che spinse Bohr a successive revisioni del suo originario programma di ricerca deve essere ricercata nella difficoltà che egli incontrò nel ricavare dal « paradigma » planckiano gli strumenti concettuali che legittimassero fisicamente il « meccanismo » che è alla base del comportamento radiativo dell'atomo.

Le due concezioni quantistiche, quella di Planck e quella di Bohr, al livello di elaborazione raggiunto alla fine del 1913, si differenziano per due conseguenze di rilievo:

a) Nel caso dell'atomo, e in relazione al contenuto delle leggi spettroscopiche, si deve rinunciare, secondo Bohr, all'ipotesi — che era ineliminabile nella costruzione della teoria di Planck, ma anche in quella di Einstein — che esista una relazione di identità tra la frequenza della radiazione emessa o assorbita e la frequenza meccanica della particella carica (oscillatore o elettrone rotante) che interagisce con la radiazione.

b) L'ipotesi di quantizzazione dell'energia di Planck non è utilizzabile, nemmeno in una versione debole della teoria, cioè nell'ambito di un'analogia puramente formale, per ricavare una condizione quantistica che ci consenta d selezionare gli stati stazionari dell'atomo, cioè le orbite elettroniche fisicamente permesse.

Si giunse a questa drastica conclusione dopo i primi due tentativi compiuti da Bohr di sviluppare con successo l'analogia tra oscillatore armonico ed elettrone rotante su un'orbita atomica, tentativi che obbligarono Bohr ad appesantire la sua teoria con ipotesi « arbitrarie »:

1) Ogni processo di emissione di radiazione è preceduto dalla ionizzazione dell'atomo;

2) La frequenza della radiazione emessa, dopo ogni processo di cattura dell'elettrone seguente a ionizzazione, è uguale alla metà della frequenza meccanica che l'elettrone stesso possiede nell'orbita stazionaria finale;

3) A ogni livello energetico dell'atomo è associato un diverso numero di quanti di energia.

Bohr era in grado di proporre unicamente un procedimento semiempirico di derivazione della condizione quantistica per gli stati stazionari:

a) Si trovano i valori dell'energia dell'elettrone su una determinata or-

bita mediante gli strumenti formali della meccanica classica: l'energia dell'ennesimo stato è proporzionale alla frequenza di rivoluzione.

b) Le leggi spettroscopiche e, nel caso particolare dell'atomo di idrogeno, la formula di Balmer esprimono la frequenza di ogni riga come differenza di due termini. Si fa l'ipotesi che ciascun termine sia uguale, a meno della costante di Planck, all'energia dell'ennesimo stato stazionario.

c) Dal confronto tra i due valori dell'energia, il primo ottenuto per via classica e il secondo con un'ipotesi sul contenuto delle leggi empiriche, si ricavano indicazioni dirette sugli stati dell'atomo fisicamente possibili.

Tutta l'informazione che possiamo ricavare dalla condizione quantistica è questa: essa rappresenta una regola di selezione per i livelli energetici dell'atomo. Altro non è in grado di dirci; soprattutto su come l'energia viene emessa o assorbita dall'atomo e sul valore delle frequenze della radiazione che l'atomo scambia con l'esterno.

Nella teoria di Planck l'ipotesi quantistica dice molto di più a questo proposito; dice che la frequenza della radiazione è uguale alla frequenza dell'oscillatore; che ogni quanto di energia è proporzionale, secondo h, alla frequenza dell'oscillatore; e che, essendo n il numero dei quanti, l'energia dello stato è $E = nh\nu$, cioè esiste una relazione definita tra la frequenza della radiazione e l'energia dell'oscillatore.

Per Bohr, la quantità di energia coinvolta in ogni processo di radiazione, e quindi la caratteristica di questa radiazione, possono essere determinate, non in relazione allo stato di un elettrone nella sua orbita, ma sulla base del confronto tra lo stato iniziale e lo stato finale della transizione che accompagna il processo radiativo. Quindi, non l'energia di uno stato, cioè l'energia che l'elettrone possiede quanto si trova su un'orbita stabile, ma la variazione di energia nel passaggio dell'elettrone da uno stato a un altro è uguale, a meno della costante di Planck, alla frequenza della radiazione. Inoltre, mentre il processo di radiazione *à la* Planck implica la presenza di n quanti di energia, il processo di radiazione *à la* Bohr fa *sempre* intervenire un solo quanto pari alla variazione dell'energia interna dell'atomo.

Cosa resta dunque delle originarie concezioni quantistiche di Planck nella teoria tomica di Bohr? L'asserzione secondo cui:
L'emissione (o l'assorbimento) di energia da parte di un atomo è associata a un *processo* di tipo *discontinuo* nel quale il sistema passa da uno stato stazionario a un altro; tale discontinuità si traduce nell'emissione (o nell'assorbimento) di un quanto di energia, il quale stabilisce una relazione tra le modificate condizioni interne dell'atomo e la natura della radiazione.

La teoria non è in grado di dire nulla sulla natura di questo processo discontinuo e sulle cause del comportamento radiativo dell'atomo. Gli atomi sono oggetti inosservabili quando si trovano in uno stato definito, stabile. Quando li osserviamo, dobbiamo interagire con essi attraverso un altro oggetto fisico, per

esempio la radiazione; se interagiamo con gli atomi, modifichiamo irreversibilmente il loro stato, cioè distruggiamo lo stato iniziale. Cosa avviene nell'istante in cui perturbiamo un atomo con una radiazione, la teoria non è in grado di dirlo. Sappiamo soltanto che sia prima che dopo l'interazione con l'osservatore l'atomo si trova in uno stato stabile, che in quanto tale è però inosservabile.

La teoria, in realtà, dice qualcosa di più: possiamo *definire* lo stato del sistema, cioè descrivere nello spazio e nel tempo il moto dell'elettrone sull'ennesima orbita con gli strumenti di analisi classici; ma ciò è possibile a condizione che gli elettroni non rispettino le leggi dell'elettrodinamica di Maxwell, e solo quando l'atomo è in uno stato stazionario, cioè finché l'atomo resta un oggetto in-*osservabile* e non interagisce con la radiazione. Quando ciò avviene non abbiamo alcuna possibilità di seguire l'evoluzione del sistema e di descrivere il processo di interazione nello spazio e nel tempo. Dobbiamo limitarci ad affermare che è in atto una transizione discontinua da uno stato a un altro.

Le conclusioni cui giungeva Bohr alla fine del 1913, nel tentativo di estendere le concezioni quantistiche al problema della struttura dell'atomo, sono singolarmente analoghe a quelle considerazioni che tredici anni dopo avrebbe posto a base del concetto di complementarità. I punti di convergenza tra i due modi di considerare la realtà fisica sono del tutto evidenti: se si vuole definire *lo stato* del sistema — e nel 1913 questo era visto solo all'interno di una descrizione meccanica del moto dell'elettrone — era necessario « eliminare tutte le perturbazioni esterne » (Bohr, 1927), il che voleva dire ammettere che, contrariamente a quanto previsto dall'elettrodinamica classica, l'elettrone accelerato nella sua orbita ellittica non emette radiazione (Bohr, 1913). D'altra parte, sottoponendo l'oggetto atomico a osservazione — il che vuol dire attivare un meccanismo di interazione tra lo stesso atomo e la radiazione — non è possibile fornire « una definizione non ambigua dello stato del sistema » (Bohr, 1927), poiché nulla sappiamo della relazione che esiste tra lo stato stazionario, a partire dal quale l'elettrone compie una transizione associata a ogni interazione con la radiazione, e il processo di radiazione (Bohr, 1913): la teoria ci fornisce unicamente informazioni riguardo alla dipendenza della frequenza della radiazione dalla variazione dell'energia interna dell'atomo.

Furono necessari tredici anni, nel corso dei quali si assistette a una eccezionale attività di ricerca teorica e sperimentale, perché Bohr riuscisse a cogliere, nella nuova situazione fisica connessa all'interazione tra radiazione e materia, implicazioni tanto radicali da rivoluzionare addirittura i nostri tradizionali modi di concettualizzazione e di rappresentazione della realtà. Solo nel 1927, infatti, egli riconobbe che il contrasto tra possibilità di definizione dello stato del sistema e osservabilità delle grandezze fisiche era ineliminabile e comportava che « non si può parlare di causalità nel significato comune del termine ».

Perché il fisico danese non ritenne di assumere un atteggiamento così radicale riguardo alla revisione dei fondamenti concettuali fin dal 1913, pur avendo a disposizione gli stessi dati sui quali avrebbe costruito nel 1927 l'idea di complementarità? Perché scelse invece di impegnarsi, a partire dalla « Trilogia », nella

ricerca di una soluzione « classica » al problema del « meccanismo della radiazione »?

È evidente che un interrogativo del genere non avrebbe senso se si prescindesse dal diverso contesto problematico al quale facevano riferimento le scelte così diverse che Bohr operò nel 1913 e nel 1927. Si pensi soltanto che alla vigilia della Conferenza di Como era stato elaborato, con i lavori di Born e di Heisenberg, il formalismo matematico della nuova meccanica; che lo stesso Heisenberg aveva scoperto le relazioni di indeterminazione; e soprattutto si era consolidata l'idea, introdotta da Einstein nel 1917, che nella trattazione dei fenomeni quantistici non si potesse prescindere da considerazioni di tipo probabilistico.

Questa domanda è però tutt'altro che banale se viene assunta come criterio guida per ricostruire, in una prospettiva storica, l'articolazione che Bohr diede al suo programma di ricerca e per individuare le radici lontane della sua interpretazione fisica della meccanica quantistica. Scopriremo allora che quel programma si sviluppò all'interno di una linea di pensiero che rivendicava la difesa del patrimonio conoscitivo della fisica classica, in particolare dell'elettrodinamica di Maxwell-Lorentz; scopriremo, inoltre, che l'idea della complementarità è molto meno contaminata filosoficamente di quanto hanno sostenuto alcuni critici dell'opera del fisico danese.

La teoria quantistica dell'atomo di idrogeno, che forniva un fondamento teorico al modello di Rutherford, si impose immediatamente all'attenzione degli ambienti scientifici dell'epoca grazie al suo eccezionale potenziale interpretativo e alla altrettanto sorprendente capacità di previsione sperimentale. E ciò, nonostante essa avesse una sua evidente debolezza logica e concettuale interna (si noti che Bohr, consapevole di ciò, si riferì sempre ad essa, fino al 1925, non come a una « teoria », ma come a uno « schema formale »). La teoria di Bohr è in realtà afflitta da un conflitto ineliminabile: da una parte, si discostava radicalmente dalle teorie classiche (si vedano i due postulati posti a fondamento della teoria), mentre, dall'altro, « restava sia concettualmente, sia tecnicamente dipendente da esse » (se si voleva definire lo stato dell'atomo, salvaguardando le possibilità di visualizzazione — *Anschaulichkeit* — delle nostre descrizioni della realtà, era necessario utilizzare gli strumenti concettuali e formali della meccanica analitica). La teoria di Bohr si sviluppò per molti anni trasformando questo conflitto in una sistematica linea di ricerca che si orientò, come afferma giustamente in un recente lavoro John Hendry, in due direzioni: da una parte, egli cercò di estendere il campo di applicabilità dei concetti classici ai fenomeni cosiddetti non classici (si veda l'utilizzazione del principio adiabatico nella determinazione delle condizioni quantistiche degli stati con i metodi della meccanica analitica, anche nel caso di sistemi sottoposti a campi di forza variabili); dall'altra, egli si preoccupò di limitare l'applicabilità di questi concetti classici (per esempio con l'introduzione dei due postulati quantistici) così da consentire a fenomeni completamente non classici, o supposti tali (come le transizioni che accompagnano ogni processo radiativo), di entrare a far parte della teoria senza provocare insanabili contraddizioni.

Bohr adottò questo approccio teorico perché solo i concetti e le teorie classiche erano in grado di assicurare la costruzione di un'immagine intuitiva della realtà; inoltre, perché era fortemente convinto che svelando il meccanismo della radiazione si sarebbe ottenuta un'interpretazione « classica » del quanto di Planck e del carattere apparentemente discontinuo dei processi microscopici? Certamente, egli considerava il contenuto intuitivo e la descrivibilità nello spazio e nel tempo come due requisiti essenziali di ogni spiegazione scientifica. A testimonianza di ciò vi sono alcune prese di posizione esplicite del fisico danese e soprattutto l'atteggiamento di netto rifiuto che egli assunse nei riguardi di alcune ipotesi teoriche. Da una parte, il rifiuto dell'ipotesi del « *core model* » sostenuta tra gli altri dal suo giovane allievo Werner Heisenberg, secondo la quale si rinunciava al concetto di orbita dell'elettrone; dall'altra la « non accettazione » dei numeri quantici seminteri in quanto, a suo avviso, non interpretabili nell'ambito di un modello visualizzabile, e quindi privi di ogni realtà fisica.

Sarebbe, tuttavia, fortemente limitativo giudicare l'atteggiamento di Bohr come condizionato da un'istanza metodologica sorretta, a sua volta, da convinzioni metafisiche. Vi sono almeno due ragioni teoriche che Bohr considerava particolarmente fondate e che suggerivano la difesa a oltranza del modello e che obbligavano a considerare la discontinuità un problema teorico *da risolvere*, piuttosto che l'indizio, come suggeriva Pauli, della necessità di una revisione radicale dei concetti della fisica.

In primo luogo, la coincidenza, riscontrata nella regione degli alti numeri quantici, tra previsioni classiche e previsioni quantistiche; coincidenza, non nuova per la fisica quantistica, che Bohr formalizzò nel cosiddetto principio di corrispondenza. Questo principio costituiva un utile strumento per ricavare una stima del valore delle frequenze e delle intensità delle righe a partire dalle frequenze e dalle ampiezze delle componenti armoniche del moto meccanico degli elettroni nelle singole orbite stazionarie. Ma il principio di corrispondenza era formulabile solo all'interno del modello orbitale dell'atomo, cioè in un contesto teorico che utilizzava concetti classici come traiettoria, frequenza meccanica, ecc.

In secondo luogo, l'insostenibilità dell'ipotesi di Einstein che estendeva la quantizzazione all'energia associata al campo elettromagnetico, cioè dell'ipotesi dei quanti di luce, che Bohr considerò *sempre* nulla più che uno strumento euristico dimostratosi particolarmente utile nella spiegazione dell'effetto fotoelettrico. L'obiezione che Bohr rivolgeva all'idea einsteiniana non ammetteva repliche. Si suppone che ogni quanto di energia associato alla radiazione abbia un valore $h\nu$, dove h è la costante di Planck e « ν è la grandezza che nell'immagine classica è descritta come il numero di onde che passano nell'unità di tempo »; ma questa è una soluzione non soddisfacente al problema della propagazione della luce, « perché la ' frequenza ' della radiazione che compare nella teoria è definita da esperimenti sul fenomeno dell'interferenza, i quali, per essere interpretati, hanno bisogno dell'ipotesi della costituzione ondulatoria della luce ».

L'elettrodinamica classica incontrava, dunque, una barriera insormontabile quando era costretta a misurarsi con i fenomeni nei quali interviene il quanto di azione di Planck, ma conservava una tale efficacia interpretativa da suggerire che la nuova teoria quantistica sarebbe nata come « generalizzazione razionale » di quello schema teorico. Bohr portò alle estreme conseguenze il suo progetto di ricerca — e questo è il maggiore contributo che, a mio avviso, egli diede alla fondazione della meccanica quantistica — accettando addirittura una conseguenza prevista dalla teoria di Einstein; cioè che la sola alternativa all'ipotesi dei quanti di luce era l'abbandono dei grandi principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

Con l'articolo del 1924, scritto con la collaborazione di Kramers e Slater, Bohr propose un « nuovo » modello di atomo dove ogni stato stazionario era caratterizzato da un insieme di oscillatori armonici « virtuali », aventi frequenze uguali alle possibili transizioni che l'atomo è in grado di compiere a partire da quello stato. Si trattò dell'ultimo, disperato, tentativo di difendere il modello intuitivo e di conciliare il carattere probabilistico degli eventi quantistici con la richiesta di descrivibilità del fenomeno radiativo nello spazio e nel tempo. Questa soluzione, come è noto, era stata suggerita dalla teoria quantistica della dispersione elaborata da Ladenburg, Kramers e Heisenberg. Questo tentativo doveva: *a*) ipotizzare un insolito meccanismo di « comunicazione » tra i singoli atomi attraverso campi virtuali prodotti dagli oscillatori associati ai differenti stati quantistici dell'atomo; *b*) prevedere l'esistenza di un'interazione tra questi campi virtuali e la radiazione da cui gli atomi erano illuminati; e *c*) supporre che le ampiezze di questi campi agissero sulla probabilità che gli atomi compissero una determinata transizione. Ma, soprattutto, con questo tentativo, si doveva supporre, così come aveva previsto Einstein, che i principi di conservazione non fossero più validi nei singoli processi elementari, ma avessero un significato statistico e si doveva *rinunciare a qualsiasi legame di tipo causale* tra le transizioni che avvengono in atomi distanti.

Come è noto, la teoria degli oscillatori virtuali fu clamorosamente falsificata, nel giro di poche settimane, dagli esperimenti di Geiger e Bothe. Ma non si trattò del fallimento dell'intero programma di ricerca di Bohr poiché con l'idea di oscillatore virtuale egli aveva dimostrato quale fosse il limite estremo al quale poteva essere portata una teoria dell'atomo che si ponesse l'obiettivo di difendere i tradizionali criteri di descrivibilità degli oggetti fisici. Con l'idea di oscillatore virtuale, Bohr aveva compiuto un enorme progresso nella direzione del chiarimento dei fondamenti concettuali di una teoria che incorpori al proprio interno l'idea di discontinuità quantistica.

Al di là delle conseguenze eclatanti della sua teoria del 1924, che potevano provocare una reazione di rigetto da parte dei fisici quantistici dell'epoca, quella stessa teoria gli permise di comprendere che non esisteva alcuna compatibilità tra le possibilità osservative permesse dai fenomeni atomici e le possibilità di definizione degli stati del sistema secondo i requisiti di un modello meccanico. Con gli oscillatori virtuali si rinuncia ad associare a ogni stato le frequenze

meccaniche ricavabili dall'analisi armonica del moto (le quali peraltro non hanno, a eccezione della zona degli alti numeri quantici, alcuna relazione con le frequenze della radiazione) e si suppone che ogni stato stazionario sia caratterizzato dalla sovrapposizione di tutti i possibili stati (gli oscillatori virtuali) di evoluzione del sistema, ciascun caratterizzato da una certa probabilità. Questa probabilità esprime la possibilità che, come risultato di una certa misura, osserviamo realmente *una* particolare transizione quantistica. I singoli stati non sono connessi al moto dell'elettrone nell'orbita stazionaria ma ai livelli energetici, iniziale e finale, (le frequenze degli oscillatori sono tali per cui $\nu = 1/h\,[E_1 - E_2]$) tra i quali avvengono le transizioni, che sono alla base del meccanismo della radiazione.

Alla fine del 1927, Bohr presentava l'interpretazione fisica della meccanica quantistica e illustrava la teoria della complementarità. Non si trattava di una brillante soluzione filosofica escogitata per aggirare pesanti problemi teorici; era il punto di arrivo inevitabile di una coerente linea di ricerca che aveva avuto come obiettivo principale la difesa della ricchezza interpretativa e della validità concettuale dell'intero patrimonio della fisica classica.

Bibliografia essenziale

N. Bohr, « On the Constitution of Atoms and Molecules », *Phil. Mag.*, *26*, 1913, 1–25, 476–502, 857–875.

N. Bohr, H. A. Kramers, J. C. Slater, « The Quantum Theory of Radiation », *Phil. Mag.*, *47*, 1924, 785–802.

N. Bohr, « The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory », *Nature*, *121*, 1928, 58–590.

J. L. Heilbron, Th. S. Kuhn, « The Genesis of the Bohr Atom », *Hist. Stud. Phys. Sci.*, *1*, 1969, 211–290.

J. Hendry, *The Creation of Quantum Mechanics and the Bohr–Pauli Dialogue*, Reidel, Dordrecht 1984.