

Meccanica quantistica dei processi d'urto^{1 2}.

Max Born a Gottinga.

(ricevuto il 21 luglio 1926)

La forma di Schrödinger della meccanica quantistica permette di definire in modo naturale la frequenza di uno stato per mezzo dell'intensità dell'oscillazione propria associata. Quest'idea porta ad una teoria dei processi d'urto nella quale le probabilità di transizione sono determinate dal comportamento asintotico di soluzioni aperiodiche.

Introduzione. I processi d'urto hanno non solo prodotto le dimostrazioni sperimentali più convincenti per le ipotesi fondamentali della teoria dei quanti, ma paiono anche adatti a far luce sul significato fisico delle leggi formali della cosiddetta "meccanica quantistica". Queste producono, a quanto pare, sempre i giusti valori dei termini degli stati stazionari e le giuste ampiezze delle oscillazioni irraggiate nelle transizioni, ma sull'interpretazione fisica delle formule le opinioni sono divise. La forma matriciale della meccanica quantistica³ fondata da Heisenberg, e da lui sviluppata assieme a Jordan ed all'autore di questa comunicazione, parte dall'idea che una rappresentazione esatta dei processi nello spazio e nel tempo sia in generale impossibile, e quindi ci si accontenta di stabilire relazioni tra quantità osservabili, che solo nel caso limite classico possono essere interpretate come proprietà del moto. Schrödinger⁴ d'altro canto sembra attribuire alle onde, che egli secondo il proce-

¹Zeitschr. f. Phys. **38**, 803 (1926).

²Su ciò una comunicazione provvisoria, ZS. f. Phys. **37**, 863, 1926.

³W. Heisenberg, ZS. f. Phys. **33**, 879, 1925; M. Born e P. Jordan, ibidem **34**, 858, 1925; M. Born, W. Heisenberg e P. Jordan, ibidem **35**, 557, 1926. Vedi anche P.A.M. Dirac, Proc. Roy. Soc. **109**, 642, 1925; **110**, 561, 1926.

⁴E. Schrödinger, Ann. d. Phys. **79**, 361, 489, 734, 1926. Vedasi in particolare la seconda comunicazione, pag. 499. Inoltre Naturw. **14**, 664, 1926.

dimento di de Broglie vede come il veicolo dei processi atomici, una realtà dello stesso tipo di quella posseduta dalle onde luminose; egli cerca di "costruire gruppi d'onde che" abbiano "in ogni direzione dimensioni relativamente piccole" e che evidentemente devono rappresentare in modo diretto il corpuscolo in moto.

Nessuna di queste due interpretazioni mi sembra soddisfacente. Cercherò qui di dare una terza interpretazione e di dimostrare la sua utilità nel caso dei processi d'urto. Associa ad essa un'osservazione di Einstein sul comportamento del campo d'onda e dei quanti di luce; egli diceva press'a poco che le onde ci sono solo per mostrare la via ai quanti di luce corpuscolari, e parlava in questo senso di un "campo fantasma". Questo determina la probabilità che un quanto di luce, il trasportatore di energia ed impulso, prenda un dato cammino; ma al campo di per sè non appartengono nè energia nè impulso.

Per porre queste idee direttamente in relazione con la meccanica quantistica si farebbe assai meglio ad aspettare finchè non sia compiuto l'inserimento del campo elettromagnetico nel formalismo. Ma per la completa analogia che esiste tra quanto di luce ed elettrone si penserà di formulare le leggi del moto dell'elettrone in modo analogo. E risulta qui ovvio considerare le onde di de Broglie-Schrödinger come il "campo fantasma" o meglio "campo guida".

Tentativamente seguirò quindi l'idea: il campo guida, rappresentato da una funzione scalare ψ delle coordinate di tutte le particelle che intervengono e del tempo, si propaga secondo l'equazione differenziale di Schrödinger. Ma impulso ed energia saranno trasmessi come quando dei corpuscoli (elettroni) realmente volano in giro. I cammini di questi corpuscoli sono determinati solo quanto li restringe la legge dell'energia e dell'impulso; per il resto per quanto concerne l'imboccare un certo cammino, sarà data solo una probabilità mediante l'assegnazione dei valori della funzione ψ . Ciò si potrebbe, un po' paradossalmente, riassumere all'incirca così: il moto delle particelle segue leggi probabilistiche, ma la probabilità stessa si propaga in accordo con la

legge causale⁵.

Se si considerano i tre gradi dello sviluppo della teoria dei quanti si vede che il più basso, quello dei processi periodici, è del tutto inadatto a dimostrare l'utilità di un'idea siffatta. Qualcosa di più offre il secondo grado, quello dei processi aperiodici stazionari; ci occuperemo di questi nel presente lavoro. Ma realmente decisivo può essere solo il terzo grado, quello dei processi non stazionari; in questo caso si deve dimostrare se l'interferenza di "onde di probabilità" smorzate è sufficiente a spiegare quei fenomeni che con evidenza indicano un accoppiamento non spazio-temporale.

Una precisazione del concetto è possibile solo in base allo sviluppo matematico⁶; perciò ci dedichiamo subito ad esso, per tornare solo in seguito all'ipotesi stessa.

.
. .
. . .
. . . .

§ 9. Osservazioni conclusive. In base alla trattazione presente posso esprimere l'opinione che la meccanica quantistica consente di formulare e di risolvere non solo il problema degli stati stazionari, ma anche quello dei processi di transizione. L'interpretazione di Schrödinger sembra in proposito dar conto dello stato dei fatti nel modo di gran lunga più facile; inoltre consente di mantenere i concetti consueti di spazio e tempo, nei quali gli eventi si svolgono in modo del tutto normale. Invece la teoria proposta non si conforma all'idea della determinatezza causale dell'evento singolo. Nella mia comunicazione provvisoria ho sottolineato in modo particolare questo indeterminismo, poichè esso mi pare nel miglior accordo con la prassi dello sperimen-

⁵Ciò vuol dire che la conoscenza dello stato in tutti i punti ad un istante determina l'assegnazione dello stato a tutti i tempi successivi.

⁶Nell'esecuzione matematica di questo lavoro mi ha nel modo più amichevole aiutato il Prof. N. Wiener di Cambridge; vorrei qui esprimergli il mio grazie in proposito, e riconoscere che senza di lui non sarei giunto allo scopo.

tatore. Ma naturalmente non è vietato, a chiunque non si lasci così accontentare, assumere che esistano dei parametri ulteriori, non ancora introdotti nella teoria, che determinano l'evento singolo. Nella meccanica classica essi sono le "fasi" del moto, cioè le coordinate delle particelle in un determinato istante. Mi pare per il momento improbabile che si possano introdurre in modo naturale nella nuova teoria quantità che corrispondano a queste fasi; ma Frenkel mi ha comunicato che forse invece questo succede. Comunque sia, questa possibilità non cambierebbe nulla riguardo all'indeterminismo pratico dei processi d'urto, perchè non si sanno dare proprio i valori delle fasi; essa del resto deve portare alle stesse formule della teoria "senza fasi" qui proposta.

Tendo a credere che le leggi del moto dei quanti di luce si potranno trattare in modo del tutto analogo⁷. Soltanto non si ha allora nel problema fondamentale dell'emissione spontanea alcun processo periodico, quindi nessun problema con valori al contorno, ma un problema ai valori iniziali per le equazioni d'onda accoppiate della quantità ψ di Schrödinger e del campo elettromagnetico. Cercare le leggi di questo accoppiamento è certo uno dei problemi più urgenti; per quanto so, si lavora ad esso in più posti⁸. Quando queste leggi saranno formulate sarà forse possibile proporre una teoria razionale del tempo di vita degli stati, della probabilità di transizione nei processi radiativi, del decadimento e della larghezza di riga.

⁷*Le difficoltà che finora si sono trovate nell'introduzione del "campo fantasma" nell'ottica mi sembrano originare in parte dall'ipotesi implicitamente fatta che il centro dell'onda e la particella emittente debbano essere nello stesso posto. Ma questo certamente non accade già nell'effetto Compton e in generale non accadrà mai.*

⁸*Vedasi per esempio la dissertazione apparsa or ora di O. Klein, ZS. f. Phys. 37, 895, 1926.*