

Capitolo 1

Aspetti della fisica quantistica

tratto da: *Ciò che tiene insieme il mondo*
di Roman Sèxl, Ed. Zanichelli

1.1 Come si fa a passare contemporaneamente attraverso due porte?

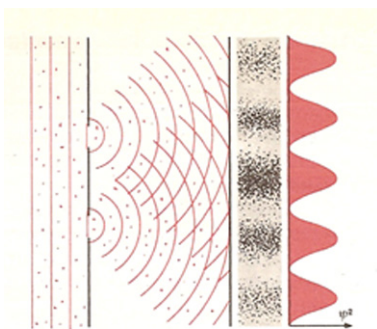
La paradossale problematica onda-corpuscolo diventa particolarmente evidente nella descrizione dell'esperimento delle due fenditure, la cui spiegazione costituisce una pietra di paragone per l'interpretazione della teoria dei quanti.

Se dunque un'onda luminosa, sonora, un'onda sull'acqua o anche un'onda di elettroni incide su una stretta fessura in uno schermo impenetrabile, essa si sventaglia in tutte le direzioni dopo aver attraversato la fessura. Questo fenomeno si può osservare facilmente con le onde superficiali su uno specchio d'acqua tranquillo, ed è anche la causa del fatto che un suono, che si propaga attraverso una stretta fessura in un muro, viene percepito in tutto lo spazio al di là del muro. Questi fenomeni di diffrazione sono appunto caratteristici di tutte le propagazioni ondose.

Se un'onda deve propagarsi attraverso due strette aperture vicine, cioè una doppia fenditura, dietro l'ostacolo si forma una figura di diffrazione strutturata molto dettagliatamente. Le onde provenienti dalle due fenditure si sovrappongono e talora un picco di una onda coincide con un picco dell'altra onda, talora invece un picco della prima onda coincide con una valle dell'altra. Con questo

meccanismo di *interferenza* si forma un quadro di ondulazioni complesso, che fu osservato per la prima volta sulle onde luminose da Thomas Young (1773-1829), che in tal modo rivelò appunto la natura ondulatoria della luce. Poco tempo dopo il diffondersi delle prime idee di de Broglie, fenomeni di interferenza di questo tipo furono osservati anche con onde di elettroni.

Per il problema del dualismo onda-corpuscolo quest'ultimo risultato è a prima vista enigmatico, paradossale e inspiegabile giacché teoria ondulatoria e teoria corpuscolare danno predizioni completamente diverse. Finché gli elettroni attraversano una sola fenditura, la situazione è relativamente facile e chiara. Dietro alla fessura si ottiene una immagine sfocata da fenomeni di diffrazione, immagine che può essere registrata per esempio su una lastra fotografica. Se si ripete l'esperimento usando la seconda fenditura anziché la prima, sulla lastra si riproduce una immagine uguale. Ma se le due fenditure sono entrambe aperte, la situazione cambia completamente. Le due porzioni di onda trasmessa interferiscono l'una con l'altra, ciò che si traduce sulla lastra fotografica in un'immagine a strisce peculiare.



Se un'onda di elettroni viene trasmessa attraverso due fenditure parallele e vicine, su una lastra fotografica disposta al di là dello schermo si osserva una immagine a strisce caratteristica. Essa si forma per interferenza delle onde che si propagano attraverso le due fenditure. La teoria corpuscolare prevederebbe qui un comportamento completamente diverso. Siccome ogni elettrone può passare attraverso una sola delle due fenditure, esso non dovrebbe dar luogo ad alcun fenomeno di interferenza. La contraddizione tra questi due comportamenti viene evitata facendo uso delle relazioni di indeterminazione di Heisenberg

La teoria ondulatoria spiega questa immagine con la sovrapposizione delle due onde, così come l'abbiamo descritta anche noi qui sopra. Poiché d'altra parte l'intensità dell'onda risultante fornisce la probabilità di trovare le particelle, anche la teoria corpuscolare sembra in accordo con le osservazioni: l'interpretazione di Born fornisce la relazione necessaria. Ma la teoria corpuscolare entra subito in

difficoltà se ci chiediamo attraverso quale delle due fenditure è passato ciascuno degli elettroni registrati. Siccome ogni particella attraversa evidentemente una sola delle due fenditure, dovrebbe essere indifferente che le due fenditure siano aperte contemporaneamente oppure una dopo l'altra.

Ma l'esperimento dà nei due casi risposte completamente diverse. Sembra che in qualche modo sia importante, per le particelle, che le due fenditure siano aperte insieme. Sembra che ciascuna delle due particelle possa in qualche modo passare da due porte distinte contemporaneamente! Non dovrebbe essere possibile stabilire semplicemente attraverso quale delle due fessure ciascun elettrone è effettivamente passato? Osservando la sua traiettoria si dovrebbe ben riuscire a risolvere l'enigma del suo movimento.

Questa idea presuppone però che si possano effettivamente osservare le traiettorie delle singole particelle. Fin dalle sue prime considerazioni Heisenberg aveva annunciato dubbi in proposito. Al principio dell'anno 1927 egli riuscì a precisare i suoi dubbi ed a formulare un limite fondamentale della osservabilità: *le relazioni di indeterminazione di Heisenberg*.

1.2 La fine del determinismo

“Le conferenze” di Erwin Schrodinger a Copenaghen fecero divampare nuovamente con estrema violenza la controversia sulla interpretazione della meccanica quantistica. Anche dopo la partenza di Schrodinger, Niels Bohr discusse con Werner Heisenberg, che era arrivato a Monaco per una visita di qualche mese, sulle conseguenze della nuova teoria. “L'interpretazione intuitiva della meccanica quantistica è ancora piena di contraddizioni interne, che si manifestano nella battaglia delle opinioni su continuo e discontinuo, su onda e corpuscolo”, scrive Heisenberg nella prefazione al suo articolo (*Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica quantistica*), nel quale egli espone le sue conclusioni sulla controversia.

Questo articolo divenne, come parte della *interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanti*, un classico della storia della fisica. Nel riassunto che precede l'articolo si dice: “Nel presente lavoro vengono prima di tutto presentate definizioni esatte delle parole: posizione, velocità, energia ecc. (per esempio di un elettrone), definizioni che mantengono la loro validità anche nella meccanica quantistica, e viene dimostrato che le coppie di grandezze canonicamente coniugate possono essere misurate contemporaneamente solo con una imprecisione caratteristica. Questa costituisce il vero motivo del presentarsi di relazioni statistiche nella meccanica quantistica...”

L'*imprecisione* poneva una barriera di principio alla possibilità di determinare le traiettorie di elettroni e di altre particelle del microcosmo. Ma prima di tutto occorre ridefinire *ex novo* concetti come posizione, traiettoria o velocità, per adattarli alle esigenze del mondo microscopico:

Se si vuole far chiarezza su ciò che si deve intendere per posizione dell'oggetto, per esempio nel caso dell'elettrone, occorre specificare determinati esperimenti con l'aiuto dei quali si può misurare la "posizione" dell'elettrone, altrimenti questa espressione non ha alcun senso.

"Esse est percipi !", avrebbe qui esclamato il vescovo Berkeley, e si sarebbe dichiarato completamente d'accordo con le riflessioni di Heisenberg. Grandezze come posizione e velocità dell'elettrone esistono solo nella osservazione. È completamente senza significato parlare di grandezze di questo genere, se contemporaneamente non si danno le prescrizioni su come le si possano misurare.

"La traiettoria esiste solo in quanto noi la osserviamo", così Heisenberg si esprime in modo pregnante. Ma ogni osservazione implica anche una perturbazione dell'oggetto che si vuole osservare. Se per esempio si vuole stabilire la posizione di un elettrone, occorre illuminare la particella e osservarla con un microscopio. In questo procedimento l'elettrone viene colpito da quanti di luce, e con ciò il suo impulso, e quindi il suo moto, viene modificato in modo incontrollabile.

L'analisi di Heisenberg mostrava che tanto più precisamente viene determinata la posizione, tanto meno precisa risulta la conoscenza dell'impulso, e viceversa. Questo perché per poter determinare la traiettoria dell'elettrone con molta precisione; occorre impiegare luce con lunghezza d'onda molto piccola, che in base ai risultati di Planck e di Einstein è costituita da quanti di luce di energia molto alta, che perturbano molto fortemente il moto dell'elettrone. Quanto più precisa è la misura della posizione, tanto più forte è la perturbazione dell'impulso e quindi indeterminato l'impulso finale. Ogni procedimento di misura deve perciò limitarsi a determinare con la massima precisione possibile o la posizione o l'impulso dell'elettrone, e il limite di precisione è stabilito dalla celebre "relazione di indeterminazione di Heisenberg".

Questa limitazione di principio alla precisione di una misura portava ad altre modificazioni radicali nel sistema concettuale della fisica. Passiamo ora al concetto di *traiettoria* dell'elettrone. Con la parola *traiettoria* noi intendiamo una successione di punti dello spazio, che l'elettrone assume come "posizione" una dopo l'altra. Siccome sappiamo già che cosa significa posizione ad un istante dato, qui non intervengono difficoltà nuove.

Ma è facile da vedere, per esempio, che l'espressione usata spesso "l'orbita dell'elettrone nell'atomo di idrogeno", non ha alcun significato dal nostro punto di vista. Per ricavare questa orbita si dovrebbe infatti illuminare l'atomo con luce di lunghezza d'onda minore del diametro dell'atomo. Ma un unico quanto di questa luce è sufficiente per strappare completamente l'elettrone dalla sua "orbita" (con il che, oltre a tutto, si verrebbe a definire soltanto un punto di una tale orbita): la parola "orbita" non ha qui dunque alcun significato ragionevole.

L'orbita dunque, secondo Heisenberg, nasce solo con l'osservazione e insieme

viene distrutta dalla osservazione stessa. Il delicato mondo dell'atomo non scopre le sue carte così facilmente.

Ma con questo è risolto anche il problema delle due fenditure. Fintanto che la traiettoria dell'elettrone, o del fotone, che attraversa lo schermo non viene osservata, non ha senso chiedere quale sia la traiettoria di questa particella, poiché il concetto di traiettoria acquista un significato solo con l'osservazione. D'altra parte, se si osserva quale delle due fenditure ha attraversato l'elettrone, con questa osservazione si perturba il comportamento delle particelle, come mostra una analisi quantitativa, in modo tale che i delicati fenomeni di interferenza vengono distrutti. Anche in questo caso la curiosità dell'uomo distrugge proprio quei fenomeni del mondo dell'atomo che essa vorrebbe osservare.

Il punto di partenza di Heisenberg era stato il positivismo. Nella fisica dovevano aver diritto di esistenza solo le relazioni fra grandezze osservabili. Il risultato delle sue riflessioni era invece una filosofia ben più radicale del positivismo e in un certo senso quasi opposta ad esso: i fenomeni, come per esempio la traiettoria di un elettrone, nascono solo con l'osservazione. Era quasi un trionfo per la filosofia idealistica, nemica per eccellenza delle scienze della natura fin dai tempi di Schelling e di Hegel.

Con le relazioni di indeterminazione di Heisenberg, che avevano messo in luce un limite di principio della misurabilità nella fisica del microcosmo, era arrivata la fine del determinismo. Ricordiamo ancora una volta le parole di Laplace, che aveva descritto l'universo come una grande macchina senza anima: “Noi dobbiamo dunque considerare lo stato presente dell'universo da una parte come l'effetto del suo stato precedente e d'altra parte come la causa dello stato successivo. Uno *spirito* che conoscesse tutte le forze che agiscono in natura ad un dato istante, nonché le posizioni relative di tutte le cose che costituiscono il mondo, e che inoltre fosse sufficientemente intelligente da saper analizzare tutti questi dati, potrebbe esprimere con la stessa formula il moto dei più grandi corpi celesti e del più piccolo atomo. Nulla sarebbe per lui incerto, futuro e passato sarebbero aperti come pagine di un libro davanti ai suoi occhi”.

Così commenta Heisenberg questa idea della macchina del mondo: “Nella formulazione dura della causalità: -Se conosciamo con precisione il presente, possiamo calcolare il futuro- non è errata la conseguenza, ma la premessa. Noi non possiamo in linea di principio conoscere il presente in tutti i suoi particolari. Perciò ogni processo conoscitivo è una scelta fra una folla di possibilità, ed una limitazione del futuro possibile. Ora, poiché il carattere statistico della teoria dei quanti è così fortemente legato alla imprecisione di ogni conoscenza, si potrebbe essere tentati di supporre che dietro al mondo statistico della nostra conoscenza si nasconda un altro mondo reale, nel quale la legge di causa ed effetto è valida. Ma tali speculazioni ci sembrano, e vogliamo espressamente sottolinearlo, inutili e prive di senso. La fisica deve soltanto esprimere formalmente le relazioni fra le percezioni. Anzi, si possono esprimere ancora meglio i veri termini della questione nel modo seguente: siccome tutti gli esperimenti sono soggetti alle leggi della

meccanica quantistica, e perciò alle relazioni di indeterminazione, si può dire che la non validità della legge di causa ed effetto è definitivamente stabilita per mezzo della meccanica quantistica”.

Queste opinioni divennero parte integrante della *interpretazione di Copenhagen della teoria dei quanti*, che dominò per alcuni decenni il pensiero, dei fisici quasi come una Sacra Scrittura. Ma ci furono anche degli eretici: “La filosofia - o la religione - dell’acquietamento di Heisenberg e Bohr é escogitata così bene, che essa dà al credente, per intanto, un morbido cuscino, dal quale egli non si lascerà scacciare tanto facilmente”, scriveva Albert Einstein ad Erwin Schrodinger. Al giorno d’oggi la discussione è divampata in pieno di nuovo. Ma prima che impariamo i motivi di ciò dobbiamo rendere onore al contributo dato da Niels Bohr alla interpretazione della teoria dei quanti.

1.3 L’interpretazione di Copenhagen della teoria dei quanti

... Siamo qui di fronte ad un problema epistemologico completamente nuovo per le scienze della natura. Finora ogni descrizione di esperienze era fondata sulla ipotesi, immanente già nell’uso linguistico comune, che sia possibile operare una netta distinzione fra il comportamento degli oggetti osservati e gli strumenti necessari per la loro osservazione... Ma appena incominciamo ad occuparci di fenomeni come i processi atomici individuali, che per loro natura sono essenzialmente condizionati dalla interazione fra gli oggetti e gli apparecchi di misura, necessari per la definizione della disposizione sperimentale, dobbiamo esaminare più da vicino la questione di quale tipo siano più in generale le conclusioni che si possono ricavare riguardo a questi oggetti e di come queste conclusioni possano essere espresse.

A questo riguardo ci dobbiamo innanzitutto render conto chiaramente del fatto che lo scopo di ogni esperimento fisico non ci permette alcuna scelta diversa da quella di impiegare i concetti della vita quotidiana, raffinati mediante la terminologia della fisica classica. Questo vale non soltanto per la descrizione della struttura e del funzionamento degli apparecchi di misura, ma anche per la descrizione dei risultati sperimentali. Qualsiasi descrizione dei processi che si svolgono nel laboratorio deve dunque essere sempre espressa nel linguaggio quotidiano, il linguaggio della fisica classica, per consentire la comunicazione fra gli uomini. In questo rispetto l’esperienza quotidiana precede anche logicamente le conoscenze della fisica dei quanti.

Da questo segue però una ulteriore importante conclusione: “D’altra parte é altrettanto importante comprendere, che proprio da questa stessa circostanza segue anche che nessun risultato di un esperimento su un fenomeno che si svolge in linea di principio al di fuori della fisica classica può essere usato per trarne

conclusioni su proprietà degli oggetti in se: un tale risultato è anzi legato inescindibilmente ad una situazione ben determinata, nella cui descrizione entrano come componenti essenziali anche gli apparecchi di misura che interagiscono con l'oggetto.”

Il microcosmo costituisce dunque un'unità inescindibile con gli apparecchi che vengono installati per la sua osservazione. L'esperienza, cioè la domanda posta alla natura, non fornisce alcuna informazione su elettroni, quanti di luce o altre particelle microscopiche in se, ma solo sul loro comportamento in certe condizioni create per l'esperienza. Questo ha una conseguenza importantissima: se, per esempio, si vuole misurare la posizione di un elettrone, occorre predisporre condizioni sperimentali diverse da quelle necessarie quando si vuole misurare l'impulso della stessa particella. E' impossibile realizzare simultaneamente questi due tipi di condizioni sperimentali e bisogna dunque decidere quale delle due domande si vuole porre alla natura. “Si può scrutare il mondo o con un binocolo *da impulsi* o con un binocolo *da posizioni*, ma non con entrambi insieme”, ha detto una volta Heisenberg.

In questo **principio di complementarità** Bohr vede la spiegazione della relazione di indeterminazione di Heisenberg. E in questa maniera si risolve anche la contraddizione onda-corpuscolo: l'elettrone non è né onda né particella, e solo in connessione con l'una o l'altra apparecchiatura sperimentale si comporta talvolta come onda, altre volte come particella. Quale risposta si otterrà dall'esperienza dipende da quale domanda si farà alla natura.

La filosofia ufficiale della meccanica quantistica, cioè appunto l'*interpretazione di Copenaghen*, era così completa, con le relazioni di indeterminazione di Heisenberg, e il principio di complementarità di Bohr. Ma anche se la grande maggioranza dei fisici era con ciò soddisfatta, alcuni scienziati importanti si rivoltarono contro questa “filosofia dell'acquietamento”.

1.4 Schrodinger inventa un gatto

La fisica classica aveva cercato di determinare e calcolare in anticipo il divenire del mondo. Il programma della teoria dei quanti è invece molto più modesto. Dalla funzione d'onda si può precalcolare solo il divenire possibile e le corrispondenti probabilità. Tutti i dettagli dei processi della microfisica risultano invece completamente indeterminati.

Albert Einstein disse una volta: “Dio non gioca ai dadi”, esprimendo così in modo inequivocabile la sua avversione contro l'indeterminismo della teoria dei quanti. Era forse l'influenza prussiana - Einstein era a quel tempo professore a Berlino - che lo portava a prescrivere leggi rigorose anche per gli elettroni, e a non permettere a loro di muoversi secondo l'arbitrarietà e i capricci delle leggi della probabilità.

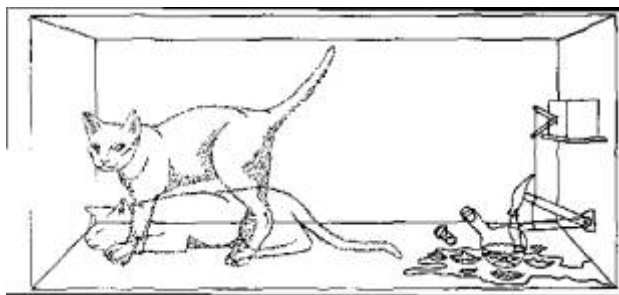


Figura 1.1: Il gatto di Schrodinger

Il gatto di Schrodinger é rinchiuso in una scatola di acciaio nella quale una macchina diabolica viene messa in funzione dalla disintegrazione spontanea di un atomo radioattivo. In base alla interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanti; soltanto l'osservazione finale potrebbe rendere effettivamente vivo o morto il gatto che fino a quel momento sarebbe "distribuito" ugualmente tra vita e morte.

Anche Erwin Schrodinger aveva sperato di superare le difficoltà della teoria dei quanti con la sua "meccanica ondulatoria", e di porre così le basi di un mondo continuo e deterministico. Egli era perciò altamente insoddisfatto dell'interpretazione che Born, Heisenberg e Bohr avevano imposto alla meccanica quantistica. Non era forse assurdo che la fisica, stabilisse solo le possibilità del divenire? In quale momento la possibilità si trasformava in realtà? Non era grottesco pensare, come pretendeva Heisenberg, che la traiettoria dell'elettrone si formasse solo al momento della osservazione?

In una famosa serie di articoli sulla *Situazione presente della meccanica quantistica*, Schrodinger espresse tutto il suo disagio. A questo proposito egli inventò una immagine, che entrò a far parte delle discussioni degli anni successivi con il nome: *il gatto di Schrodinger*. La sua osservazione era la seguente: "Si possono anche descrivere delle situazioni ridicole. Un gatto viene rinchiuso in una scatola di acciaio, insieme con la macchina diabolica descritta qui di seguito (e che deve essere protetta dalle grinfie del gatto): un contatore di Geiger contiene una piccolissima quantità di una sostanza radioattiva, così piccola che nel corso di un'ora può con eguale probabilità avvenire che si disintegri uno dei suoi atomi, oppure nessuno. Se il decadimento avviene, il contatore viene attivato e mediante un relais aziona un martelletto, che frantuma una boccetta contenente acido cianidrico. Se si lascia a se stesso questo sistema per la durata di un'ora, si potrà concludere che alla fine il gatto sarà ancora vivo se nel frattempo non si è disintegrato alcun atomo, giacche la prima disintegrazione atomica avrà provocato il suo totale avvelenamento. Ma la funzione d'onda dell'intero sistema descriverebbe la stessa situazione dicendo che in essa il gatto vivo e il gatto morto sono mescolati o impastati in egual misura".

Qui si esprime in pieno l'indignazione di Schrodinger contro l'interpretazione

della meccanica quantistica che egli stesso aveva contribuito a costruire: e infatti secondo Heisenberg il gatto dentro la scatola di acciaio non sarebbe né vivo né morto, perché la fisica dei quanti determina solo la possibilità di un evento, e finché non si osserva il gatto, questa possibilità non diventa realtà. Solo aprendo la scatola, cioè attraverso l'atto della osservazione, il gatto, che prima era "distribuito ugualmente fra vita e morte", diventa definitivamente vivo oppure morto.

Non sarebbe più sensato pensare che il gatto era già o vivo o morto nella scatola, prima che si aprisse il coperchio e si eseguisse l'osservazione?

A questo la scuola di Copenaghen risponde che soltanto l'atto dell'osservazione determina i fenomeni, e che qualsiasi domanda su grandezze inosservabili non ha alcun senso in linea di principio.

Indice

1	Aspetti della fisica quantistica	1
1.1	Come si fa a passare contemporaneamente attraverso due porte? .	1
1.2	La fine del determinismo	3
1.3	L'interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanti	6
1.4	Schrodinger inventa un gatto	7