

Dualismo onda – corpuscolo^[1]

La "meccanica quantistica" descrive il comportamento della materia e della luce. Mentre alla scala umana la fisica classica riesce a rendere bene conto dei fenomeni, gli oggetti su scala molto piccola non si comportano come qualcosa di cui si possa avere diretta esperienza.

Gli elettroni si comportano esattamente come la luce. Il comportamento quantistico degli oggetti atomici (elettroni, protoni, neutroni, fotoni e così via) è lo stesso per tutti, sono tutti "onde-particelle," o qualunque altro nome si voglia usare per indicarli. Così ciò che apprendiamo sulle proprietà degli elettroni vale anche per tutte le altre "particelle", compresi i fotoni della luce.

Il comportamento atomico è così diverso dalla comune esperienza, che esso appare strano e misterioso a chiunque. Perfino gli esperti non lo capiscono nel modo che essi desidererebbero: tutto quanto riguarda la diretta esperienza e l'intuizione umana si riferisce ad oggetti grandi. Sappiamo come si comportano gli oggetti grandi ma quelli su piccola scala fanno altrimenti e per apprendere ciò che riguarda questi ultimi dobbiamo usare metodi più astratti e concettuali, piuttosto che cercare dei legami con la nostra diretta esperienza.

Affronteremo subito un fenomeno che è assolutamente impossibile spiegare in forma classica, e che contiene in sé il cuore della meccanica quantistica. In effetti, questo fenomeno contiene l'unico mistero.

Non possiamo eliminare il mistero "spiegando" come avviene. Ci limiteremo a descrivere come avviene e nel far questo avremo descritto le principali caratteristiche della meccanica quantistica.

Lavoreremo con gli elettroni e per di capirne il comportamento quantistico li metteremo a confronto con particelle a noi più familiari, cioè dei piccoli proiettili e poi anche con delle onde, per esempio del tipo di quelle che si formano nell'acqua.

1 – Un esperimento con pallottole

Consideriamo dapprima i proiettili. C'è una mitragliatrice che spara pallottole in continuazione (figura 1). Non è molto buona, perché sparge le pallottole (casualmente) su una regione angolare piuttosto grande. Di fronte alla mitragliatrice c'è una parete (fatta di uno spessore corazzato) in cui sono praticati due fori di dimensioni appena sufficienti a lasciar passare un proiettile attraverso ad essi. Dietro la parete c'è un tabellone che "assorbe" i proiettili che ci battono

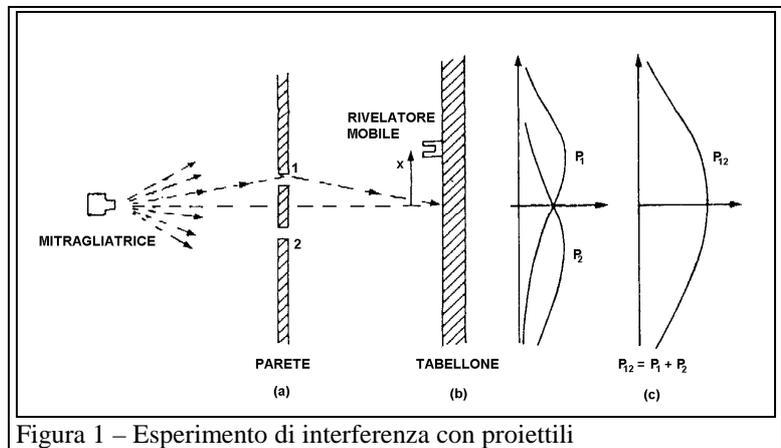


Figura 1 – Esperimento di interferenza con proiettili

sopra. Sul tabellone, di fronte alla parete coi fori, c'è un "rivelatore" di pallottole. I proiettili che entrano nel rivelatore vengono fermati ed accumulati. Quando lo vogliamo, possiamo vuotare la scatola e contare i proiettili che contiene. Il rivelatore può essere mosso avanti e indietro.

Ci si chiede qual è la probabilità che un proiettile che passa attraverso i fori sulla parete arrivi sul tabellone ad una distanza x dal centro.

Si deve parlare di probabilità. La "probabilità" a cui ci riferiamo, cioè quella che un proiettile giunga al rivelatore, è quella grandezza che noi misuriamo contando il numero dei proiettili che arrivano sul rivelatore in un certo tempo e poi facendo il rapporto tra questo numero ed il numero *totale di* proiettili che urtano il tabellone durante quell'intervallo di tempo.

^[1] In questo paragrafo riportiamo quasi per intero una delle più chiare esposizioni sul dualismo onda-corpuscolo; essa è dovuta a Feynman ed è riportata nel cap.1 del 3° volume del libro "La Fisica di Feynman".

I proiettili non sono delle pallottole reali, ma sono indistruttibili. Arrivano sempre a blocchi identici e distinti. Misuriamo la probabilità di arrivo di uno di tali blocchi in funzione di x .

Indicate con P_{12} la probabilità che i proiettili provengano sia dal foro 1 che dal foro 2. Sorprende che P_{12} abbia il suo valore massimo in $x = 0$. Chiudiamo il foro 2; il massimo di P_1 si ha per quel valore di x che giace sulla retta congiungente la mitragliatrice ed il foro 1. Quando il foro 1 è chiuso otteniamo la curva P_2 . Le probabilità vanno sommate. "Non si osserva *interferenza*".

2 – Un esperimento con onde

In un contenitore d'acqua poco profondo (figura 2) viene fatta muovere su e giù da un motore una "sorgente di onde" che produce onde circolari.

Abbiamo una parete con due fori e dietro c'è una seconda parete che è un perfetto "assorbitore". Si può ottenere questo risultato costruendo una "spiaggia" di sabbia in leggero declivio. Davanti alla spiaggia mettiamo un rivelatore che può essere spostato avanti e indietro in direzione x . In questo caso il rivelatore è un congegno che misura l'intensità del moto ondoso.

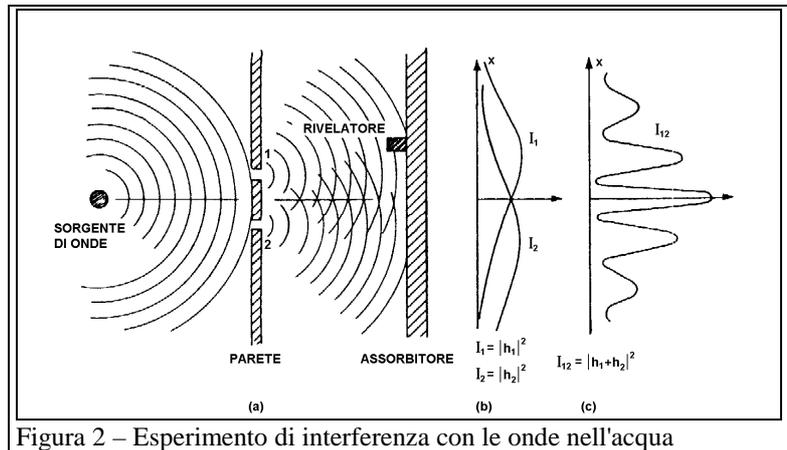


Figura 2 – Esperimento di interferenza con le onde nell'acqua

Si può pensare ad un apparecchio che misuri l'altezza del moto ondoso, con una scala calibrata con i quadrati dell'altezza effettiva, cosicché la lettura risulti proporzionale all'intensità dell'onda. Il nostro rivelatore registra quindi un qualcosa proporzionale all'energia che giunge al rivelatore per unità di tempo.

Quel che si può notare per prima cosa è che l'intensità può avere qualsiasi valore. Se la sorgente si muove molto poco c'è appena un leggero moto ondoso al rivelatore; quando aumenta il moto della sorgente viene rivelata una maggiore intensità di onde. L'intensità dell'onda non ha certo una struttura in qualche modo "a blocchi."

Misuriamo ora l'intensità dell'onda per vari valori di x (mantenendo costante il moto della sorgente delle onde). Otteniamo allora la curva segnata con I_{12} nella parte (c) della figura 2. Osserviamo che l'onda originale viene diffratta attraverso i fori e che nuove onde circolari si diffondono da ciascun foro. Se chiudiamo un foro alla volta e misuriamo la distribuzione d'intensità sull'assorbitore troviamo le curve d'intensità che sono riportate nella parte (b) della figura 2. I_1 è l'intensità dell'onda proveniente dal foro 1 (determinata effettuando le misure quando il foro 2 è tappato) e I_2 è l'intensità proveniente dal foro 2 (quando il foro 1 è chiuso).

L'intensità I_{12} osservata quando entrambi i fori sono aperti, certamente non è la somma di I_1 e I_2 . Diciamo allora che si ha "*interferenza*" tra le due onde. Dove la curva I_{12} ha i suoi massimi le onde sono "in fase" e i picchi delle onde si sommano dando luogo ad una interferenza costruttiva. Si avrà interferenza costruttiva in tutti i punti dove la differenza delle distanze del rivelatore dai due fori sia uguale a un numero intero di lunghezze d'onda. Nei punti in cui le onde arrivano al rivelatore con una differenza di fase di π il moto ondoso che ne risulterà sarà dato dalla differenza delle due ampiezze. Si ha qui una interferenza distruttiva e l'intensità dell'onda ne risulta diminuita. L'intensità assume valori minimi nei punti in cui la distanza del rivelatore dal foro 1 differisce dalla distanza dal foro 2 di un numero dispari di mezza lunghezza d'onda.

L'altezza istantanea al rivelatore dell'onda proveniente dal foro 1 può essere scritta come la parte reale di $h_1 e^{i\omega t}$ dove h_1 è l'ampiezza. L'intensità è proporzionale all'ampiezza quadratica media cioè al modulo quadrato $|h_1|^2$. Analogamente, per il foro 2, l'altezza è $h_2 e^{i\omega t}$ e l'intensità è proporzionale a

$|h_2|^2$. Quando entrambi i fori sono aperti le altezze singole si sommano dando luogo all'altezza complessiva $(h_1 + h_2)e^{i\omega t}$ e all'intensità $|h_1 + h_2|^2$. Tralasciando la costante di proporzionalità le relazioni corrette per onde che interferiscono sono

$$I_1 = |h_1|^2; \quad I_2 = |h_2|^2; \quad I_{12} = |h_1 + h_2|^2.$$

Si osservi che il risultato è completamente diverso da quello ottenuto con i proiettili. Sviluppando $|h_1 + h_2|^2$ si trova

$$|h_1 + h_2|^2 = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2|\cos\delta$$

dove δ è la differenza di fase tra h_1 e h_2 . In funzione delle intensità si può scrivere

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos\delta$$

L'ultimo termine è il termine d'interferenza.

3 – Un esperimento con elettroni

Immaginiamo ora di fare un esperimento simile ai precedenti, ma facendo uso di elettroni (figura 3). C'è un cannone elettronico che consiste di un filo di tungsteno riscaldato elettricamente e circondato da un involucro metallico provvisto di un foro. Se il filo è mantenuto a tensione negativa rispetto all'involucro, gli elettroni emessi dal filo verranno accelerati verso le pareti ed alcuni di essi usciranno dal foro.

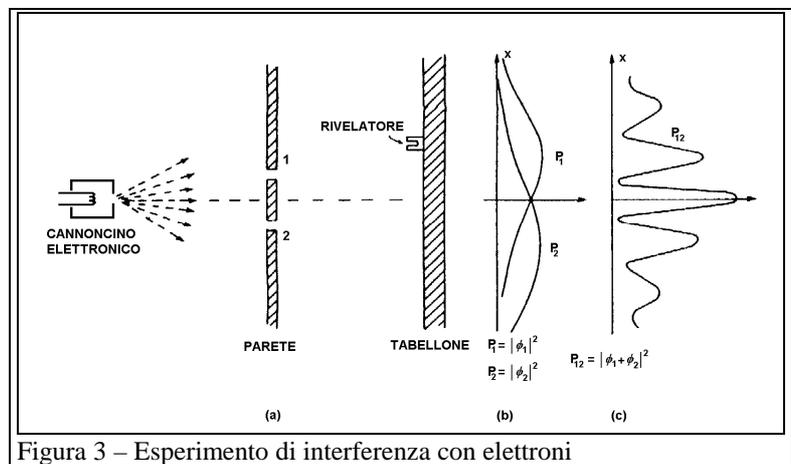


Figura 3 – Esperimento di interferenza con elettroni

Tutti gli elettroni che escono dal cannone avranno (all'incirca) la stessa energia. Di fronte al cannone vi è di nuovo una parete (per esempio una sottile placca metallica) in cui sono praticati due fori. Dietro la parete vi è un'altra placca che ha la funzione di arrestare gli elettroni. Davanti a quest'ultima collochiamo un rivelatore mobile. Quest'ultimo potrebbe essere un contatore geiger o, forse meglio, un moltiplicatore di elettroni connesso con un altoparlante.

Tutti gli elettroni che escono dal cannone avranno (all'incirca) la stessa energia. Di fronte al cannone vi è di nuovo una parete (per esempio una sottile placca metallica) in cui sono praticati due fori. Dietro la parete vi è un'altra placca che ha la funzione di arrestare gli elettroni. Davanti a quest'ultima collochiamo un rivelatore mobile. Quest'ultimo potrebbe essere un contatore geiger o, forse meglio, un moltiplicatore di elettroni connesso con un altoparlante.

Non è possibile realizzare questo esperimento (come invece si poteva fare con i due già descritti). Questo esperimento non è mai stato fatto in questo modo perché per rivelare gli effetti che ci interessano l'apparato dovrebbe essere costruito su una scala talmente piccola da rendere impossibile la cosa. Quello descritto è un esperimento concettuale scelto così perché è facile ragionarci su. I risultati che si otterrebbero sono noti perché sono stati fatti molti esperimenti in cui la scala e le proporzioni erano state scelte in modo da mettere in luce gli effetti che interessano.

La prima cosa che notiamo nell'esperimento con elettroni è che si sentono dei "clic" ben staccati nel rivelatore (cioè nell'altoparlante). E che tutti i "clic" sono uguali: non ci sono "mezzi clic." Ci accorgiamo anche che i "clic" arrivano in modo irregolare, così come si ode fare da un contatore geiger in funzione. Se contiamo i clic che arrivano in un tempo sufficientemente lungo - diciamo per parecchi minuti - e poi li ricontiamo per un altro periodo di tempo uguale troviamo che i due numeri ottenuti sono assai vicini. Possiamo dunque parlare di una frequenza media con cui i clic sono uditi.

Se muoviamo il rivelatore, il ritmo con cui arrivano i clic risulta più veloce o più lento, ma la grandezza (intensità) di ciascun clic è sempre la stessa. Se abbassiamo la temperatura del filo nel cannone elettronico, il ritmo dei clic diminuisce, ma il suono di ciascun clic rimane lo stesso. Infine, ponendo due diversi rivelatori sullo schermo in fondo, notiamo che il solito clic viene emesso da uno

oppure dall'altro dei due, ma mai contemporaneamente. (Eccetto che una volta ogni tanto, quando due clic sono emessi in tempi assai vicini cosicché il nostro orecchio non ne avverte la separazione.) Concludiamo, perciò, che quel che arriva al rivelatore, qualunque cosa sia, arriva in "granuli". Tutti i "granuli" hanno le stesse dimensioni: i "granuli" arrivano tutti interi ed uno alla volta. Diremo quindi che gli elettroni arrivano sempre in granuli, tutti identici tra loro.

Come nel nostro esperimento con i proiettili si può cercare ora di rispondere sperimentalmente alla domanda: qual è la probabilità relativa che un granulo elettronico arrivi sulla placca di fondo a varie distanze x dal centro. Come prima, otterremo la probabilità relativa facendo lavorare il cannone elettronico a ritmo costante. La probabilità che un granulo arrivi ad un particolare valore di x è proporzionale al ritmo medio dei clic, quando il rivelatore è nella posizione x .

Il risultato del nostro esperimento è la curva segnata con P_{12} nella parte (c) di figura 3.

4 – Interferenza delle onde elettroniche

Cerchiamo ora di analizzare la curva di figura 3 per capire il comportamento degli elettroni. La prima cosa da dire è che, poiché quel che arriva sono dei granuli, ciascun granulo, che in fondo potremmo anche chiamare elettrone, è passato attraverso il foro 1 oppure attraverso il foro 2. Scriviamo tutto ciò sotto forma di una Proposizione:

Proposizione A: Ciascun elettrone o attraversa il foro 1 oppure attraversa il foro 2.

Ammettendo la Proposizione A, tutti gli elettroni che arrivano alla placca di fondo possono venire suddivisi in due classi: (1) quelli che ci sono arrivati passando per il foro 1 e (2) quelli arrivati attraverso il foro 2. Allora la nostra curva deve essere la somma degli effetti degli elettroni venuti dal foro 1 e degli elettroni venuti dal foro 2. Controlliamo questa idea con un esperimento. Per prima cosa faremo una misura con gli elettroni che vengono dal foro 1. Chiudiamo il foro 2 e contiamo i clic al rivelatore. Da questa misura, ricaviamo P_1 . Il risultato è mostrato dalla curva segnata con P_1 nella parte (b) di figura 3. Tale risultato è assai ragionevole. In maniera analoga, misuriamo P_2 , distribuzione di probabilità per gli elettroni che provengono dal foro 2. Anche il risultato di tale misura è riportato in figura.

Il risultato P_{12} ottenuto con entrambi i fori aperti non è certo la somma di P_1 e P_2 . In analogia con il nostro esperimento con le onde diciamo che c'è interferenza.

Per gli elettroni: $P_{12} \neq P_1 + P_2$.

Ma da dove viene fuori questa interferenza? Forse non è vero che i granuli passano attraverso l'uno o l'altro dei fori 1 e 2, perché, se così fosse, le probabilità si sommerebbero. Forse vanno in modo più complicato. Non possono dividersi a metà perché arrivano sempre tutti interi e allora, forse qualcuno passa attraverso il foro 1, e poi anche attraverso il foro 2, e così via per un po' di volte; oppure fanno qualche altra strada complicata cosicché chiudendo il foro 2, abbiamo alterato la probabilità di arrivo sul fondo degli elettroni che avevano attraversato il foro 1. Ma vi sono alcuni punti in cui arrivano pochi elettroni quando sono aperti tutti e due i fori e che invece ricevono molti elettroni se chiudiamo uno dei fori. Notate, poi, che al centro della curva, P_{12} , è maggiore del doppio di $P_1 + P_2$. E' come se la chiusura di un foro diminuisse il numero di elettroni che escono dall'altro. Sembra assai difficile spiegare entrambi questi effetti proponendo che gli elettroni viaggino per cammini complicati.

Tutto è assai misterioso. Si sono rimuginate molte idee per cercare di spiegare la curva P_{12} pensando ai singoli elettroni che se ne vanno in modo complicato attraverso i fori. Ma nessuna di esse ha avuto successo. Nessuna può render conto della curva P_{12} a partire da P_1 e P_2 .

Quel che è abbastanza sorprendente è che la matematica che serve per collegare P_1 e P_2 a P_{12} è estremamente semplice. Perché P_{12} è proprio una curva come I_{12} di figura 2 e quel caso era semplice. Quel che succede sulla placca di fondo può essere descritto da due numeri complessi, che chiameremo ϕ_1 , e ϕ_2 (che sono funzioni di x). Il modulo quadrato di ϕ_1 ci dà l'effetto col solo foro 1 aperto, cioè $P_1 = |\phi_1|^2$. Allo stesso modo l'effetto col solo foro 2 aperto è dato da ϕ_2 , cioè $P_2 = |\phi_2|^2$. L'effetto

combinato dei due fori è perciò $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$. La matematica è proprio quella che si aveva con le onde !

Ne concludiamo quanto segue:

Gli elettroni arrivano in "granuli", come delle particelle, e la loro probabilità di arrivo varia con la distribuzione d'intensità propria di un'onda. È in questo senso che gli elettroni si comportano "talvolta come una particella e talvolta come un'onda."

Se il numero di elettroni che arriva in un particolare punto non è uguale al numero di elettroni che arrivano passando dal foro 1 più quelli che passano dal foro 2 dovremmo concludere che la Proposizione A è falsa. Non è vero che gli elettroni passano attraverso uno o l'altro dei fori 1 e 2. Verifichiamo con un altro esperimento questa conclusione.

5 – Osserviamo gli elettroni

Faremo adesso il seguente esperimento. Aggiungiamo al nostro apparecchio ad elettroni una sorgente di luce molto forte, posta dietro lo schermo a metà tra i due fori, come è mostrato in figura 4. Sappiamo che le cariche elettriche diffondono la luce. Cosicché quando un elettrone riesce in un modo qualsiasi ad oltrepassare lo schermo, prima di raggiungere il rivelatore devierà verso il nostro occhio della luce e potremo vederne il cammino. Per esempio, se l'elettrone passa attraverso il foro 2 dovremmo vedere un lampo di luce proveniente dalle vicinanze del punto A in figura.

Se l'elettrone passa attraverso il foro 1, ci aspetteremmo di vedere invece un lampo nelle vicinanze del foro di sopra. Se dovesse accadere di osservare luce da tutte e due le parti allo stesso tempo, significa che l'elettrone si divide a metà. Facendo l'esperimento si vede che ogni volta che udiamo un "clic" dal nostro rivelatore di elettroni

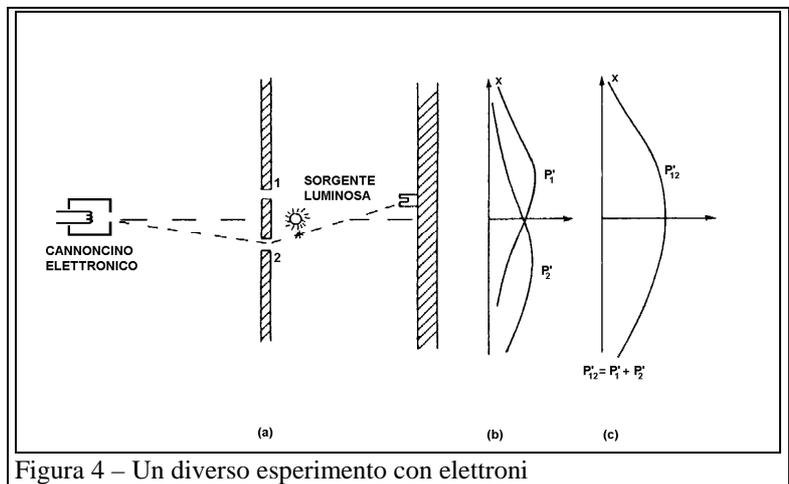


Figura 4 – Un diverso esperimento con elettroni

(sulla parete di fondo), vediamo anche un lampo di luce o vicino al foro 1 oppure al foro 2, ma mai tutti e due insieme! E otteniamo questo stesso risultato indipendentemente dalla posizione del rivelatore. Da questa esperienza concludiamo che quando osserviamo gli elettroni troviamo che essi passano attraverso o l'uno o l'altro dei fori. Sperimentalmente la Proposizione A è necessariamente vera.

Ma allora perché P_{12} non è uguale proprio a $P_1 + P_2$? Ritorniamo all'esperienza! Ricostruiamo il cammino degli elettroni e scopriamo ciò che fanno. Per ogni posizione (sull'asse x) del rivelatore contiamo gli elettroni che arrivano e registriamo anche il foro attraverso il quale sono passati, osservando di lampi di luce. Tutti gli elettroni che arrivano verranno quindi registrati in due classi: quelli che sono giunti attraverso il foro 1 e quelli che sono giunti attraverso il foro 2.

Ricaviamo la probabilità P_1' che un elettrone arrivi al rivelatore via il foro 1 e la probabilità P_2' , che un elettrone arrivi al rivelatore via il foro 2. Se ora ripetiamo queste misure per molti valori di x, otteniamo per P_1' e P_2' le curve mostrate nella parte (b) di figura 4.

È sorprendente che otteniamo per P_1' qualcosa di molto simile a ciò che si era ottenuto prima per P_1 chiudendo il foro 2; mentre P_2' è molto simile a quello che si era ottenuto chiudendo il foro 1. Dunque, quando li osserviamo, gli elettroni arrivano proprio come ci aspettavamo che arrivassero. Sia che i fori siano aperti o chiusi, quelli che vediamo arrivare attraverso il foro 1 sono distribuiti nello stesso modo, indipendentemente dalla situazione del foro 2.

Per la probabilità totale, cioè la probabilità che un elettrone arrivi al rivelatore con un cammino qualsiasi, otteniamo un risultato che noi già conosciamo. Basta fingere di non avere mai osservato i

lampi di luce, e sommare insieme i conteggi del rivelatore che avevamo separato. Dobbiamo semplicemente sommare i numeri. Per la probabilità che un elettrone giunga sulla parete di fondo passando attraverso un foro qualsiasi troviamo $P_{12}' = P_1 + P_2$. Così, pur essendo riusciti ad osservare attraverso quale dei fori passano i nostri elettroni, non otteniamo più la vecchia curva di interferenza P_{12} , ma una nuova, P_{12}' , che non mostra traccia di interferenza! Se si spegne la luce si ritrova P_{12} . Dobbiamo concludere che la distribuzione degli elettroni sullo schermo quando li osserviamo è differente da quella quando non li osserviamo. È ovvio che è la sorgente di luce a disturbare le cose. La luce, nell'essere diffusa dagli elettroni, dà loro un colpo che ne fa mutare il movimento. Tentando di "guardare" gli elettroni ne abbiamo cambiato il movimento; l'urto subito dall'elettrone, nel deviare il fotone, ne modifica talmente il moto, da far sì che l'elettrone che sarebbe andato a finire dove la curva P_{12} ha un massimo, si posi invece dove P_{12} ha un minimo; per questo non vediamo più gli effetti ondulatori di interferenza.

Proviamo ad abbassare la luce; le onde luminose saranno più deboli e non disturberanno tanto gli elettroni e rendendo sempre più fiavole la luce, alla fine le onde saranno abbastanza deboli da avere un effetto trascurabile. La prima cosa che si osserva è che i lampi di luce diffusi dagli elettroni al loro passaggio non diventano più deboli ma sono sempre uguali. L'unica differenza che si ottiene affievolendo la luce è che qualche volta udiamo un "clic" del rivelatore, ma non vediamo alcun lampo. L'elettrone passa senza essere "visto". Già da qui ci rendiamo conto che anche la luce si comporta come gli elettroni; sapevamo che era "ad onde," ma adesso troviamo che è anche "a corpuscoli." Essa arriva sempre - oppure è diffusa - in grani che chiamiamo "fotoni." Quando diminuiamo l'intensità della sorgente luminosa, non cambiamo le dimensioni dei fotoni, ma solo il ritmo con cui essi sono emessi. Ciò spiega perché, quando la nostra sorgente è debole, alcuni elettroni passano senza essere visti; non c'era alcun fotone mentre l'elettrone passava.

Se è vero che ogni volta che "vediamo" un elettrone, vediamo un lampo delle stesse dimensioni, allora gli elettroni che osserviamo sono sempre quelli disturbati. Tuttavia facciamo l'esperimento con una luce debole. Adesso ogni volta che udiamo un conteggio del rivelatore facciamo un segno in una di tre colonne: in colonna (1) segniamo gli elettroni visti passare attraverso il foro 1, in colonna (2) quelli visti attraverso il foro 2, ed in colonna (3) quelli che non sono stati visti affatto. Quando elaboriamo i nostri dati (calcolando le probabilità) troviamo questi risultati: quelli "visti attraverso il foro 1" hanno una distribuzione come P_1' ; quelli "visti attraverso il foro 2" hanno una distribuzione come P_2' (cosicché quelli "visti attraverso il foro 1 oppure 2" hanno una distribuzione come P_{12}'); e quelli "non visti affatto" hanno una distribuzione "tipo onda" proprio come P_{12} di figura 3! Se gli elettroni non si vedono si ha interferenza!

Ciò si comprende osservando che quando non vediamo un elettrone, nessun fotone lo perturba, mentre quando lo vediamo, un fotone lo ha disturbato. Si ha sempre un'identica alterazione perché i fotoni di luce producono effetti di uguali dimensioni e il risultato della diffusione dei fotoni è sufficiente ad appianare ogni effetto di interferenza.

Non c'è modo di vedere gli elettroni senza disturbarli. Infatti, l'impulso trasportato da un "fotone" è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda ($p = h/\lambda$) e la spinta che l'elettrone riceve, quando il fotone è diffuso verso il nostro occhio, dipende dall'impulso portato dal fotone. Se volevamo disturbare l'elettrone solo leggermente non avremmo dovuto abbassare l'intensità della luce, ma la sua frequenza (che è la stessa cosa che aumentare la sua lunghezza d'onda). Usiamo allora una luce più rossa (potremmo anche usare luce infrarossa, o onde radio) in modo da non perturbare così tanto gli elettroni e rifacciamo l'esperimento ogni volta con luce di maggiore lunghezza d'onda. Al principio, nulla sembra cambiare. I risultati sono gli stessi. Poi accade qualcosa di strano. A causa della natura ondulatoria della luce vi è una limitazione per la distanza minima di due punti affinché possano essere visti ancora come punti separati. Questa distanza è dell'ordine della lunghezza d'onda della luce. Così adesso, non appena rendiamo la lunghezza d'onda della luce maggiore della distanza dei nostri fori vediamo un grosso lampo sfuocato quando la luce è diffusa dagli elettroni. Non possiamo più dire attraverso quale foro è passato l'elettrone! Sappiamo solo che è passato da qualche parte! Ed è proprio con luce di questo colore che troviamo che le spinte ricevute dall'elettrone sono

abbastanza piccole da rendere P_{12}' simile a P_{12} , cioè da cominciare ad ottenere effetti di interferenza. Ed è solo per lunghezze d'onda molto maggiori della separazione dei due fori (quando non possiamo più dire da dove è passato l'elettrone) che l'alterazione dovuta alla luce diviene abbastanza piccola da riottenere la curva P_{12} di figura 3.

Con il nostro esperimento troviamo che è impossibile scegliere la luce in modo tale da poter dire attraverso quale foro è passato l'elettrone e allo stesso tempo non perturbarne la distribuzione. Heisenberg suggerì che le allora nuove leggi della natura potevano risultare coerenti solo se esisteva una limitazione nelle nostre possibilità sperimentali non riconosciuta precedentemente.

Egli propose, come principio generale, il suo principio di indeterminazione, che possiamo enunciare come segue riferendoci al nostro esperimento: "È impossibile costruire un apparecchio per determinare da quale foro è passato l'elettrone, che allo stesso tempo non perturbi l'elettrone sufficientemente da distruggere l'interferenza." Se un apparecchio è capace di determinare da quale foro è passato l'elettrone, non può essere così delicato da non alterarne in modo essenziale la distribuzione. Finora nessuno ha mai trovato un modo di sfuggire al principio di indeterminazione e quindi dobbiamo ammettere che esso rappresenti una caratteristica fondamentale della natura.

L'intera meccanica quantistica dipende dalla correttezza del principio di indeterminazione. Poiché questa è una teoria che ha avuto così tanti successi, la nostra fiducia nel principio di indeterminazione è rafforzata. Ma se si dovesse scoprire un modo di demolire il principio di indeterminazione, la meccanica quantistica darebbe risultati incoerenti e non potrebbe più essere considerata come una valida teoria della natura.

Ma cosa ne è della Proposizione A? È vero, o non è vero, che l'elettrone passa o attraverso il foro 1 oppure attraverso il foro 2? La sola risposta che si può dare è che dall'esperienza, per non incorrere in contraddizioni, è necessario ragionare in un certo modo speciale. Per evitare di fare predizioni errate dobbiamo dire che: se si guardano i fori o, più precisamente, se si ha un apparecchio che è capace di determinare se gli elettroni passano attraverso il foro 1 o il foro 2, allora si può dire attraverso quale foro è passato ciascun elettrone; ma, quando non si prova a determinare da che parte passa l'elettrone, quando non c'è niente nell'esperimento che perturbi l'elettrone, allora non si può dire se l'elettrone passa attraverso il foro 1 oppure il foro 2. Questa è la logica che dobbiamo usare se vogliamo descrivere la natura con successo.

Da ciò si deduce che il moto di tutta la materia - come degli elettroni - deve essere descritto in termini di onde, ma allora cosa possiamo dire per i proiettili del nostro primo esperimento? Perché non abbiamo visto frange di interferenza in quel caso?

Si trova che, per le pallottole, le lunghezze d'onda erano così piccole da rendere le frange d'interferenza molto sottili e fitte. Così fitte, in realtà, da non poter distinguere con nessun rivelatore di dimensioni finite i vari massimi e minimi. Quello che abbiamo osservato era solo una sorta di media, che è la curva classica. In Fig.13 abbiamo provato ad indicare schematicamente ciò che accade con oggetti di grandi dimensioni. La parte (a) della figura mostra la distribuzione di probabilità per i proiettili come la si può calcolare dalla meccanica quantistica. Le rapide oscillazioni sono intese a rappresentare lo schema di interferenza che si ottiene per onde di lunghezza

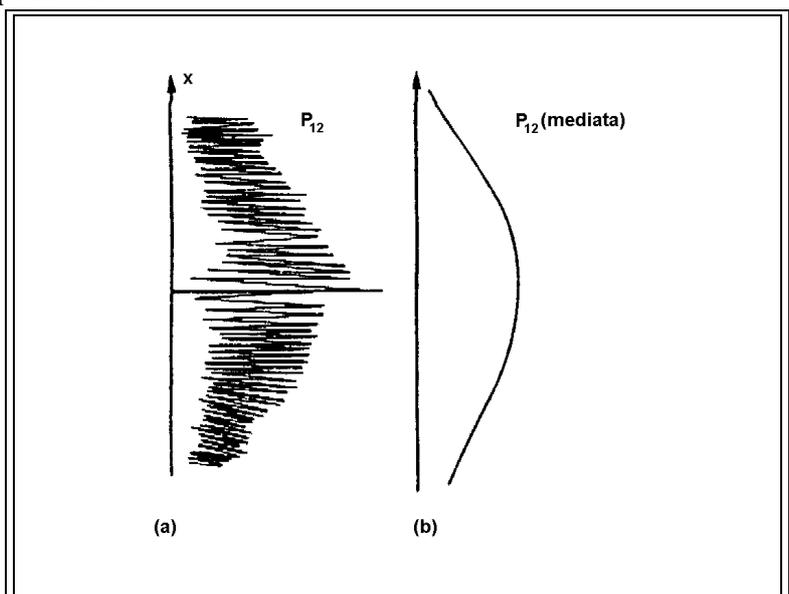


Figura 5 – Figura di interferenza con proiettili: (a) effettiva (schematizzata), (b) osservata

d'onda molto piccola. Ogni rivelatore fisicamente realizzabile, tuttavia, media diverse oscillazioni

della curva di probabilità, di modo che la misura riproduce la curva continua disegnata nella parte (b) della figura.

Principi di indeterminazione e di complementarità

Scriveremo le conclusioni di carattere generale che possono essere tratte dagli esperimenti del paragrafo precedente. Chiariamo prima che un "esperimento ideale" è quello in cui non c'è alcuna influenza esterna imprecisata, cioè, non deve esserci alcuna vibrazione o altro di cui non sappiamo tener conto. Per essere del tutto precisi bisognerebbe dire: "un esperimento ideale è un esperimento in cui tutte le condizioni iniziali e finali sono completamente specificate". Ciò che verrà indicato come un evento è, in generale, proprio un insieme particolare di condizioni iniziali e finali (per esempio: un elettrone parte dalla sorgente, raggiunge il rilevatore e non accade niente altro).

1. La probabilità di un evento in un esperimento ideale è data dal quadrato del modulo di un numero complesso ϕ che viene detto ampiezza di probabilità:

$$P = \text{probabilità} \quad \phi = \text{ampiezza di probabilità} \quad P = |\phi|^2.$$

2. Quando un evento può avvenire secondo varie alternative, l'ampiezza di probabilità per l'evento è la somma delle ampiezza di probabilità delle varie alternative considerate separatamente. Si ha perciò interferenza:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2, \quad P = |\phi_1 + \phi_2|^2$$

3. Se si effettua un'esperienza capace di determinare se una o l'altra delle possibili alternative si è effettivamente realizzata, la probabilità per l'evento è la somma delle probabilità per ciascuna delle alternative. Non si ha più interferenza:

$$P = P_1 + P_2$$

Ci si potrebbe ancora domandare: "Come funziona tutto ciò? Qual è il meccanismo che sta dietro a questa legge?" Nessuno ha mai trovato un tale meccanismo. Nessuno può "spiegare" niente di più di quanto abbiamo "spiegato" noi. Nessuno saprà dare una rappresentazione più approfondita della situazione. Non abbiamo idea di un meccanismo più fondamentale da cui questi risultati possano essere dedotti.

Vogliamo sottolineare una differenza molto importante tra la meccanica classica e quella quantistica. Abbiamo parlato di probabilità che in una data situazione un elettrone arrivi. Abbiamo con ciò voluto implicare che con il nostro dispositivo sperimentale (anche con il migliore possibile) non siamo in grado di predire esattamente ciò che accadrà. Possiamo solo dare delle probabilità! Se ciò è vero, ne segue che la fisica deve rinunciare all'idea di voler prevedere esattamente ciò che accadrà in una data situazione. Non sappiamo prevedere ciò che accadrà in una data situazione, anzi adesso crediamo che ciò sia impossibile, e che l'unica cosa che siamo in grado di prevedere è la probabilità di eventi differenti. Si deve riconoscere che questo è un ripiegamento rispetto all'antico ideale di comprensione della natura. Può darsi che sia un passo indietro, ma nessuno ha trovato il modo di evitarlo.

Facciamo adesso qualche considerazione su una proposta che è stata avanzata più volte per cercare di evitare la descrizione che abbiamo data: "Forse l'elettrone ha qualche strano meccanismo dentro di sé, qualche variabile interna, che noi ancora non conosciamo. Forse questa è la ragione per cui non possiamo prevedere ciò che avverrà. Se potessimo guardare più da vicino l'elettrone saremmo in grado di dire dove andrà a finire". Per quel che ne sappiamo, ciò è impossibile. Ci sarebbero ancora delle difficoltà. Supponiamo di essere portati ad assumere che dentro l'elettrone vi sia un qualche meccanismo che determini dove questo andrà a finire. Questo meccanismo deve anche fissare per quale foro esso andrà a passare nella sua traiettoria. Ma non dobbiamo dimenticare che ciò che è dentro l'elettrone non può dipendere da ciò che noi facciamo, ed in particolare dal nostro aprire o chiudere uno dei fori. Perciò, se un elettrone, prima di partire, ha già deciso (a) quale foro userà,

e (b) dove andrà a finire, dovremmo trovare P_1 per quegli elettroni che hanno scelto il foro 1, P_2 per quelli che hanno scelto il foro 2, e necessariamente la somma $P_1 + P_2$ per quelli che arrivano attraverso i due fori. Non sembrano esistere altre alternative. Ma noi abbiamo verificato sperimentalmente che ciò non è vero. E nessuno è riuscito ad immaginare una soluzione per questo enigma. Perciò oggi dobbiamo limitarci a calcolare probabilità. Diciamo oggi, ma sospettiamo molto fortemente che questo stato di cose ci accompagnerà sempre, che sia impossibile risolvere questo enigma, che questo sia il vero modo di essere della natura.