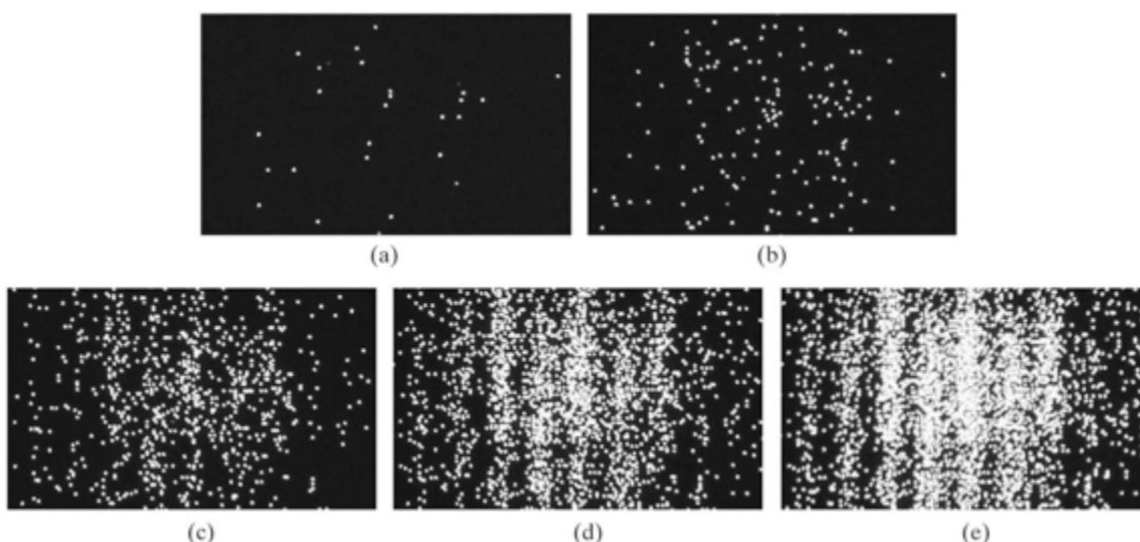




l'esperimento più bello della fisica: l'esperimento della doppia fenditura

come gli scienziati spiegano la natura della materia grazie alla meccanica quantistica

Scoprire la natura della luce e della materia e spiegare il loro comportamento è da sempre la maggior ambizione delle scienze, specialmente della fisica.

Già Aristotele si interrogava su questo argomento, ritenendo la luce un'onda, simile alle onde del mare, che percorre l'etere. Ma c'era anche chi era propenso a vederla come un flusso di particelle, specialmente il grande Isaac Newton, che fu affascinato dallo studio della luce per tutta la sua vita.

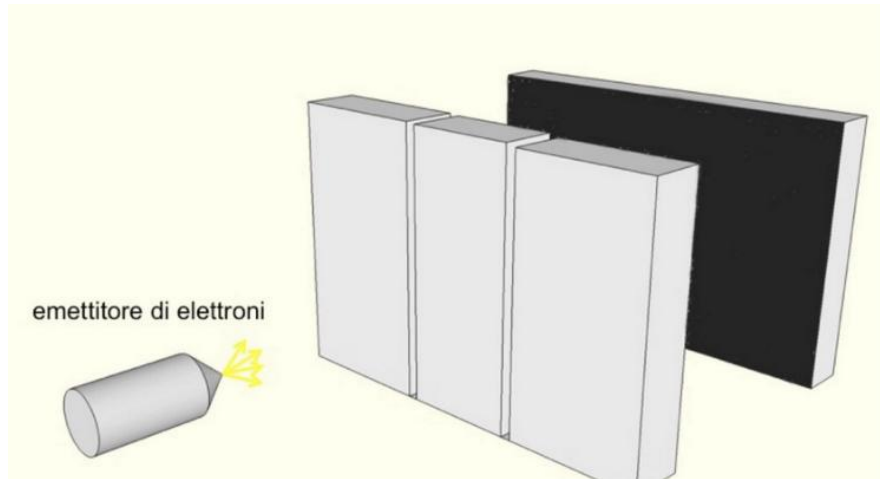
Dopo innumerevoli tentativi di rendere finalmente chiara la questione, nel 1924 il fisico francese **Louis de Broglie** unificò i risultati apparentemente contrastanti dei vari esperimenti, asserendo che la luce presenti una **dualità** onda-corpuscolo, unica opzione possibile per accorpare le diverse teorie. Non solo: era convinto che tutta la materia manifestasse questa natura.

Tale teoria nacque da una serie di celebri esperimenti, detti *esperimenti alla Young* dal nome dello scienziato inglese **Thomas Young**, il primo a effettuare l'esperimento della doppia fenditura.

Quello della doppia fenditura è un esempio di ricerca **empirica** (dal greco εμπειρία "esperienza", è un tipo di ricerca che basa le sue conclusioni sull'osservazione diretta o indiretta dei fatti) e una delle sue varianti è stata definita come "**l'esperimento più bello mai eseguito in fisica**" [1] poiché è stato in grado di rendere visibili all'occhio della persona comune gli effetti di complessi comportamenti fisici.

In particolare analizzeremo l'esperimento con un fascio di elettroni, realizzato nel 1989 da Akira Tonomura e i suoi collaboratori. [2]

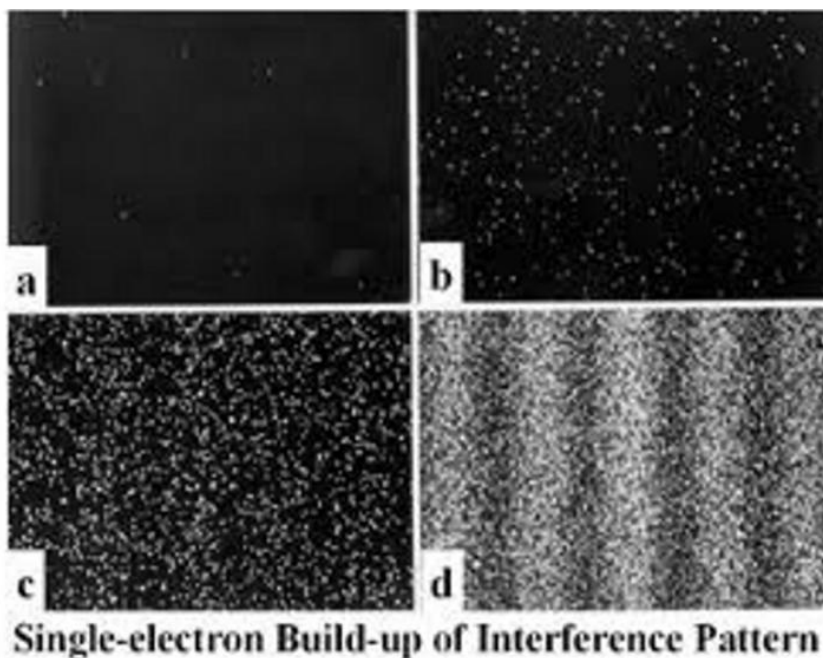
L'esperimento, molto simile al celebre esperimento mentale di Richard Feynman [3] consiste nel "bombardare" con elettroni [4] una **barriera** opaca con **due fenditure** di larghezza opportuna (dell'ordine della lunghezza d'onda emessa), sul cui retro si trova una **lastra rivelatrice**.



Innanzitutto si procede ad accendere la sorgente di elettroni, emessi **uno per volta** (da qui il nome *a elettrone singolo*) grazie alla sorgente a bassissima intensità.

Sulla lastra inizieranno a comparire diversi puntini luminosi: sono gli elettroni, e ciò porterebbe a concludere che siano indubbiamente particelle, poiché si comportano in modo molto simile a ciò che ci si aspetterebbe da dei proiettili.

Ma dopo l'invio di molti elettroni lo scenario cambia: i puntini iniziano a distribuirsi creando una **figura di interferenza** (sotto in foto), ovvero un fenomeno tipico delle **onde**, che avviene quando due o più onde **interagiscono** tra di loro annullandosi o sommandosi.



La differenza sostanziale tra un'onda e una particella è che una particella può passare attraverso una e una sola fenditura; al contrario l'onda è capace di propagarsi attraverso entrambe le fenditure contemporaneamente, interferendo.

Ed è qui che la fisica classica si arrende: non è più in grado di spiegare questo fenomeno perché nulla del genere appartiene a ciò che siamo in grado di osservare nella nostra quotidianità.

Ma come se questo fenomeno non fosse già sufficientemente singolare e inconsueto, è ciò che avviene in una delle sue varianti il dettaglio maggiormente destabilizzante.

Infatti l'esperimento chiamato in gergo "**which way?**" (*quale via?*) prende il nome dalla sua domanda centrale: da quale fenditura passerà l'elettrone?

Per rispondere a questa domanda si posiziona un rilevatore nei pressi delle fenditure e si accende l'emettitore, effettuando l'esperimento come è stato fatto nella versione a elettrone singolo.

Ora ci si aspetterebbe (giustamente) che sulla lastra rilevatrice appaia nuovamente la figura di interferenza, identica o quasi a quella apparsa precedentemente. E invece, il risultato è sorprendente: gli elettroni si dispongono **come se fossero normali particelle** che attraversano le due fenditure, perdendo la loro natura ondulatoria. È da porre in evidenza il fatto che l'esperimento è stato eseguito nella stessa maniera di quello di Tonomura, con la sola differenza dell'apparato di rilevazione.

È quindi logico sospettare che sia l'atto stesso dell'osservazione a modificare il comportamento della materia.

Ciò che osserviamo non è la natura in sé, ma la natura sottoposta al nostro metodo di indagine.

-Werner Heisenberg

Questi esperimenti e le loro conseguenze sono un esempio del celebre **principio di indeterminazione** elaborato dallo scienziato tedesco Werner Heisenberg. Esso stabilisce che è impossibile misurare contemporaneamente e con precisione alcune coppie di proprietà (per esempio la quantità di moto e la posizione) che definiscono lo stato di una particella elementare. Infatti, se si misura la traiettoria che la particella segue, si perde l'informazione sulla sua natura ondulatoria e viceversa.

Inoltre sono strettamente collegati anche al **principio di complementarità**, postulato da Niels Bohr, che sostiene che non è possibile osservare simultaneamente nello stesso esperimento la natura ondulatoria e la natura corpuscolare della materia.

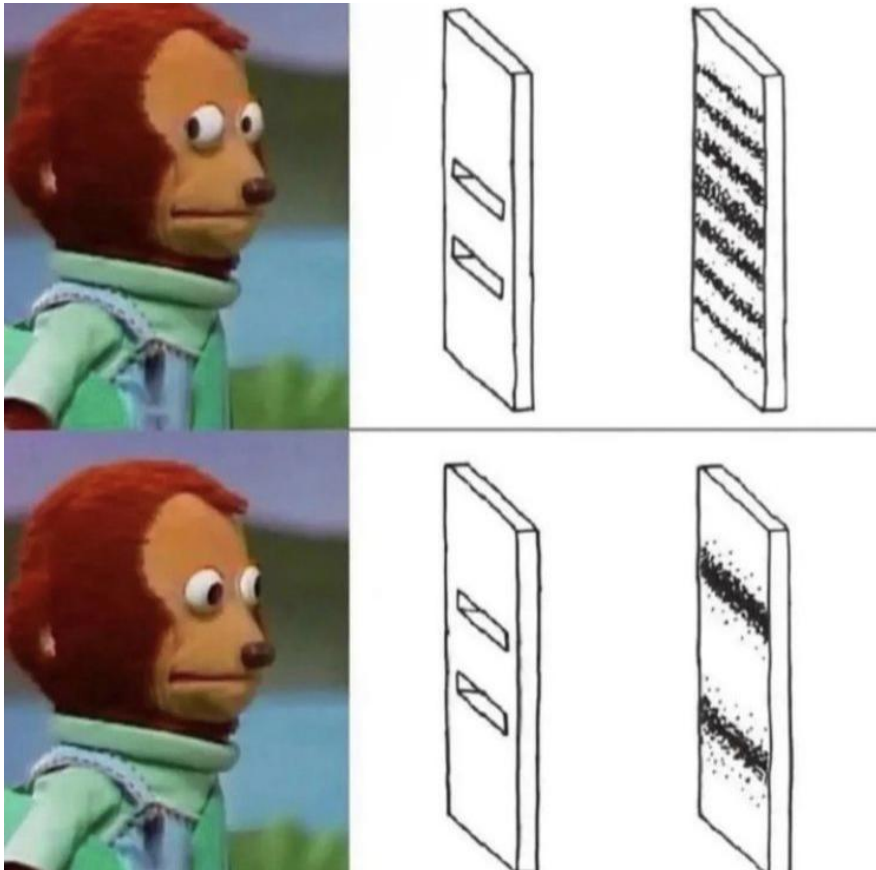
Anche utilizzando il miglior apparato sperimentale sarebbe impossibile prevedere esattamente, per esempio, dove l'elettrone andrà, si può solamente calcolare la probabilità dei diversi eventi. Cade quel determinismo su cui si è sempre basata la fisica classica.

Tutta la materia e tutta l'energia presentano dunque caratteristiche sia delle **onde** sia dei **corpuscoli**, e questo è ciò che chiamiamo **dualismo onda-particella**, sebbene nessuno sia ancora riuscito a fornire una spiegazione soddisfacente del significato di ciò.

Separatamente nessuno dei due riesce a chiarire la realtà, ma congiuntamente sì. Nessuno è riuscito a risolvere questo rompicapo e le sue conseguenze, e la natura potrebbe essere davvero così assurda.

“È un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene l'unico mistero. [...] Nel raccontarvelo dovremo raccontarvi le caratteristiche fondamentali di tutta la meccanica quantistica.”

-Richard Feynman



note a pie' pagina

1. per esattezza la versione definita "l'esperimento più bello di sempre" dai lettori della rivista *Physics World* fu quella "a singolo elettrone"
2. fu precedentemente realizzato anche nel 1961 Claus Jönsson dell'Università di Tubinga e nel 1974 a Bologna da Pier Giorgio Merli, Gianfranco Missiroli e Giulio Pozzi, ma i loro risultati vennero pressoché ignorati.
3. Richard Feynman, fisico e premio Nobel nel 1965, proponeva nelle sue *Lectures on physics* un esperimento mentale, il quale era molto simile a quello realizzato successivamente da Tonomura. Però Feynman scriveva, erroneamente, che *"l'apparato che bisognerebbe costruire per mostrare gli effetti nei quali siamo interessati sarebbe troppo piccolo, impossibile da realizzare"*. Si sbagliava.

4. o fotoni, o addirittura molecole: l'esperimento è stato successivamente svolto anche con una sorgente di **ftalocianina** e altre molecole, con gli stessi risultati che verranno adesso illustrati

- Feynman sull'esperimento con gli elettroni (da *Lectures on Physics*)

1-4 An experiment with electrons

Now we imagine a similar experiment with electrons. It is shown diagrammatically in Fig. 1-3. We make an electron gun which consists of a tungsten wire heated by an electric current and surrounded by a metal box with a hole in it. If the wire is at a negative voltage with respect to the box, electrons emitted by the wire will be accelerated toward the walls and some will pass through the hole. All the electrons which come out of the gun will have (nearly) the same energy. In front of the gun is again a wall (just a thin metal plate) with two holes in it. Beyond the wall is another plate which will serve as a "backstop." In front of the backstop we place a movable detector. The detector might be a geiger counter or, perhaps better, an electron multiplier, which is connected to a loudspeaker.

We should say right away that you should not try to set up this experiment (as you could have done with the two we have already described). This experiment

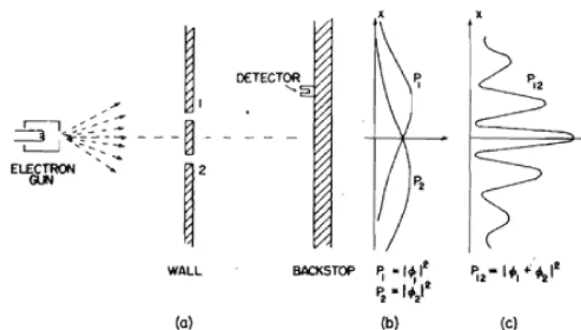


Fig. 1-3. Interference experiment with electrons.

has never been done in just this way. The trouble is that the apparatus would have to be made on an impossibly small scale to show the effects we are interested in. We are doing a "thought experiment," which we have chosen because it is easy to think about. We know the results that *would* be obtained because there *are* many experiments that have been done, in which the scale and the proportions have been chosen to show the effects we shall describe.

di Oderica Maria Viggiani (3A europeo) e Simona Dodaro (3C biomedico-cambridge)

allegati

📺 **Single electron double slit wave experiment** video di Akira Tonomura

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_all.html?locale=it simulazione con Phet dell'esperimento della doppia fenditura