

INCONTRI DI FISICA

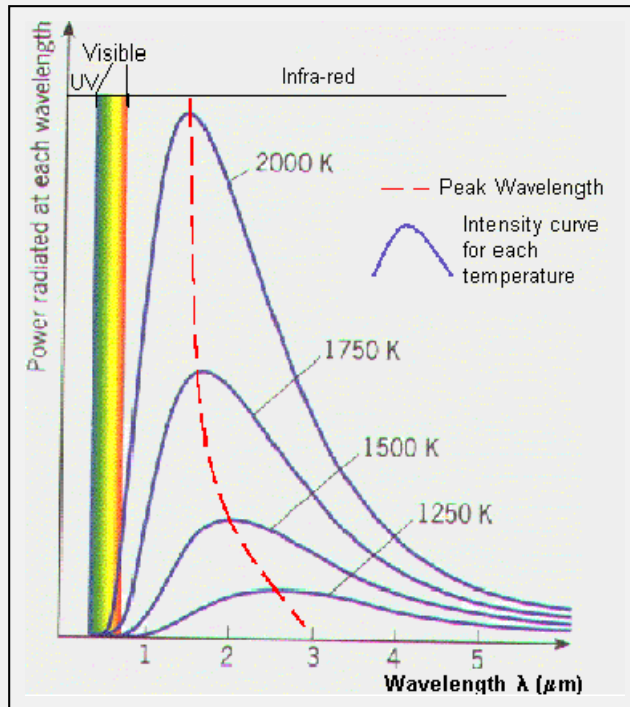
XI Edizione

"Meccanica Quantistica Misteri e Paradossi"

ANGELO BASSI

**Dipartimento di Fisica
Università di Trieste**

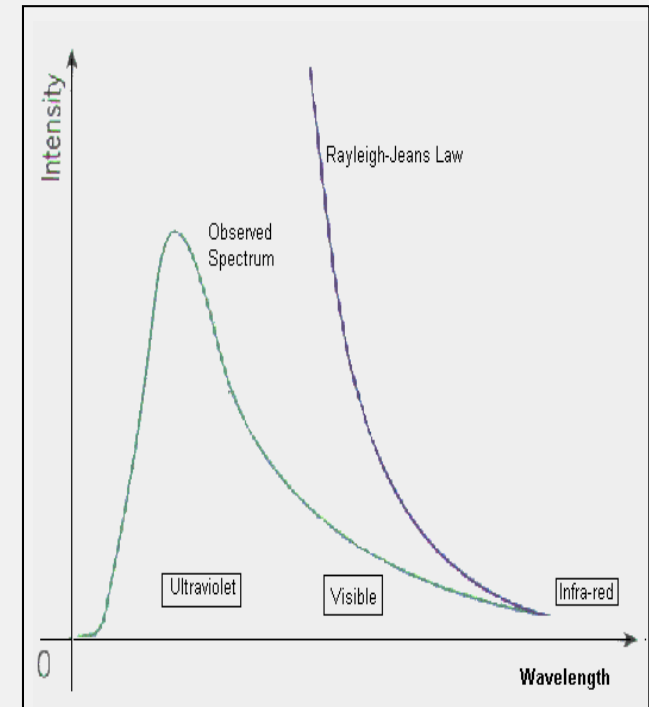
Quantizzazione della luce: ipotesi di Planck (1900)



Tutti i corpi emettono radiazione.

I **corpi neri** sono speciali: il loro spettro è una **funzione universale** della temperatura.

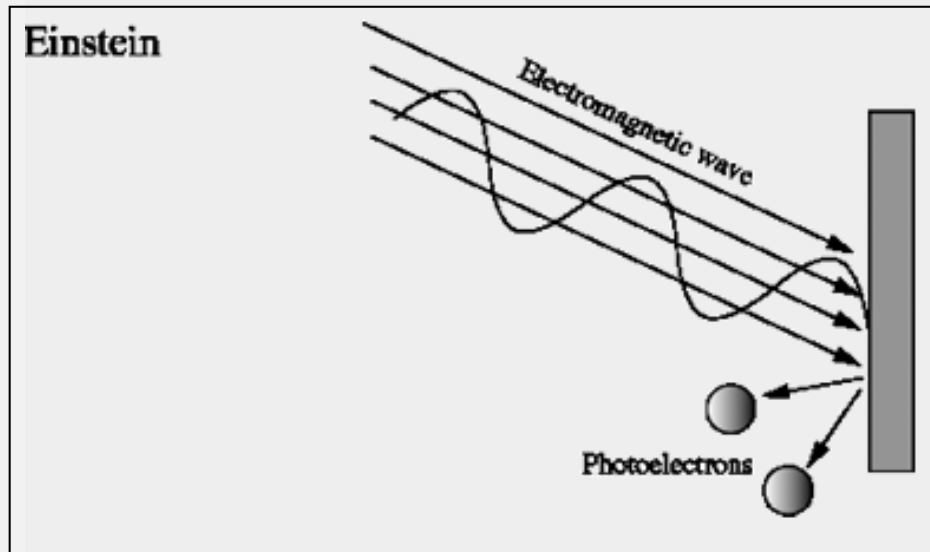
La **fisica classica non riesce a spiegare** questa proprietà. Anzi, la teoria dà risultati matematicamente inconsistenti.



Ipotesi di Planck: gli **scambi energetici** tra radiazione e materia non avvengono con continuità, come previsto dalla teoria classica. Essi avvengono attraverso pacchetti **discreti** di energia, multipli della quantità base:

$$E = h\nu$$

Quantizzazione della luce: effetto fotoelettrico (1905)

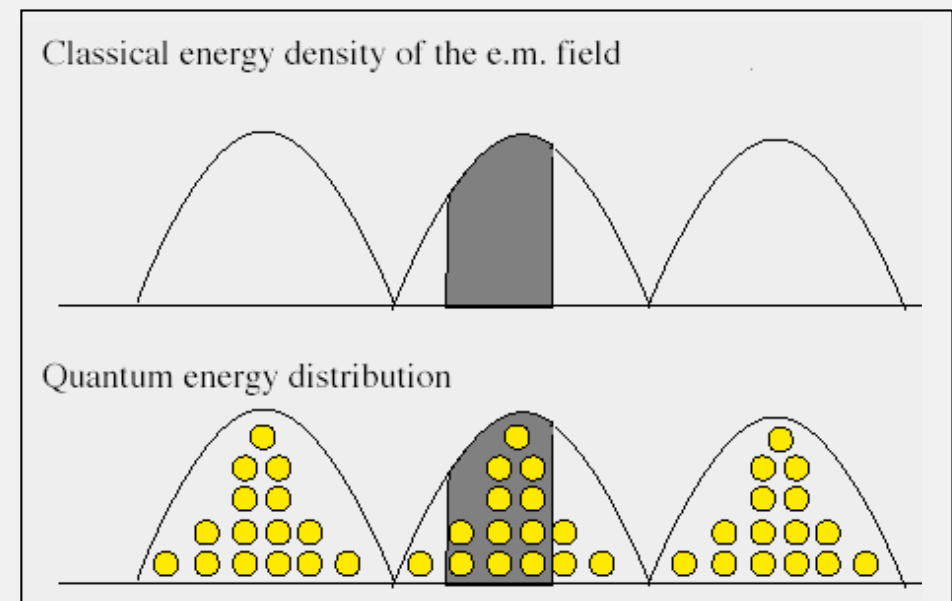


Classicamente, la **luce** è rappresentata da un'onda che si propaga con continuità nello spazio

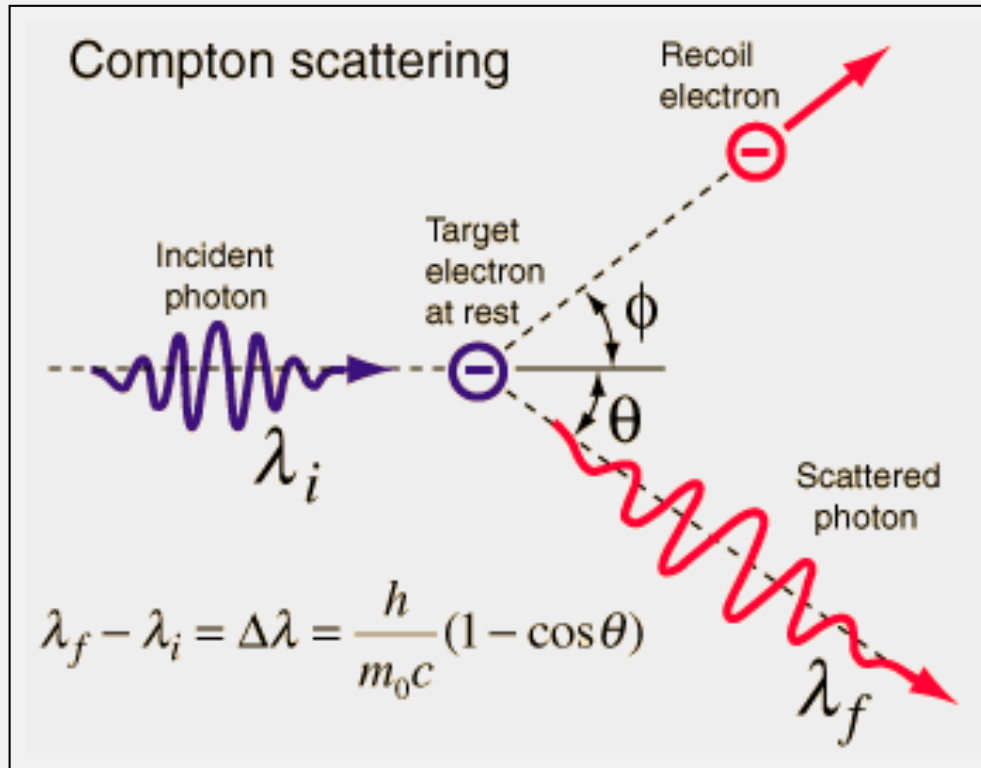
Per spiegare l'effetto fotoelettrico, **Einstein** assume che la **luce** sia composta da **quanti** discreti di energia

$$E = nh\nu$$

(n = numero intero). La costante è la stessa usata da Planck, anche se il fenomeno è diverso da quello studiato da Planck.



Quantizzazione della luce: effetto Compton (1923)



L'effetto Compton riguarda lo scattering della luce (raggi X, gamma) da gas, liquidi e solidi.

Anche in questo caso, **la teoria classica non è in grado di spiegare i dati sperimentali.**

Soluzione: Trattare la **luce** come una **particella a tutti gli effetti!** Il problema è quindi ricondotto ad un semplice problema di cinematica relativistica tra due particelle: il quanto di luce e l'elettrone.

Quantizzazione della luce: riassunto

La luce manifesta sia un carattere ondulatorio che un carattere corpuscolare.

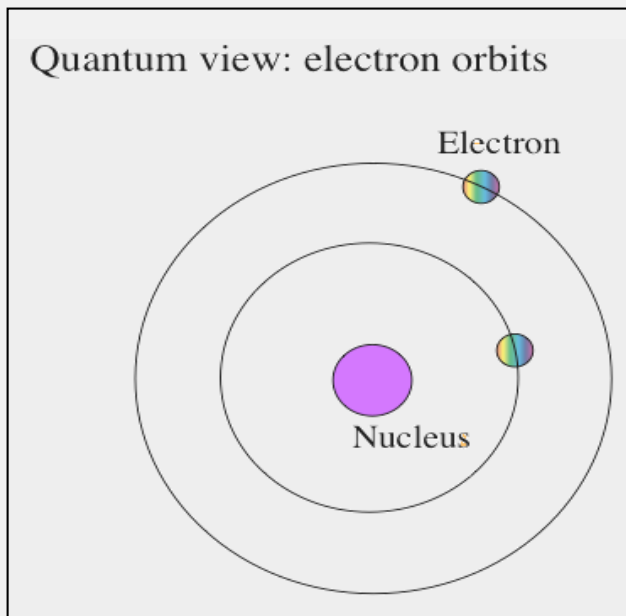
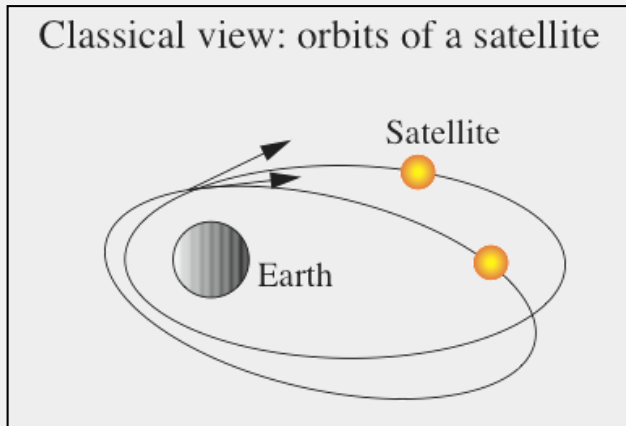
Negli esperimenti di interferenza, diffrazione, ... (esempio, esperimento con le due fenditure), vengono alla luce gli aspetti ondulatori, quelli noti dal '800 in poi.

In altri esperimenti di interazione con la materia, vengono alla luce gli aspetti corpuscolari.

➡ **Principio di complementarità** di Bohr

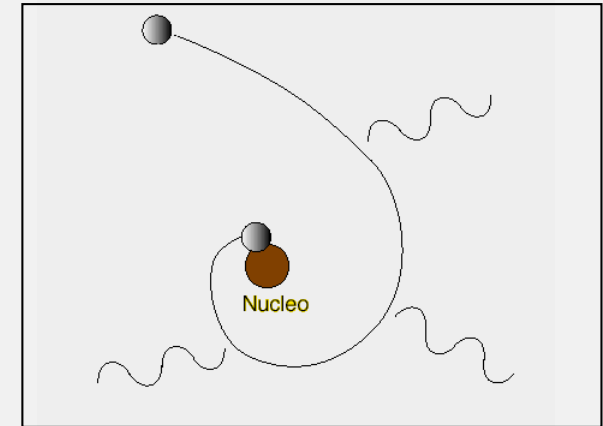
➡ **Problema:** come descrivere entrambi i comportamenti della luce, all'interno di un'unica teoria?

Descrizione della materia: l'atomo di Bohr (1911-13)



Atomo classico

Gli elettroni dovrebbero emettere radiazione e cadere sul nucleo.
Instabilità della materia!



Atomo di Bohr

Solo certi **livelli energetici** sono permessi. Su questi livelli, gli elettroni sono stabili.

Salti (quantistici) tra diversi livelli sono permessi, con emissione o assorbimento di quanti di radiazione.



Descrizione della materia: l'ipotesi di de Broglie (1924)

Osservazione: La luce ha una doppia natura, ondulatoria e corpuscolare.

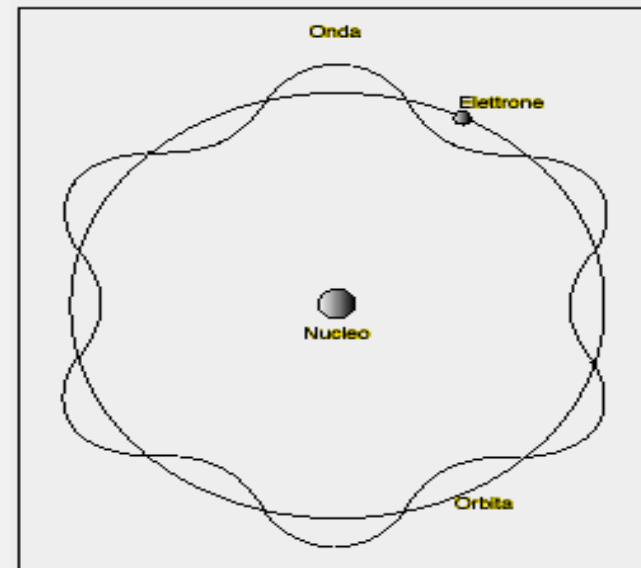
Ipotesi: Anche la materia ha una doppia natura. Ad una particella di massa m , che si muove con velocità v , è associata una lunghezza d'onda:

$$\lambda = h/p = h/mv$$

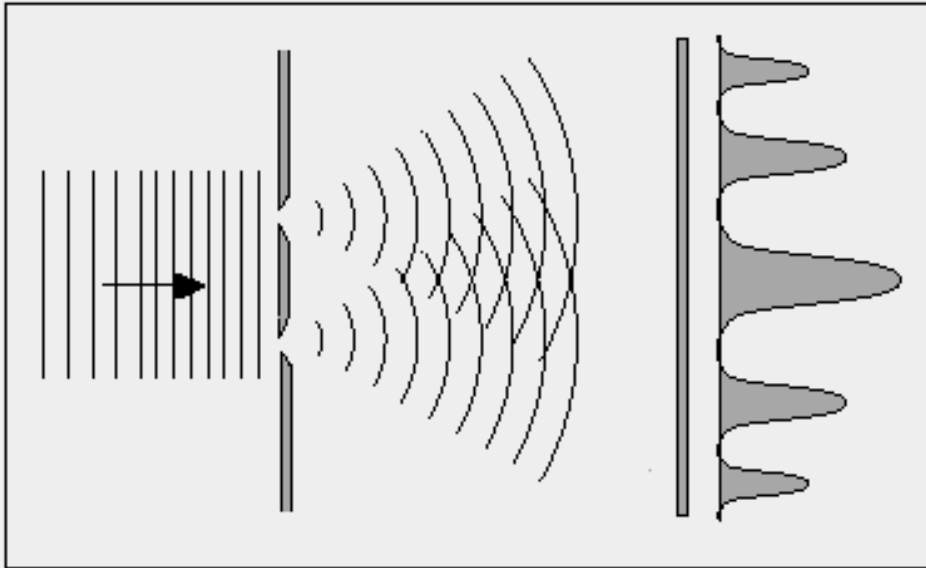
h è talmente piccola che, a livello macroscopico, la natura ondulatoria della materia non può essere osservata.

A livello microscopico, invece, gli effetti ondulatori diventano rilevanti.

L'ipotesi di de Broglie dà una spiegazione dell'esistenza dei livelli energetici, postulata da Bohr.



Descrizione della materia: l'esperimento (1927)

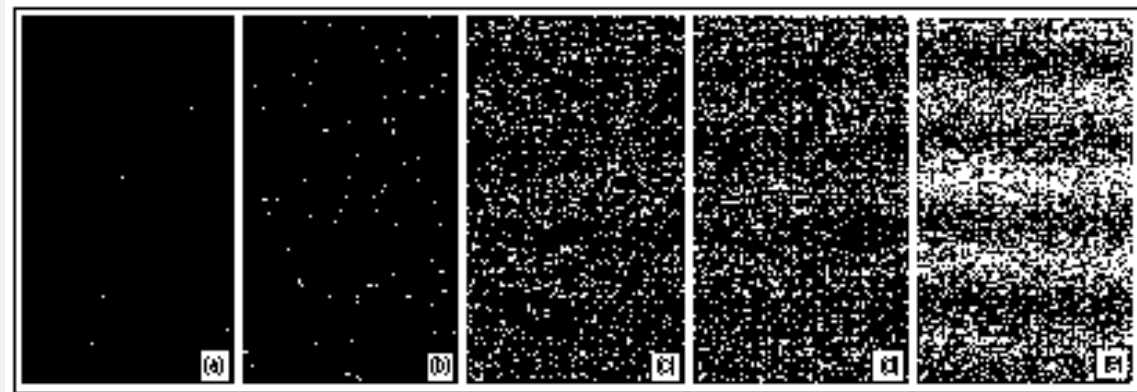


Esperimento di interferenza

Schermo con due fenditure. Gli elettroni vengono sparati contro lo schermo. Dietro esso, una lastra fotografica registra la loro posizione finale.

Gli elettroni vengono sparati **uno ad uno**.

La disposizione dei punti sullo schermo (inizialmente casuale) presenta una chiara struttura a **frange di interferenza**.



C. Jonsson, 1961.

Descrizione della materia: riassunto

La materia, come la luce, manifesta sia un carattere ondulatorio che un carattere corpuscolare.

Negli esperimenti di interferenza, diffrazione, ... (esempio, esperimento con le due fenditure), vengono alla luce gli aspetti ondulatori, mentre negli esperimenti di collisione prevale l'usuale carattere corpuscolare.

➡ **Principio di complementarità** di Bohr

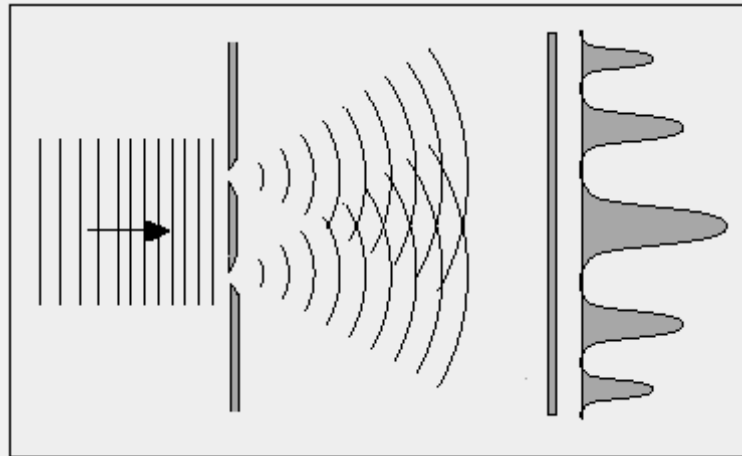
➡ **Problema:** come descrivere entrambi i comportamenti della materia, all'interno di un'unica teoria?

Chiaramente, la fisica classica non fornisce più una rappresentazione adeguata dei nuovi fenomeni microscopici che stanno emergendo.

I diversi modelli proposti (ipotesi di Einstein, atomo di Bohr, ipotesi di de Broglie ...) devono lasciare il posto ad un'unica teoria complessiva

Ancora l'esperimento delle due fenditure

Consideriamo nuovamente l'esperimento delle **due fenditure** con **elettroni**.



Primo tentativo: descrizione particellare della materia

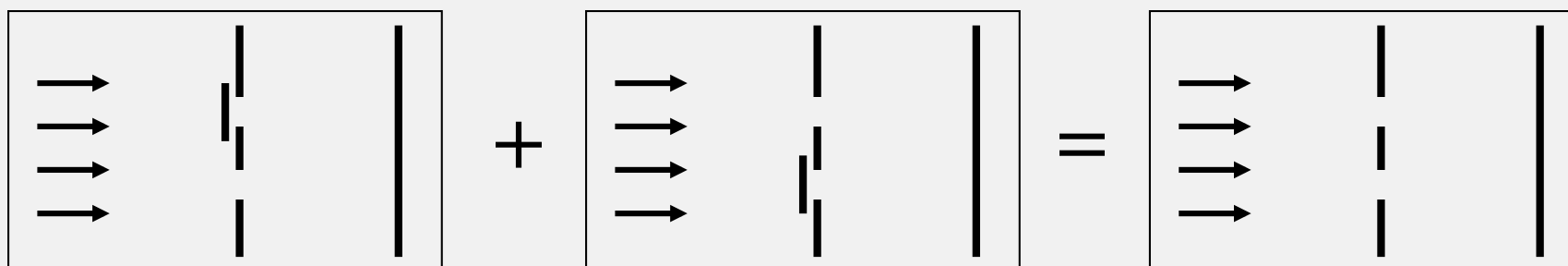
Conseguenza: ciascun elettrone – come qualunque **particella** – passa attraverso **una delle due fenditure**. In media, metà elettroni passano attraverso la fenditura superiore, e metà attraverso quella inferiore.

Test dell'ipotesi particellare

Effettuiamo i seguenti **due esperimenti**:

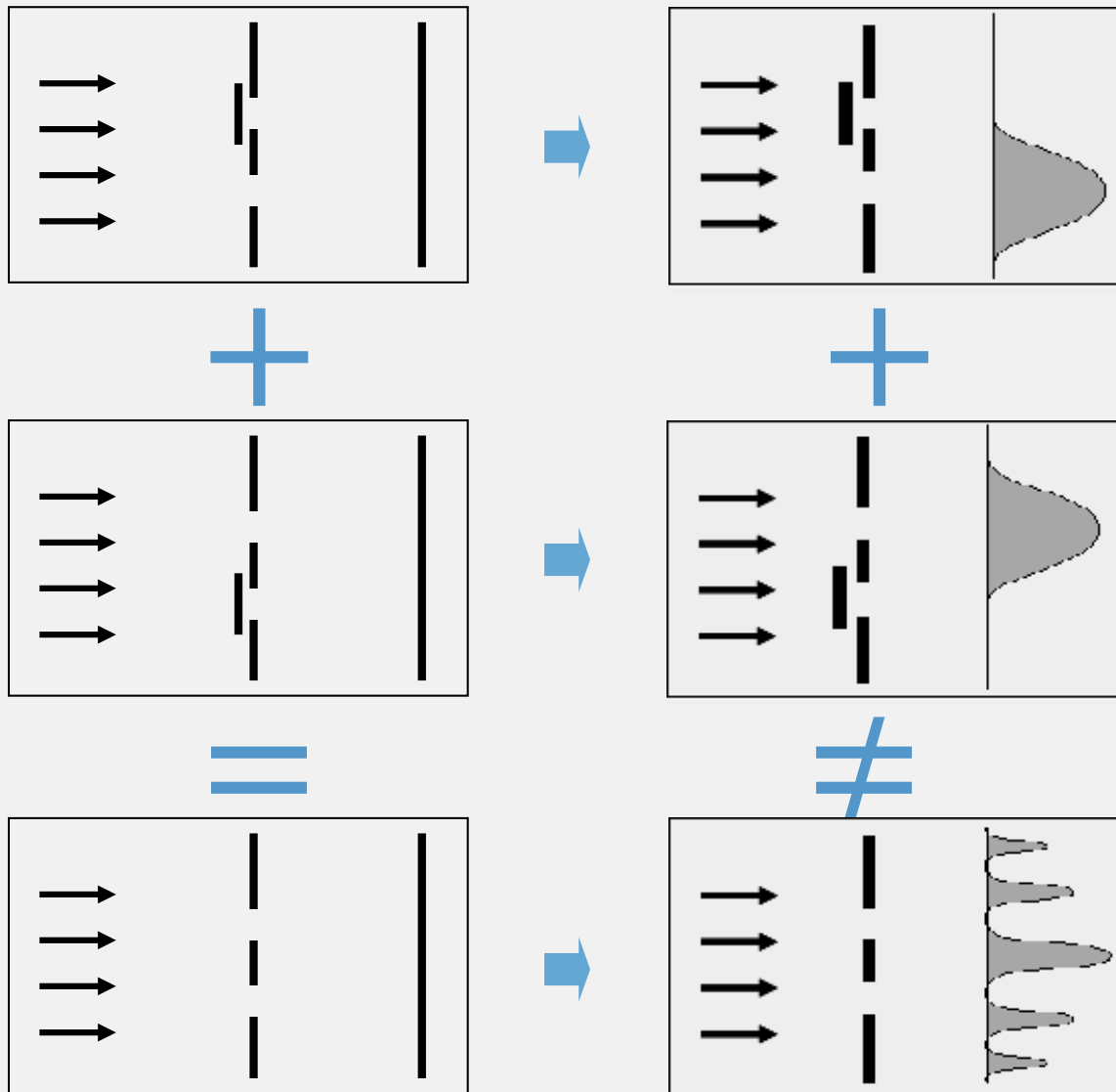
1. Prima chiudiamo la fenditura superiore, lasciando quella inferiore aperta, e spariamo N elettroni. Poi apriamo la fenditura superiore e chiudiamo quella inferiore, e spariamo altri N elettroni.
2. Teniamo entrambe le fenditure aperte e spariamo N elettroni.

Se gli elettroni sono particelle, i due esperimenti dovrebbero dare, statisticamente, lo **stesso risultato**.



L'ipotesi è sbagliata!

Ipotesi teorica



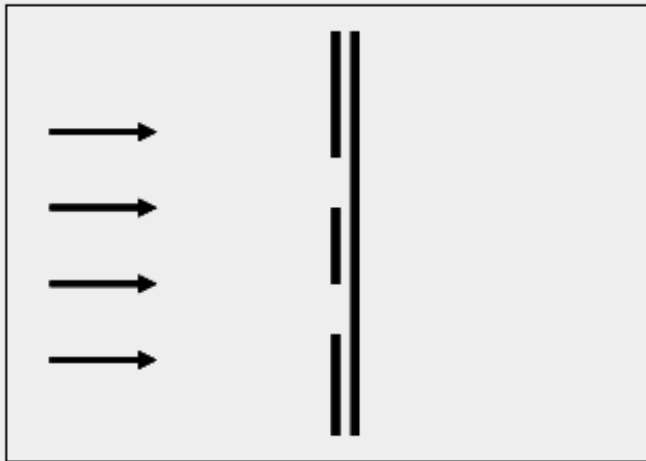
Risultato sperimentale

Non è possibile interpretare gli elettroni come **particelle**, almeno nel senso classico del termine.

L'altra possibilità

Gli **elettroni** non sono particelle. Sono delle **onde di materia**. Come tutte le onde, passano attraverso entrambe le fenditure.

Anche questa risposta è **sbagliata**.



Se uno sposta la lastra fotografica fino a farla coincidere con lo schermo con le due fenditure, non si trova mezzo elettrone in corrispondenza di una fenditura, e mezzo elettrone in corrispondenza dell'altra, come accadrebbe per qualsiasi onda. **L'elettrone è sempre o tutto da una parte, o tutto dall'altra.**



Non è possibile interpretare gli elettroni come **onde**, almeno nel senso classico del termine.

La nascita della Meccanica Quantistica (1926)

Nel 1926, Schrödinger propone di associare una **funzione d'onda** ad ogni sistema fisico. Questa funzione d'onda risolve una ben precisa equazione – chiamata **equazione di Schrödinger** – che determina la sua evoluzione nel tempo.

In questo modo vengono spiegati i risultati di tutti gli esperimenti fatti a livello microscopico. **I nuovi fenomeni, e i modelli provvisori, vengono finalmente inquadrati all'interno di un'unica teoria.**

Non tutto torna, però ...

J.S. Bell



«At an early stage, [Schrödinger] had tried to replace 'particles' with wavepackets. But wavepackets diffuse. And the paper of 1952 ends, rather lamely, with the admission that Schrödinger does not see how, for the present, to account for particles tracks in track chambers ... nor, more generally, for the definiteness, the particularity, of the world of experience, as compared with the indefiniteness, the waviness, of the wavefunction».

("Are there quantum jumps?", in: J.S. Bell, "Speakable und unspeakable in quantum mechanics", Cambridge University Press, 1987, p. 201).

La soluzione ufficiale (Born, 1926)

Scuola di Copenhagen: non è legittimo chiedersi dove sia l'elettrone. Possiamo solo chiederci dove possiamo **trovare** l'elettrone, se **misuriamo** la sua posizione. E la risposta è:

La probabilità di trovare l'elettrone vicino al punto x , al tempo t , è data dal modulo quadro della funzione d'onda $\Psi(x,t)$ ad esso associata.

L'interpretazione ortodossa: si rinuncia alla rappresentazione dei fenomeni

A. Petersen



«There is no quantum world. There is only an abstract quantum mechanical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how Nature *is*. Physics concerns *what we can say* about Nature».

(in: M. Jammer, "The philosophy of Quantum Mechanics", p. 204)

La Meccanica Quantistica

Assioma 1. Ad ogni sistema fisico è associata una funzione d'onda $\Psi(x,t)$

Assioma 2. La funzione d'onda evolve secondo l'equazione di Schrödinger.

Assioma 3. La **probabilità di trovare** la particella nel punto \mathbf{x} al tempo \mathbf{t} è:

$$P(x,t) = |\Psi(x,t)|^2$$

In questo modo emergono le proprietà **ondulatorie**. Tuttavia materia e radiazione manifestano anche comportamenti **corpuscolari**. È necessario introdurre un nuovo assioma.

Assioma 4. Immediatamente dopo la misura, la funzione d'onda collassa nella regione in cui la particella è stata trovata (**postulato di riduzione del pacchetto**).

Alcuni commenti dell'epoca

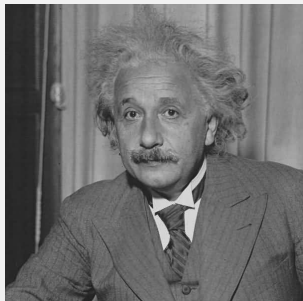
W. Pauli



«As O. Stern said recently, one should no more rack one's brain about the problem of whether something one cannot know anything about exists all the same, than about the ancient question of how many angels are able to sit on the point of a needle. But it seems to me that Einstein's question are ultimately always of this kind».

(from a 1954 letter to M. Born, in: *"The Born-Einsten Letters"* Walker, New York, p. 223)

A. Einstein



«What I dislike in this kind of argumentation is the basic positivistic attitude, which from my point of view is untenable».

(in: *"Albert Einstein: philosopher-scientist"*, p. 668)

Il problema della misura: aspetti fisico-matematici

Così com'è formulata, la teoria prevede due tipi di dinamiche:

- L'evoluzione data dall'**equazione di Schrödinger**, che è lineare e deterministica
- L'evoluzione data dalla **riduzione del pacchetto**, che è non lineare e stocastica.

Domanda: Quando si dà una dinamica, e quando si dà l'altra dinamica?

Risposta: L'equazione di Schrödinger vale sempre, tranne per gli esperimenti di misura, per i quali si applica il postulato di riduzione del pacchetto.

Problema: Cos'è un esperimento di misura? In che modo si differenzia da qualunque altro tipo di interazione tra sistemi fisici? Chi decide che una particolare situazione fisica si qualifica come "esperimento"?

La meccanica quantistica non è una teoria matematicamente ben definita!

Il gatto di Schrödinger (1935)

Un **gatto**, come qualunque sistema fisico, è composto da elettroni, protoni e neutroni. Per esso dovrebbero valere le regole della **meccanica quantistica**

Esperimento



“Gatto vivo + gatto morto” è una conseguenza del formalismo quantistico. **Che senso hanno stati di questo tipo?**

Schrödinger è stato il primo a riconoscere le conseguenze devastanti della posizione ortodossa, quando la meccanica quantistica viene applicata a sistemi macroscopici.

Conclusione (personale)

Agli inizi del '900, le nuove proprietà della materia e della radiazione, che via via emergevano dai dati sperimentali, hanno completamente disorientato la comunità scientifica. La meccanica quantistica è stata il primo schema teorico ragionevole che essi sono stati capaci di elaborare.

Il dato fondamentale è che, **a livello microscopico, il processo di misura (l'osservazione) è sempre invasivo** e altera inevitabilmente il comportamento dei micro-sistemi, i quali, se lasciati liberi, evolverebbero diversamente. **Separare l'influenza dell'osservatore dal comportamento intrinseco del sistema non è una cosa facile.**

I fondatori della meccanica quantistica, invece di accettare la sfida, hanno assiomatizzato questa influenza dell'osservatore, **escludendo l'analisi dell'interazione micro-macro dai compiti della fisica**, e bloccando la ricerca scientifica per oltre 50 anni.

Nell'ultimo decennio questi problemi stanno tornando prepotentemente alla ribalta.

Quantum Theory without Observers: la meccanica di Bohm

Vale l'equazione di Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{x}) \right] \psi(\mathbf{x}, t)$$

La funzione d'onda ha solamente il ruolo di guidare il moto delle particelle le quali, come in meccanica classica, sono rappresentate da **punti nello spazio**:

$$\frac{d}{dt} q(t) = F(\psi(\mathbf{x}, t))$$

Secondo questa teoria, se conoscessimo la posizione iniziale delle particelle e la funzione d'onda, potremmo determinare in maniera univoca la loro evoluzione futura. La teoria cioè è **deterministica**.

Quantum Theory without Observers: modelli di collasso spontaneo

Viene modificata l'equazione di Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{x}) + \text{altri termini} \right] \psi(\mathbf{x}, t)$$

in modo che risulti possibile re-interpretare la funzione d'onda come l'oggetto matematico che rappresenta i sistemi fisici nello spazio (Schrödinger).

La funzione d'onda viene interpretata come la **densità di materia della particella**. Una particella non è quindi più un punto materiale, ma un pacchetto di materia che si muove nello spazio. A livello microscopico questo pacchetto è largo (da cui tutti i fenomeni di interferenza), mentre a livello macroscopico è molto localizzato, quasi puntiforme.

I termini aggiuntivi all'equazione di Schrödinger sono **stocastici**, quindi questo modello è intrinsecamente indeterministico.