

LE RIVOLUZIONI QUANTISTICHE

Prof.G.Lorenzoni 12 e 19 novembre 2014 Museo del Patrimonio Industriale

<< Sembra difficile dare uno sguardo alle carte che Dio ha nelle sue mani. Ma neppure per un istante posso credere che Egli giochi a dadi o faccia uso di mezzi telepatici >>.

Albert Einstein

<< Se non siete confusi di fronte alla meccanica quantistica, allora significa che non l'avete afferrata bene >>.

Niels Bohr

<< La Meccanica Quantistica non si capisce, ma ci si abitua >>.

Tullio Regge

PRIMA RIVOLUZIONE QUANTISTICA

(1900 => 1940)

Interazione radiazione-materia (corpo nero)

Effetto fotoelettrico (1905)

Stabilità della materia (atomo di Bohr, 1913)

Effetto Compton (1923)

Proprietà meccaniche e termodinamiche dei materiali e molte altre proprietà del mondo microscopico NON interpretabili mediante la fisica classica.

Dopo pochi decenni:

-RIVOLUZIONE CONCETTUALE => RIVOLUZIONE TECNOLOGICA (all'origine della nostra civiltà dell'informazione)

-TRANSISTOR (1948) => MICROCIRCUITI INTEGRATI (2002)

-LASER (1972)

-Codice a barre, lettori CD, strumenti medici, telecomunicazioni (Terabit)

.... ma non tutto era stato risolto! 1964 : BELL => ENTANGLEMENT =>

SECONDA RIVOLUZIONE QUANTISTICA (1964=> OGGI)

Nuovo campo di indagine:
Informazione quantistica

Finora abbiamo due applicazioni
importanti:

CRITTOGRAFIA QUANTISTICA

COMPUTAZIONE QUANTISTICA

CORPO NERO (1900)

Nel 1900, mentre cercava una spiegazione compatibile con lo spettro della radiazione di corpo nero tanto alle basse frequenze (Legge di Rayleigh-Jeans) quanto alle alte frequenze (Legge di Wien),

MAX PLANCK

introdusse la quantizzazione dello scambio di energia tra radiazione e materia.

Kirchhoff definì il corpo nero come un sistema che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente su di esso e dimostrò che la densità di energia per unità di volume e di frequenza $\rho(\nu, T)$ della radiazione elettromagnetica all'interno di una cavità con pareti isolate termicamente mantenute ad una temperatura T è indipendente dalla natura del materiale.

Wilhelm Wien trovò che:

$$\rho(\nu, T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T}$$

La relazione sperimentale che riproduceva i risultati alle basse frequenze era data dalla legge di Rayleigh-Jeans. Tale legge conduce ad una densità di energia per unità di volume infinita (*catastrofe ultravioletta*):

$$\rho(T) = \int_0^{+\infty} \rho(\nu, T) d\nu = +\infty$$

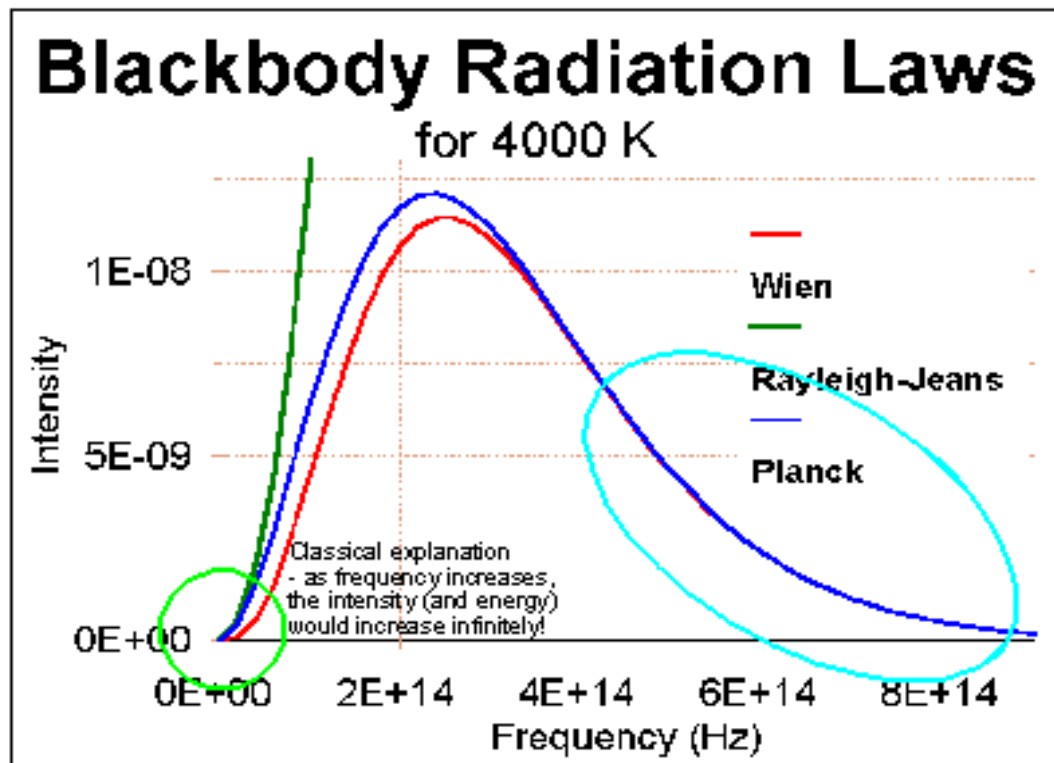
dove $k_B = 8.617 \times 10^{-11} \text{ MeV K}^{-1} = 1.381 \times 10^{-16} \text{ erg K}^{-1}$.

Mediante l'uso di argomentazioni termodinamiche e di un'ipotesi *ad hoc* per interpolare tali formule, Planck giunse alla celebre espressione nota appunto come legge di Planck:

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8 \pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

dove h rappresenta la costante di Planck corrispondente a $6,26 \times 10^{-34} \text{ J x s}$

Planck postulò che gli atomi delle pareti della cavità potessero emettere o assorbire radiazioni solamente in pacchetti (o quanti) di energia $E = h\nu$ (ν = frequenza della radiazione assorbita o emessa).



Confronto delle leggi di Wien, Rayleigh-Jeans, e Planck per $T = 4000\text{K}$

I quanti di luce, o Fotoni, furono dunque introdotti inizialmente da Planck al solo scopo di evitare le infinità matematiche che apparivano nella teoria di Rayleigh-Jeans. La loro interpretazione come quanti di luce (fotoni) è invece dovuta ad EINSTEIN che nel 1905, per spiegare l'effetto fotoelettrico, propose la quantizzazione della luce stessa.

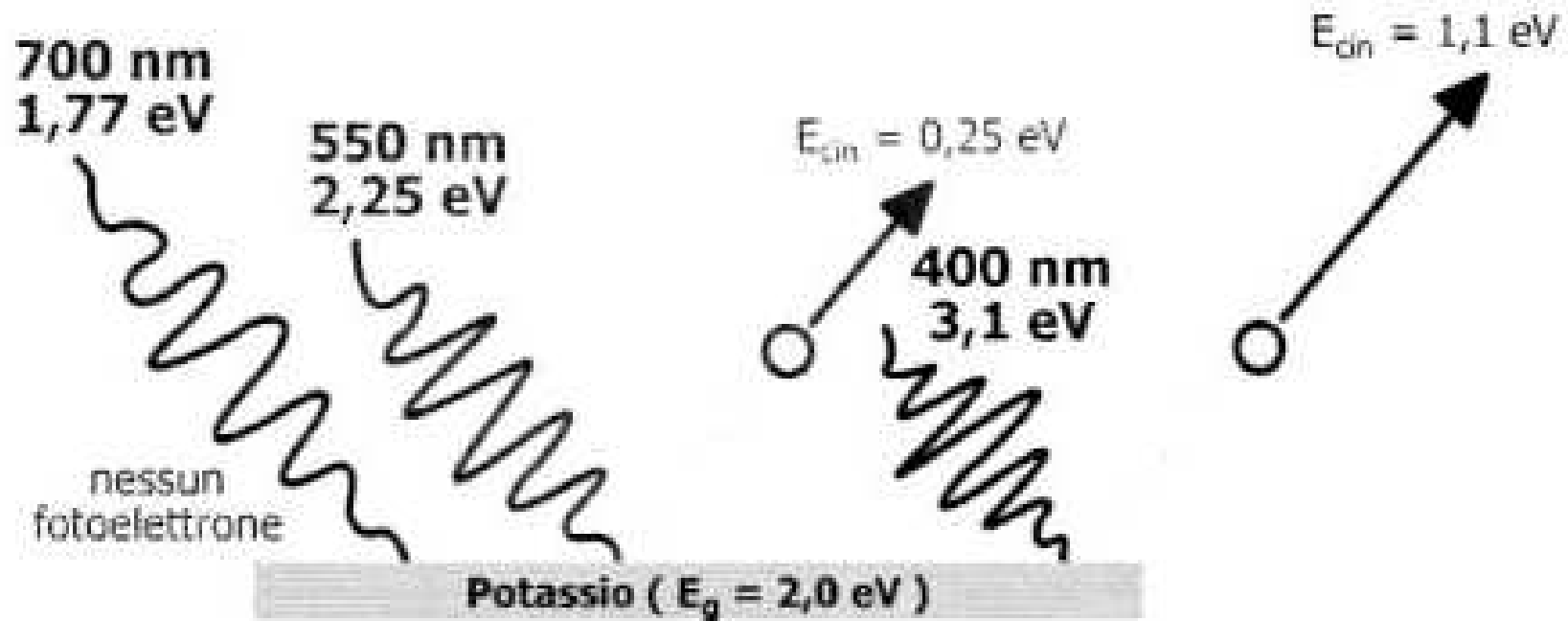
EFFETTO FOTOELETTRICO (1905)

Quando una lastra di metallo è colpita da radiazione elettromagnetica, il metallo emette elettroni. Sperimentalmente si osserva che:

- A. il numero di elettroni emessi è proporzionale all'intensità della radiazione incidente
- B. Per ciascun metallo esiste una frequenza di soglia ν_0 tale che per radiazione avente frequenza $\nu < \nu_0$ non vi è emissione di elettroni
- C. La massima energia cinetica degli elettroni emessi è proporzionale a $(\nu - \nu_0)$ ed è indipendente dall'intensità della radiazione incidente
- D. L'emissione di elettroni è praticamente istantanea, cioè appare e scompare con la radiazione elettromagnetica incidente senza alcun ritardo misurabile.

I risultati B e C sono incompatibili con la teoria ondulatoria della radiazione elettromagnetica. Einstein concluse che la radiazione monocromatica di frequenza ν si comporta come se fosse costituita da un numero finito di "quanti" di energia, localizzati ed indipendenti, di valore $E = h\nu$ e tali quanti sono chiamati *fotoni*. Con questo risultato l'interpretazione dell'effetto fotoelettrico è immediata.

$$E_{\text{fotone}} = h\nu$$



Effetto fotoelettrico

Se l'energia della luce incidente non fosse radunata in quanti, la probabilità di rimozione di un elettrone dovrebbe aumentare con l'intensità della luce incidente e la durata dell'illuminazione. Inoltre l'elettrone dovrebbe uscire dall'atomo nell'istante in cui avesse finalmente assorbito tutta l'energia necessaria dalla luce incidente.

Le misure dimostrano che il fenomeno si svolge con modalità ben diverse.
L'emissione dell'elettrone avviene solamente se la luce incidente ha una frequenza ν tale che

$$h\nu > Q \quad (Q = \text{energia di legame}).$$

Aumentando l'intensità della radiazione incidente aumenta il ritmo di emissione degli elettroni, ma questi hanno sempre la stessa energia

$$h\nu - Q = h\nu - h\nu_0 = h(\nu - \nu_0).$$

In sostanza tutto si comporta come se la luce incidente fosse prodotta, trasmessa ed assorbita solo in *quanti* (o pacchetti) di energia $h\nu$, come se la rimozione dell'elettrone avvenisse solo quando l'energia del quanto supera quella di legame Q e se l'energia dell'elettrone uscente fosse quella del quanto di luce incidente $h\nu$ da cui è stata tolta la quantità di energia Q necessaria per la rimozione.

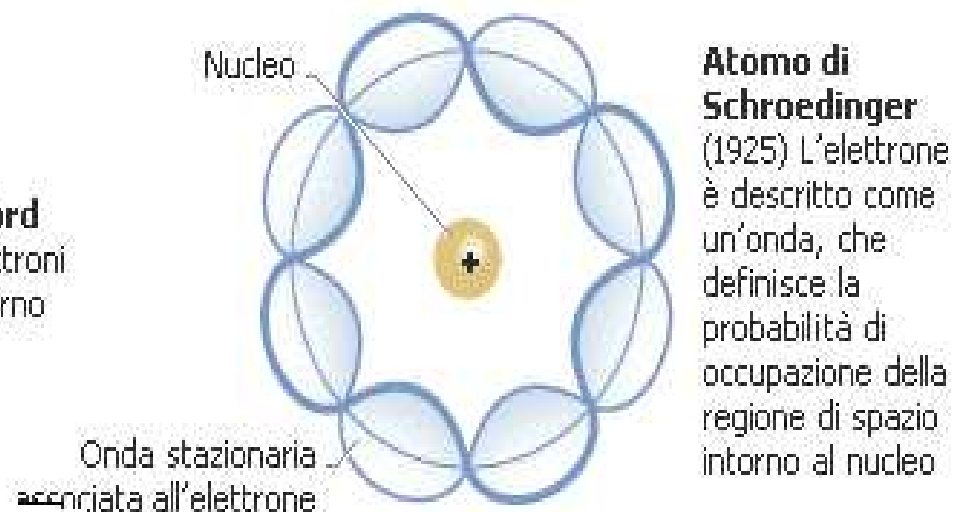
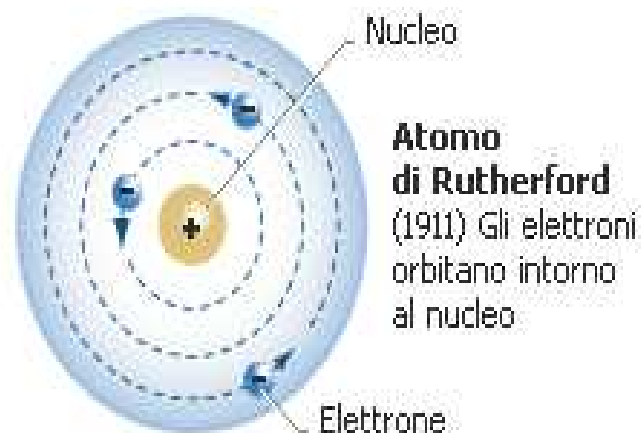
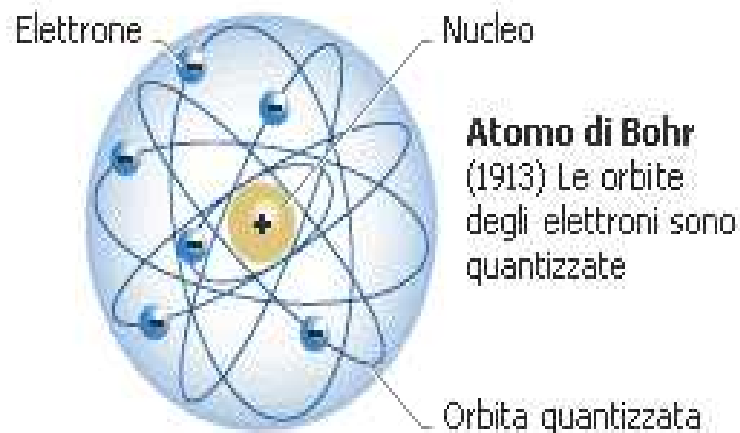
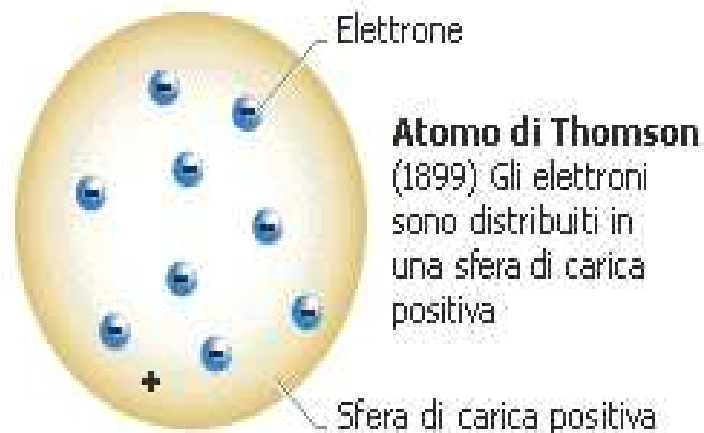
MODELLO ATOMICO DI BOHR (1913)

Il modello di Bohr rappresenta una ingegnosa combinazione di leggi classiche e di concetti quantistici primordiali: l'atomo di idrogeno è descritto come composto da un protone e un elettrone legati da attrazione elettrostatica.

In tale modello, l'elettrone percorre un'orbita ellittica intorno al protone in modo simile a quanto fanno i pianeti intorno al Sole (Legge dell'inverso del quadrato della distanza).

Tra le infinite orbite possibili, sono permesse solo quelle che soddisfano certe condizioni di quantizzazione.

Nonostante i successi, il modello di Bohr dell'atomo di idrogeno non risulterà coerente con il principio di Indeterminazione, ed è sarà quindi sostituito con il modello che descrive l'elettrone come densità di probabilità.



Differenze di energia tra i vari livelli energetici dell'elettrone nell'atomo di idrogeno

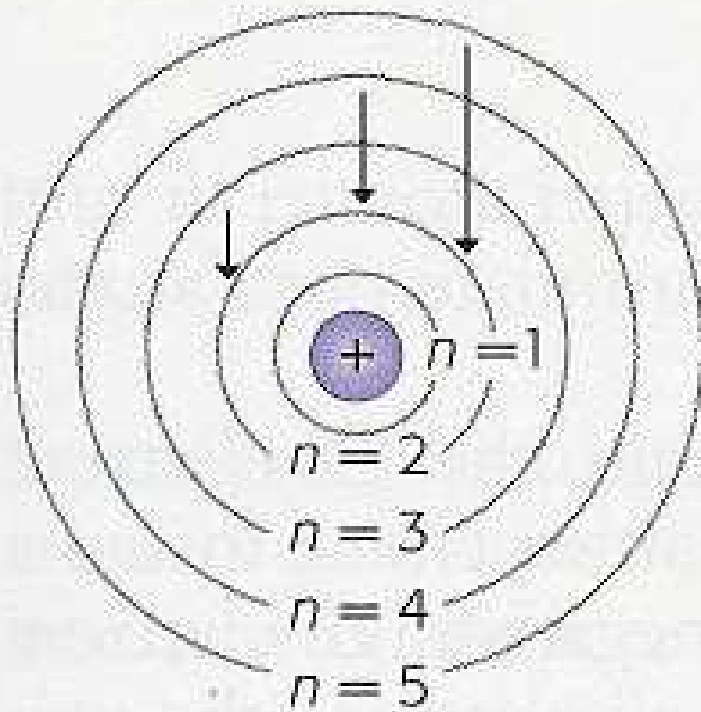
$$E = -\frac{1}{n^2} \frac{2k^2 \pi^2 m e^4}{h^2}$$

$$\Delta E = E_{n_i} - E_{n_j} = \left(\frac{1}{n_j^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \frac{2k^2 \pi^2 m e^4}{h^2}$$

Se $n_i = 1$ ed $n_j = 2$

$$\Delta E = E_{n_i} - E_{n_j} = \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{1^2} \right) \frac{2k^2 \pi^2 m e^4}{h^2} = \left(\frac{1}{4} \right) \dots\dots$$

emissione delle
righe spettrali



434 nm



486 nm



657 nm



Il modello atomico di Bohr spiega:

- 1. Gli spettri di assorbimento dei gas atomici (righe spettrali scoperte da Balmer);**
- 2. la stabilità della materia**

Tale modello si serve di assunzioni ad hoc sulle orbite per le quali non esisteva alcuna giustificazione.

Principale obiezione:

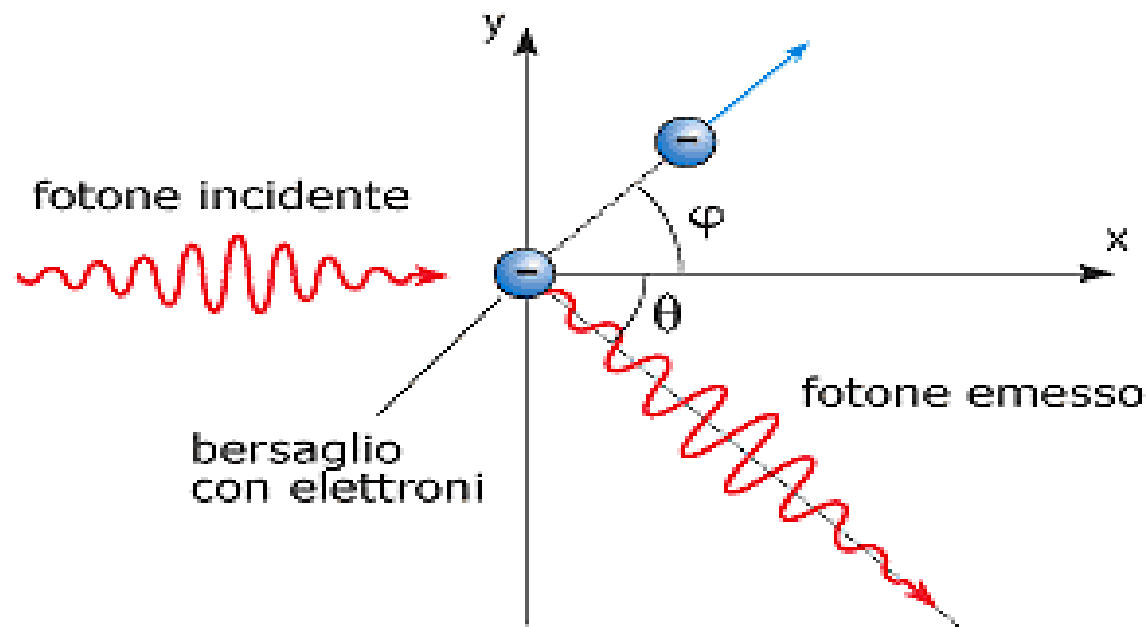
L' elettrone che percorre un'orbita deve irraggiare onde elettromagnetiche, perdendo continuamente energia e precipitando sul protone in tempo brevissimo, in contrasto col principio di stabilità degli atomi.

Spiegazione successiva: vedi principio di indeterminazione (l'elettrone non può precipitare sul nucleo => giustificazione della stabilità della materia).

EFFETTO COMPTON (1923)

Il fenomeno più decisivo che convinse i fisici del fatto per cui la luce in alcuni casi presenti un carattere corpuscolare è rappresentato dall'EFFETTO COMPTON, osservato misurando la lunghezza d'onda dei raggi X riflessi dagli elettroni di un blocco di paraffina. Compton dimostrò che, facendo incidere raggi X su un corpo, appariva anche una componente di radiazione secondaria. Di lì dimostrò che la lunghezza d'onda λ' di questo raggio secondario era indipendente dal materiale utilizzato nell'esperimento poiché dipendeva solamente dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e dall'angolo θ formato dal raggio incidente e dal raggio secondario. Egli osservò anche che la lunghezza d'onda della radiazione secondaria risultava sempre maggiore o uguale a quella della radiazione incidente:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = (h/m_e c) (1 - \cos\theta)$$



Compton stesso provò a spiegare questo fenomeno nell'ambito della teoria ondulatoria della luce, ma trovando che ciò era impossibile, ricorse alla teoria corpuscolare. Egli affermò che la luce di frequenza ν è formata da fotoni aventi energia $E = h\nu$ ed un impulso $\mathbf{p} = h\nu/c = h/\lambda$ (essendo $c = \lambda\nu$)

I quanti riflessi hanno dunque una lunghezza d'onda λ' maggiore (e quindi un'energia minore) di quella dei quanti incidenti. Il risultato segue dalle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto nella collisione fotone-elettrone. Le stesse leggi si applicano alla collisione di una palla da biliardo con una che sia inizialmente immobile: la palla incidente cede parte della sua energia e della sua quantità di moto a quella immobile ed esce quindi con un'energia minore di quella iniziale, esattamente come avviene per il fotone.

L'esperimento di Arthur Compton chiarì al di là di ogni dubbio che occorreva tener conto sia della conservazione dell'energia che della quantità di moto del fotone.

In conclusione, *il fotone possiede non solo energia ma anche quantità di moto*, proprio come avviene per una particella (aspetto corpuscolare della radiazione).

LUCE : ONDA O PARTICELLA?

Per molti anni i fisici considerarono i concetti di particella e onda come opposti. Di conseguenza, i fatti precedentemente descritti ponevano un serio dilemma riguardo la concezione della luce. Per interpretare i classici esperimenti di diffrazione e interferenza è necessario considerare la radiazione elettromagnetica come un'onda, mentre una spiegazione degli effetti fotoelettrico e Compton richiede che la luce presenti un carattere corpuscolare.

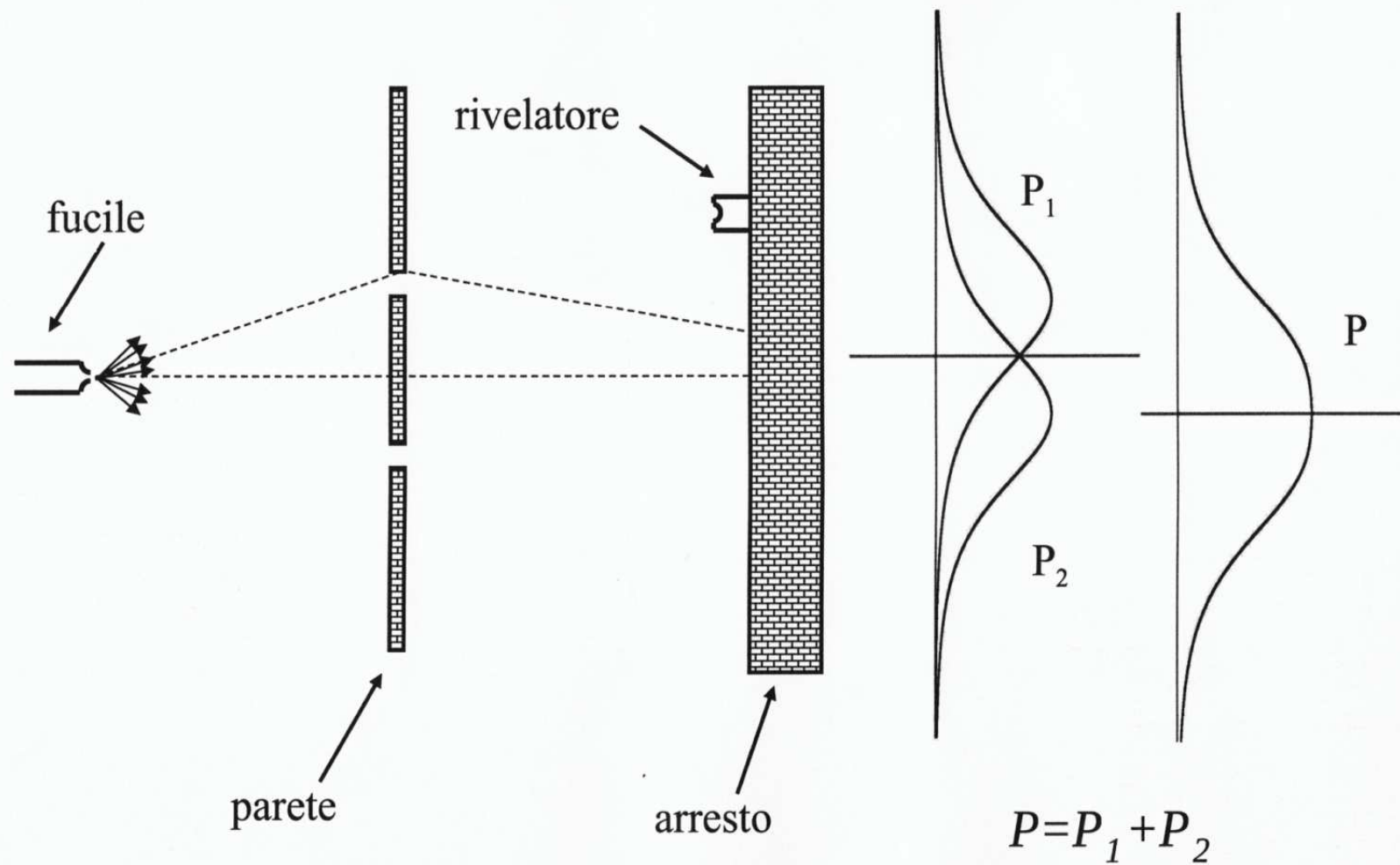
La luce è dunque una particella oppure un'onda?

La risposta a questa domanda fu resa possibile per la prima volta nella seconda metà degli anni '20 del '900, fondamentalmente grazie all'interpretazione statistica della meccanica quantistica sviluppata da MAX BORN e dal ***principio di complementarità*** enunciato da NIELS BOHR. (vedi, per approfondire, Bell p.227)

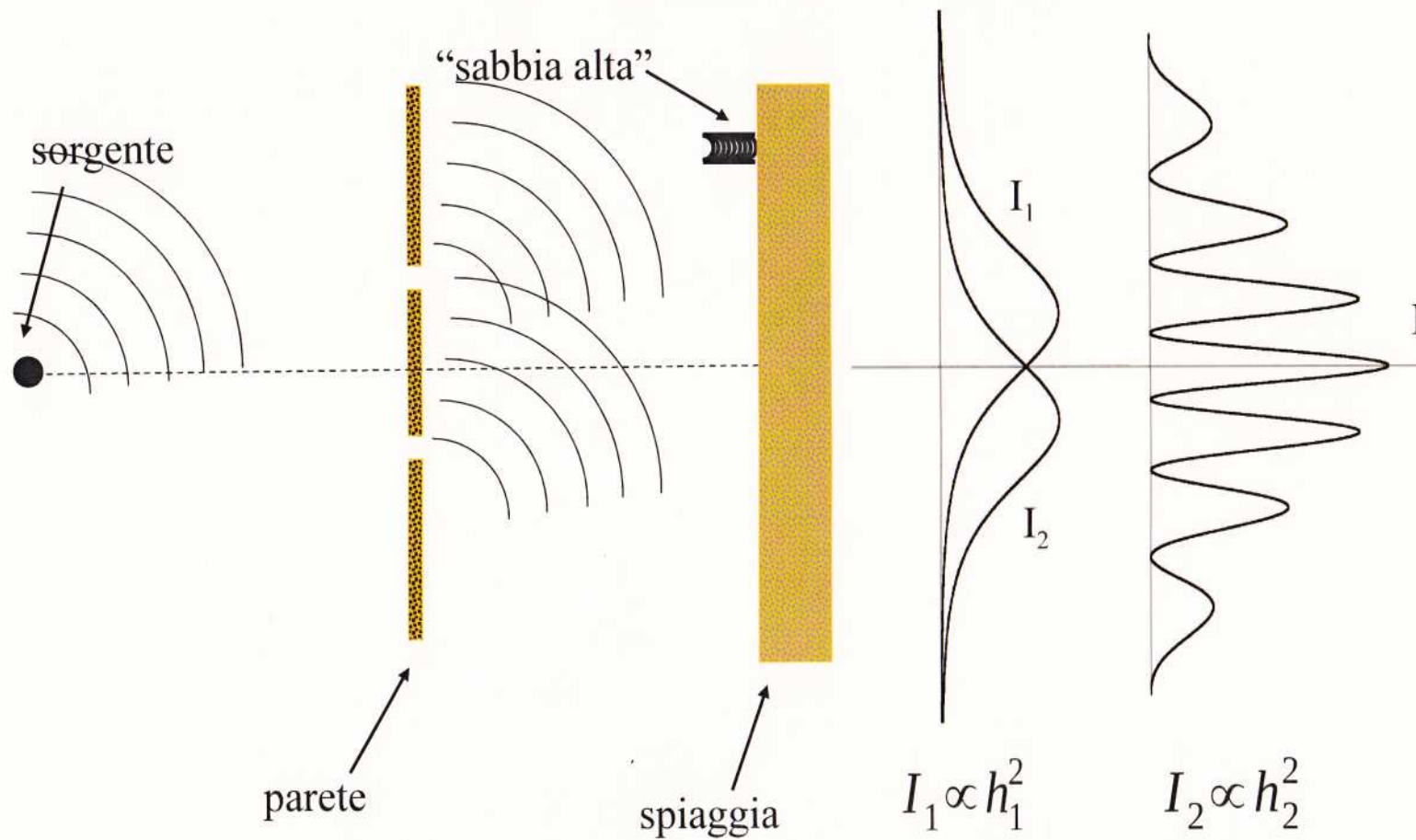
Il dilemma onda-corpuscolo è oggi uno pseudo problema. Le particelle subatomiche non sono né onde né corpuscoli, se con “onda” e “corpuscolo” vogliamo intendere qualcosa che abbia la stessa costituzione delle onde oppure dei corpi della fisica macroscopica.

Quanto alla ***vera natura*** di una particella si può dire soltanto che alla particella corrisponde una funzione d'onda la quale obbedisce all'equazione di Schrödinger o che la particella è soggetta alle leggi della meccanica quantistica.

A. Esperienza con **proiettili**



B. Esperienza con onde

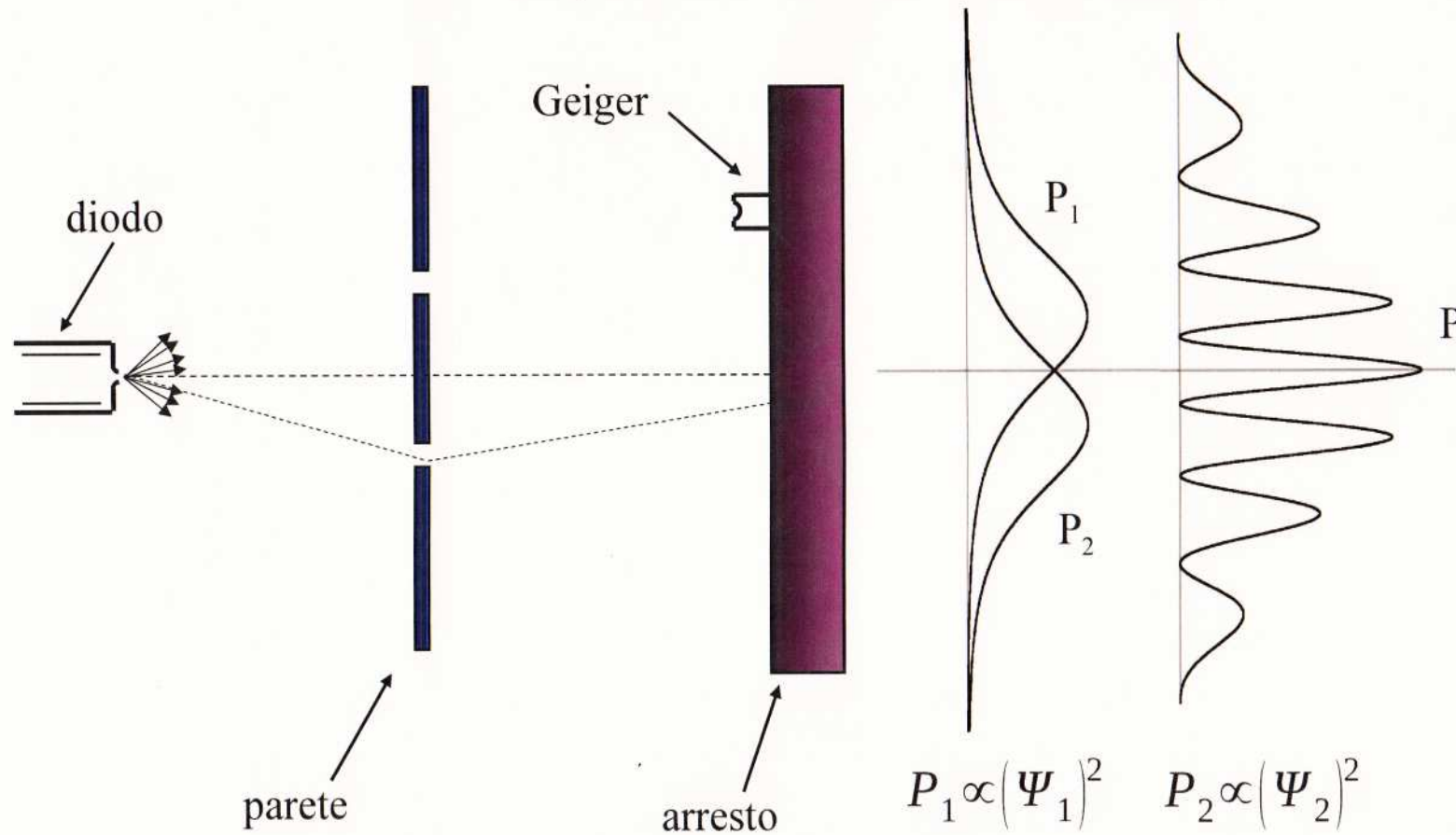


$$I_1 \propto h_1^2$$

$$I_2 \propto h_2^2$$

$$I \propto (h_1 + h_2)^2 \neq I_1 + I_2$$

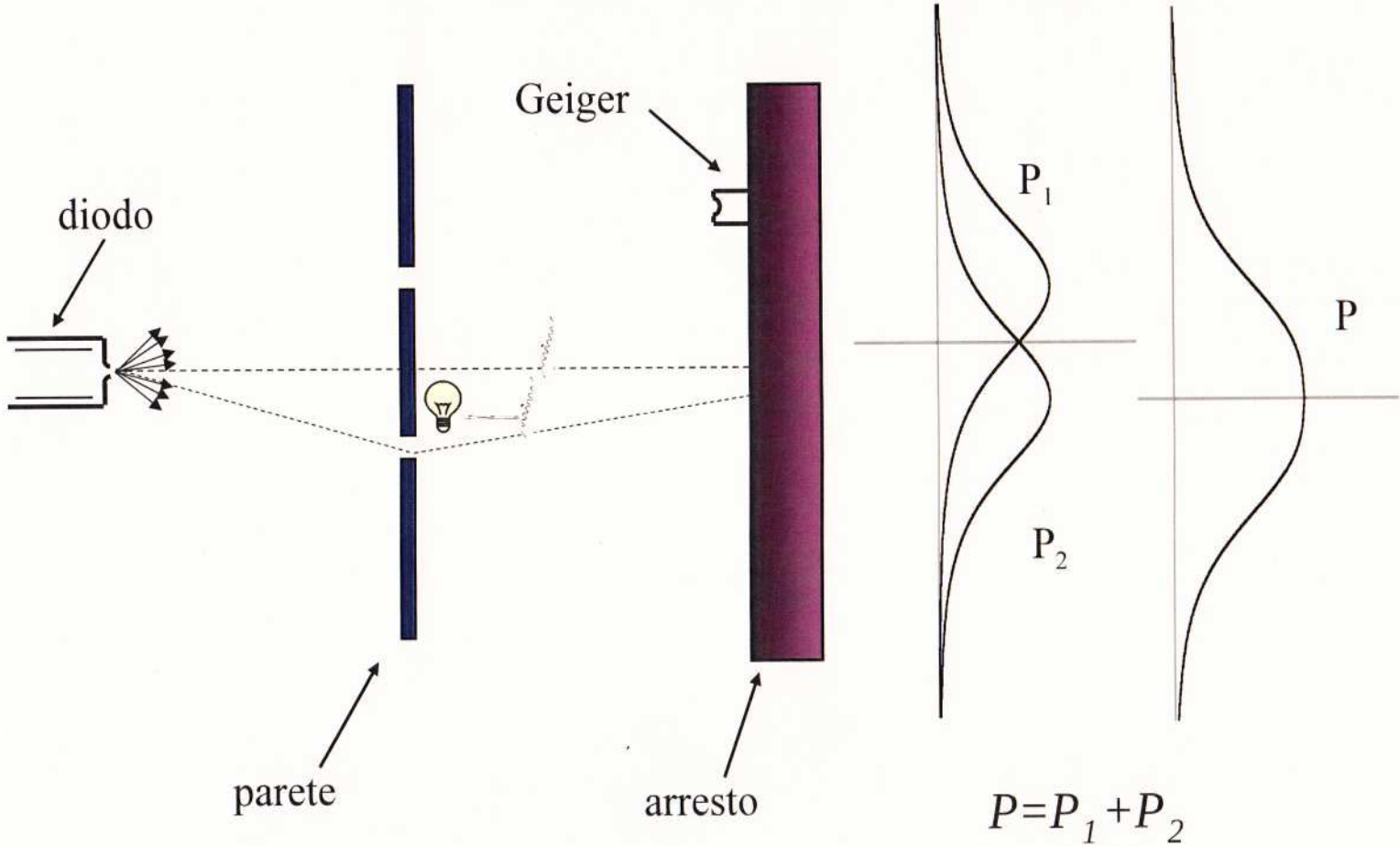
C. Esperienza con **elettroni**



$$P_1 \propto (\Psi_1)^2 \quad P_2 \propto (\Psi_2)^2$$

$$P \propto ((\psi_1 + \psi_2))^2 \neq P_1 + P_2$$

C. Esperienza con **elettroni**



RISULTATO DELLE ESPERIENZE:

- A. compaiono in UNITÀ
 - B. possono avere **QUALUNQUE ALTEZZA**
 - C. compaiono in UNITÀ
-
- A. probabilità di arrivo: $P = P_1 + P_2$
 - B. intensità delle onde: $I \neq I_1 + I_2$
 - C. probabilità di arrivo
NON rivelati dalla lampada: $P \neq P_1 + P_2$
rivelati dalla lampada: $P = P_1 + P_2$
-
- A. NON interferiscono MAI
 - B. interferiscono **SEMPRE**
 - C. interferiscono **SEMPRE** “senza lampada”
NON interferiscono MAI “con la lampada”

“SPIEGAZIONE” DEI RISULTATI

La probabilità del risultato di una misura - **evento** - è data dal modulo quadrato di un numero complesso detto

ampiezza di probabilità:

$$P = |\psi|^2$$

Interpretazione statistica della Meccanica Quantistica

L'ampiezza dell'onda $|\Psi(\mathbf{x}, \mathbf{t})|^2$ rappresenta dunque la probabilità che la particella si possa trovare nel punto di coordinata \mathbf{x} al tempo \mathbf{t} . Ciò rappresenta l'unificazione degli aspetti corpuscolare e ondulatorio. Nessuno di essi è in grado singolarmente di fornire una descrizione completa della realtà fisica, ma entrambi rappresentano aspetti complementari di un'unica realtà fisica che diventano più o meno evidenti a seconda del tipo di esperimento considerato.

In definitiva la probabilità di un evento -come ad esempio il risultato di un esperimento- è data dal modulo quadrato di un numero complesso Ψ chiamato "ampiezza di probabilità".

ONDE DI MATERIA

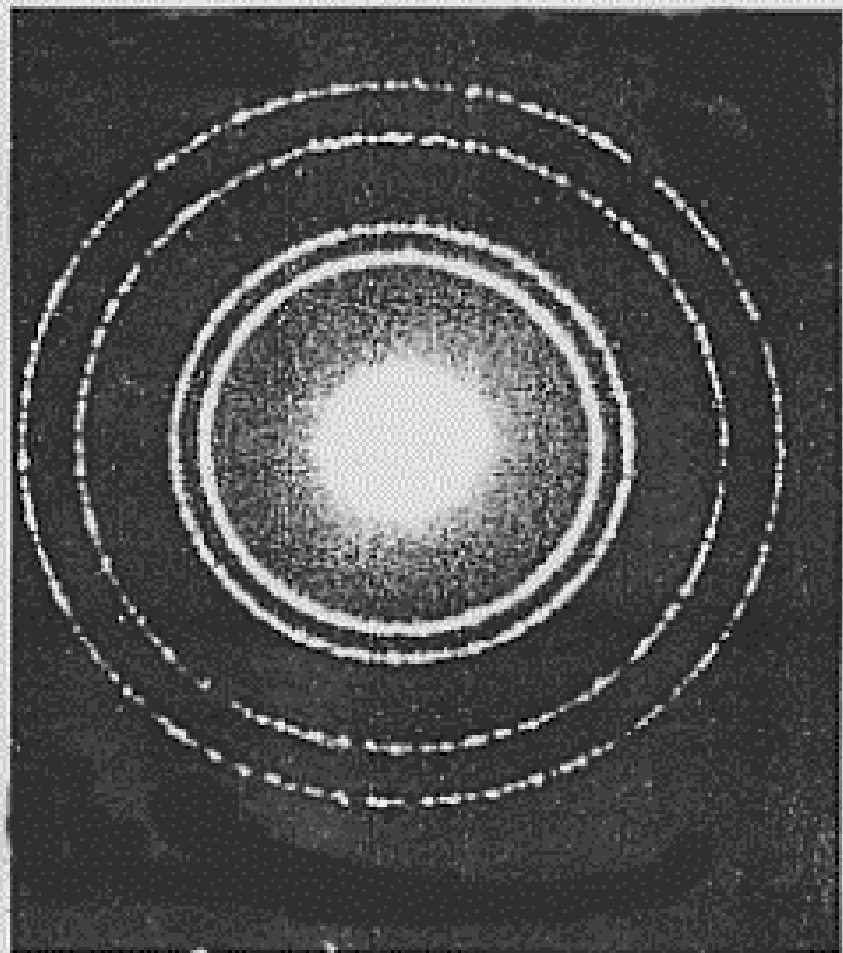
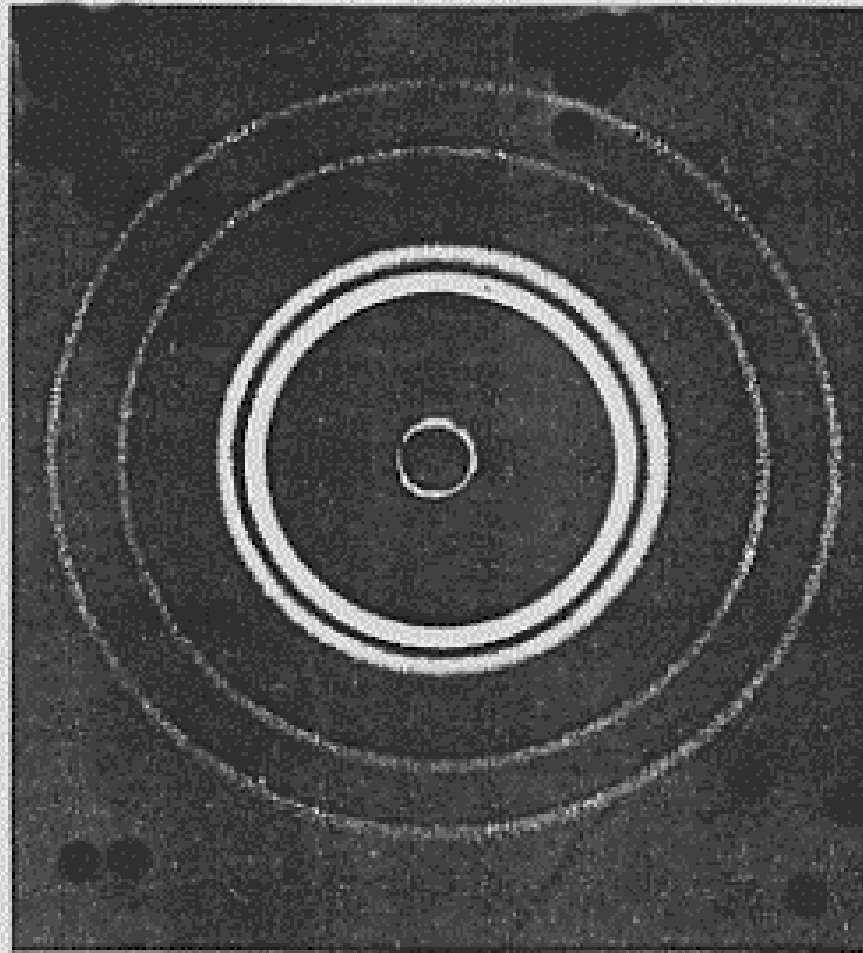
Spiegazione Effetto Compton: un raggio di luce monocromatico di lunghezza d'onda λ è formato da fotoni aventi impulso $p=h/\lambda$.

Nel formalismo di SCHRÖDINGER (1925) si ha un'equazione d'onda per la **materia**, che completa un perfetto dualismo: come la radiazione, anche la materia può comportarsi come particella o come onda, secondo una proposta di Louis De Broglie (1924), incomprensibile nel quadro della logica classica. Come De Broglie stesso notò, ciò implica che, sotto opportune condizioni, ogni corpo può presentare un comportamento di tipo ondulatorio, per cui è associabile una lunghezza d'onda (lunghezza d'onda di De Broglie):

$$\lambda=h/p$$

Nel 1927 Davisson e Germer evidenziarono la natura ondulatoria di un fascio elettronico riflesso da un reticolo cristallino.

La figura di diffrazione a sinistra è stata prodotta da un fascio di raggi X che attraversa un sottile foglio di alluminio. La figura di diffrazione a destra è stata ottenuta per mezzo di un fascio di elettroni che attraversa lo stesso foglio di alluminio.



La relazione di De Broglie rappresenta il punto di partenza della meccanica ondulatoria. Il primo problema che si presenta è quello di determinare quale equazione d'onda governi l'evoluzione dell'onda stessa associata al moto della particella. Il problema fu risolto da Schrödinger:

L'equazione di Schrödinger dipendente dal tempo

L'equazione di Schrödinger dipendente dal tempo, in una dimensione spaziale, ha la forma

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t}$$

Per una **particella libera**, per la quale $U(x) = 0$, la funzione d'onda, soluzione dell'equazione, può essere scritta come **un'onda piana**

$$\Psi(x, t) = A e^{i(kx - \omega t)} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{h} p \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{h} E$$

Per altri problemi, cioè per **particelle soggette ad una forza**, il potenziale non nullo rende la soluzione più difficile. La dipendenza spaziale della funzione d'onda è fissata dall'equazione di **Schrödinger indipendente dal tempo** mentre l'evoluzione temporale da quella **dipendente dal tempo**

$H\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$	$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} + U(x)\Psi(x) = E\Psi(x)$
Time evolution	Time independent equation

L'equazione di Schrödinger indipendente dal tempo

Per un potenziale generico U l'equazione di Schrödinger unidimensionale ed indipendente dal tempo è

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + U(x)\Psi(x) = E \Psi(x)$$

In 3 dimensioni assume la forma

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \left[\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} \right] + U(x, y, z)\Psi(x, y, z) = E \Psi(x, y, z)$$

per coordinate cartesiane. Può essere scritta in modo più compatto, introducendo l'operatore **Laplaciano**

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

L'equazione di Schrodinger può quindi essere scritta come:

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(x, y, z) \right] \Psi(x, y, z) = E \Psi(x, y, z) \quad \hat{H} \Psi = E \Psi$$

La ricerca dei livelli quantistici dell'energia viene ora ridotta semplicemente alla ricerca degli autovalori dell'equazione di Schrödinger per stati stazionari.

La seconda formulazione dell'equazione di Schrödinger, dipendente dal tempo, rappresenta invece una generalizzazione dell'equazione per stati stazionari e fornisce l'equazione del moto della meccanica quantistica.

In tali equazioni si fa uso di grandezze osservabili (o semplicemente 'osservabili') intese come operatori:

	Classical variable	Quantum operator
Position	x	x
A function which depends only on position	$f(x)$	$F(x)$
Momentum	p	$\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}$
Energy	E	$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$

Il successo dell'equazione di Schrödinger nello spiegare la struttura atomica e nel prevedere con estrema precisione un'incredibile serie di dati osservativi fu straordinario e con pochi precedenti nella storia della scienza. Dalla Meccanica Ondulatoria nacque così la Meccanica Quantistica, dando origine ad una rivoluzione scientifica che corre parallela (e che si integra) con quella della Relatività: la teoria quantistica dei campi contiene ed unifica la Relatività e la Meccanica Quantistica.

Schrödinger si preoccupò anche del significato fisico della funzione d'onda, ma su questo punto non riuscì a trovare un'interpretazione soddisfacente. Fu invece Born che interpretò *correttamente* il significato fisico della funzione d'onda, affermando che $|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2$ rappresenta la densità di probabilità di trovare la particella nel punto \mathbf{r} nello spazio all'istante t .

In particolare, se $\Psi_1(\mathbf{r},t)$ e $\Psi_2(\mathbf{r},t)$ rappresentano due funzioni d'onda che danno origine rispettivamente alle densità di probabilità:

$$P_1(\mathbf{r},t) = |\Psi_1(\mathbf{r},t)|^2 \quad \text{e} \quad P_2(\mathbf{r},t) = |\Psi_2(\mathbf{r},t)|^2$$

allora la densità di probabilità associata all'onda complessiva

$$\Psi(\mathbf{r},t) = \Psi_1(\mathbf{r},t) + \Psi_2(\mathbf{r},t)$$

(cioè la sovrapposizione delle due), è data da:

$$P(\mathbf{r},t) \propto |\Psi(\mathbf{r},t)|^2 = P_1(\mathbf{r},t) + P_2(\mathbf{r},t) + 2\mathbf{Re} \{ \Psi_1^*(\mathbf{r},t) \Psi_2(\mathbf{r},t) \}.$$

E' proprio la presenza del termine finale che consente di spiegare i fenomeni di interferenza e diffrazione tanto per i fotoni quanto per le particelle massive (v. esperimento della doppia fenditura).

RELAZIONI DI INDETERMINAZIONE

Di grande importanza concettuale per la Meccanica Quantistica rimane il *Principio di Indeterminazione* di Werner HEISENBERG (1927).

Le principali relazioni di indeterminazione per le grandezze osservabili sono:

$$\Delta x \Delta p_x \approx h$$

$$\Delta y \Delta p_y \approx h$$

$$\Delta z \Delta p_z \approx h$$

$$\Delta E \Delta t \approx h$$

L'origine delle relazioni di indeterminazione risiede nella perturbazione finita e incontrollabile del sistema in esame causata dall'interazione con l'apparato di misura (per determinare lo stato di una particella è necessario infatti osservarla con uno strumento di misura).

Come fu fatto notare da Heisenberg, le formule di Planck e di De Broglie implicano che lo stesso apparato di misura perturba l'oggetto esaminato in modo tale da impedire la determinazione simultanea della posizione e della quantità di moto dell'oggetto stesso.

Tali limitazioni non dipendono dalla scelta dell'apparato (e quindi hanno valore universale) e discendono dalla natura ondulatoria della materia => indeterminismo ontologico della Meccanica Quantistica.

Ciò implica che se cerchiamo di definire la posizione di una particella con una precisione $\Delta\mathbf{x}$, allora il suo impulso può essere noto con una precisione $\Delta\mathbf{p} \approx \mathbf{h}/\Delta\mathbf{x}$.

Si noti che le relazioni precedenti si riferiscono alla conoscenza simultanea della posizione e dell'impulso in una direzione predeterminata.

Se ad esempio \mathbf{p}_x per un elettrone è noto con precisione, allora la sua posizione risulta totalmente indeterminata.

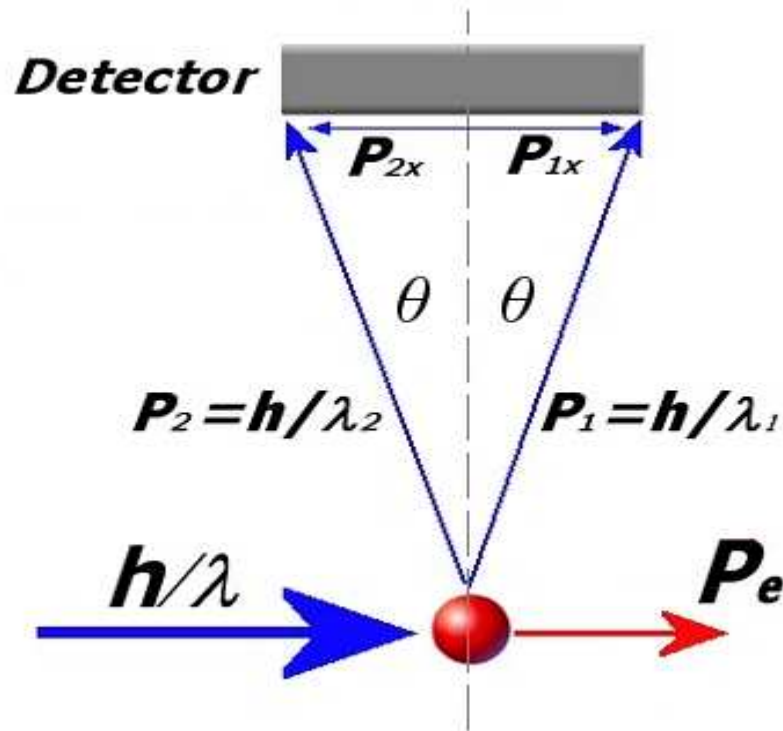
Criterio matematico per la determinazione di osservabili compatibili =>

commutatore $[A,B] = 0$ osservabili compatibili es. $[x,p_y] = 0$

$[A,B] \neq 0$ osservabili incompatibili es. $[x,p_x] \neq 0$

Il microscopio di Heisenberg

Per osservare un oggetto occorre utilizzare una radiazione di lunghezza d'onda λ più piccola delle dimensioni dell'oggetto stesso, e tale risultato vale qualunque sia la natura della radiazione e del corpo (infatti sono stati costruiti microscopi che utilizzano come radiazione non solamente fotoni, ma anche elettroni o protoni). Rimpicciolendo il corpo dobbiamo usare una radiazione di lunghezza d'onda sempre più piccola e quindi di frequenza (ed energia) sempre più elevata (per scoprire particelle elementari occorrono energie sempre più elevate) .



Secondo questo schema, l'elettrone è illuminato con una radiazione di lunghezza d'onda $\lambda = h/p$ e la luce riflessa è focalizzata con un sistema ottico. Per quanto abbiamo detto, è impossibile localizzare l'elettrone in una regione il cui diametro sia minore della lunghezza d'onda λ , per cui risulta $\Delta x > \lambda$.

Inoltre, poiché la luce incidente è costituita da fotoni che trasmettono all'elettrone energia e impulso secondo l'effetto Compton, la sua quantità di moto finale può variare di una quantità pari a $\Delta p \approx h/\lambda$

Combinando le relazioni precedenti si ottiene $\Delta x \Delta p > h$.

L'esperimento concettuale (***Gedankenexperiment***) esposto si estende a qualsiasi particella osservata mediante un apparato qualsiasi. La tesi di Heisenberg è valida anche per oggetti macroscopici, ma non ha effetti visibili: l'incertezza quantistica è infatti mascherata dalla miriade di imperfezioni materiali che si trovano sempre in un qualsiasi apparato reale di misura.

(v. ad esempio il *pendolo quantistico*).

Conseguenze immediate del Principio di Indeterminazione di Heisenberg

Il principio di indeterminazione impone una revisione del determinismo classico così riassumibile:

1. non possiamo immaginare una particella elementare come una pallina dai contorni e dalla posizione ben definita.
2. Il concetto di traiettoria perde il suo significato in senso assoluto;
secondo il concetto classico la determinazione della traiettoria implica che, ad ogni dato istante, si conoscano esattamente tanto la posizione quanto l'impulso.
3. Non è possibile separare l'osservatore dal sistema osservato (che è sempre influenzato dall'osservazione entro i limiti imposti dal principio di indeterminazione).

La Meccanica Quantistica accetta tuttavia tale distorsione come elemento conoscitivo intrinseco ed essenziale del sistema osservato: eseguendo una misura, forziamo il sistema a scegliere una configurazione tra tutte quelle disponibili con una probabilità che dipende dalla funzione d'onda Ψ (collasso della funzione d'onda).

L'enorme impatto che il Principio di Indeterminazione ebbe tra i fisici e i non fisici è dovuto al suo legame con il concetto di **determinismo**. Il determinismo classico afferma che se è noto lo stato presente di un sistema isolato, allora è possibile prevedere esattamente i risultati di una qualsiasi misura su tale sistema. Quanto precedentemente affermato nega la possibilità di una tale previsione, e perciò inficia le basi stesse del determinismo comportando una rinuncia al programma deterministico originale della Meccanica Classica.

Alcuni fisici, tra cui gli stessi De Broglie e Schrödinger, ai quali dobbiamo aggiungere a vario titolo Albert Einstein, David Bohm, Jean Paul Vigièr, Franco Selleri e altri, non hanno accettato il carattere definitivamente non deterministico della Meccanica Quantistica. Secondo questi studiosi, oltre alle ben note variabili conosciute dalla Meccanica Quantistica, dovrebbero esistere ulteriori 'variabili nascoste' la cui misurazione consentirebbe di ricollocare la teoria in ambito deterministico (v. oltre *teorie a variabili nascoste -locali e non-* \Leftrightarrow *paradosso EPR, disuguaglianze di Bell ed esperimento di Aspect sulla correlazione quantistica 1981-82*).

Applicazioni del Principio di Indeterminazione

1. Pendolo classico e pendolo quantistico

Contrariamente al pendolo classico, un pendolo quantistico ha una posizione e un impulso tali da rispettare il Principio di Indeterminazione. Se cerchiamo di localizzare la massa a quota minima dobbiamo illuminarla con un fotone che la porrebbe nuovamente in moto.

Di conseguenza, il pendolo quantistico non è mai immobile, ma oscilla (sia pur di poco) intorno alla verticale ($\Delta x \approx 10^{-13}$ cm, totalmente non osservabile).

2. Stabilità dell'elettrone nel modello di Bohr

Le fluttuazioni quantistiche forniscono il meccanismo essenziale per garantire la stabilità della materia. Come per il pendolo, l'elettrone non può essere risucchiato dall'interazione elettrica dentro il nucleo: se ciò avvenisse il suo impulso assumerebbe (sempre per il Principio di Indeterminazione) valori così grandi da riportarlo immediatamente fuori.

3. Effetto tunnel

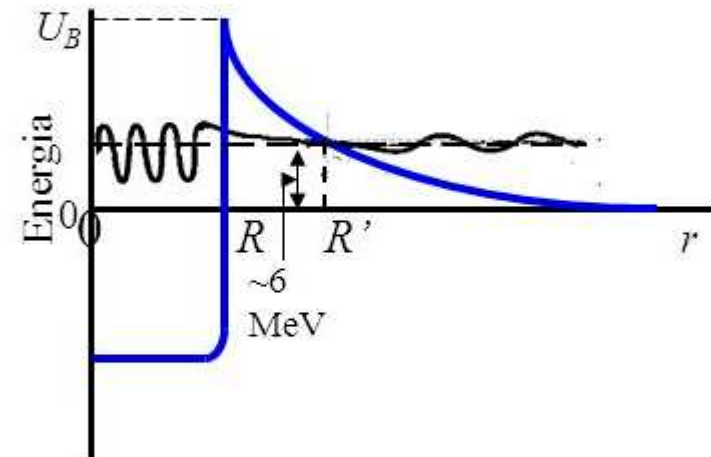
L'effetto tunnel è reso possibile dall'incertezza $\Delta E \Delta t > h$ (più piccolo è l'errore ΔE nella misura di energia di un sistema, maggiore deve essere la durata Δt dell'esperimento).

Decadimento alfa

Il decadimento alfa è un esempio della penetrazione di una barriera quantistica di potenziale (effetto tunnel).

L'altezza della barriera U_B è

$$U_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2(Z-2)e^2}{R}$$



Per un nucleo pesante $U_B \sim 30-40$ MeV mentre per le particelle alfa le energie sono tra 4 e 8 MeV (impossibile sormontare la barriera!!!).

Il controllo dell'effettivo passaggio della particella dall'altra parte della barriera implica di fatto la localizzazione della particella stessa illuminandola con radiazioni (v. microscopio di Heisenberg).

L'idea fondamentale è che per controllare se la particella passa o meno dall'altra parte, dobbiamo localizzarla con una precisione che è almeno uguale allo spessore del muro. La misura imprime alla particella una quantità di moto tanto più grande quanto più sottile è la barriera. Oltre un certo limite la spinta è sufficiente per attraversare la barriera (**effetto tunnel**). In sostanza la particella prende a prestito l'energia necessaria, attraversa la barriera, poi rende il prestito entro il tempo Δt .

Per il **Principio di Indeterminazione**, se la durata Δt del prestito è così breve da rendere l'incertezza ΔE sull'energia maggiore del prestito (per cui questo non è più osservabile!), allora il sistema può effettuarlo senza violare il teorema di conservazione dell'energia.

I POSTULATI DELLA MECCANICA QUANTISTICA E L'INTERPRETAZIONE DI COPENHAGEN

Come si è visto, la nuova teoria possiede alcune caratteristiche completamente nuove, tra cui:

1. L'introduzione di una funzione d'onda complessa $\Psi(\mathbf{r},t)$ il cui modulo quadrato $|\Psi(\mathbf{r},t)|^2$ è reale!) che ha una **interpretazione probabilistica**;
2. l'esistenza di **relazioni di indeterminazione** tra alcune variabili dinamiche che limitano la precisione della loro determinazione simultanea;
3. il **carattere discretizzato dei valori di alcune quantità fisiche** come ad esempio l'energia degli stati legati dell'atomo di idrogeno, i momenti angolari (come ad esempio lo spin) etc.

Schrödinger, Heisenberg, Born, Dirac e diversi altri stabilirono le basi fisiche della nuova teoria, mentre i fondamenti matematici furono elaborati principalmente da Von Neumann. Questo quadro concettuale della Meccanica Quantistica è oggi derivabile da un insieme di postulati fondamentali (v. J. Von Neumann, *I fondamenti matematici della Meccanica Quantistica*, 1932).

Tra questi, si introducono gli elementi noti come *vettori di stato* definiti in un spazio di Hilbert L^2 (funzioni quadrato-sommabili affinché $|\Psi(\mathbf{x},t)|^2$ fornisca un valore compreso tra 0 e 1, trattandosi di una densità di probabilità), il collegamento tra i possibili valori di misura di un'osservabile (autovalori), le relazioni di commutazione tra grandezze incompatibili, etc.

Tale assiomatizzazione contiene un elemento conflittuale tra due assiomi fondamentali: ***l'equazione di Schrödinger*** e il ***principio del collasso (o riduzione) della funzione d'onda***.

Come sappiamo, gli stati quantistici rappresentano informazioni probabilistiche intorno ai sistemi fisici studiati. Tuttavia l'equazione di Schrödinger è ***deterministica*** (nel senso che, fissato un stato ad un certo istante, tale equazione determina l'evoluzione di quello stato - e la distribuzione di probabilità cui esso dà luogo - per ogni altro istante futuro e passato). Essa è una particolare equazione differenziale lineare che descrive come evolvono nel tempo gli stati dei sistemi fisici ***quando non sono sottoposti a misure da parte dell'osservatore***.

L'altro assioma (**Collasso della Funzione d'Onda**) descrive come si trasforma lo stato di un sistema fisico **quando viene eseguita una misura**: un osservatore che effettua una misura e ottiene un certo risultato (per esempio localizza un elettrone in una certa regione dello spazio) trasforma lo stato iniziale del sistema osservato in un nuovo stato che “tiene conto” dell'osservazione effettuata:

Se, eseguendo una misurazione, scopriamo che il sistema gode di una proprietà P , allora, subito dopo la nostra misurazione, il sistema si troverà in uno stato puro s , che attribuisce alla proprietà P il valore di probabilità 1.

Osserviamo che, mentre l'*equazione di Schrödinger* determina un processo di evoluzione **continuo**, il *collasso della funzione d'onda* introduce un salto, cioè una **discontinuità**, che dipende da un **atto** e da una **scelta** dell'osservatore.

Sorge a questo punto il problema: che cosa produce l'improvvisa trasformazione dello stato iniziale (che pure rappresentava un massimo di informazione)?

Che cosa fa precipitare la **potenza** nell'**atto**? E' l'osservatore che, con le sue misure, rende **reali** alcune proprietà fisiche che prima del suo intervento erano solo **possibili** ?

Gran parte dei guai logici e dei "paradossi" della Meccanica Quantistica dipendono dalle strane conseguenze del collasso della funzione d'onda e dalla irrisolta convivenza tra i due assiomi fondamentali che descrivono l'evoluzione nel tempo degli *stati puri* (v. ad esempio il paradosso del *gatto di Schrödinger*, il paradosso della misurazione).

All'origine di tutte le "stranezze" della Meccanica Quantistica possiamo oggi porre il concetto di stato puro di un micro - oggetto.

Teoria Classica

Classicamente, in linea di principio è possibile preparare un sistema in cui la posizione e l'impulso delle particelle siano note con una precisione illimitata. In tale caso diciamo che **lo stato del sistema è puro** (essendo massimale la nostra conoscenza su tale stato). In particolare, per sistemi puri preparati in modo identico la misura di una qualsiasi osservabile fornisce sempre lo stesso risultato:

Stato puro: conoscenza massimale dello stato del sistema => si ottiene sempre lo stesso risultato (punto nello spazio delle fasi).

In meccanica classica gli stati puri rappresentano sempre delle **informazioni logicamente complete**, che **decidono** tutte le proprietà rilevanti del sistema (completezza logica). Quando un osservatore ha solo conoscenze vaghe intorno alle proprietà di un sistema fisico, vuol dire che egli **non sa esattamente** quale stato puro deve essere associato al sistema. Ma “nella mente di Dio” gli stati puri decidono sempre tutte le proprietà possibili.

Teoria Quantistica

Volendo procedere allo stesso modo per un sistema quantistico incontriamo delle difficoltà per due motivi fondamentali:

1. Posizione e impulso **non** sono misurabili simultaneamente con precisione illimitata (relazioni di indeterminazione);
2. Nella misura di un' osservabile, l'interazione tra il sistema e l'apparato di misura può perturbare il sistema in modo incontrollato in modo tale che il valore misurato non sia più attribuibile esclusivamente al sistema iniziale, bensì all'interazione reciproca sistema-apparato.

Stato puro quantistico: stato del sistema per il quale è massimo il numero di osservabili indipendenti compatibili => si ha il massimo di informazione possibile (informazione massimale): $|\Psi\rangle$ singolo vettore normalizzato

Stato misto quantistico: preparazione non massimale (informazione parziale).
Ad esempio, se ho uno stato avente rispettivamente probabilità p_1, p_2, \dots, p_n che il sistema si trovi negli stati puri $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_n \dots$; $\sum p_i = 1$; $0 \leq p_i \leq 1$

Dunque la costruzione matematica classica **non** è trasferibile tale e quale al caso della Meccanica Quantistica. Infatti **una peculiarità della meccanica quantistica è la divergenza tra massimalità e completezza logica: un'informazione può essere massimale senza essere logicamente completa** (Principio di Indeterminazione di Heisenberg).

In questo caso, riprendendo la nostra metafora, nemmeno una “mente onnisciente”, che avesse una conoscenza massimale intorno ad un sistema fisico, potrebbe deciderne **tutte** le proprietà rilevanti.

Come osserva Gian Carlo Ghirardi nel libro *Un'occhiata alle carte di Dio*, una caratteristica a prima vista strana degli oggetti microscopici è dunque quella di non potere avere “troppe proprietà” nello stesso tempo.

Il paese dei quanti è il mondo del **forse** e del **può essere**. Lo stesso concetto di “trovarsi in un certo luogo” acquista un significato completamente diverso rispetto alla fisica classica: una particella quantistica non è localizzabile in una regione precisa dello spazio, ma potrebbe essere qua, là, altrove... e ciascun “potrebbe” è accompagnato da un preciso valore di probabilità => carattere essenzialmente indeterministico della fisica quantistica.

PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE DEGLI STATI

Il principio di sovrapposizione non ha precedenti nell'era pre-quantistica è funziona solamente per oggetti di cui sia ben evidenziabile la natura ondulatoria. Dati due o più stati puri, possiamo mescolarli e costruire altri stati (che saranno stati misti), ottenuti come combinazioni lineari di stati puri.

Il sistema fisico che si trova nello stato sovrapposizione: $s = s_1 + s_2$
potrebbe verificare - con una probabilità p_1 - le proprietà che sono *certe* per lo stato s_1 e *potrebbe* verificare - con una probabilità p_2 - le proprietà che sono *certe* per lo stato s_2 .

Questi valori di probabilità (p_1, p_2) sono determinati dalla forma matematica dello stato somma.

I SALTI QUANTICI

Supponiamo di voler calcolare la probabilità che un atomo, colpito da un raggio laser, emetta fotoni per fluorescenza. Se p_L indica la probabilità di trovarsi in uno stato luminoso, allora la probabilità di non irradiare fotoni (stato buio) ha la probabilità complementare $p_B = 1 - p_L$.

Considerando un vapore con un gran numero di atomi, l'interpretazione probabilistica secondo la scuola di Copenhagen è semplice: una frazione di atomi si trova in uno stato p_L , mentre la frazione rimanente si trova in uno stato buio p_B . **E per un singolo atomo ?** La scuola di Copenhagen risponderebbe che l'atomo si trova in una sovrapposizione di stati luminoso e buio (cioè l'atomo si trova contemporaneamente nello stato luminoso e quello buio) ed è impossibile conoscere in anticipo ciò che accadrà quando si accende il laser per illuminare l'atomo. Secondo la scuola di Copenhagen quando si effettua una misura dello stato di un singolo atomo, si deve considerare il postulato della riduzione del pacchetto d'onda: quando viene illuminato, l'atomo cade in uno dei due stati fondamentali (per esempio nello stato L).

Una successiva evoluzione può portare nuovamente l'atomo in uno stato di sovrapposizione degli stati B ed L, ed indurlo successivamente a cadere nello stato B. Così si prevede che il singolo atomo, ad istanti casuali, passi dallo stato L allo stato B e viceversa mediante un processo di salti quantici.

L'esistenza di tali salti quantici, che implica un'evoluzione **discontinua** del sistema, fu fieramente contrastata da un certo numero di fisici, tra i quali lo stesso Schrödinger che così si esprime:

<< ***Se dobbiamo continuare con questi maledetti salti quantici, allora mi dispiace di averci mai avuto qualcosa a che fare*** >> (v. Bell, p.268)

Tali fisici vedevano nei salti quantici un comodo espediente avente un certo valore pedagogico, ma tuttavia sostenevano che la Meccanica Quantistica si potesse applicare solo a grandi *ensembles* (e non ad oggetti quantistici singoli come ad esempio i singoli atomi). Il progresso sperimentale ottenuto a partire dagli anni '70 ha tuttavia permesso di manipolare ed osservare oggetti singoli (come ad esempio un singolo fotone, elettrone o ione): nel 1986 fu possibile osservare direttamente dei salti quantici relativi alla fluorescenza di un singolo ione intrappolato. In questo esperimento si osserva proprio che lo ione evolve casualmente tra istanti in cui è invisibile ed istanti in cui mostra fluorescenza. Questo risultato dimostrò che i salti quantici esistono davvero e che la Meccanica Quantistica può descrivere anche il comportamento di un oggetto singolo.

IL PARADOSSO EPR

Un altro importante paradosso della teoria quantistica è stato discusso per la prima volta da Einstein Podolsky e Rosen (EPR) in un articolo del 1935 dal titolo:

La descrizione quantistica della realtà può considerarsi completa?

Si tratta di un ragionamento che coinvolge in un unico esperimento ideale gli argomenti più problematici dei fondamenti della fisica, come il rapporto tra soggetto osservatore e oggetto osservato, i concetti di oggetto e di proprietà fisica, il ruolo della probabilità, lo spazio e il tempo, il rapporto tra Meccanica Quantistica e Relatività, e altre cose ancora.

Esso ha fornito un contributo fondamentale nel chiarire i fondamenti ed i limiti della Meccanica Quantistica.

Paradosso EPR

... Einstein non demorde e nel 1935 ci riprova ...

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

nell'articolo viene proposto un *gedanken experiment* che dovrebbe dare sostegno all'idea che esiste una "realtà obiettiva", indipendente dalla misura

EPR : DESCRIZIONE

Per rendere più intuitiva e comprensibile l'argomentazione di EPR, rimandiamo ad una descrizione metaforica che non altera la struttura logica del ragionamento come da Halliday Resnick Walker, *Fondamenti di Fisica. Fisica moderna*, Zanichelli, Bologna 2011 (v. p. 911). Un tale esperimento non riuscirebbe ovviamente come descritto nel testo: quella storia è solo un'analogia; perchè risultasse realistica dovremo fornire ad Alice e Rodolfo delle "caramelle quantistiche", ciascuna delle quali dovrebbe essere verde e rossa nello stesso tempo e cambiare alternativamente colore con estrema rapidità in modo coordinato. Un tale comportamento quantistico è talmente irrilevante per oggetti macroscopici (come le caramelle) che risulta del tutto vano sperare di verificarlo.

A livello quantistico, invece, tali fenomeni avvengono così come descritti.

Esaminiamo l'esperimento di EPR. Una sorgente S emette simultaneamente due fotoni, A e B, in opposte direzioni. Ciascun fotone ha una certa proprietà X, che può assumere due valori, X_1 e X_2 (la proprietà è, in questo caso, la direzione di polarizzazione dell'onda di probabilità quantistica associata al fotone).

Date le modalità con cui i fotoni sono stati emessi (simultaneamente con emissione coordinata), è sempre vero che, se il fotone A ha valore X_1 , il fotone B deve avere valore X_2 e viceversa. In questo non c'è nulla di strano. Questi due fotoni, considerati insieme, costituiscono un singolo sistema quantistico che può sussistere in due stati:

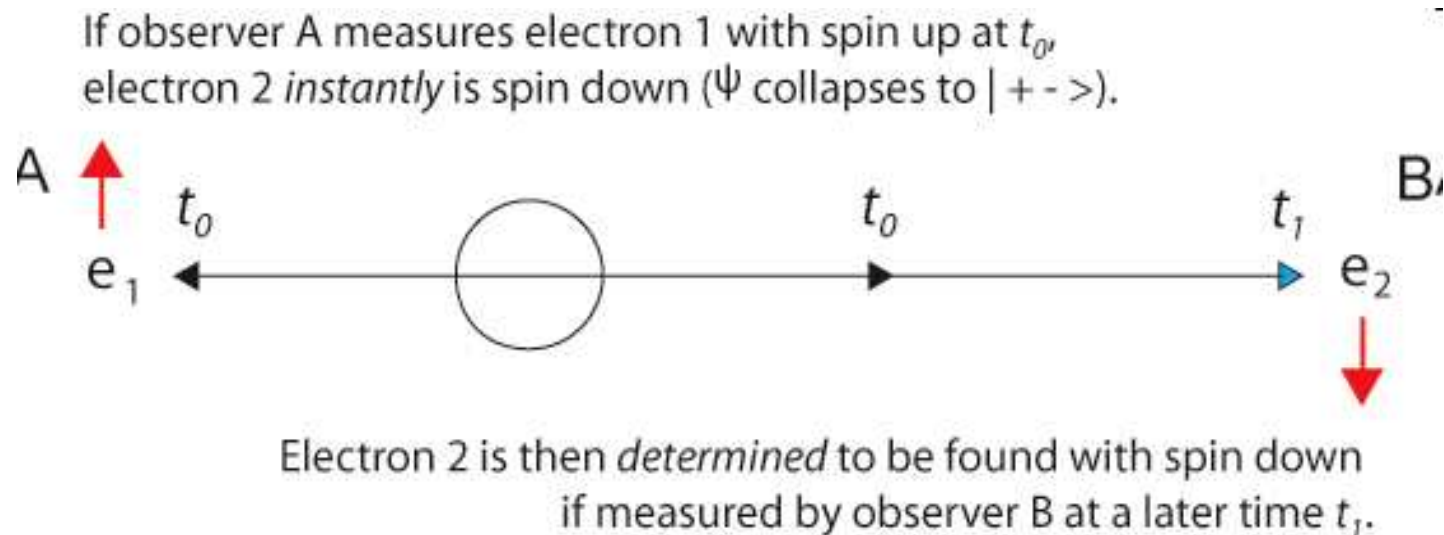
$$(AX_1, BX_2) \quad (AX_2, BX_1)$$

Prima di effettuare qualsiasi misura, la Meccanica Quantistica prevede che lo stato **effettivo** di questo sistema sia una miscela in parti uguali di **entrambi** gli stati (potete immaginare il sistema come oscillante tra i due stati, che trascorre metà del tempo in ciascuno dei due). Effettuando opportune misure sul fotone A, uno sperimentatore può scegliere di rivelare o il valore X_1 o il valore X_2 per quel fotone. Se lo sperimentatore sceglie di rilevare X_1 , la misura costringe il sistema a collassare nel solo stato (AX_1, BX_2) ; conseguentemente una misurazione sul fotone B può rilevare solo il valore X_2 . In sintesi, la misura effettuata su A (arbitrariamente scelta), impedisce automaticamente la scelta sullo stato di B. La Meccanica Quantistica prevede che ciò avvenga anche se i due fotoni sono distanti tra loro (anche chilometri!) quando si effettua la prima misura; Einstein chiamò questo fenomeno “azione a distanza di fantasmi”.

Quando nel 1935 Einstein, Podolsky e Rosen proposero tale esperimento concettuale, il risultato previsto era talmente strano che Einstein lo rifiutò, affermando che si era aperta una profonda incrinatura nella fisica quantistica.

Ciò nondimeno, gli esperimenti eseguiti fin dagli anni '80 hanno dimostrato che tutto ciò avviene veramente. La maggior parte dei fisici accetta questi risultati come un'impressionante conferma della validità della Meccanica Quantistica.

Un altro esempio di esperimento alla EPR, concettualmente simile al precedente, coinvolge due elettroni e le misure dei loro spin secondo il seguente schema:



Nel paradosso EPR dovremmo rinunciare ad una delle seguenti ipotesi:

1. Il principio di completezza fisica;

2. il principio di realtà;

3. il principio di località.

1. **Einstein, Podolsky e Rosen avevano messo sotto accusa l'ipotesi di completezza fisica.** La loro dimostrazione doveva rappresentare una sorta di **argomento per assurdo**, la cui conclusione era:

la teoria quantistica è una teoria fisicamente incompleta.

In tal caso gli stati puri quantistici **non** rappresenterebbero un massimo di informazione, e dovrebbero poter essere completati.

Come è possibile **completare** la Meccanica Quantistica? La ricerca di un **completamento** della teoria è stato l'obiettivo sistematico dei teorici delle **variabili nascoste**. In tali teorie si postula l'esistenza di **grandezze** (o **variabili**) oggi ancora sconosciute (nascoste, appunto). L'idea è che la conoscenza dei valori di queste grandezze dovrebbe fornire **stati puri senza dispersione**, capaci di decidere tutte le proprietà quantistiche rilevanti. In questo modo si tornerebbe al **determinismo** e si riconcilerebbe di nuovo la **massimalità** con la **completezza logica** delle informazioni.

Ma è davvero possibile conciliare queste teorie con la Meccanica Quantistica ortodossa?

Oggi molte ragioni spingono a dare una risposta negativa a tale domanda. Innanzitutto ci sono i “no go theorems” (dimostrati da Von Neumann, Specker, Bell etc). Si tratta di teoremi matematici che hanno la seguente forma:

Ogni teoria a variabili nascoste *locali* che soddisfi certe condizioni minimali è logicamente incompatibile con la teoria quantistica.

Tale incompatibilità spesso riguarda le previsioni statistiche delle correlazioni tra varie misure, che risultano diverse nel caso della teoria quantistica e nel caso di un suo completamento deterministico.

A partire dagli anni '80, Alain Aspect e collaboratori hanno realizzato in laboratorio alcuni interessanti esperimenti, che hanno sempre confermato le previsioni statistiche della Meccanica Quantistica e contraddetto le previsioni delle teorie a variabili nascoste locali. A tutt'oggi sembra dunque che l'indeterminismo caratteristico della teoria quantistica risulti perfettamente confermato dall'esperienza.

2. La soluzione proposta da Bohr e da quella che è stata chiamata *l'interpretazione di Copenhagen della Meccanica Quantistica* consiste invece nel *rifiuto del principio di realtà*. Secondo l'interpretazione di Copenhagen non ha senso parlare di **proprietà oggettive** dei sistemi fisici: la fisica studia esclusivamente *fenomeni*, connessi di solito con **apparecchi di misura**, attraverso cui gli sperimentatori realizzano osservazioni e misure (centralità dell'interazione sistema - apparato, secondo Bohr). Non esistono proprietà fisiche **primarie**: tutte le proprietà di cui si occupa la fisica sono **secondarie**.

Ma qui entra in gioco qualcosa di più importante e profondo: il nostro universo è costituito di particelle che obbediscono alla Meccanica Quantistica e interagiscono in vario modo fra loro. E' lecito considerare separatamente due particelle che in passato hanno interagito fra loro? Sembra proprio che la risposta debba essere negativa: non dovremmo attribuire uno stato puro a ciascuna particella considerata separatamente, bensì **avrebbe senso solo parlare dello stato puro (o della funzione d'onda) del sistema complessivo** costituito dalle due particelle. In altre parole le funzioni d'onda delle due particelle rimangono *intrecciate* (entangled) e quindi non possono essere trattate separatamente.

Ancora più sconcertante è pensare che qualsiasi particella può avere interagito in passato con qualsiasi altra e anzi, praticamente, nelle varie epoche di formazione dell'Universo tutte le particelle hanno interagito fra loro. Sarebbe dunque corretto considerare *solo* lo stato complessivo dell'intero Universo!

Se così fosse, dovremmo concludere in ultima analisi che il mondo non è separabile in oggetti diversi, ciascuno con le sue proprietà e la sua storia. Se lo facciamo è perché si tratta di una **buona** (di solito ottima...) **approssimazione**, ma di approssimazione pur sempre si tratta.

3. Altre soluzioni del paradosso EPR si basano invece sul ***rifiuto del principio di località***. EPR viene ricostruito come una sorta di *dimostrazione per assurdo*, tesa a dimostrare che i fenomeni quantistici sono non locali (v. definizione di non-località).

La problematica generata da EPR è tutt'altro che esaurita. Recenti studi effettuati in California e a Roma dimostrano la possibilità di “teletrasportare” da un osservatore all'altro lo stato quantico di un campo continuo. L'argomento è in rapido sviluppo.

DEFINIZIONE DI LOCALITA'

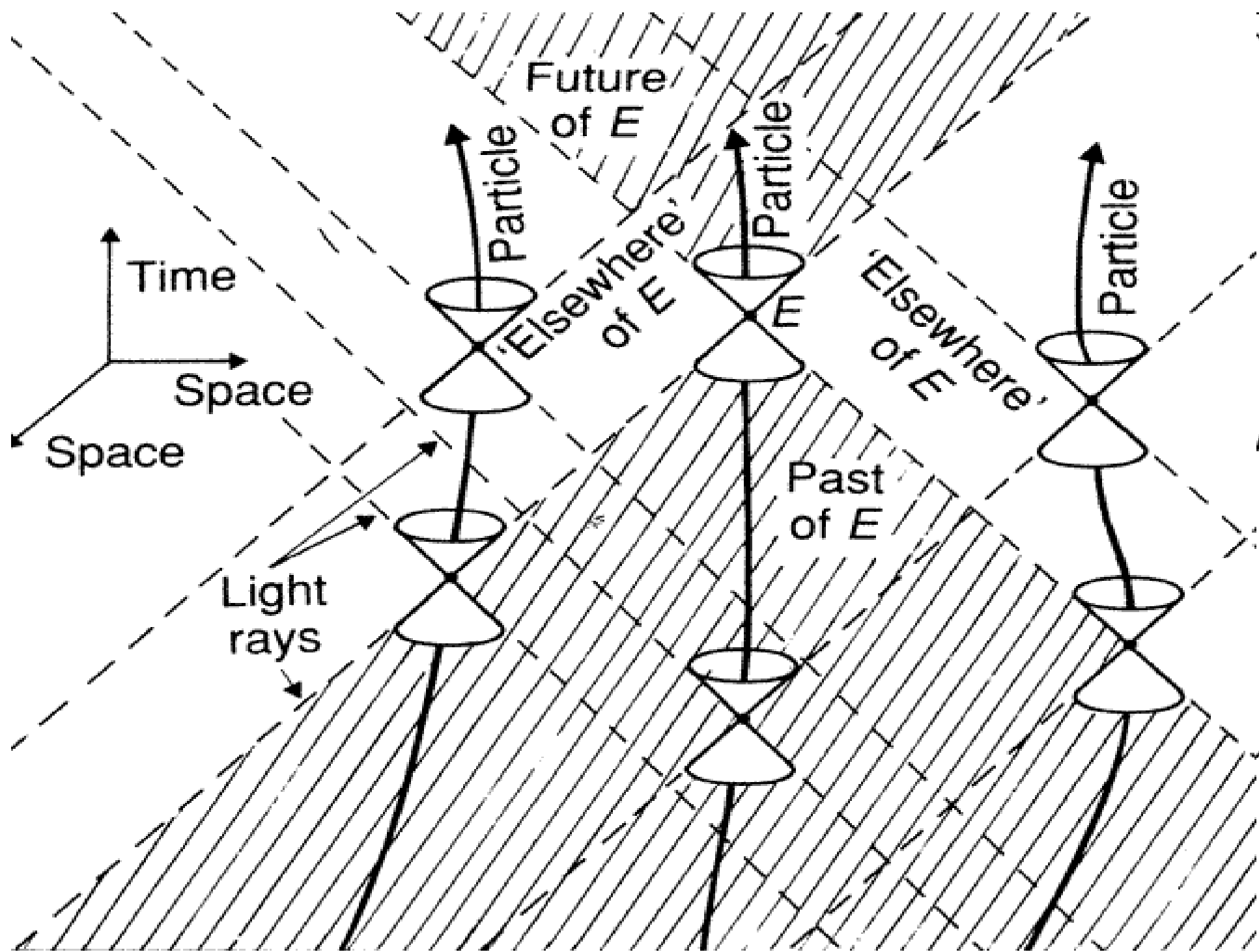
L'ipotesi di località consiste nel non ammettere azioni a distanza istantanee (o, quantomeno, segnali che si trasmettano a una velocità superiore a quella della luce).

Si dice che vale la causalità locale se ciò che accade in un luogo A al tempo t dipende esclusivamente da ciò che si trova nel luogo A già prima del tempo t , oppure dipende da qualcosa che si propaga da un luogo lontano B arrivando però nel luogo A non più tardi del tempo t . Poiché non esistono segnali che si propagano a velocità $v > c$, questo limita una regione di luoghi e di tempi (chiamata tecnicamente **cono luce passato**) dalla quale possono originarsi le cause locali.

In definitiva possiamo affermare che:

variabili locali => variabili i cui valori non possono essere influenzati da alcun tipo di azione a distanza

variabili non locali => variabili i cui valori sono influenzati da azioni a distanza



CONTRIBUTI FONDAMENTALI DI JOHN BELL

- Nel 1964 John Bell pose all'attenzione dei fisici le straordinarie caratteristiche dell' *entanglement*: la Meccanica Quantistica descrive una coppia di oggetti *entangled* come un unico sistema quantistico complessivo, impossibile da pensare come due oggetti singoli, persino quando i due componenti sono lontani l'uno dall'altro. John Bell dimostrò che non vi è alcun modo di comprendere l'*entanglement* nell'ambito dei comuni concetti di una realtà fisica localizzata nello spazio tempo e soggetta al principio di causalità. Ciò era in contrasto con quanto si aspettavano EPR, i quali misero in evidenza le forti correlazioni esistenti tra particelle *entangled* e avevano analizzato tali correlazioni nell'ambito dei concetti di una realtà fisica **locale**. La caratteristica più importante del lavoro di Bell fu indubbiamente la possibilità di determinare *sperimentalmente* la validità delle idee di Einstein.
- =>

Disuguaglianze di Bell (soddisfatte da teorie di variabili nascoste, ma in contrasto con la Meccanica Quantistica). Bell sintetizza così le conseguenze delle prove sperimentali indicanti l'incompatibilità delle previsioni statistiche della Meccanica Quantistica con l'ipotesi di località (violazione delle disuguaglianze di Bell): <<...la non-località della Meccanica Quantistica non può essere attribuita all'incompletezza, ma è in qualche modo irriducibile >>. (v. Bell, p.329)

- Le prove sperimentali delle disuguaglianze di Bell fornirono una risposta priva di ambiguità: l'*entanglement* **non** può essere compreso alla stregua di normali correlazioni (v. colore degli occhi per gemelli identici).
- Separazione tra mondo macroscopico (apparato di misura) e mondo microscopico (sistema quantistico). Tale distinzione risulta fondamentale nell'interpretazione di Copenhagen. Per lui tale suddivisione era inaccettabile e rappresentava una forte motivazione a considerare descrizioni del mondo alternative e non standard (comprese le teorie a variabili nascoste di Bohm e il modello dell'onda pilota di De Broglie).