

David Bohm

Interpretazioni Realiste della Meccanica Quantistica

$E_{\text{photon}} = hf = h\frac{c}{\lambda}$

$\Delta x \cdot \Delta p > h$

$\Delta x > \lambda$

$\Delta p > \frac{h}{\lambda}$

$K_{\text{max}} = eV_{\text{stop}}$

$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2} [E - U]\psi = 0$

$E = \frac{p^2}{2m}$

$b = \sqrt{\frac{8\pi^2m(U_0 - E)}{h^2}}$

$V_{\text{stop}} = \frac{h}{e}f - \frac{\phi}{e}$

$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$

$k = \frac{2\pi}{h}p$

$\psi(x) \approx \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx} & ; x < 0 \\ Ce^{-\alpha x} & ; 0 \leq x \leq L \\ De^{ikx} & ; x > L \end{cases}$

$|\psi(x, y, z)|^2 dV$

$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$

$U(x) = 0$

$\frac{1}{\text{particle}} = p$

Quantum Theory



La Meccanica Quantistica ha davvero bisogno di interpretazioni?

Il ventesimo secolo fu segnato dall'avvento della *Teoria dei Quanti*. Dopo quasi tre secoli di fisica classica, il mondo microscopico diede una serie di risultati in disaccordo con la meccanica newtoniana, che portarono a un vero e proprio **cambiamento di paradigma** (v.Kuhn).

Ancora oggi però, dopo più di **100** anni da quella rivoluzione concettuale, i fisici si trovano in **difficoltà** quando si tratta di spiegare il significato profondo della **Meccanica Quantistica** (MQ). Infatti, non possono certamente dire di aver compreso appieno il significato fisico di questa teoria...

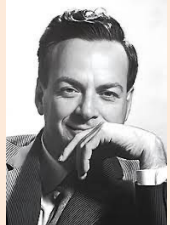
«Quelli che non rimangono scioccati, la prima volta che si imbattono nella meccanica quantistica, non possono averla compresa»

Niels Bohr



«Se credete di aver capito la teoria dei quanti, vuol dire che non l'avete capita»

R. Feynman



La Meccanica Quantistica ha davvero bisogno di interpretazioni?

Già negli anni '20 e '30 del ventesimo secolo, i fisici più importanti dell'epoca **tentarono di capire cosa si nasconde dietro il mistero dei quanti** e nei decenni successivi molti passi avanti sono stati fatti. Nonostante ciò, il mistero resiste ancora ai tentativi di svelarlo...

D'altra parte, la struttura matematica della teoria è in grado di darci un quantità innumerevole di **predizioni sempre più in accordo con gli esperimenti** (entanglement, teoria dei campi, modello standard,...). Ma cosa si cela dietro questa indiscussa validità del formalismo? Qual è la **corretta interpretazione** dei fenomeni quantistici?

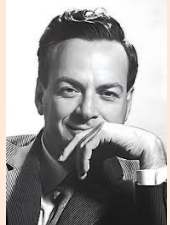
«Quelli che non rimangono scioccati, la prima volta che si imbattono nella meccanica quantistica, non possono averla compresa»

Niels Bohr



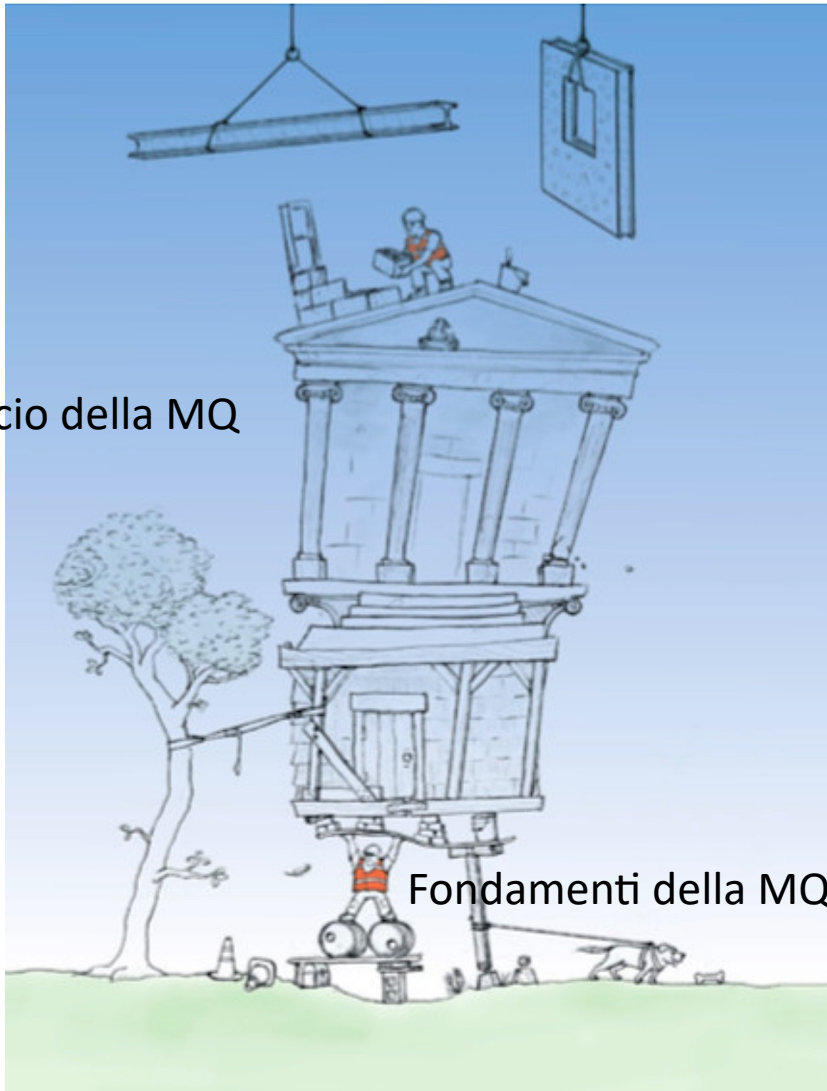
«Se credete di aver capito la teoria dei quanti, vuol dire che non l'avete capita»

R. Feynman



La Meccanica Quantistica ha davvero bisogno di interpretazioni?

Edificio della MQ



Fondamenti della MQ



La Meccanica Quantistica ha davvero bisogno di interpretazioni?

Il fisico statunitense **David Bohm** (Wilkes-Barre **1917** - Londra **1992**) è stato uno dei primi a prendere sul serio il problema dei fondamenti già a metà del secolo scorso, chiedendosi se l'interpretazione dominante della MQ, la cosiddetta «**Interpretazione di Copenaghen**», difesa da Bohr e da molti dei principali fisici dell'epoca (ma non tutti, come vedremo), fosse l'unica compatibile con il formalismo quantistico e con la **non-località** ad esso intrinseca.

La sua teoria a **variabili nascoste non-locali**, sebbene quasi mai citata nei corsi istituzionali di fisica quantistica e quindi praticamente sconosciuta alla maggior parte degli studenti, offre una delle **principali interpretazioni alternative in chiave realista** a quella di Copenaghen ed è stata oggetto, negli anni Ottanta e Novanta, di studi che hanno permesso di dimostrare (**1996**) la sua **completa equivalenza** con la MQ standard, almeno nel caso non relativistico.



Ma cosa dice l'Interpretazione di Copenaghen?

L'interpretazione di Copenaghen, detta anche «**interpretazione standard**» della **teoria quantistica**, si ispirò ai lavori svolti nella capitale danese principalmente da Niels Bohr e Werner Heisenberg attorno al **1927** e riguarda la teoria della **misurazione quantistica**, il **principio di complementarità** e il **dualismo onda-corpuscolo**.



Il pilastro portante di questa interpretazione è la **concezione probabilistica della funzione d'onda**, comunemente nota come **regola di Born** ed elaborata dal fisico Max Born nel **1926**, secondo la quale il quadrato della funzione d'onda fornisce la **densità di probabilità** della posizione della particella, con cui **non si intende la probabilità che la particella si trovi realmente nel punto P, ma quella che essa venga trovata in P se si esegue una misura di posizione**.

Regola di Born

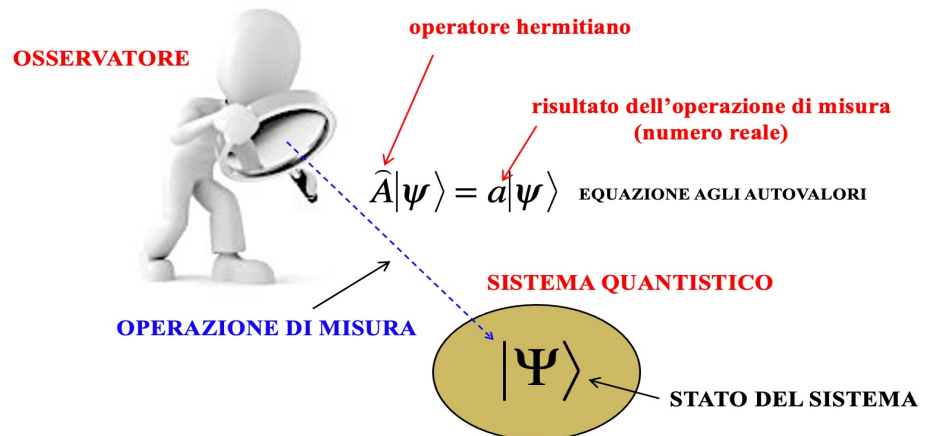
Gli osservabili fisici sono associati a operatori hermitiani

Un osservabile A agisce su di un sistema fisico proiettando la funzione d'onda ψ su uno dei suoi autostati: $\psi = \sum c_i \phi_i$

L'esito della misura di un osservabile è il corrispondente autovalore:

$$A\phi_i = \lambda_i \phi_i$$

La probabilità di quell'esito della misura è il modulo quadro del corrispondente autostato: $P(\lambda_i) = |\langle \phi_i | \psi \rangle|^2 = c_i^2$

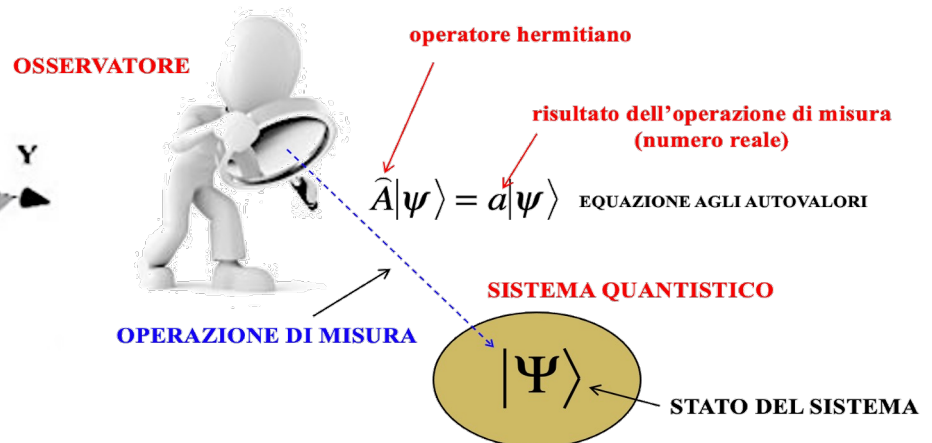


Ma cosa dice l'Interpretazione di Copenaghen?

Secondo l'interpretazione di Copenaghen, **le affermazioni probabilistiche della meccanica quantistica sono infatti irriducibili**, nel senso che non riflettono una nostra mancanza di conoscenza relativa a qualche variabile nascosta, ma rivelano la **natura intrinsecamente indeterminata del mondo microscopico**. Dunque sarebbe privo di senso domandarsi "dov'era la particella prima che ne misurassi la posizione?", in quanto la teoria standard prende in considerazione esclusivamente **quantità osservabili mediante processi di misurazione**. Ed è proprio l'atto della misurazione a causare il cosiddetto «**collasso della funzione d'onda**», che "costringe" la particella osservata ad assumere solo *uno* dei valori permessi, con probabilità stabilite con precisione dal formalismo della teoria.

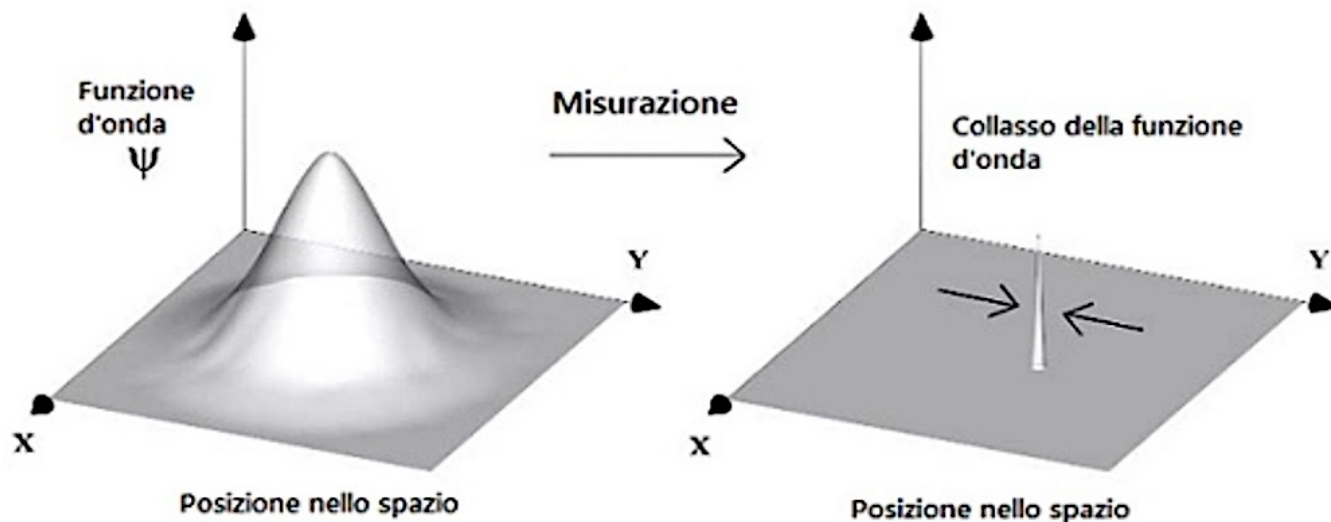
Prima di una
operazione di misura
la funzione d'onda
evolve determini-
sticamente secondo
l'equazione di
Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$$



Ma cosa dice l'Interpretazione di Copenaghen?

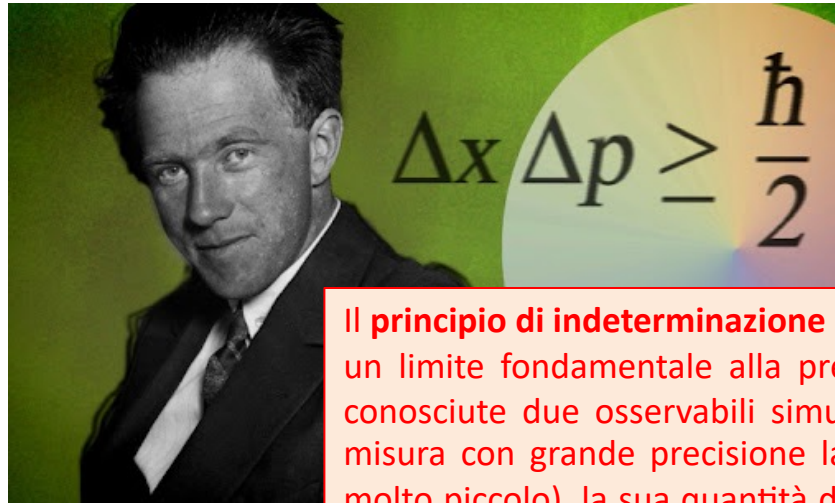
Secondo l'interpretazione di Copenaghen, **le affermazioni probabilistiche della meccanica quantistica sono infatti irriducibili**, nel senso che non riflettono una nostra mancanza di conoscenza relativa a qualche variabile nascosta, ma rivelano la **natura intrinsecamente indeterminata del mondo microscopico**. Dunque sarebbe privo di senso domandarsi "dov'era la particella prima che ne misurassi la posizione?", in quanto la teoria standard prende in considerazione esclusivamente **quantità osservabili mediante processi di misurazione**. Ed è proprio l'atto della misurazione a causare il cosiddetto «**collasso della funzione d'onda**», che "costringe" la particella osservata ad assumere solo *uno* dei valori permessi, con probabilità stabilite con precisione dal formalismo della teoria.



Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen



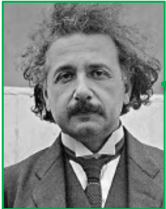
- 1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati
- 1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone
- 1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici
- 1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria
- 1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda
- 1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione
- 1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen



Il **principio di indeterminazione di Heisenberg** implica che esiste un limite fondamentale alla precisione con cui possono essere conosciute due osservabili simultaneamente. Ad esempio, se si misura con grande precisione la posizione di una particella (Δx molto piccolo), la sua quantità di moto diventa altamente incerta (Δp molto grande), e viceversa. Lo stesso vale anche per altre coppie di osservabili, come ad es. energia e tempo:

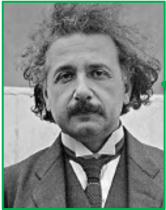
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen



- 1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati
- 1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone
- 1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici
- 1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria
- 1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda
- 1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione
- 1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen
- 1927 → Louis De Broglie elabora la sua idea dell'onda-pilota
- 1927 → Prima fase del dibattito Bohr-Einstein
- 1930 → Seconda fase del dibattito Bohr-Einstein
- 1932 → John von Neumann enuncia i «teorema dell'impossibilità»
- 1935 → Terza fase del dibattito Bohr-Einstein, con l'introduzione del paradosso EPR
- 1935 → Erwin Schrodinger espone il famoso paradosso del «gatto di Schrodinger»

Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen



1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati

1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone

1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici

1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria

1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda

1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione

1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen

1927 → Louis De Broglie elabora la sua idea dell'onda-pilota

1927 → Prima fase del dibattito Bohr-Einstein

1930 → Seconda fase del dibattito Bohr-Einstein

1932 → John von Neumann enuncia i «teorema dell'impossibilità»

1935 → Terza fase del dibattito Bohr-Einstein, con l'introduzione del paradosso EPR

1935 → Erwin Schrodinger espone il famoso paradosso del «gatto di Schrodinger»

1952 → David Bohm riprende l'idea dell'onda-pilota di de Broglie e formula la meccanica bohmiana

1957 → Hugh Everett III introduce quella che in seguito verrà denominata teoria a multi-mondi

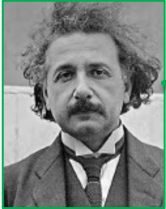
1964 → John Stewart Bell formula la disuguaglianza che porta il suo nome

1982 → Alain Aspect insieme ai suoi collaboratori realizza un esperimento con cui verifica sperimentalmente la disuguaglianza di Bell, e pertanto viene provata la non-località della meccanica quantistica

1986 → Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber formulano la teoria del collasso spontaneo

Anni 2000 → Qbism e decoerenza quantistica

Sviluppo cronologico della Interpretazione di Copenaghen

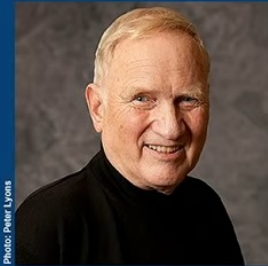


NOBELPRISET I FYSIK 2022
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022



Alain Aspect

Université Paris-Saclay &
École Polytechnique, France



John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
USA



Anton Zeilinger

University of Vienna,
Austria

"för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformationsvetenskap"

"for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

#nobelprize

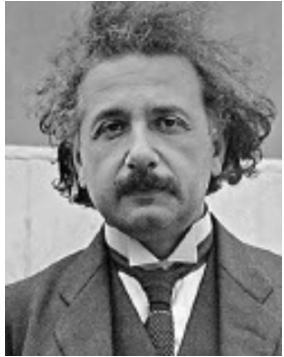


1982 → Alain Aspect insieme ai suoi collaboratori realizza un esperimento con cui verifica sperimentalmente la disuguaglianza di Bell, e pertanto viene provata la non-località della meccanica quantistica

1986 → Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber formulano la teoria del collasso spontaneo

Anni 2000 → Qbism e decoerenza quantistica

Lo scontro Einstein-Bohr: Dio gioca o non gioca a dadi?



Come è noto, **ad Einstein non piaceva l'indeterminismo della meccanica quantistica**. La sua frase più famosa è probabilmente "***God does not play dice***", ma non è esatto dire che questo fosse l'aspetto della meccanica quantistica a preoccuparlo di più.

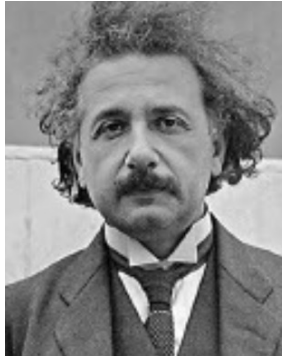
Ma se non era la perdita del determinismo a preoccuparlo, allora cosa? Da questa sua frase forse possiamo capirlo:

"Sembra difficile dare un'occhiata alle carte di Dio. Ma che giochi a dadi e usi metodi "telepatrici" (come l'attuale teoria quantistica richiede da lui) è qualcosa a cui non posso credere per un solo momento". Da ciò si deduce come la

sua preoccupazione non fosse tanto l'indeterminismo, quanto invece **l'azione a distanza (telepathic methods)**, o meglio la **non-località** della meccanica quantistica. Pertanto, egli ideò astuti *Gedanken experiments* (esperimenti mentali) al fine di provare che la visione ortodossa fosse sbagliata, o almeno incompleta. E fu proprio nell'ambito di questi tentativi che **Einstein trovò nell'amico Bohr un formidabile avversario intellettuale...**



Lo scontro Einstein-Bohr: Dio gioca o non gioca a dadi?



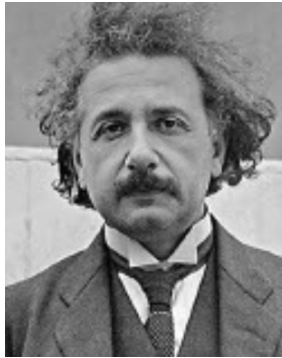
La **differenza fondamentale** tra il punto di vista di Einstein e quello di Bohr consisteva nel fatto che il fisico tedesco insisteva sulla necessità di avere una **descrizione completa di un sistema fisico che fosse indipendente dall'osservatore (realismo)**, andando quindi al di là del legame sistema-apparato, e che inoltre evitasse di fare ricorso a forme di interazione non-locale per **evitare contraddizioni con la sua Teoria della Relatività**.

Bohr invece conferiva alle teorie fisiche uno **statuto unicamente epistemologico**, non preoccupandosi dunque né del realismo né di eventuali violazioni della condizione di località einsteiniana. In particolare, il fisico danese si basava sul suo **Principio di Complementarità**, secondo il quale il duplice aspetto delle rappresentazioni fisiche dei fenomeni a livello atomico e subatomico non poteva essere osservato contemporaneamente durante lo stesso esperimento (si vedano ad es. la **natura ondulatoria e corpuscolare della materia o le relazioni di indeterminazione**)



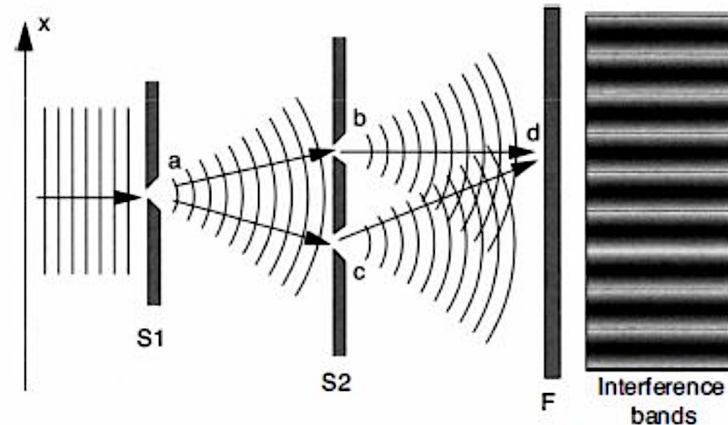
Nel contesto della visione realista di Einstein queste forme di dualismo non erano invece accettabili, in quanto secondo la sua concezione **qualunque teoria fisica che pretendesse di essere fondamentale doveva assumere una posizione chiara circa lo statuto ontologico del micromondo**.

Lo scontro Einstein-Bohr: Dio gioca o non gioca a dadi?

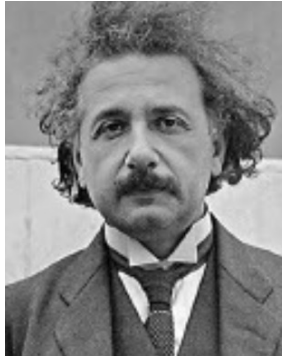


Storicamente, il **primo attacco di Einstein** alla concezione ortodossa, che stava crescendo sempre più nei consensi, avvenne durante il **Quinto Congresso di Fisica nell'Istituto di Solvay nel 1927**.

In quella circostanza lui si chiese se fosse possibile usare le leggi di conservazione dell'impulso e dell'energia per ottenere **conoscenze aggiuntive** riguardo lo stato (posizione e velocità) delle particelle nei processi di interferenza (tipo doppia fenditura). In questo modo, **voleva dimostrare che il principio di indeterminazione di Heisenberg fosse sbagliato**.



Lo scontro Einstein-Bohr: Dio gioca o non gioca a dadi?



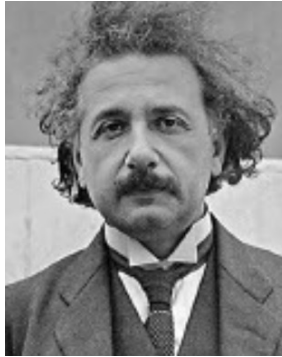
Storicamente, il **primo attacco di Einstein** alla concezione ortodossa, che stava crescendo sempre più nei consensi, avvenne durante il **Quinto Congresso di Fisica nell'Istituto di Solvay nel 1927**.

In quella circostanza lui si chiese se fosse possibile usare le leggi di conservazione dell'impulso e dell'energia per ottenere **conoscenze aggiuntive** riguardo lo stato (posizione e velocità) delle particelle nei processi di interferenza (tipo doppia fenditura). In questo modo, **voleva dimostrare che il principio di indeterminazione di Heisenberg fosse sbagliato**.

Secondo i documenti ufficiali, **Bohr uscì vincitore** da questo primo scontro. In realtà, seppur senza ammetterlo esplicitamente, **Bohr fu costretto a modificare certe sue precedenti asserzioni** circa lo status dei macrosistemi ed il ruolo che essi giocano nella misurazione delle variabili microscopiche. In particolare, egli dovette riconoscere, a differenza di quanto affermato in precedenza, che tali sistemi (cioè gli **apparati di misura**) non possono essere sempre considerati come sistemi classici.



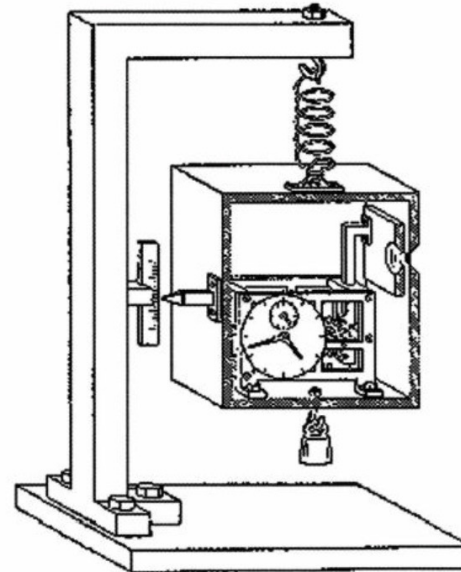
Lo scontro Einstein-Bohr: Dio gioca o non gioca a dadi?



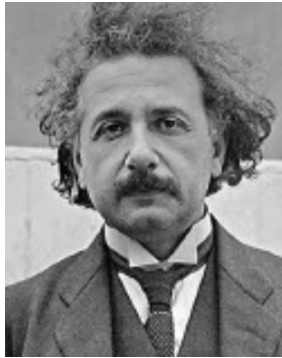
Alla **sesta Conferenza di Solvay del 1930**, le relazioni di indeterminazione furono oggetto di un nuovo serio attacco da parte di Einstein, stavolta nella loro **versione energia-tempo**. La sua argomentazione era semplice ma apparentemente inattaccabile. Dopo una notte insonne, però, anche in questo caso **Bohr riuscì ad avere la meglio**, peraltro utilizzando proprio il **principio di equivalenza** tra massa inerziale e gravitazionale messo da Einstein a fondamento della Relatività Generale...

«Fu un vero shock per Bohr... che, a tutta prima, non ne vedeva una soluzione. Per tutta la sera fu estremamente angustiato, e continuava a passare da uno scienziato all'altro, cercando di persuaderli che non poteva essere, che sarebbe stata la fine della fisica se Einstein avesse avuto ragione; ma non riusciva a trovare un modo di confutare il paradosso [...] Il mattino dopo vide il trionfo di Bohr...»

Léon Rosenfeld



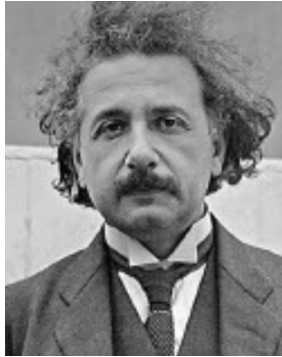
Lo scontro Einstein-Bohr: Dio gioca o non gioca a dadi?



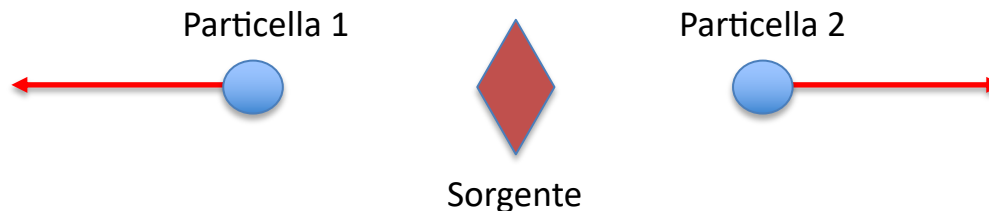
Questo episodio, e l'anno in cui si verificò (1930), segnarono un **cambiamento decisivo** nell'atteggiamento di Einstein nei confronti della meccanica quantistica. Sembrava adesso convinto che esistessero limitazioni, in linea di principio, alla possibilità di determinare con la precisione desiderata la velocità e la posizione di una particella, **accettando così il principio di indeterminazione**. Ma mantenne la ferma convinzione che queste proprietà potessero essere considerate come appartenenti ai sistemi, e non come "create" dall'atto di misurazione. **Da questo momento in poi, i suoi attacchi non saranno più rivolti contro l'incoerenza della teoria, ma contro la sua presunta incompletezza**. In altre parole, come abbiamo accennato prima, Einstein era molto riluttante all'idea di accettare la natura non-epistemica delle probabilità quantistiche, e insisteva sul fatto che la teoria non raccontasse l'intera storia. **Fu questa la linea di pensiero che avrebbe poi portato David Bohm a formulare il primo esempio esplicito di teoria a variabili nascoste** (grazie anche alle frequenti discussioni avute con Einstein a Princeton).



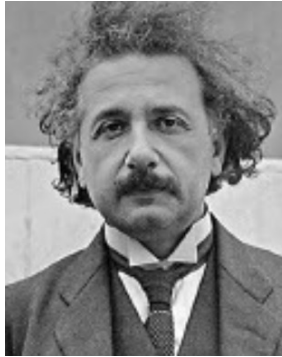
Lo scontro Einstein-Bohr: il Paradosso EPR



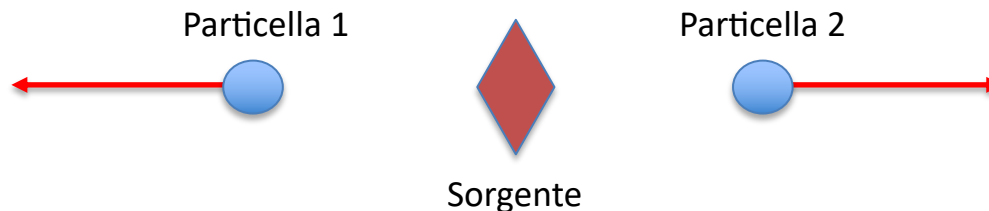
Nel **1935**, in collaborazione con Boris Podolsky e Nathan Rosen, Einstein pubblicò su Physical Review un **esperimento mentale** che sarebbe diventato celebre con il nome di **Paradosso EPR**. Sulla base di ipotesi naturali di realismo ed utilizzando i principi relativistici universalmente riconosciuti come validi, con questo argomento i tre fisici intendevano **dimostrare che la meccanica quantistica è incompleta**. Gli autori consideravano due particelle che partono simultaneamente dallo stesso luogo e si muovono in direzioni opposte, così da conservare la quantità di moto totale, pari a zero. Secondo **l'interpretazione standard della MQ** le particelle **non** dovrebbero possedere una posizione e una velocità definite prima dell'atto della loro misura.



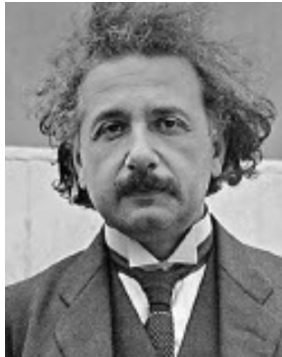
Lo scontro Einstein-Bohr: il Paradosso EPR



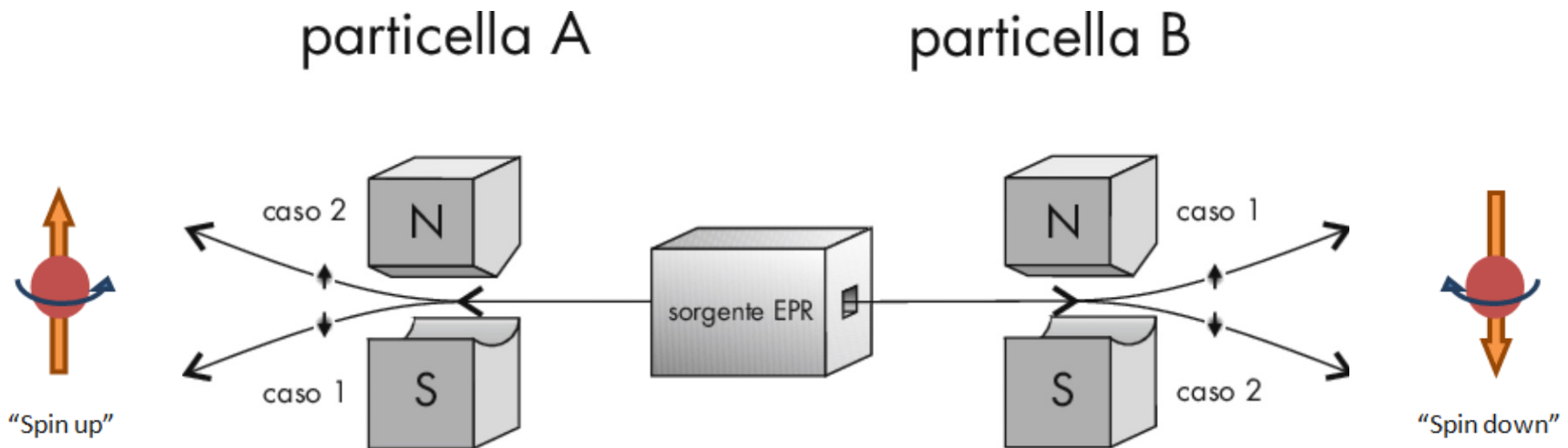
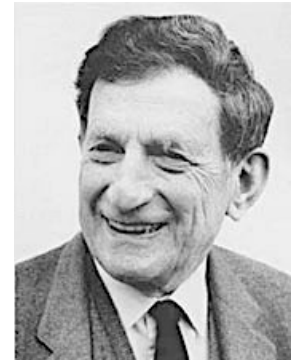
Però, per la conservazione della quantità di moto, **misurando l'impulso** di una particella, si sarebbe potuto conoscere quello dell'altra particella, e anche **misurando la posizione** di una particella si conoscerebbe quella dell'altra, poiché esse si muovono alla stessa velocità e in direzioni opposte. Inoltre, se le due particelle sono molto distanti e **se il principio di località è valido**, la scelta che facciamo sulla grandezza da misurare per una particella, **non può influenzare** lo stato dell'altra particella. Se ne deduce che ciascuna particella deve possedere **una quantità di moto e una posizione ben definite anche se non le misuriamo**, e questo dimostrerebbe che la meccanica quantistica è incompleta, poiché la descrizione dello stato quantico non include queste variabili!



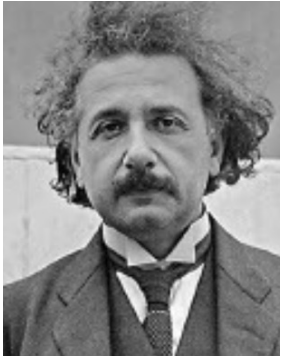
Lo scontro Einstein-Bohr: il Paradosso EPR



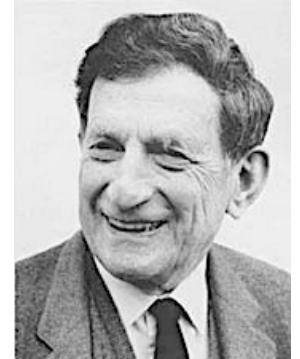
Questa argomentazione verrà più avanti ripresa proprio da **Bohm**, che **semplificherà la trattazione del paradosso considerando gli spin** delle due particelle e non più le loro posizioni e quantità di moto, passando così dalla misurazione di variabili continue a quella, molto più intuitiva, di **variabili discrete**, ma senza cambiare la sostanza del ragionamento. Il cui scopo non era quello di confutare il principio di indeterminazione di Heisenberg (come molti avevano pensato) ma di **riabilitare il realismo**.



Lo scontro Einstein-Bohr: il Paradosso EPR



Questa argomentazione verrà più avanti ripresa proprio da Bohm, che **semplificherà la trattazione del paradosso considerando gli spin** delle due particelle e non più le loro posizioni e quantità di moto, passando così dalla misurazione di variabili continue a quella, molto più intuitiva, di **variabili discrete**, ma senza cambiare la sostanza del ragionamento. Il cui scopo non era quello di confutare il principio di indeterminazione di Heisenberg (come molti avevano pensato) ma di **riabilitare il realismo**.



particella A

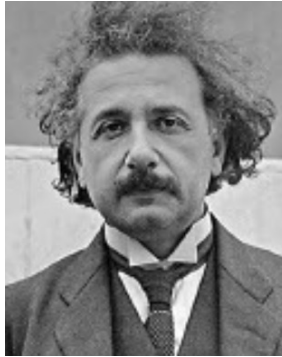
particella B

"Se, senza perturbare in alcun modo un sistema, possiamo prevedere con certezza (cioè con probabilità pari all'unità) il valore di una grandezza fisica, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a questa grandezza fisica.»

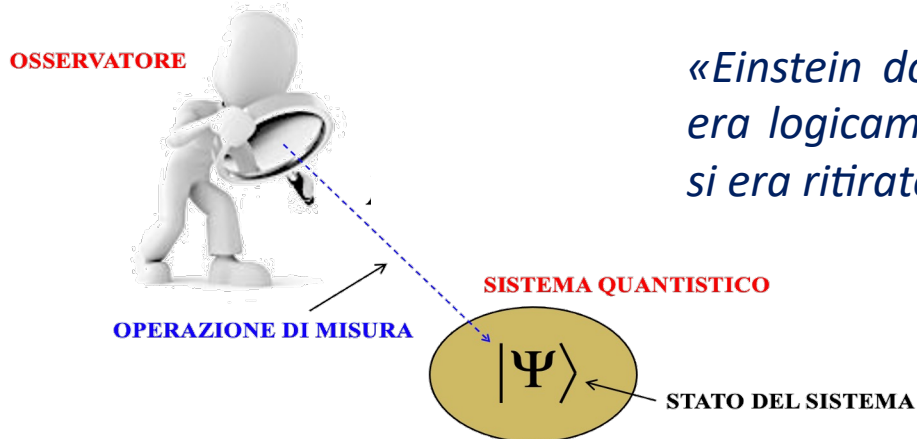
A.Einstein, lettera a Schrodinger del 19 giugno 1935



Lo scontro Einstein-Bohr: il Paradosso EPR



La risposta di Bohr non si fece attendere e nel numero successivo di Physical Review, sempre nel **1935**, in un articolo con lo stesso titolo usato dal gruppo EPR ("Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?»), Bohr esaminò le cose dal punto di vista della Complementarità e dedusse che **non è possibile parlare di un sistema fisico senza fare alcuna misurazione su di esso** e tantomeno confrontarlo con un altro che invece è stato misurato. Secondo Bohr, quindi, **un fenomeno non è reale finchè non è osservato**. E da allora questa divenne anche la posizione ufficiale dell'interpretazione standard della MQ.



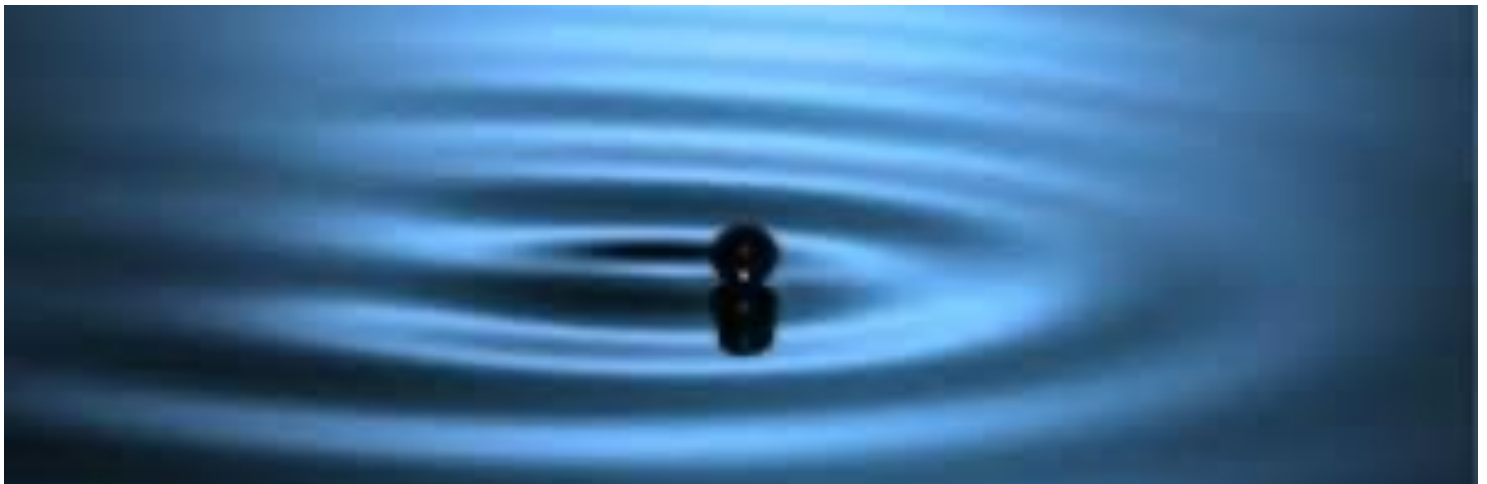
«Einstein dovette ammettere che la posizione di Bohr era logicamente inattaccabile. Ma questo perché Bohr si era ritirato in una posizione imprendibile»

Banesh Hoffmann

Il punto di vista di de Broglie: la Teoria dell'Onda-Pilota



Come già visto, nelle sue note del **1924-1927**, e nella sua tesi di dottorato, che precede tutti gli altri importanti lavori sulla fisica quantistica, **Louis de Broglie aveva associato le onde alle particelle** dando così origine alla meccanica ondulatoria e al dualismo onda-corpuscolo, **ma lo aveva fatto introducendo l'idea che il moto delle particelle potesse essere guidato da onde** (teoria dell'**onda-pilota** o della "**doppia soluzione**"). Fu invitato a presentare il suo lavoro alla **5a conferenza di Solvay a Bruxelles** nel **1927**, dove sostenne che le particelle andavano considerate '**esterne**' all'onda ψ , mentre il loro moto era **determinato** dalla propagazione dell'onda, regolata dall'equazione appena introdotta (nel **1926**) da Schrödinger.



Il punto di vista di de Broglie: la Teoria dell'Onda-Pilota



Einstein pensava che de Broglie fosse nella direzione giusta, ma la reazione generale dei presenti alla conferenza fu negativa. In particolare, Pauli sollevò un'obiezione riguardante la descrizione, all'interno della teoria di de Broglie, di alcuni fenomeni di scattering. Il fisico francese lasciò la conferenza di Solvay scoraggiato, non solo per le critiche o per le reazioni negative, ma soprattutto perché non riusciva a dare un senso fisico alla sua onda-pilota, definita nello spazio delle configurazioni, e comunque non riusciva a formalizzare matematicamente la teoria in tutti i suoi aspetti. Rinunciò quindi alla sua alternativa e seguì l'ortodossia di Copenaghen per i successivi venticinque anni... fino all'arrivo di Bohm (si veda più avanti)...



Il punto di vista di Schrödinger: il gatto è vivo o morto?



Schrödinger è stato, insieme ad Einstein, uno dei più noti critici dell'interpretazione standard della meccanica quantistica. In particolare le sue perplessità si concentravano sul problema della misura e della necessità del **collasso** («salto quantico») della funzione d'onda (da lui introdotta).



Schrödinger: «Se continueremo a rimanere attaccati a questo dannato salto quantico, allora mi pento di aver mai avuto a che fare con la teoria dei quanti!»

Bohr: «Il resto di noi è grato che tu lo abbia fatto!»

Il punto di vista di Schrödinger: il gatto è vivo o morto?



Schrödinger è stato, insieme ad Einstein, uno dei più noti critici dell'interpretazione standard della meccanica quantistica. In particolare le sue perplessità si concentravano sul problema della misura e della necessità del **collasso** («salto quantico») della funzione d'onda (da lui introdotta). Con il suo famoso **esempio del gatto (1935)** Schrödinger voleva proprio evidenziare la *reduction ad absurdum* insita nell'idea che la MQ fosse completa, mostrando come secondo la teoria standard un'indeterminazione che potrebbe essere accettabile nel dominio microscopico, a cui non abbiamo accesso diretto, si trasformerebbe in **un'indeterminazione macroscopica inaccettabile**. Secondo Schrodinger, una descrizione che considera il gatto "sia vivo sia morto" non poteva certamente essere completa!



Il punto di vista di Schrödinger: il gatto è vivo o morto?



Schrödinger è stato, insieme ad Einstein, uno dei più noti critici dell'interpretazione standard della meccanica quantistica. In particolare le sue perplessità si concentravano sul problema della misura e della necessità del **collasso** («salto quantico») della funzione d'onda (da lui introdotta). Con il suo famoso **esempio del gatto (1935)** Schrödinger voleva proprio evidenziare la *reduction ad absurdum* insita nell'idea che la MQ fosse completa, mostrando come secondo la teoria standard un'indeterminazione che potrebbe essere accettabile nel dominio microscopico, a cui non abbiamo accesso diretto, si trasformerebbe in **un'indeterminazione macroscopica inaccettabile**. Secondo Schrodinger, una descrizione che considera il gatto "sia vivo sia morto" non poteva certamente essere completa!

«Caro Schrödinger... il suo gatto mostra che siamo completamente d'accordo riguardo alla nostra valutazione del carattere della teoria corrente. Una funzione ψ che contiene sia il gatto vivo che quello morto non può proprio essere presa come una descrizione di un reale stato di cose...»

Lettera di Einstein a Schrödinger

Il "Teorema di Impossibilità" di Von Neumann



Intanto, nel **1932**, von Neumann aveva pubblicato quella che è considerata una delle più basilari esposizioni matematiche della meccanica quantistica, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, tradotto "Fondamenti matematici della meccanica quantistica". In quel testo von Neumann sviluppava il formalismo della misurazione in meccanica quantistica, e forniva un **argomento a favore della completezza della teoria ortodossa**, dimostrando con un teorema diventato famoso (noto come "**teorema dell'impossibilità**"), che non è possibile introdurre variabili nascoste che riproducano i risultati della meccanica quantistica standard. Questo teorema veniva regolarmente chiamato in causa nel dibattito sulla completezza della MQ...

«I fisici hanno buone ragioni per ritenere ciò impossibile, basate principalmente sugli studi condotti da John von Neumann»

Max Born, con riferimento al punto di vista di Einstein

«La ben nota dimostrazione di von Neumann mostra che le conseguenze della meccanica quantistica non possono essere modificate da affermazioni aggiuntive sulla distribuzione dei valori delle osservabili, basate sulla fissazione dei valori di alcuni parametri nascosti»

Wolfgang Pauli

Il "Teorema di Impossibilità" di Von Neumann



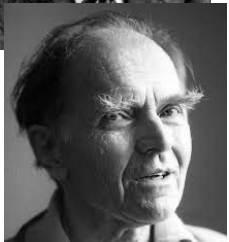
In realtà von Neumann, come si evince anche da quanto scrive lui stesso, non dimostrava affatto, né pretendeva di dimostrare, l'inesistenza di una teoria alternativa le cui previsioni siano equivalenti a quelle della meccanica quantistica standard. Sugeriva solo che l'esistenza di una tale teoria sia "altamente improbabile" (*highly unlikely*). Nonostante ciò, il suo lavoro venne in seguito interpretato erroneamente come una "prova" della non esistenza di qualsiasi teoria alternativa a quella standard e dunque finì per esercitare una notevole influenza sulla ricerca scientifica intorno ai fondamenti della MQ...

«L'unica teoria formale esistente al momento che ordina e riassume le nostre esperienze in questo campo in modo semi-soddisfacente, cioè la meccanica quantistica, è in convincente contraddizione logica con la causalità. Naturalmente sarebbe un'esagerazione affermare che la causalità è stata in tal modo eliminata: la meccanica quantistica presenta, nella sua forma attuale, parecchie gravi lacune, e può anche darsi che sia falsa, sebbene quest'ultima possibilità sia altamente improbabile di fronte alla sua sorprendente capacità nella spiegazione qualitativa dei problemi generali, e nel calcolo quantitativo di quelli speciali.»

Il "Teorema di Impossibilità" di Von Neumann



Pare che anche Einstein non fosse convinto dell'argomento di von Neumann, ma non ne pubblicò mai una critica – probabilmente non ne sentiva la necessità, visto che lo stesso von Neumann aveva chiarito che la sua non fosse una dimostrazione definitiva. Ma, al solito, la sua rimase una posizione isolata. I seguaci di Bohr infatti continuarono ad usare quel presunto «teorema di impossibilità» per stroncare sul nascere qualunque dibattito sulle variabili nascoste. Un esempio dell'influenza della "prova" di von Neumann viene vividamente descritta nell'autobiografia del filosofo della scienza Paul Feyerabend:



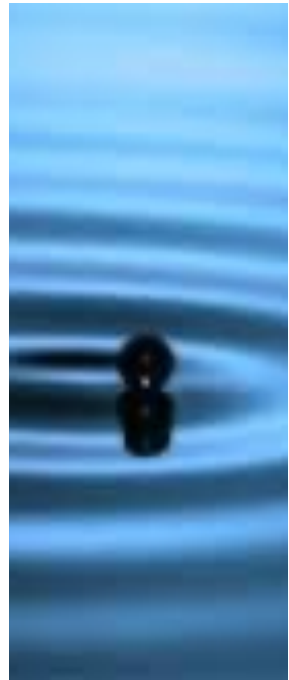
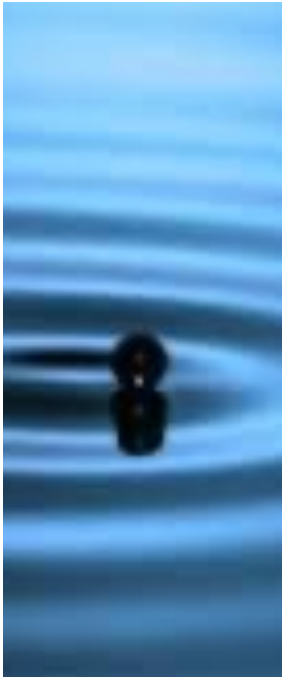
«Egli [Bohr] venne per una conferenza pubblica [...] Alla fine della conferenza se ne andò e la discussione proseguì senza di lui. Alcuni oratori hanno attaccato le sue argomentazioni qualitative: sembravano esserci molte scappatoie. I Bohriani non hanno chiarito gli argomenti; hanno menzionato la presunta prova di von Neumann, e questo ha risolto la questione. Ora dubito fortemente che coloro che hanno citato la prova, con la possibile eccezione di uno o due di loro, avrebbero potuto spiegarla. Sono anche sicuro che i loro avversari non avevano idea dei suoi dettagli. Eppure, come per magia, il solo nome "von Neumann" e la sola parola "prova" hanno messo a tacere gli oppositori».

Paul Feyerabend

L'entrata in scena di David Bohm e il ritorno dell'Onda-Pilota



Abbiamo visto che, **alla fine degli anni Trenta**, non essendo riuscito a formalizzarla rigorosamente in tutti i suoi aspetti, **Louis de Broglie aveva rinunciato alla sua idea dell'onda-pilota** e aveva finito per seguire l'ortodossia di Copenaghen per i successivi venticinque anni... Fino a quando, all'inizio degli **anni Cinquanta**, non ricevette un **manoscritto da un giovane fisico americano, di nome David Bohm**, che riprendeva quell'idea ma la sviluppava in una direzione che de Broglie per primo, ma neanche Einstein o Schrödinger, erano stati in grado di seguire fino in fondo: **assumendo cioè che le particelle siano oggetti reali, con posizioni e impulsi ben definiti, il cui moto è guidato da onde pilota che però non vivono in spazi matematici astratti, come le funzioni d'onda di probabilità di Schrödinger, ma sono entità concrete che vivono nello spazio reale tridimensionale.** De Broglie reagì cercando di ribadire la sua priorità e riaffermando le sue vecchie obiezioni alla sua stessa teoria, ma si era probabilmente reso conto che **Bohm aveva centrato l'obiettivo** che lui, forse per mancanza di coraggio, non era riuscito a realizzare venticinque anni prima...



David Bohm: una biografia inquieta



David Bohm era nato nel **1917** a Wilkes-Barre in Pennsylvania. Suo padre, Samuel Bohm, fu un emigrante ungherese di origine ebraica e sua madre una lituana, pure di origine ebraica. Il giovane David fu educato principalmente dal padre, proprietario di un negozio di mobili in Wilkes-Barre e assistente di un rabbino. Nelle sue intenzioni **David avrebbe dovuto occuparsi dell'azienda familiare** ma le inclinazioni del ragazzo apparvero subito di tutt'altra natura.

Dal **1930** frequentò il **Collegio statale della Pennsylvania**, dove si avvicinò alla meccanica quantistica. Dopo aver conseguito il diploma, David vinse una borsa di studio che gli permise di iscriversi **all'Università della California**, nella quale conseguì il dottorato nel **1943**. Successivamente esercitò la sua attività come fisico teorico nelle più importanti università americane, come **Berkeley e Princeton**, dedicandosi soprattutto ad approfondire il comportamento degli elettroni nei metalli, con **risultati estremamente innovativi** che lo portarono all'attenzione del mondo della fisica di allora.



David Bohm: una biografia inquieta

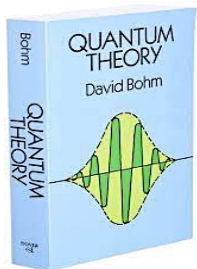
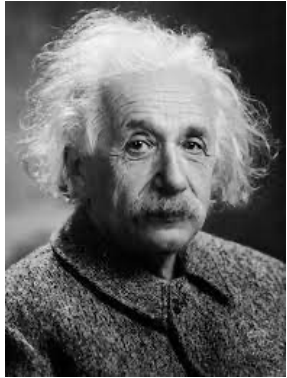


Oppenheimer (suo ex PhD advisor) lo convocò inizialmente tra gli scienziati del Progetto Manhattan, ma i suoi trascorsi politici non gli permisero di partecipare al progetto. Siamo negli anni in cui in America comincia la cosiddetta “caccia alle streghe”. Su segnalazione dello stesso Oppenheimer, nel 1948 Bohm venne chiamato a deporre a causa della sua adesione al Partito comunista nel 1942 (per appena nove mesi), ma si appellò al quinto emendamento. Dopo altri inviti a comparire davanti al gran giurì, nel 1949 fu arrestato, accusato di oltraggio alla corte e imprigionato per breve tempo per poi essere scarcerato su cauzione.

Nel 1950 venne prosciolto da tutte le accuse ma l'Università di Princeton, attenta ai finanziatori, lo scaricò comunque. Bohm era ormai finito nella lista nera dei ricercatori e nemmeno Einstein, che il giovane aveva iniziato a frequentare regolarmente presentandogli i primi lineamenti di quella che poi sarebbe stata la sua teoria a variabili nascoste, riuscì nel suo tentativo di chiamarlo come assistente. Fu così costretto ad emigrare in Brasile presso l'Università di S. Paolo.



David Bohm: una biografia inquieta



Nel **1951**, durante la sua permanenza in Brasile, **Bohm pubblica il suo famoso testo «Quantum Theory»**, dove analizza l'interpretazione della teoria quantistica e dell'esperimento mentale EPR, ponendosi tra i **critici dell'interpretazione di Copenaghen**. Per questa ragione regalerà una copia del libro ad **Albert Einstein**, il quale però nel **1952**, dopo la pubblicazione di due fondamentali articoli di Bohm su Physical Review, scrivendo a Max Born stranamente **critica** l'approccio del fisico americano. Forse perché si era reso conto che, come vedremo, **la teoria di Bohm era sì una teoria a variabili nascoste**, che dunque confermava la natura incompleta della MQ standard (come piaceva ad Einstein), **ma si trattava di variabili nascoste non-locali** (cosa che invece non piaceva assolutamente allo scienziato tedesco, che rimase sempre legato al suo principio di località). **Altre critiche a Bohm vennero da Heisenberg, Pauli e soprattutto da Léon Rosenfeld**, e spesso erano dettate, oltre che da motivazioni scientifiche legate alla **"eretività"** della sua teoria, anche da **ragioni politiche** legate alle accuse di tradimento rivolte al fisico americano (da molti considerato un Trotskista). Tanto che, mentre si trovava in Brasile, per evitare che andasse in Unione Sovietica l'ambasciata americana gli **ritirò il passaporto** concedendogliene uno valido solo per gli USA.

David Bohm: una biografia inquieta

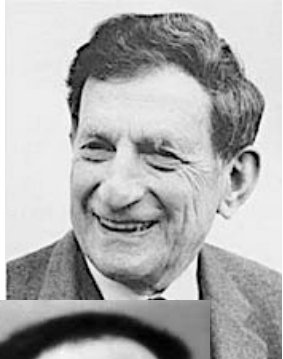


Per evitare il completo isolamento Bohm prese la **nazionalità brasiliana**, continuando a lavorare ad alcune varianti della sua teoria originale, in **collaborazione** soprattutto **con il fisico Jean-Pierre Vigier** (→ MQ Stocastica). Nel **1955 lasciò definitivamente il Brasile** per andare due anni in Israele, al Technion Institute di Haifa, e poi in Gran Bretagna presso l'Università di Bristol per quattro anni. Nel **1961** si stabilisce finalmente a **Londra**, dove rimarrà a ricoprire la cattedra di fisica teorica al **Birkbeck College** fino alla pensione.

Negli anni Ottanta Bohm spingerà alle estreme conseguenze la visione che aveva maturato con la MQ Stocastica (in seguito sviluppata da Edward Nelson) e che richiedeva l'ipotesi di un livello sub-quantico della realtà, teorizzando l'esistenza di un «**ordine implicito**» (implicate order) che non siamo in grado di percepire ma che è a fondamento dell'«**ordine esplicito**» osservato in natura e descritto dalle nostre leggi fisiche. Negli ultimi anni collaborò con il neuroscienziato di Stanford, **Karl Pribram**, ad una **teoria olografica del cervello** basata sulle proprietà olografiche dell'ordine implicito, ed ebbe interessanti conversazioni filosofiche (poi divenute celebri) con il mistico di origine indiana **Jiddu Krishnamurti**.



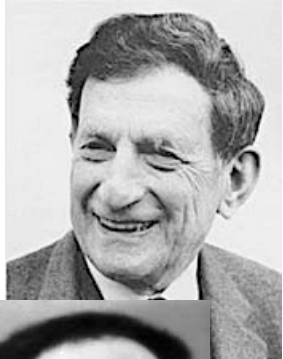
La Teoria di de Broglie-Bohm e il dualismo onda-corpuscolo



Vediamo adesso di dare qualche dettaglio supplementare sulla teoria sviluppata da Bohm nel **1952** basandosi sulle idee originali di de Broglie. Secondo quella che viene chiamata «**teoria dell'onda-pilota di de Broglie-Bohm**» (o **Meccanica Bohmiana**). Come abbiamo anticipato, l'elettrone – per esempio – è considerato una **particella con una posizione ben precisa**, che segue traiettorie definite nello spazio; i fenomeni statistici ondulatori (come la formazione di un pattern di interferenza nell'esperimento delle due fenditure) sorgono perché **il moto della particella è influenzato da un'onda ad essa associata**. Quello che, nell'interpretazione ortodossa, è un singolo elettrone, secondo questa teoria non è più una sola cosa ma due: **un'onda + una particella puntiforme**, il cui movimento è controllato dall'onda!



La Teoria di de Broglie-Bohm e il dualismo onda-corpuscolo

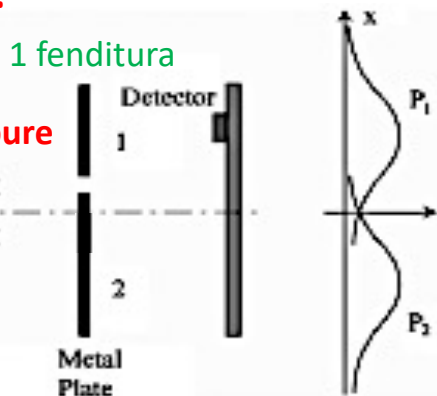


Vediamo adesso di dare qualche dettaglio supplementare sulla teoria sviluppata da Bohm nel **1952** basandosi sulle idee originali di de Broglie. Secondo quella che viene chiamata «**teoria dell'onda-pilota di de Broglie-Bohm**» (o **Meccanica Bohmiana**), come abbiamo anticipato, l'elettrone – per esempio – è considerato una **particella con una posizione ben precisa**, che segue traiettorie definite nello spazio; i fenomeni statistici ondulatori (come la formazione di un pattern di interferenza nell'esperimento delle due fenditure) sorgono perché **il moto della particella è influenzato da un'onda ad essa associata**. Quello che, nell'interpretazione ortodossa, è un singolo elettrone, secondo questa teoria non è più una sola cosa ma due: **un'onda + una particella puntiforme**, il cui movimento è controllato dall'onda!



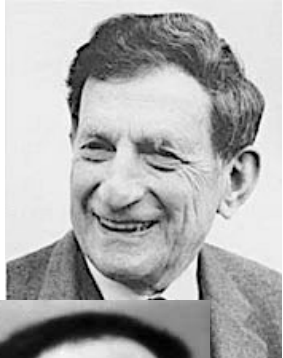
MQ Standard:

l'elettrone si comporta come una particella **oppure** come un'onda a seconda dell'esperimento



ESPERIMENTO CON UNA O DUE FENDITURE

La Teoria di de Broglie-Bohm e il dualismo onda-corpuscolo

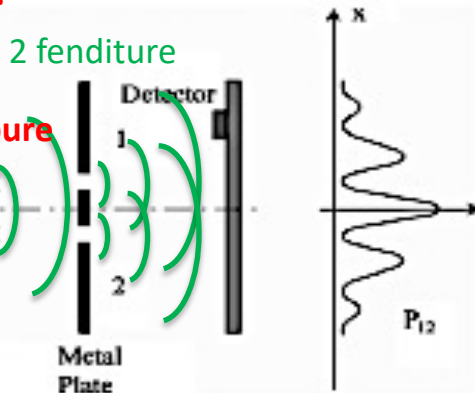


Vediamo adesso di dare qualche dettaglio supplementare sulla teoria sviluppata da Bohm nel **1952** basandosi sulle idee originali di de Broglie. Secondo quella che viene chiamata «**teoria dell'onda-pilota di de Broglie-Bohm**» (o **Meccanica Bohmiana**), come abbiamo anticipato, l'elettrone – per esempio – è considerato una **particella con una posizione ben precisa**, che segue traiettorie definite nello spazio; i fenomeni statistici ondulatori (come la formazione di un pattern di interferenza nell'esperimento delle due fenditure) sorgono perché **il moto della particella è influenzato da un'onda ad essa associata**. Quello che, nell'interpretazione ortodossa, è un singolo elettrone, secondo questa teoria non è più una sola cosa ma due: **un'onda + una particella puntiforme**, il cui movimento è controllato dall'onda!



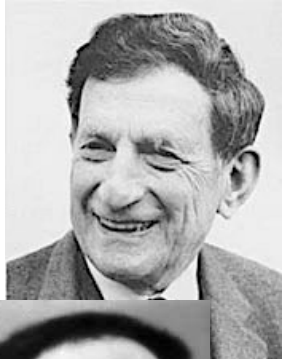
MQ Standard:

l'elettrone si comporta come una particella **oppure** come un'onda a seconda dell'esperimento



ESPERIMENTO CON UNA O DUE FENDITURE

La Teoria di de Broglie-Bohm e il dualismo onda-corpuscolo

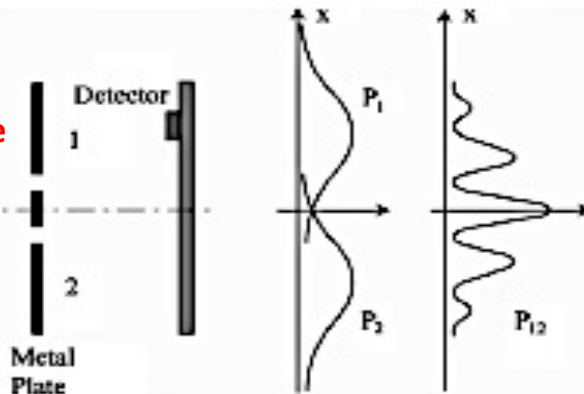


Vediamo adesso di dare qualche dettaglio supplementare sulla teoria sviluppata da Bohm nel **1952** basandosi sulle idee originali di de Broglie. Secondo quella che viene chiamata «**teoria dell'onda-pilota di de Broglie-Bohm**» (o **Meccanica Bohmiana**), come abbiamo anticipato, l'elettrone – per esempio – è considerato una **particella con una posizione ben precisa**, che segue traiettorie definite nello spazio; i fenomeni statistici ondulatori (come la formazione di un pattern di interferenza nell'esperimento delle due fenditure) sorgono perché **il moto della particella è influenzato da un'onda ad essa associata**. Quello che, nell'interpretazione ortodossa, è un singolo elettrone, secondo questa teoria non è più una sola cosa ma due: **un'onda + una particella puntiforme**, il cui movimento è controllato dall'onda!



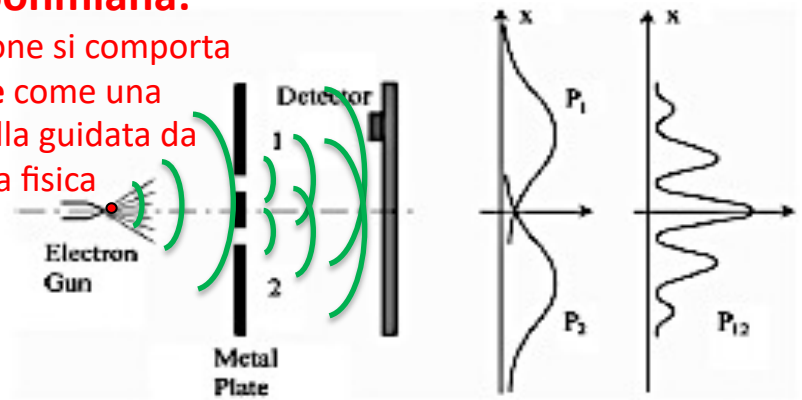
MQ Standard:

l'elettrone si comporta come una particella **oppure** come un'onda a seconda dell'esperimento

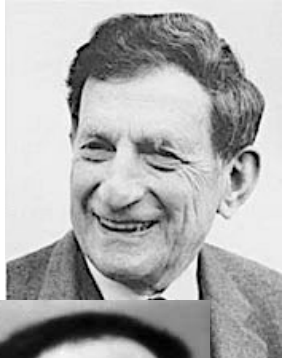


MQ Bohmiana:

l'elettrone si comporta **sempre** come una particella guidata da un'onda fisica



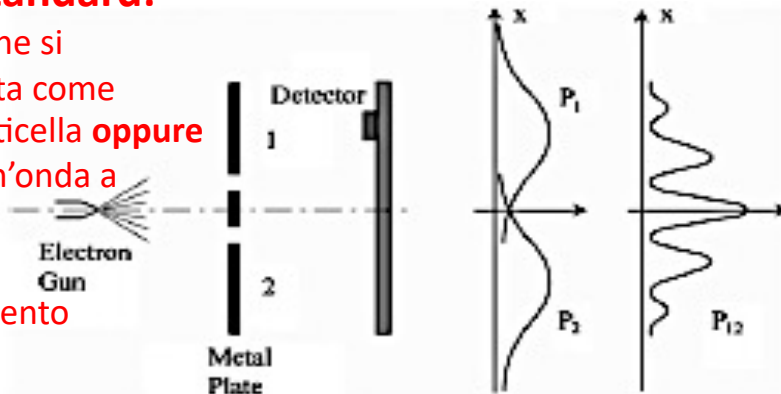
La Teoria di de Broglie-Bohm e il dualismo onda-corpuscolo



Questa ipotesi risolve alla radice molte difficoltà, ad esempio quelle relative alla comprensione del motivo per cui i sistemi quantistici possono manifestare sia proprietà ondulatorie che corpuscolari negli esperimenti di interferenza. Il sistema contiene sempre due entità indissociabili, un'onda ed una particella: l'onda può produrre gli effetti di interferenza e guidare la particella in un modo che costringa la sua traiettoria a riprodurre lo schema d'interferenza, dunque niente di particolarmente "misterioso" concettualmente. Il famoso "dualismo onda-corpuscolo", come inteso originariamente da de Broglie, era quindi davvero un dualismo, nel senso letterale del termine, non quell'elusivo ed enigmatico concetto che ci è stato tramandato nell'ambito dell'interpretazione di Copenhagen.

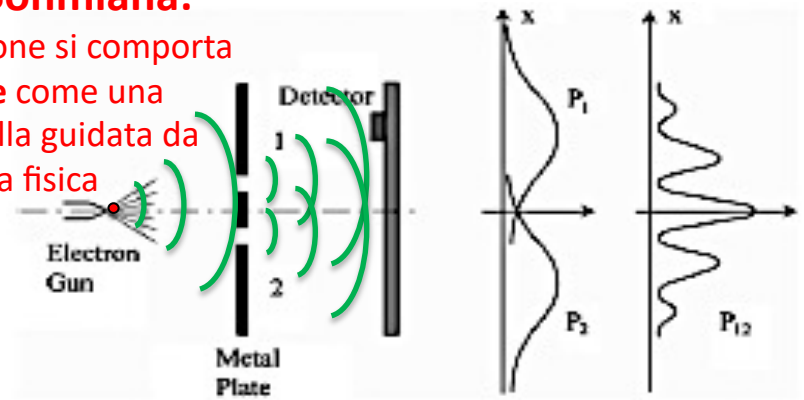
MQ Standard:

l'elettrone si comporta come una particella oppure come un'onda a seconda dell'esperimento

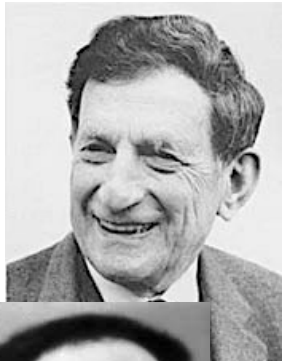


MQ Bohmiana:

l'elettrone si comporta sempre come una particella guidata da un'onda fisica



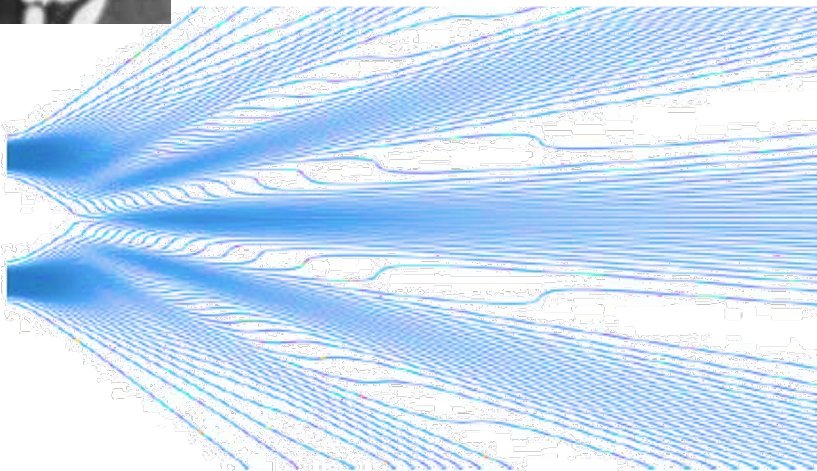
La Teoria di de Broglie-Bohm: l'esperimento delle due fenditure



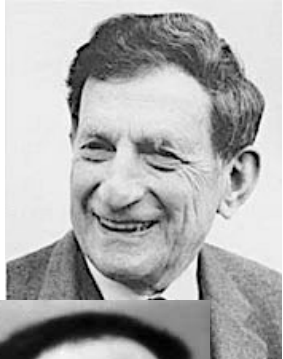
Ecco come **John Stewart Bell** riassume la teoria di de Broglie-Bohm nel caso dell'esperimento a doppia fenditura:

«Non è chiaro dalla piccolezza della scintilla sullo schermo che abbiamo a che fare con una particella? E non è chiaro, dalle figure di diffrazione e di interferenza, che il moto della particella è diretto da un'onda? De Broglie ha mostrato in dettaglio come il moto di una particella, passando attraverso uno solo dei due fori dello schermo, possa essere influenzato dalle onde che si propagano attraverso entrambi i fori. E così influenzata che la particella non va dove le onde si annullano, ma è attratta dove cooperano. Questa idea mi sembra così naturale e semplice, per risolvere il dilemma onda-particella in modo così chiaro e ordinario, che è un grande mistero per me che sia stata così generalmente ignorata»

J.S.Bell

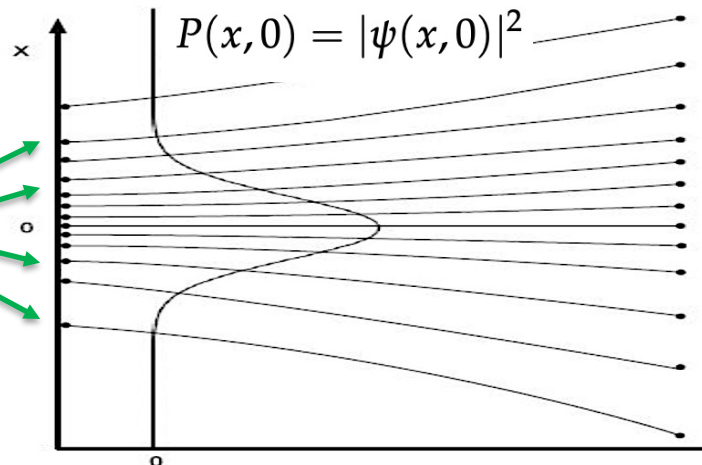


La Teoria di de Broglie-Bohm: il ruolo delle condizioni iniziali

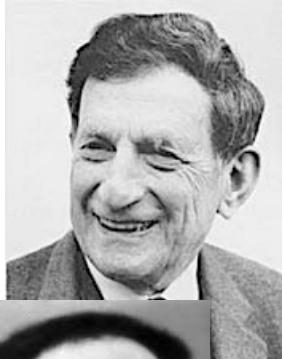


E' interessante notare che **la teoria di de Broglie-Bohm riesce a rendere conto anche della natura probabilistica del mondo microscopico** che emerge con evidenza dall'interpretazione standard. Infatti, anche se secondo la teoria dell'onda-pilota la posizione di una particella è sempre ben definita, di solito noi **non conosciamo esattamente quella posizione!** Se ad esempio **prepariamo sperimentalmente un elettrone** per avere una funzione d'onda $\psi(x, 0)$, non possiamo scegliere o controllare l'esatta posizione iniziale della particella $X(0)$ - che sarà pertanto **casuale**, e dunque ci si aspetta che questa **imprecisione** sulle condizioni iniziali possa essere quantificata da una **distribuzione di probabilità $P(x, 0)$** .

*Possibili posizioni iniziali
dell'elettrone preparato con
una $\psi(x,0)$ gaussiana*



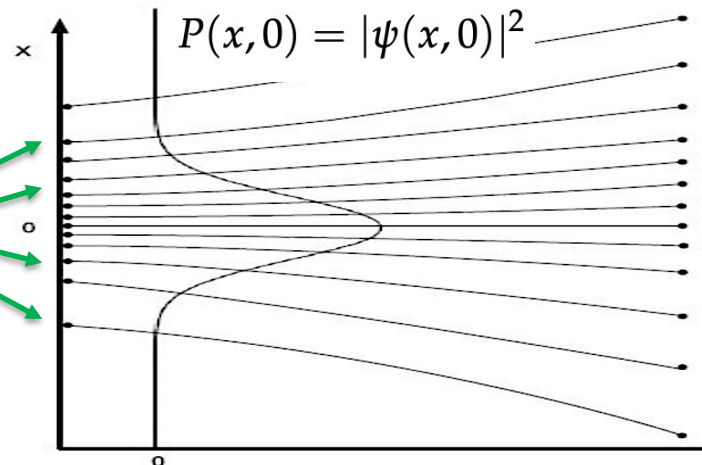
La Teoria di de Broglie-Bohm: il ruolo delle condizioni iniziali



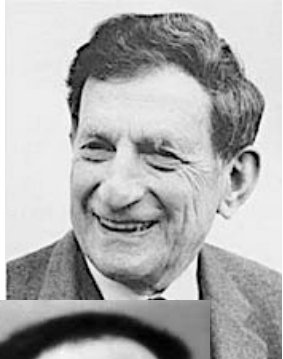
Questa distribuzione di probabilità iniziale non è dovuta ad una preparazione non abbastanza precisa, ma è postulata come **fondamentale**: per una data realizzazione di un esperimento, non c'è modo di selezionare quale valore della posizione sia effettivamente realizzato all'interno della distribuzione; **da una realizzazione all'altra, una nuova scelta di posizione viene fatta dalla natura, in maniera completamente casuale.**



*Possibili posizioni iniziali
dell'elettrone preparato con
una $\psi(x,0)$ gaussiana*

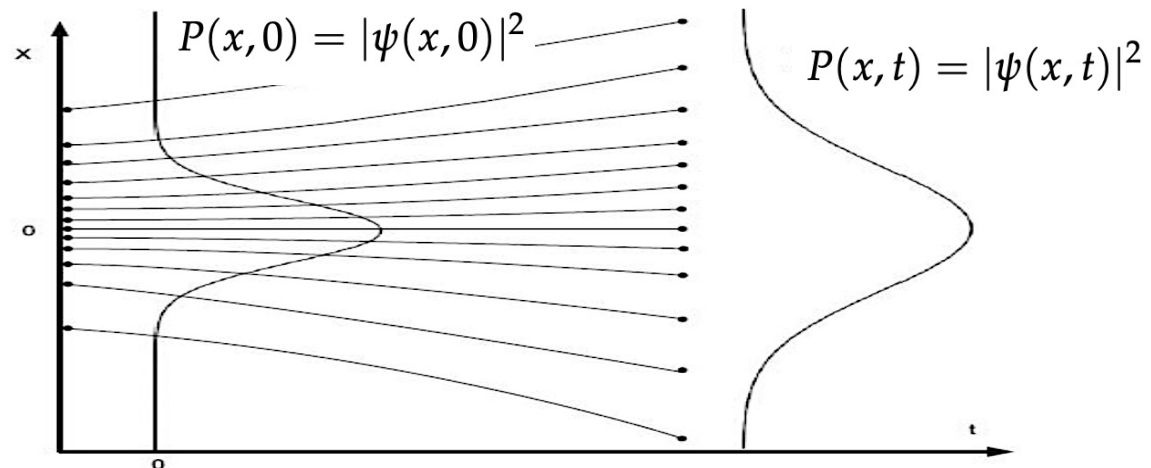


La Teoria di de Broglie-Bohm: il ruolo delle condizioni iniziali



Questa distribuzione di probabilità iniziale non è dovuta ad una preparazione non abbastanza precisa, ma è postulata come **fondamentale**: per una data realizzazione di un esperimento, non c'è modo di selezionare quale valore della posizione sia effettivamente realizzato all'interno della distribuzione; **da una realizzazione all'altra, una nuova scelta di posizione viene fatta dalla natura, in maniera completamente casuale**. Poi questa distribuzione **evolverà nel tempo** seguendo un'equazione ben precisa, che **condurrà ad una certa distribuzione di probabilità** (detta di «equilibrio quantistico») $P(x, t)$ al tempo t , dotata della cosiddetta **proprietà di «equivarianza»**.

Illustrazione della proprietà di «equivarianza» della distribuzione $|\psi(x,t)|^2$ nei casi di una ψ gaussiana. Ogni punto rappresenta la posizione di una particella, al tempo $t = 0$ e al generico t .

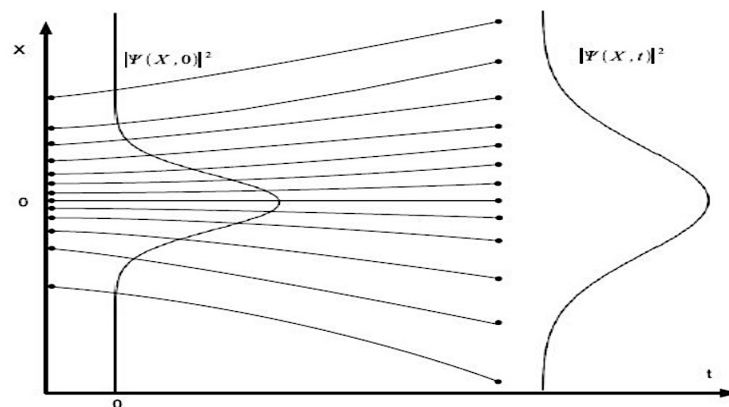


La Teoria di de Broglie-Bohm: il ruolo delle condizioni iniziali

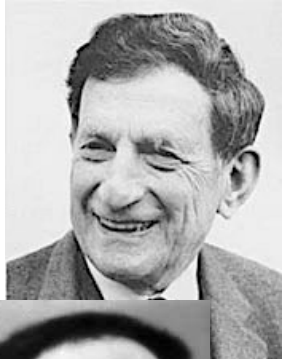


L'ipotesi di equivarianza della teoria di de Broglie-Bohm permette quindi di conservare il carattere fondamentale probabilistico delle previsioni della meccanica quantistica. Ma mentre nell'interpretazione ortodossa la particella "non ha", prima della misura, una posizione iniziale definita, e solo il collasso della funzione d'onda imposto dalla misura la costringe a compiere una scelta, **questa nuova teoria afferma che la natura "sceglie" sempre in quale posizione iniziale è la particella, semplicemente noi non ne siamo a conoscenza**: i risultati delle misurazioni rivelano semplicemente il valore pre-esistente delle posizioni (**realismo**), **senza bisogno di introdurre alcun collasso**. Bohm dimostra che, in questo modo, **tutte le previsioni della meccanica quantistica sono rispettate!**

OSSERVATORE



La Teoria di de Broglie-Bohm e il determinismo

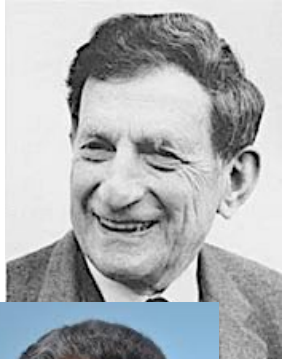


L'interpretazione di Copenaghen considera le probabilità come caratteristiche intrinseche della meccanica quantistica: nonostante il fatto che l'evoluzione temporale della funzione d'onda, descritta dall'equazione di Schrodinger, sia perfettamente **deterministica**, tutte le previsioni della teoria standard sui risultati di una misurazione quantistica possono essere espressi solo in termini di **probabilità**. Di conseguenza, **la meccanica quantistica standard risulta essere una teoria non deterministica a livello ontologico**.

D'altra parte la **teoria di de Broglie-Bohm** richiederebbe, per la definizione completa di un sistema quantistico, non solo la specifica della densità di probabilità, ma anche le **posizioni iniziali** di tutte le particelle appartenenti al sistema (le "variabili nascoste" del modello). E poiché, come abbiamo visto, le posizioni delle particelle non possono essere determinate sperimentalmente con una precisione migliore di quella data dalla densità di probabilità $|\psi|^2$, **l'interpretazione di de Broglie-Bohm non è in grado di produrre previsioni deterministiche, esattamente come la formulazione standard**. Dunque la teoria di de Broglie-Bohm rimane probabilistica rispetto alle possibili previsioni di una misura quantistica, ma **a differenza della MQ standard è deterministica a livello ontologico**. E questa è una *differenza epistemologica fondamentale!*



Bohm e la Meccanica Quantistica Stocastica



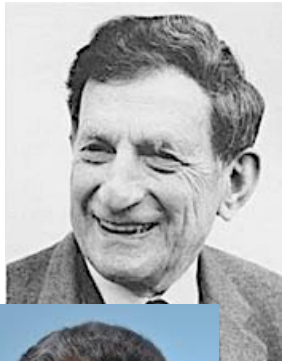
E' interessante ricordare che durante il suo soggiorno in Brasile, nei **primi anni Cinquanta**, Bohm ebbe anche modo di collaborare con il fisico francese **Jean-Pierre Vigièr**, con il quale, estendendo la sua precedente teoria basata sull'idea dell'onda-pilota di de Broglie, fornì una **nuova interpretazione della MQ** chiamata «**Teoria di Bohm-Vigièr**» o «**Meccanica Quantistica Stocastica**» (poi sviluppata, con differenze significative, da Edward Nelson).

Le idee di base furono inizialmente applicate ad un singolo elettrone. In particolare, **Bohm e Vigièr considerarono l'elettrone come sospeso in un fluido**, il cui movimento generale è determinato dall'equazione d'onda di Schrödinger. Tale movimento verrà comunicato alla particella in modo che subisca un **processo stocastico (tipo moto Browniano)** e che descriva una traiettoria dotata di una velocità locale media ed di una componente casuale, la quale potrebbe derivare da una **realtà situata ad un livello sub-quantico più profondo** rispetto a quello della meccanica quantistica. Quest'ultimo, come poi proposto da Nelson, potrebbe essere dovuto ad un **background casualmente fluttuante** oppure, per esprimerci in termini più moderni, potrebbe derivare dalle "**fluttuazioni stocastiche del vuoto**", inteso appunto come mezzo sub-quantico fondamentale (etere turbolento?).

Si ricordi la lezione sul Vuoto, dove abbiamo avanzato l'ipotesi di un etere sub-quantico turbolento dotato di fluttuazioni quantistiche irriducibilmente casuali (objective randomness)

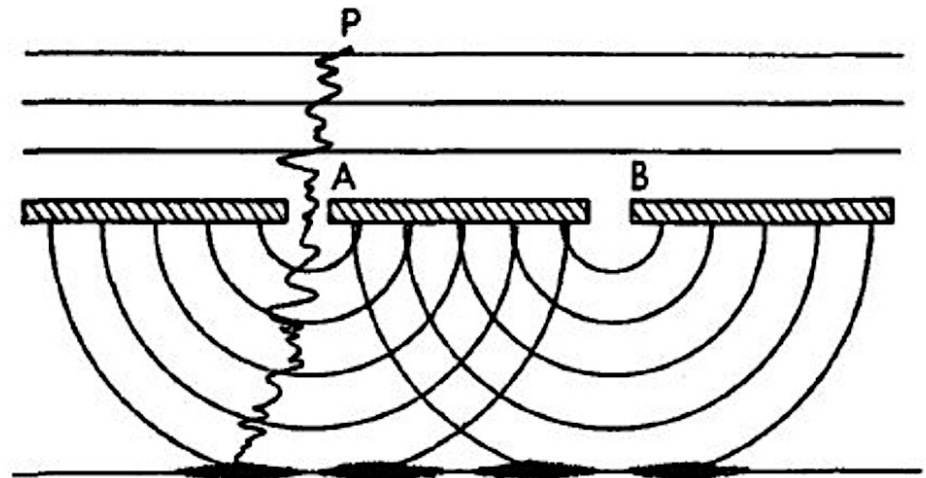


Bohm e la Meccanica Quantistica Stocastica



In questa teoria, la dinamica fondamentale di una particella è determinata dall'**equazione guida**, dalla **velocità osmotica** e dagli effetti di **diffusione stocastica**. Nell'interpretazione stocastica dell'esperimento delle due fenditure, l'effetto di "guida" che la funzione d'onda esercita sul moto altrimenti casuale delle particelle è espresso principalmente attraverso la **velocità osmotica**, la quale riflette i contributi della funzione d'onda che attraversa entrambe le fenditure. **Le particelle attraverseranno di volta in volta solo una delle due fenditure** e le loro velocità osmotiche le "spingeranno" costantemente verso le regioni dove $|\psi|^2$ ha i valori più alti, e questo spiega perchè la maggior parte di esse si troverà vicino ai massimi della funzione d'onda.

Interpretazione stocastica del moto di una particella nell'esperimento a due fenditure. Notare le fluttuazioni casuali della traiettoria della particella mentre viene guidata dall'onda verso zone a maggiore probabilità..



La Disuguaglianza di Bell: un test per l'Entanglement



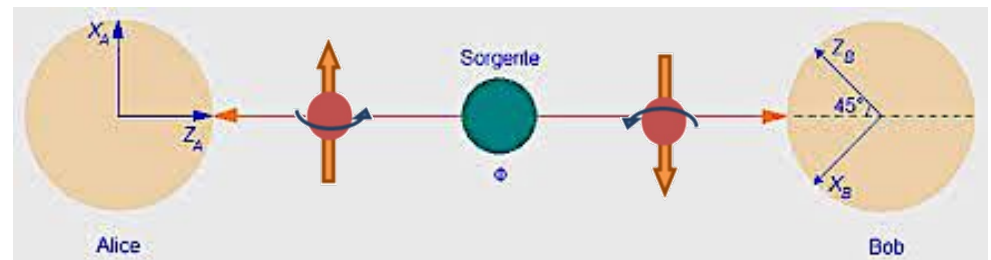
Nel **1964**, il fisico **John Stewart Bell** studiò un sistema quantistico composto da **due particelle**, riuscendo a dimostrare un potente teorema matematico che si rivelò di importanza cruciale per gli sviluppi futuri della ricerca sui fondamenti della teoria quantistica. **Il suo teorema è essenzialmente indipendente dalla natura delle particelle e dalla fisica del sistema**, e si concentra invece sulle regole della logica che governano tutti i processi di misurazione. In particolare, Bell si concentrò sulle **correlazioni** che potrebbero esistere tra i risultati di misurazioni (di posizione, momento, spin, polarizzazione) effettuate contemporaneamente su due particelle separate. **Il risultato fu una disuguaglianza, nota come disuguaglianza di Bell.**

Considerando la misurazione della proiezione dello spin lungo diverse direzioni, dato un sistema di due particelle di spin 1/2 nella stato di singoletto come nella formulazione EPR di Bohm, la disuguaglianza di Bell assume la seguente forma, nota come **disuguaglianza CHSH** (Clauser, Horne, Shimony e Holt, 1969)



$$|C(\hat{a}, \hat{b}) - C(\hat{a}, \hat{c})| + |C(\hat{a}', \hat{b}) + C(\hat{a}', \hat{c})| \leq 2$$

Coefficienti di correlazione, definiti come la somma delle probabilità di ottenere esiti concordi meno la somma delle probabilità di ottenere esiti discordi, misurando lo spin lungo diverse direzioni



La Disuguaglianza di Bell: un test per l'Entanglement



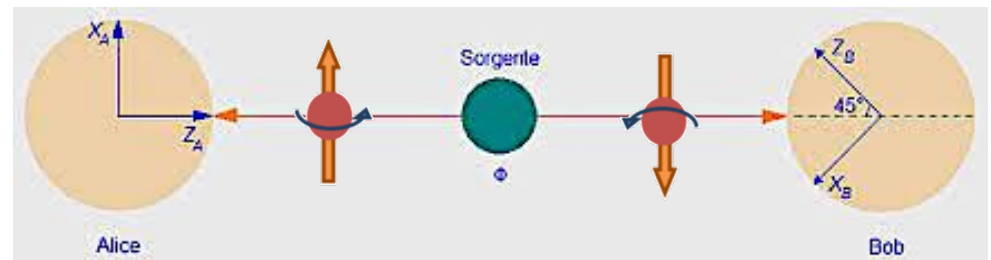
Poiché questa disuguaglianza si ottiene assumendo la **località** del sistema fisico, la sua **violazione** in un esperimento ad hoc avrebbe implicato che, qualunque teoria quantistica decidiamo di adottare, **essa deve essere non locale**. In questo caso, e questo affermava in sostanza il teorema di Bell, si sarebbe dimostrato che **nessuna teoria fisica a variabili nascoste locali può riprodurre le predizioni della meccanica quantistica**. In altre parole, si sarebbe dimostrata l'esistenza di una correlazione istantanea a distanza per i microsistemi quantistici, quello che oggi chiamiamo «**Entanglement**». Questo termine (letteralmente, in inglese, "groviglio", "intreccio") fu introdotto da Erwin Schrödinger proprio in una recensione dell'articolo sul paradosso EPR.

Considerando la misurazione della proiezione dello spin lungo diverse direzioni, dato un sistema di due particelle di spin 1/2 nella stato di singoletto come nella formulazione EPR di Bohm, la disuguaglianza di Bell assume la seguente forma, nota come **disuguaglianza CHSH** (Clauser, Horne, Shimony e Holt, 1969)



$$|C(\hat{a}, \hat{b}) - C(\hat{a}, \hat{c})| + |C(\hat{a}', \hat{b}) + C(\hat{a}', \hat{c})| \leq 2$$

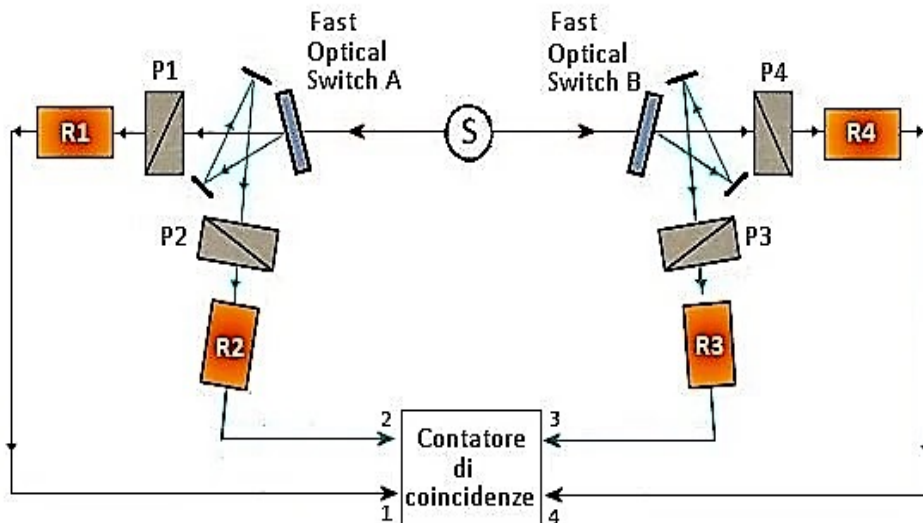
Coefficienti di correlazione, definiti come la somma delle probabilità di ottenere esiti concordi meno la somma delle probabilità di ottenere esiti discordi, misurando lo spin lungo diverse direzioni



L'Esperimento di Aspect: la prova dell'Entanglement



Il più importante test della disuguaglianza CHSH venne eseguito dal fisico **Alain Aspect** e dai suoi collaboratori nel **1982**. Invece di usare coppie di particelle di spin 1/2 nello stato di singoletto, Aspect utilizzò **coppie di fotoni** emessi simultaneamente in direzioni opposte da atomi di calcio eccitati, su cui si effettuavano **misure di polarizzazione**. Si trovò un **riscontro perfetto tra i risultati sperimentali e le predizioni della Meccanica Quantistica**. Infatti la combinazione dei coefficienti di correlazione che compare a sinistra nella disuguaglianza CHSH di Bell diede un **risultato ben al di sopra** del valore massimo possibile (cioè 2) consentito dalle teorie a variabili nascoste locali:



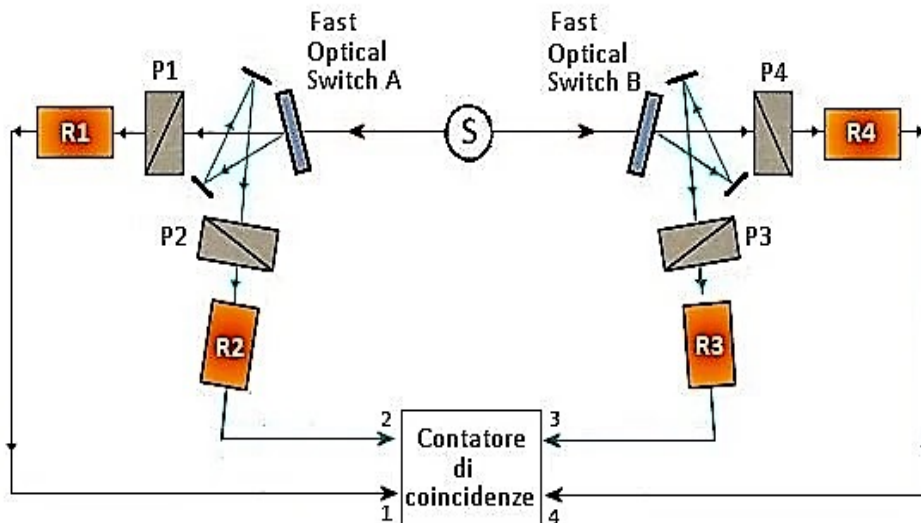
$$S_{\text{expt}} = 2.697 \pm 0.015$$

L'esperimento sulla correlazione quantistica di Aspect dimostra quindi la **violazione della disuguaglianza di Bell**, verificando con altissima probabilità il fenomeno dell'**Entanglement quantistico** e indicando di conseguenza la non validità del principio di località difeso fino alla fine da Einstein.

L'Esperimento di Aspect: la prova dell'Entanglement



Il più importante test della disuguaglianza CHSH venne eseguito dal fisico **Alain Aspect** e dai suoi collaboratori nel **1982**. Invece di usare coppie di particelle di spin 1/2 nello stato di singoletto, Aspect utilizzò **coppie di fotoni** emessi simultaneamente in direzioni opposte da atomi di calcio eccitati, su cui si effettuavano **misure di polarizzazione**. Si trovò un **riscontro perfetto tra i risultati sperimentali e le predizioni della Meccanica Quantistica**. Infatti la combinazione dei coefficienti di correlazione che compare a sinistra nella disuguaglianza CHSH di Bell diede un **risultato ben al di sopra** del valore massimo possibile (cioè 2) consentito dalle teorie a variabili nascoste locali:



$$S_{\text{expt}} = 2.697 \pm 0.015$$

Si noti che il risultato dell'esperimento di Aspect non mette fuori gioco **TUTTE** le teorie a variabili nascoste, ma **SOLO** quelle a variabili nascoste locali. Dunque *le teorie realiste di Bohm (de Broglie-Bohm, Bohm-Vigier, Bohm-Bub) ne escono indenni*, in quanto teorie a variabili nascoste non-locali.

L'Esperimento di Aspect: la prova dell'Entanglement



NOBELPRISET I FYSIK 2022
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Photo: Royal Society

Test
1982

Alain Aspect

Université Paris-Saclay &
École Polytechnique, France

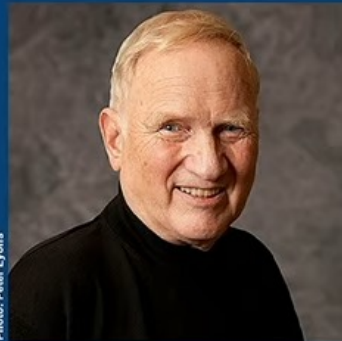


Photo: Peter Lyons

Test
1972

John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
USA



Photo: Sopp Dreislinger

Test
1998

Anton Zeilinger

University of Vienna,
Austria

”för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformationsvetenskap”

“for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science”

#nobelprize

THE
NOBEL
PRIZE

L'Analisi di Clauser

Interpretazione standard: scienza o religione?



Nel 1992, il fisico **John F. Clauser** pubblica un lavoro, *Early History of Bell's Theorem*, in cui **spiega come l'adesione all'interpretazione della MQ di Bohr-von Neumann** (Bohr aveva sconfitto Einstein e von Neumann aveva "dimostrato" con il suo teorema delle variabili nascoste che non c'era alternativa alla MQ standard) **venne accettata dalla comunità scientifica come una religione**, un dogma indiscusso e soprattutto indiscutibile, che si può riassumere nelle seguenti parole usate dallo stesso Clauser:

«Se una teoria è autoconsistente ed elegante, e se spiega un corpus significativo di dati sperimentali che sono incoerenti con le teorie precedentemente sostenute, allora la teoria deve essere accettata come vangelo. Di conseguenza, la teoria non ha bisogno di ulteriori prove, anche in aree in cui le sue previsioni possono sembrare sorprendenti e/o paradossali. [...] Negli anni successivi, la frase 'non ha bisogno di ulteriori prove' è stata reinterpretata nel senso di 'è un sacrilegio persino suggerire che dovrebbero essere eseguiti ulteriori test'. [...] Inoltre, dato l'intelletto spaventoso di von Neumann, la sua prova era considerata sacrosanta, anche per coloro che non ne avevano mai letto i dettagli. Inoltre, poiché i suoi dettagli sono stati esaminati raramente, nel corso del tempo, la dimostrazione di von Neumann è stata comunemente e erroneamente interpretata per implicare che "non è possibile alcuna teoria basata su variabili nascoste che dia le stesse previsioni sperimentali della meccanica quantistica! "»

L'Analisi di Clauser

Interpretazione standard: scienza o religione?



Nel 1992, il fisico **John F. Clauser** pubblica un lavoro, *Early History of Bell's Theorem*, in cui **spiega come l'adesione all'interpretazione della MQ di Bohr-von Neumann** (Bohr aveva sconfitto Einstein e von Neumann aveva "dimostrato" con il suo teorema delle variabili nascoste che non c'era alternativa alla MQ standard) **venne accettata dalla comunità scientifica come una religione**, un dogma indiscusso e soprattutto indiscutibile, che si può riassumere nelle seguenti parole usate dallo stesso Clauser:

«Durante gli anni del dopoguerra, gli Stati Uniti furono rapidamente coinvolti sia nella guerra fredda che in una frenesia anticomunista interna. Spinti dal senatore Joe McCarthy, gli stigmi divennero poi di moda. [...] Così, in linea con i tempi, uno stigma secondario molto potente cominciò a svilupparsi all'interno della comunità fisica verso chiunque criticasse sacrilegamente i fondamenti della teoria quantistica. Lo stigma è sopravvissuto a lungo all'era McCarthy e si è protratto fino agli anni 1970 e 1980. Purtroppo, ha effettivamente tenuto sepolto la maggior parte del disordine lasciato dai fondatori della teoria quantistica, e i fisici hanno rivolto la loro attenzione altrove. L'impatto netto di questo atteggiamento fu che qualsiasi fisico che criticasse apertamente o mettesse seriamente in discussione quei fondamenti (o previsioni) veniva immediatamente etichettato come un "ciarlatano". I ciarlatani naturalmente trovavano difficile trovare un lavoro dignitoso all'interno della professione»

L'Analisi di Clauser

Interpretazione standard: scienza o religione?

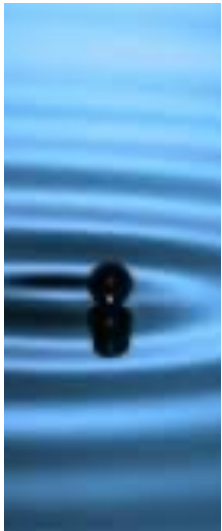


Nel 1992, il fisico **John F. Clauser** pubblica un lavoro, *Early History of Bell's Theorem*, in cui **spiega come l'adesione all'interpretazione della MQ di Bohr-von Neumann** (Bohr aveva sconfitto Einstein e von Neumann aveva "dimostrato" con il suo teorema delle variabili nascoste che non c'era alternativa alla MQ standard) **venne accettata dalla comunità scientifica come una religione**, un dogma indiscusso e soprattutto indiscutibile, che si può riassumere nelle seguenti parole usate dallo stesso Clauser:

«Lo zelo religioso tra i fisici ha provocato un potente proselitismo associato anche negli studenti. Come parte della "saggezza comune" insegnata nei tipici curricula universitari e laureati in fisica, agli studenti veniva semplicemente detto che Bohr aveva ragione e Einstein torto. Quella fu la fine della storia e la fine della discussione. Certo, era la fine, perché i capitoli conclusivi della storia non erano ancora stati scritti. L'alternativa di Bohm e de Broglie [...] non è stata né pensata né citata. Qualsiasi studente che mettesse in dubbio i fondamenti della teoria o, Dio non voglia, considerasse lo studio dei problemi associati come un'attività legittima in fisica, veniva severamente avvisato che così facendo avrebbe rovinato la sua carriera. Mi è stato dato questo consiglio da studente in molte occasioni da molti famosi fisici della mia facoltà alla Columbia e la facoltà di Dick Holt ad Harvard gli ha dato consigli simili.»

Altre Interpretazioni Alternative a quella di Copenaghen

Nonostante il **rischio di «eresia»**, lungo tutto il secolo scorso e in parte anche nel nuovo diversi scienziati si sono comunque cimentati nel proporre **ulteriori possibili interpretazioni alternative della MQ** che, come quelle a variabili nascoste non locali di Bohm et al., cercano di risolvere i principali **problemi che affliggono l'interpretazione standard** (dualismo onda-corpuscolo, problema della misura, collasso della funzione d'onda) mantenendo però inalterate le previsioni (corrette) della teoria ortodossa. Qui le citiamo solamente, in **ordine cronologico** e insieme ai loro sostenitori più o meno dichiarati, rimandando alla bibliografia per ulteriori approfondimenti:



- **Interpretazione statistica** (Einstein, Born, Slater; Prima metà del '900)
- **Interpretazione stocastica SIQM** (Bohm, Vigier, Nelson, Guerra, Kostro,... >1954)
- **Interpretazione a multi-mondi** (Everett III; 1957)
- **Collasso spontaneo o teoria GRW** (Gherardi, Rimini, Weber; 1986)
- **Interpretazione a molte menti** (Albert, Loewer; 1988)
- **Interpretazione relazionale** (Rovelli; 1996)
- **Universi paralleli e Multiverso** (Deutsch; 1997)
- **Qbism o Bayesianismo Quantistico** (Fuchs, Peres, Mermin, Schack; Anni 2000)

Conclusione:

Bohm e l'Ordine Implicito

Per chiudere, come già detto, negli anni Ottanta Bohm spinse alle estreme conseguenze le idee che aveva maturato con la MQ Stocastica teorizzando l'esistenza di un «ordine implicito» (implicate order) che non siamo in grado di percepire ma che è a fondamento dell'«ordine esplicito» osservato in natura e descritto dalle nostre leggi fisiche. Questa visione, che portò avanti con una serie di saggi, scritti e conversazioni filosofiche fino all'anno della sua morte (Londra 1992), ha evidenti punti di contatto con la visione del «vuoto che vuoto non è» che abbiamo ampiamente analizzato in una precedente lezione, ricordando che l'idea generale per cui "la comprensione ultima delle cose che vediamo dipende da qualcosa che non vediamo" non solo è in accordo con la visione moderna di un «etere quantistico» come mezzo sub-quantico ma esprime anche una concezione filosofica ed è anche alla base di tutte le religioni, occidentali e orientali.



Conclusione: Bohm e l'Ordine Implicato

"Ultimately, the entire universe (with all its 'particles', including those constituting human beings, their laboratories, observing instruments, etc.) has to be understood as a single undivided whole, in which analysis into separately and independently existent parts has no fundamental status."

- David Bohm



Bibliografia

Opere selezionate di David Bohm:

1951. *Quantum Theory*, New York: Prentice Hall

1952. *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables, I and II*. *Physical Review*, 85(2), 166e193

1952. *Reply to a criticism of a causal re-interpretation of the quantum theory*. *Physical Review*, 87(2), 389e390.

1957. *Causality and Chance in Modern Physics*, Harper edition

1965. *The Special Theory of Relativity*, New York

1980. *Wholeness and the Implicate Order*, London: Routledge

1985. *The Ending of Time*, with Jiddu Krishnamurti, San Francisco: Harper

1987. *Science, Order, and Creativity*, with F. David Peat. London: Routledge

Pubbligate postume:

1993. *The Undivided Universe: An ontological interpretation of quantum theory*, with B.J. Hiley, London: Routledge

1999. *Limits of Thought: Discussions*, with Jiddu Krishnamurti, London: Routledge

2002. *The Essential David Bohm*. editor Lee Nichol. London: Routledge, preface by the Dalai Lama



Bibliografia

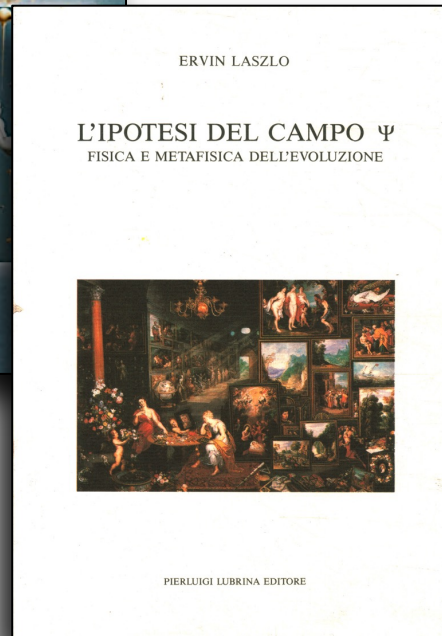
1980-1996



1992-2003

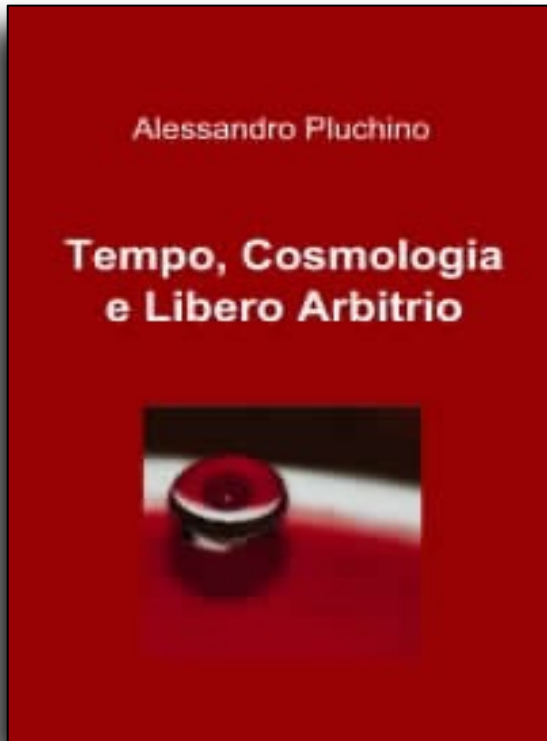


1987



Bibliografia

2011



Saggio semi-divulgativo che si concentra in particolare sulle relazioni tra il problema del Tempo, i nuovi modelli Cosmologici del Multiverso e la nostra sensazione di possedere un Libero Arbitrio, cercando di mostrare come questi tre ambiti, apparentemente distinti tra loro, siano in realtà indissolubilmente legati.

http://www.pluchino.it/NUOVO-SITO-2019/BOOKS_ET_AL/TEMPO_COSMOLOGIA_LI_BEROARBITRIO.pdf

http://www.pluchino.it/NUOVO-SITO-2019/BOOKS_ET_AL.html



Bibliografia

2020



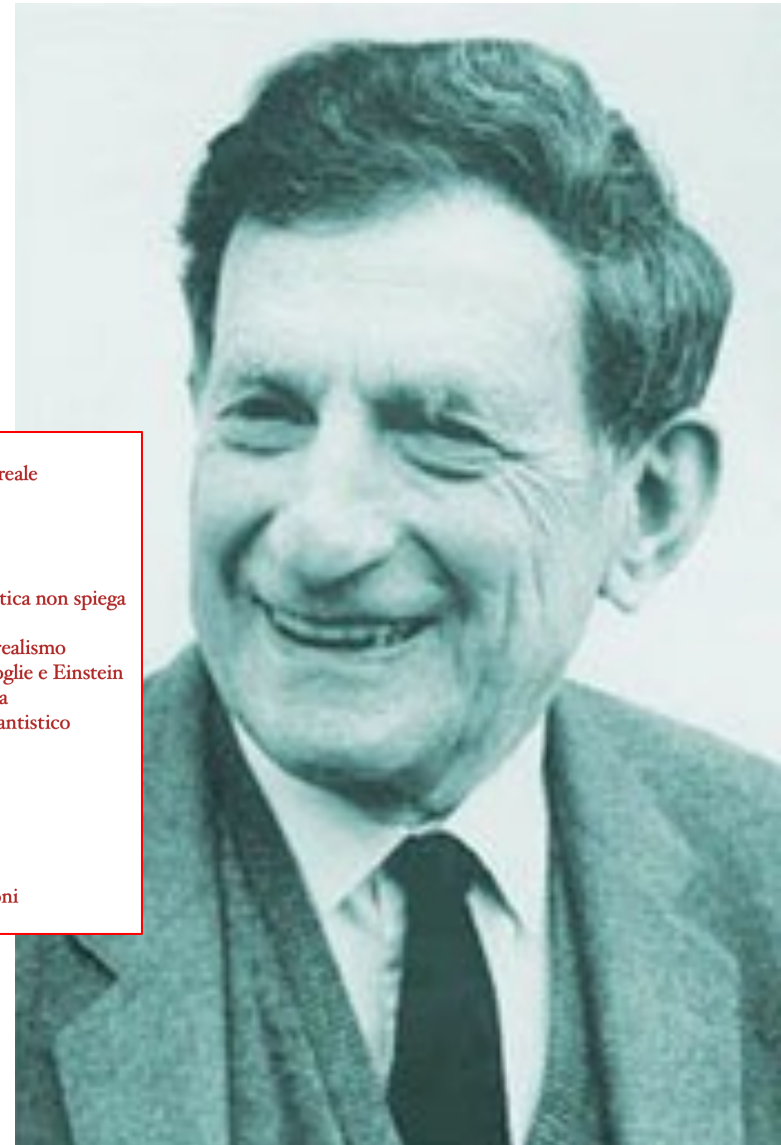
Lee Smolin
**La rivoluzione
incompiuta di Einstein**

La ricerca di ciò che c'è al di là dei quanti

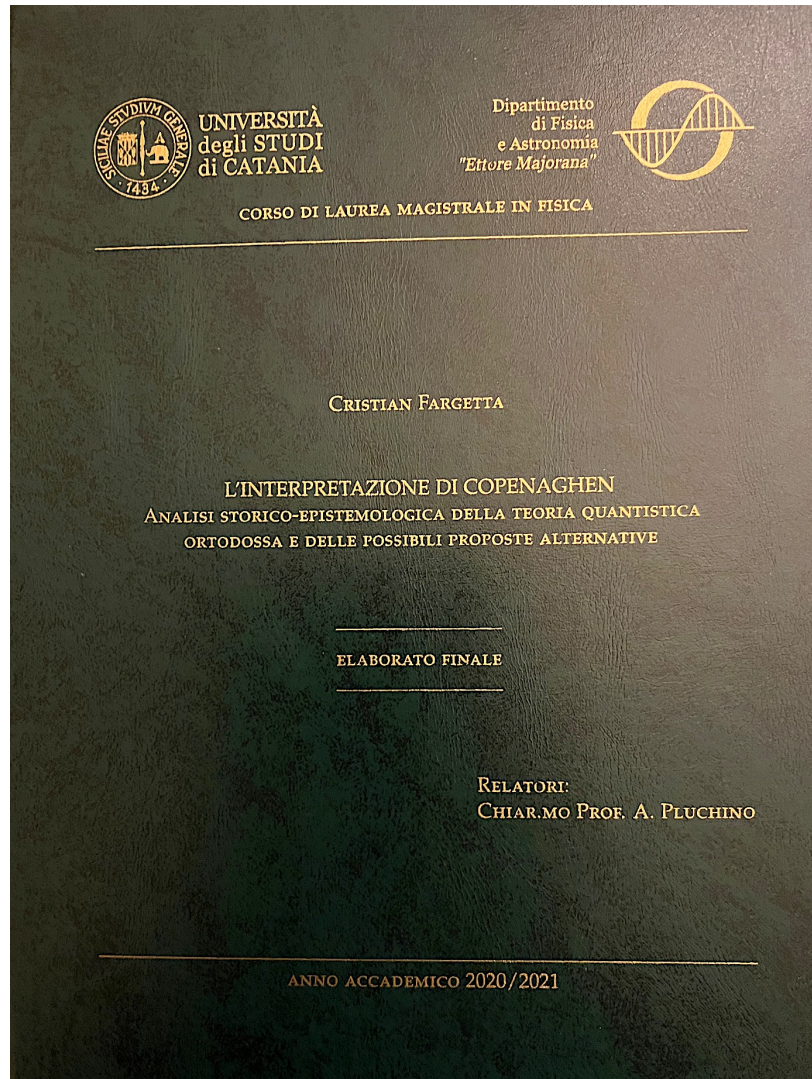


Einaudi

La rivoluzione incompiuta di Einstein
PARTE PRIMA. Un'ortodossia dell'irreale
I. La natura ama nascondersi
II. I quanti
III. Come cambiano i quanti
IV. Stati condivisi
V. Quel che la meccanica quantistica non spiega
VI. Il trionfo dell'antirealismo
PARTE SECONDA. La rinascita del realismo
VII. La sfida del realismo: de Broglie e Einstein
VIII. Bohm: il realismo ci riprova
IX. Collasso fisico dello stato quantistico
X. Realismo magico
XI. Realismo critico
PARTE TERZA. Al di là dei quanti
XII. Alternative alla rivoluzione
XIII. Lezioni
XIV. Partire dai principi
XV. Una teoria causale delle visioni
Epilogo/Rivoluzioni. Nota a me stesso



Bibliografia



Bibliografia

«La storia raccontata da Clauser [sul "dogma" dell'interpretazione di Copenaghen] illustra il fatto, spesso osservato, che nelle società *formalmente* libere, visioni impopolari e opinioni eterodosse possono essere messe a tacere in un modo talvolta più efficace che nelle semplici dittature. Invece di mettere in prigione o nei campi, è sufficiente, per imporre le opinioni dominanti, stigmatizzare i liberi pensatori, censurare pubblicazioni non ortodosse, e rifiutarsi di dare un lavoro a chi non è *in linea*. Naturalmente, tali metodi sono meno spiacevoli per le vittime di quelli più brutali delle dittature, ma ciò non significa che siano meno efficaci. È dimostrato dal fatto che, nonostante non ci sia nessuna prova a dimostrazione che *non possa* esistere una teoria alternativa a quella standard, e considerando diversi problemi concettuali presenti nell'ortodossia di Copenaghen, in molti corsi universitari di fisica quantistica non si parli minimamente di questi aspetti, adottando la *religione* di Copenaghen o, ancor peggio, la sua estremizzazione pragmatica "zitto e calcola". Ad oggi, come abbiamo anticipato, non occorre neanche "zittire" lo studente, in quanto è spesso lasciato all'oscuro di tutti le problematiche inerenti ai fondamenti della meccanica quantistica. Inoltre, gli studenti universitari hanno ormai perso la visione storica della fisica, pensando che le cose siano andate avanti "senza intoppi", ignorando aspetti di enorme rilevanza storica come il teorema di von Neumann ed il dibattito Bohr-Einstein. Se, ai tempi di Clauser, si "raccontava una storia", attualmente non si racconta alcuna storia, dunque si stronca sul nascere la possibilità che lo studente faccia domande sui fondamenti della meccanica quantistica.»

Cristian Fargetta 2021

Tesi di Laurea Magistrale in Fisica, pp.46-47

