



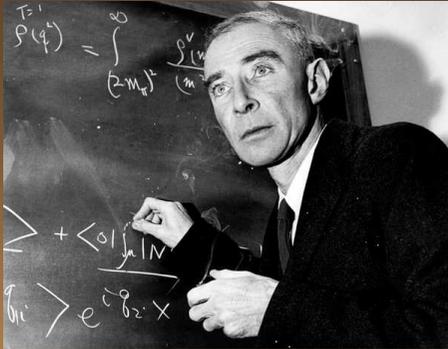
26 novembre 2014

**Museo del Patrimonio Industriale
Fornace Galotti
Bologna**

Corso di formazione per docenti

La fisica dialoga con la filosofia:
una visione della realtà tra Bohm e Krishnamurti
a cura di Gloria Nobili e Cinzia Pipitone

David Bohm e la Meccanica Bohmiana



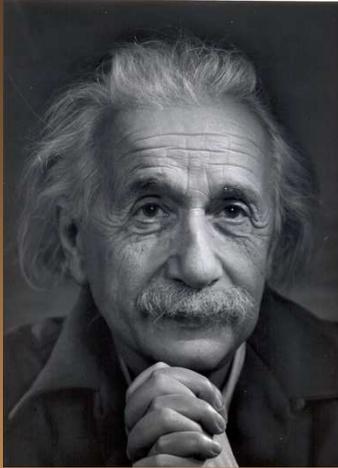
La gioventù



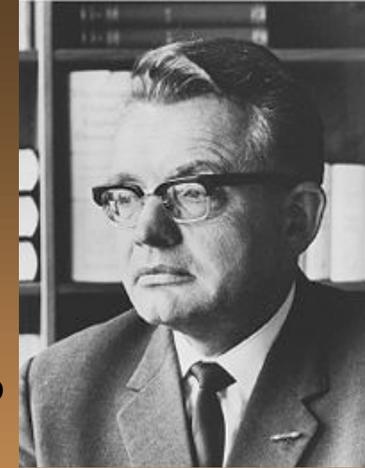
- **1917** (20 dicembre) → nacque a Wilkes-Barre in Pennsylvania figlio di un mobiliere ebreo di origine ungherese. Fin da giovanissimo, mostrò una grande passione per la scienza.
- **1939** → si laureò al *Pennsylvania State College*. Nel frattempo i suoi interessi scientifici si orientarono decisamente verso la meccanica quantistica.
- Alla fine degli anni '30 Bohm e i suoi colleghi credevano in modelli alternativi della società e divennero membri attivi di organizzazioni politiche di sinistra.
- Frequentò successivamente l'Università della California, a *Berkeley*, lavorando sotto la guida di Oppenheimer. Quando nel 1943 quest'ultimo venne nominato direttore del progetto Manhattan, Bohm ne venne escluso per le sue idee politiche.
- **1943** → conseguì comunque il dottorato in fisica teorica e rimase fino al 1947 studiando la teoria dei plasmi
- **Diffusione di Bohm** = instabilità nel plasma quando interagisce con un campo magnetico esterno. Consiste in una rapida perdita di plasma attraverso le linee di forza del campo. (applicazione nei reattori nucleari)

Documento

“Quando due elettroni sono in totale isolamento, l’interazione tra loro si estende su una grande distanza. Ma in un plasma un numero enorme di particelle cariche (10^8 circa) si riarrangia per schermare questa interazione su vasta scala. Come risultato ciascuna delle particelle cariche del plasma interagisce con quelle vicine solo sulle piccole distanze. Ma l’interazione a grande distanza non è svanita. Sono queste interazioni a grande distanza che fanno in modo che il plasma si comporti in maniera coerente. Visto a distanza, un plasma appare essere una serie di oscillazioni collettive che comportano un grandissimo numero di particelle. Esaminate però a grande ingrandimento, risulta visibile solo il moto casuale delle particelle individuali. Quello che Bohm fu in grado di fare fu di creare una descrizione matematica duale del plasma che contenesse entrambi i punti di vista: l’individuale e il collettivo. Poiché le due descrizioni sono parte di un tutto unico, il moto collettivo del tutto è racchiuso dentro il movimento casuale individuale e viceversa... Tecnicamente parlando, Bohm era in questo modo in grado di mostrare perché i plasmi diventano instabili in un campo magnetico esterno.”



Gli anni di Princeton



Hendrik Casimir, fisico olandese (1909-2000)

- **1947** → grazie all'interessamento di Oppenheimer, ottenne un incarico come professore presso la **Princeton University** e si dedicò all'approfondimento sul comportamento degli elettroni nei metalli. I suoi risultati in questo campo, molto innovativi, lo portarono all'attenzione del mondo della fisica di allora per la sua creatività e al contempo per il suo rigore logico.
- A Princeton lavorò a stretto contatto con **Einstein** e discusse con lui sulla teoria della relatività e sulla meccanica quantistica (su cui Einstein nutriva forti dubbi)
- "Oscillazione dei plasmi" → sintesi di Bohm → descrizione matematica duale (coordinate collettive e coordinate individuali una dentro l'altra)
- **1948** → effetto Casimir: dimostrazione che il vuoto quantistico è un oceano di energia!
(Campo del punto zero; densità di energia stimata = 10^{108} J/cm³)
- Il mondo della materia in cui viviamo è solo una transiente cristallizzazione nel mondo tridimensionale e nel tempo di un'energia che proviene non si sa da dove e che governa l'intero universo e la vita stessa in esso.

Effetto Casimir (1947)

- Due lamine metalliche parallele, poste a distanza di pochi nm l'una dall'altra. Poiché la materia è una forma di energia, coppie di particelle-antiparticelle («particelle virtuali») possono apparire brevemente dal 'nulla' per poi scomparire rapidamente.
- Nello spazio tra le due lamine dal vuoto quantico possono emergere fotoni 'virtuali' che rimbalzano sulle pareti altamente riflettenti delle lamine. Ciò provoca un... avvicinamento delle lamine! Perché?
- Solo fotoni di una certa lunghezza d'onda possono stare alla perfezione nello spazio interposto (vibrazioni di una corda fissata ed entrambi gli estremi → onde stazionarie) per cui c'è meno densità di fotoni tra le lamine che fuori da esse → pressione dall'esterno!
- Verifica di fluttuazioni quantistiche del vuoto.

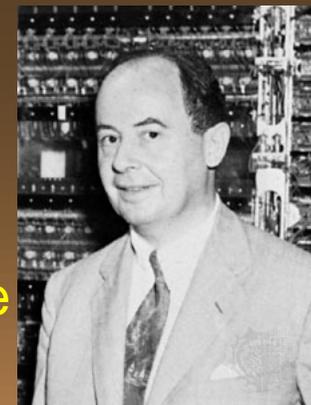
Documento

“Lo spazio non è vuoto. E’ pieno, è un plenum in opposizione al vuoto assoluto ed è il terreno che permette l’esistenza di ogni cosa, inclusi noi stessi. L’universo non è separato da questo mare cosmico di energia; è un’increspatura sulla sua superficie, una specie di “area di eccitazione” nel mezzo di un oceano incomparabilmente vasto. Questa area di eccitazione è relativamente autonoma e dà luogo a proiezioni approssimativamente ricorrenti, stabili e separabili in un ordine di manifestazione tridimensionale.”

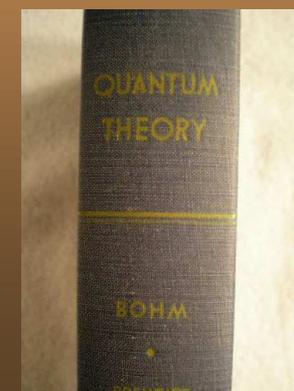
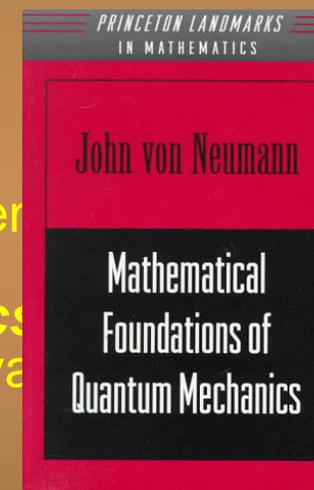
D. Peat; *Infinite Potential: The Life and Times of David Bohm*, 1996, Perseus Books

Gli anni 'difficili'

- **1950** → Commissione parlamentare sulle attività antiamericane a testimoniare sulle sue attività politiche, nell'ambito della "caccia alle streghe" promossa dal senatore McCarthy. Essendosi rifiutato di rispondere venne temporaneamente arrestato nel novembre 1949 e nel giugno 1950 dovette abbandonare Princeton, nonostante il fermo appoggio di colleghi ed amici, tra cui lo stesso Einstein.
- **1951 (febbraio)** → pubblicò "Quantum Theory", una delle descrizioni più approfondite dell'interpretazione di Copenhagen dopo il testo- bibbia del matematico ungherese John von Neumann " *Mathematical Foundation of Quantum Mechanics* del 1931. Pur rimanendo aderente al modello canonico, poneva in luce gli aspetti rimasti oscuri (Es:collasso della funzione d'onda). La sua trattazione aveva il merito di essere relativamente semplice e di non usare un formalismo matematico eccessivamente sofisticato.
- E da qui iniziò la sua ricerca di un'interpretazione della meccanica quantistica diversa da quella classica: **portare le conclusioni della MQ su un piano razionale e deterministico!** (superare *empasse* della Fisica nel riconoscere l'impossibilità di trattare gli oggetti della meccanica quantistica in maniera causale e deterministica).

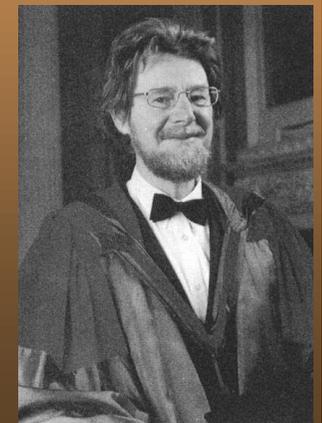
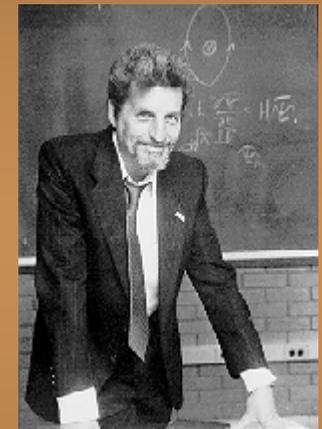


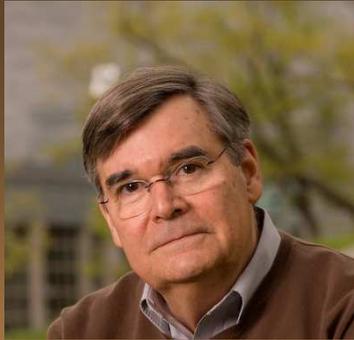
John von Neumann
1903 - 1957



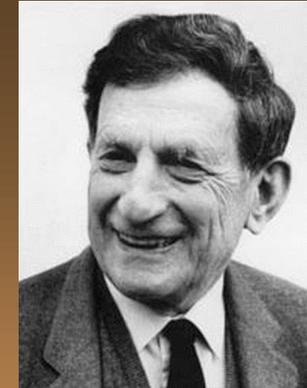
Gli anni 'da migrante'

- **1951 (Ottobre)** → partì alla volta del Brasile e dell'Università di San Paolo dove approfondì i suoi studi sui plasmi.
- 1952 → riformulazione dell'esperimento EPR
- **1955** → fu poi in Israele (*Technion Institute di Haifa*) qui conobbe la donna che sposò, Sarah Woolfson, e che rimase con lui per tutta la vita.
- **1957** → Con il suo studente Yakir Aharonov (1932) pubblicò una nuova versione del paradosso EPR (formulato da Einstein nel 1935 per dimostrare l'inconsistenza della meccanica quantistica: nessun segnale o info può viaggiare più veloce della luce!),
- Fu questa la forma che venne ripresa e discussa da John S. Bell (1928 -1990) nel suo famoso teorema del 1964: il livello di correlazione che si trova nell'ambito della meccanica quantistica è maggiore che in qualsiasi altro ambito che dipenda da variabili nascoste e dalla località.





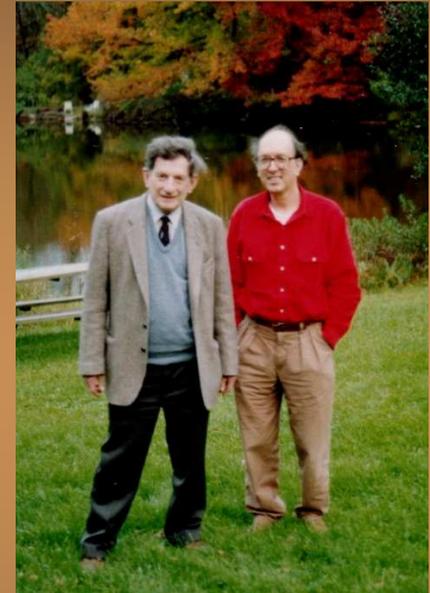
Gli anni 'inglesi'



- **1957** → si stabilì in Gran Bretagna all'università di Bristol.
- **1959** → effetto Aharonov-Bohm = gli elettroni sono in grado di “sentire” (= alterazione della sua funzione d'onda) la presenza di un campo magnetico vicino anche se essi stanno viaggiando in regioni di spazio dove la forza di campo magnetico è zero. Ciò mostrò per la prima volta che il vettore potenziale magnetico, che fino ad allora era solo una convenzione matematica, poteva avere un reale effetto fisico (quantistico).
- **1959** → inizio dei 'dialoghi' con il filosofo Jiddu Krishnamurti (1895-1986)
- **1961** → al **Birbeck College** (Università di Londra) come professore di fisica teorica, dove rimase fino al suo ritiro nel 1987 e dove sviluppò le sue idee. Qui incontrò il matematico-fisico **Basil Hiley** (1935) che collaborò con lui per dare una base matematica alle teorie ed intuizioni di Bohm. Il lavoro di Bohm e Hiley ebbe come principale obiettivo quello di fornire una **descrizione matematica di sistemi quantistici che fossero imperniati sull'idea di un 'ordine implicato'**
- **1979** → l'effetto Aharonov–Bohm aveva trovato recente conferma sperimentale.
- Bohm e Hiley fornirono un nuovo modo di comprensione della non-località, del processo di misura e dell'entanglement quantistico.

Gli anni della 'riflessione'

- Bohm e Hiley mostrarono come nel modello di Bohm, introducendo il concetto di **'informazione attiva'**, il problema della misura e del collasso della funzione d'onda può essere compreso grazie all'approccio al potenziale quantico e che questo approccio può essere esteso alle teorie del campo quantistico relativistico.
- **Il collasso della funzione d'onda dell'interpretazione di Copenhagen viene spiegato dal fatto che tutti i pacchetti della funzione d'onda multidimensionale che non corrispondono al risultato reale della misura non hanno effetto sulla particella.**
- Negli ultimi anni della sua vita fu colpito da una forte depressione, disturbo di cui aveva già sofferto da giovane.
- Morì di attacco cardiaco il 27.10.1992, mentre era su un taxi che lo riportava a casa dall'ufficio, dopo poche ore che aveva telefonato alla moglie dicendole che aveva avuto una improvvisa 'illuminazione' sulla sua teoria!

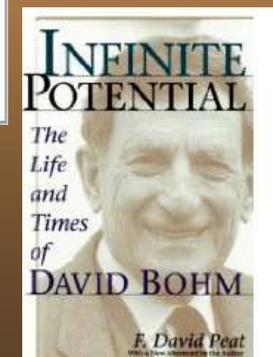
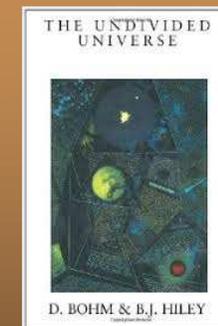
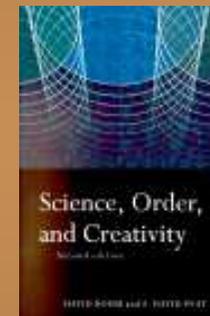
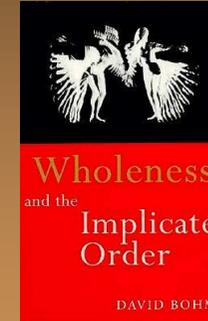


David Bohm con
David Peat (1938)



I testi più recenti

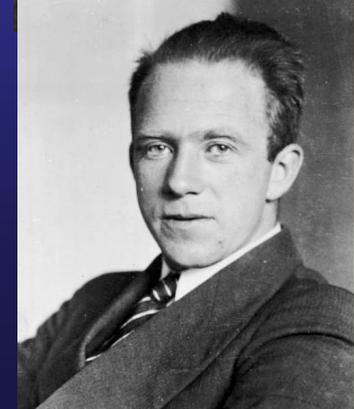
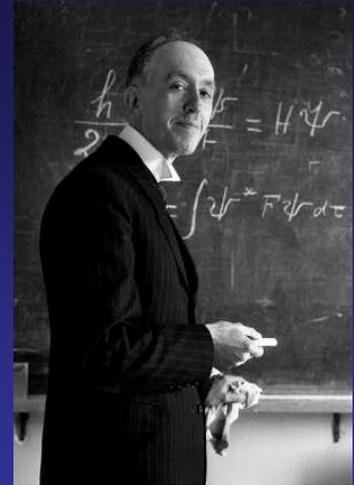
- ***Wholeness and the Implicate Order*** (1980)
- ***Science, Order and Creativity*** (1987)
scritto con David Peat
- ***The Undivided Universe*** (1993)
scritto con Basil Hiley
- ***Infinite potential*** (1997)
scritto da David Peat



Le variabili 'nascoste'

- L'impostazione teorica delle v.n. ha una lunga storia (es: corretta spiegazione delle leggi dei gas tramite la teoria cinetica delle loro molecole)
- Einstein sosteneva che la teoria quantistica fosse incompleta (per non aver colto l'esistenza di v.n.): "o la meccanica quantistica è sbagliata oppure le particelle devono rispondere a delle '**variabili nascoste**' che devono essere scovate."
- Fenomeni che apparivano probabilistici, avrebbero potuto rivelarsi deterministici grazie alle v.n. e le particelle avrebbero potuto avere velocità e posizione definite in ogni istante.
- Bohm cominciò a sviluppare la propria interpretazione nel 1952 (detta **teoria di De Broglie-Bohm**), riprendendo l'idea della cosiddetta *onda pilota* che Louis de Broglie (1892 – 1987) aveva elaborato nella sua tesi di laurea del 1925.
- Le orbite quantistiche dovevano contenere un numero intero di queste onde ($\lambda = h/mv$ con $mv=p$); gli elettroni da laboratorio, di pochi kv, avrebbero avuto $\lambda \sim 10^{-8}$ cm cioè dello stesso ordine dei raggi X. La diffrazione dei raggi X mediante elettroni eseguita nel 1927 da Davisson e Germer (americani) confermò le ipotesi di De Broglie.

- Negli anni '50 Bohm fece ricorso a una teoria delle variabili nascoste.
- Data la fama di matematico di von Neumann, la maggior parte dei fisici si limitò a dare per scontato che le avesse messe al bando e quindi nessuno se ne occupò.
- Quando Bohm dimostrò che esisteva un'alternativa che forniva le medesime predizioni della MQ, l'interpretazione di Copenhagen era talmente affermata come unica interpretazione che fu ignorato, se non attaccato.
- Wolfgang Pauli (1900-1958) ed Heisenberg (1901-1976) stigmatizzarono l'alternativa delle variabili nascoste di Bohm come "metafisica" ed "ideologica".
- Negli anni '60 e '70, in collaborazione con Basil Hiley, Bohm si rese conto che l'interpretazione in termini di variabili nascoste era troppo restrittiva per cui passò ad una **teoria ontologica (relativa a ciò che esiste)** e causale, evitando di introdurre il concetto di collasso della funzione d'onda.



La meccanica Bohmiana

- L'interpretazione di Bohm trae spunto dall'interferenza di **elettroni** nell'esperimento della doppia fenditura, che Bohm e de Broglie interpretarono come fenomeno quantistico per il quale ogni tipo di particella è associata a un'onda che ne guida il moto (da cui il termine *onda pilota*) e che è responsabile del fenomeno di interferenza osservato.
- Per esprimere matematicamente tale onda pilota, Bohm riformulò la classica funzione d'onda della meccanica quantistica (equazione di Schrodinger riferita all'elettrone), in cui compare un nuovo termine (variabile nascosta ?) che rende conto dell'influenza dell'onda sul moto della particella, da lui chiamato "**potenziale quantico**"
- → **trasformazione della MQ da teoria probabilistica a teoria deterministica.**
- **Potenziale quantico** = portatore di informazione dal vuoto quantistico (oceano d'energia; campo di punto zero) e fornitore di connessioni non-locali tra i sistemi quantistici. Guida l'elettrone in una traiettoria precisa e potenzialmente determinabile.

Documento

“A differenza di quello che succede con i potenziali elettrico e magnetico, il potenziale quantico dipende solo dalla forma dell'onda. Ciò significa che anche quando questo potenziale è debole esso può influenzare fortemente la particella. E' come se noi avessimo un'onda di un lago in grado di far sobbalzare un tappo di sughero che galleggia nell'acqua, anche quando esso è lontano dalla sorgente dell'onda. Questo concetto è chiaramente differente dalle vecchie idee newtoniane perché implica che anche caratteristiche distanti dell'ambiente possono influenzare le singole particelle”

David Bohm

1990, "A new theory of the relationship of mind and matter"

L'equazione di Schrödinger in tre dimensioni

- Equazione di Schrödinger in una dimensione:

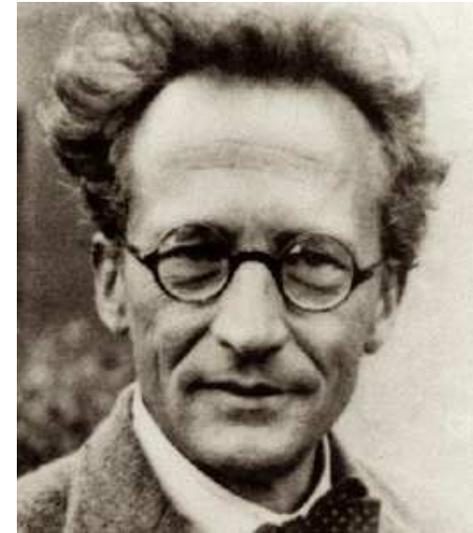
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x) \Psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t}$$

la naturale estensione dell'equazione di Schrödinger in tre dimensioni è:

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

in forma compatta:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + U(\vec{r}) \Psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad \text{dove} \quad \nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$



Equazione di Schrödinger → Bohm

- La matematica era il mezzo per esplicitare le profonde intuizioni sulla realtà della fisica.
- Attenzione alle implicazioni dei concetti fisici, piuttosto che passare pragmaticamente alla soluzione
- Non entrare nell'illusione di possedere l'universo solo perché le equazioni forniscono soluzioni soddisfacenti!

Equazione di Schrödinger nella forma non relativistica:

$$(1) \quad i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t)}{\partial t} = \sum_i \frac{-\hbar^2}{2m_i} \nabla_i^2 \psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t) + V(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots) \psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t)$$

La funzione d'onda ? è legata alla densità di probabilità ? :

$$\rho(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t) = R(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t)^2 = |\psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t)|^2 = \psi^*(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t) \psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t)$$

Se introduciamo la variabile reale $S = \mathbf{p}\mathbf{x} - (\mathbf{p}^2/2m)t$, possiamo riscrivere la funzione d'onda:

$$\psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t) = \sqrt{\rho} e^{iS(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, t)/\hbar}$$

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \sum_i \nabla_i \cdot \left(\rho \frac{\nabla_i S}{m_i} \right)$$

inoltre essendo - $\nabla S = \mathbf{p}$ e - $\partial S/\partial t = E$, sostituendo nella (1), si ottengono due equazioni accoppiate (**eq di Schrödinger 'sdoppiata'**) di cui la prima esprime la probabilità e la seconda l'energia posseduta dall'elettrone. In questo modo l'energia totale è composta di 3 parti → en. pot. V + en. Cinetica + un 'quid' Q

POTENZIALE QUANTICO

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = V - Q - \sum_i \frac{1}{2m_i} (\nabla_i S)^2 \quad Q = - \sum_i \frac{\hbar^2}{2m_i} \frac{\nabla_i^2 R}{R} = - \sum_i \frac{\hbar^2}{2m_i} \left(\frac{\nabla_i^2 \rho}{2\rho} - \left(\frac{\nabla_i \rho}{2\rho} \right)^2 \right)$$

Potenziale quantico

- Termine che descrive qualcosa di simile ad un'onda (tipo onda pilota) che fornisce informazione all' e^- mantenendolo connesso con il resto dell'Universo
- Non dipende dalla distanza, ma solo dalla "forma" dell'onda associata!
- Campo di informazione in cui l' e^- è qualcosa di ben definito, seppure in continua trasformazione
- Responsabile della dualità onda-particella
- Responsabile degli effetti non-locali

Conseguenze:

- Realtà con 'due facce': 1) le **forze** che governano la materia (mondo macroscopico); 2) il **campo di forma** (apparato guida) che fornisce le informazioni alla materia su come comportarsi.
- **Mondo macroscopico** → tempo e spazio → 'località'
- **Mondo microscopico** → informazione → 'non-località'
- L'informazione sta in una specie di '**prespazio**', un **ordine** che esiste sotto il livello delle particelle elementari e in cui non c'è distinzione tra spazio, tempo e materia.

Ordine implicato/ordine esplicito

- **Implicate order** (ordine implicato/implicito) e **explicate order** (ordine esplicito/esplicito)) sono concetti conati da Bohm per descrivere due differenti strutture che servono per comprendere lo stesso fenomeno o aspetto della realtà caratterizzato da differenti fattori, in differenti contesti così come in differenti scale a seconda del punto di vista
- ***“Non sono arrivato a questo ordine implicato fino agli anni sessanta, quando mi sono interessato alla nozione di ordine. Ho realizzato che il problema è che le coordinate sono ancora l’ordine basilare in fisica, mentre tutto il resto è cambiato.”***
- L’ordine implicato, anche detto ordine “enfolded”(avvolto, ripiegato), è visto come un più profondo e fondamentale ordine di realtà (esistenza). Al contrario, l’ordine esplicito o “unfolded“ (spiegato, rivelato, svelato) include le astrazioni («abstraction = separazione, estrazione) che gli umani percepiscono normalmente come oggetti reali.
- Egli scrive:
- ***“Nell’ordine implicato (“enfolded”), spazio e tempo non sono più i fattori dominanti che determinano le relazioni di dipendenza o indipendenza di elementi differenti. Piuttosto è possibile una sorta completamente differente di connessione di base di elementi, da cui le nostre nozioni ordinarie di spazio e tempo, insieme a quelle di particelle materiali esistenti separatamente, sono estratte come forme derivate dall’ordine più profondo. Queste nozioni ordinarie infatti appaiono in ciò che è chiamato ordine esplicito (“unfolded“), che è una forma speciale e distinta contenuta all’interno della totalità generale di tutti gli ordini implicati.”***

David Bohm, 1980

Documento

- « Propongo una nuova nozione di informazione attiva che gioca un ruolo chiave. Prendiamo la parola informazione nel suo significato letterale: 'dare una forma a'. Il potenziale quantico agisce per dare forma al moto dell'elettrone e questa forma è connessa alla forma dell'onda da cui deriva il potenziale quantico. L'informazione nel livello quantistico è potenzialmente attiva in ogni luogo, ma realmente attiva solo dove è la particella.»
- «Il modo essenziale di relazione è la partecipazione, usata nei suoi due significati di base: 'avere qualcosa di' e 'prendere parte a'. Attraverso l'attività dell'informazione, ogni parte prende parte al tutto e in ogni parte. Ed è in questo tipo di attività che il contenuto dei livelli più sottili ed implicati è esplicito (ad es: il movimento di una particella esplica il significato dell'informazione che è implicito nel campo quantistico.)

David Bohm

(1990, "[A new theory of the relationship of mind and matter](#)")

Paradosso EPR

- La proprietà quantistica presa in esame da Bohm è una sola (e non due!) : lo **spin quantistico**. **Si parte da una particella a spin zero che si scinde producendo due particelle (elettroni) A e B**. Per la legge di conservazione dello spin, A e B devono avere spin opposti. (Secondo l'interpretazione di Copenhagen qualsiasi entità quantistica che abbia possibilità di scelta esiste in una sovrapposizione di stati finché non viene misurata). Dopo che A e B sono abbastanza distanti da escludere qualunque interazione fisica tra essi, si misura lo spin di entrambi nello stesso istante. E' solo a quel punto che avviene il 'collasso della funzione d'onda' in seguito al quale viene fissata una delle due possibilità. Nel preciso istante in cui avviene la misurazione su A, la funzione d'onda di B deve collassare nello stato opposto, istantaneamente.
- Bohm → 2 spin 'correlati'/entangled (secondo Bell questa correlazione quantistica perfetta tra le due misurazioni non ha nulla di strano!)
- Einstein → 'azione fantasma a distanza'

La questione secondo Einstein

- Einstein aveva spiegato le correlazioni degli spin affermando che gli elettroni possiedono valori definiti di spin in ciascuna delle 3 direzioni (x,y,z) sia che questi vengano misurati o no. Queste correlazioni mostravano semplicemente che i fisici teorici erano stati frettolosi nel liquidare la realtà del mondo microscopico.
- Siccome gli stati di spin preesistenti alla misurazione della coppia di elettroni non possono trovare posto nella meccanica quantistica (secondo Bohr finché non viene compiuta una misurazione né l'elettrone A né l'elettrone B hanno uno spin preesistente in nessuna direzione), ciò portava Einstein a concludere che la teoria era incompleta (non era una descrizione completa della realtà fisica)
- Einstein credeva in un «**realismo locale**»; cioè che una particella non può essere influenzata in modo istantaneo da un evento lontano e che le sue proprietà esistono indipendentemente da qualsiasi misurazione.
- Secondo il teorema di Bell è possibile distinguere se un fenomeno è locale (quindi classico) oppure no (quindi non classico, entangled) grazie a una disuguaglianza matematica che coinvolge la somma dei risultati possibili di un esperimento. Se i valori misurati negli esperimenti rispettano la disuguaglianza, “vince” la località, se invece la violano, ha la meglio la non località.

La questione secondo Bell

- E' molto facile per un teorico immaginare un esperimento che realizzarlo! Infatti la disputa tra Einstein e Bohr sulla corretta interpretazione della meccanica quantistica era più di pertinenza della filosofia che della fisica.
- Nel 1969 John Clauser (1942) aveva escogitato un exp per verificare la disuguaglianza di Bell: utilizzare **coppie di fotoni** (la loro polarizzazione sostituiva lo spin dell'elettrone) dato che erano più facili da produrre in laboratorio e si sarebbero dovute fare molte misurazioni di coppie di essi. Insieme al collega Stuart Freedman, riscaldavano atomi di calcio fino a far compiere un salto quantico all'elettrone più esterno. Quando ritornava allo stato fondamentale, lo faceva in due fasi emettendo una coppia di fotoni entangled, uno verde e l'altro blu. Dopo 200 ore di misurazioni, il livello di correlazioni violava la disuguaglianza di Bell!
- C'era un problema: l'inadeguatezza dei rivelatori (funzionavano solo in una piccola frazione delle coppie generate)
- Nel 1979 Alain Aspect (1947) era ancora studente quando incontrò Bell, a Ginevra. Nel 1982, utilizzando le più recenti innovazioni tecnologiche, come laser e computer, misurò la correlazione delle polarizzazioni di coppie di fotoni che misero in luce «la più rilevante violazione della disuguaglianza di Bell»!
- Tuttavia Bell era convinto che la teoria quantistica fosse solo un espediente temporaneo, destinato ad essere sostituito da una teoria migliore.

Paradosso EPR secondo Bohm

- Secondo l'interpretazione 'classica', quando due particelle sono 'entangled' in realtà non ci sono due funzioni d'onda che ne descrivono i rispettivi stati, ma una sola funzione d'onda, che collassa in simultanea per entrambe le particelle nel momento in cui ne osserviamo una.
- Ovviamente questo non solo viola il principio di causalità ma ingenera un meccanismo che apparentemente determina la propagazione istantanea di segnali (non-località). Ciò fa sorgere una domanda: come fa la seconda particella a sapere istantaneamente quello che è successo alla prima?
- Ma si tratta davvero di segnali superluminali oppure è come se le due particelle non fossero per nulla separate dallo spazio?
- Secondo Bohm, non si tratta di segnali superluminali, ma semplicemente una conseguenza della struttura più intima dell'Universo, dove tutto esiste strettamente connesso al di là dello spazio e del tempo.
- E ciò avviene grazie all'azione del Potenziale Quantico.

Test esperimento EPR

- Il primo test valido venne effettuato all'inizio degli **anni '70** a Berkeley utilizzando la **polarizzazione di due fotoni 'entangled'** (E' possibile stimolare un atomo a produrre simultaneamente due fotoni che si dirigono in direzioni diverse e con polarizzazioni opposte (principio di conservazione)).
- Scopo: **dimostrarne l'inconsistenza!!!**
- **1982** → conferma sperimentale della coerenza dall'equipe francese di **Alain Aspect**
- **2007** → Anton Zeilinger (Università di Vienna) → coppie di fotoni entangled a 144 km uno dall'altro, precisamente alle Canarie: dall'isola di La Palma fino a Tenerife!
- **Conseguenze:** le informazioni possono essere istantanee → Viviamo in un **mondo non-locale!** → Non c'è bisogno del collasso della funzione d'onda!!!!



Non - località

- Trascende i limiti dello spazio e del tempo
- Non può essere spiegata sulla base di un campo convenzionale di una forza (non dipende dalla distanza)
- Necessita un nuovo modo di pensare e percepire la realtà
- **Secondo Bohm**, le particelle subatomiche restano in contatto indipendentemente dalla distanza perché la loro separazione è ... un'illusione! Le particelle non sono entità individuali, ma manifestazioni di uno stesso "ente" fondamentale (*Logos*) sottostante tutta la Realtà situato in una sorta di **pre-spazio**, a causa di ciò parti distanti dell'ambiente possono influenzare il moto di una particella in modo significativo
- Necessita la creazione di un nuovo linguaggio (anche matematico-formale) in cui possa essere espressa.
- Con l'aiuto di Hiley, Bohm indagò le proprietà degli **spazi topologici** (le relazioni della topologia algebrica erano più adatte che non le posizioni spazio-temporali cartesiane) e in particolar modo la coomologia (non usa numeri, ma semplici simboli)
- E fu proprio alla descrizione formale di questo pre-spazio, in cui tutto esiste a livello potenziale, che Bohm dedicò l'ultima parte della sua vita. Tuttavia emersero difficoltà tecniche enormi, specie nel tentativo di far rientrare anche la relatività generale.

Documento

“In meccanica classica, il movimento, o velocità, viene definito come la relazione tra la posizione di adesso e la posizione di un attimo fa. Ciò che era un momento fa se ne è andato, per cui si mette in relazione ciò che è con ciò che non è. Questo non è un concetto logico. Nell'ordine implicato dove opera il potenziale quantico si mettono in relazione differenti stati che sono presenti assieme nel 'prespazio'.
Si relaziona ciò che è con ciò che è”

David Bohm

(da un'intervista del 1987)

Superamento dualità onda - corpuscolo

- Nel suo moto l'elettrone è influenzato dal potenziale quantico che è determinato dall'onda pilota che in generale precede la particella
- L'elettrone può essere considerato come un'entità dinamica, cioè come un'onda che collassa e appare come particella e che poi si riespande verso l'esterno fino a riapparire come un'onda.
- Processo dinamico che avviene miliardi di volte al secondo per cui permette la connessione costante tra il micro mondo e il macro mondo.
- Metafora del 'vortice' nel lavandino.
(il vortice esiste solo come forma momentanea!)



Documento

“La fisica classica dice che la realtà è effettivamente costituita da piccole particelle che separano il mondo nei suoi elementi indipendenti. Adesso sto proponendo il contrario e cioè che la realtà fondamentale è un processo di chiusura e di apertura e queste particelle sono solo astrazioni di questo processo. Noi potremmo immaginarci l'elettrone non come una particella che esiste in continuazione, ma come qualcosa che entra e che esce e che rientra di nuovo. Se queste condensazioni sono molto vicine nel tempo, esse possono approssimare una traccia.

L'elettrone stesso non può mai essere separato dalla totalità dello spazio, che è il suo terreno”

David Bohm, 1987

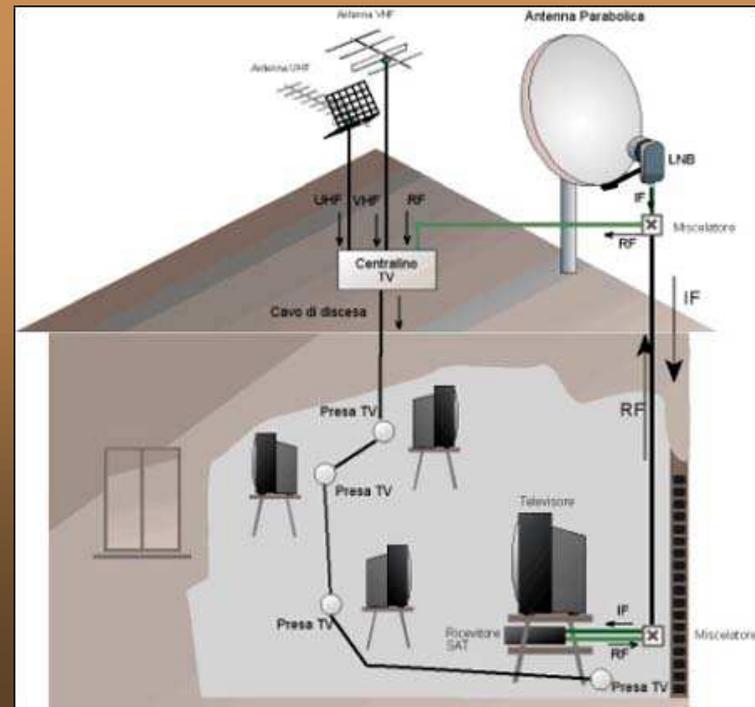
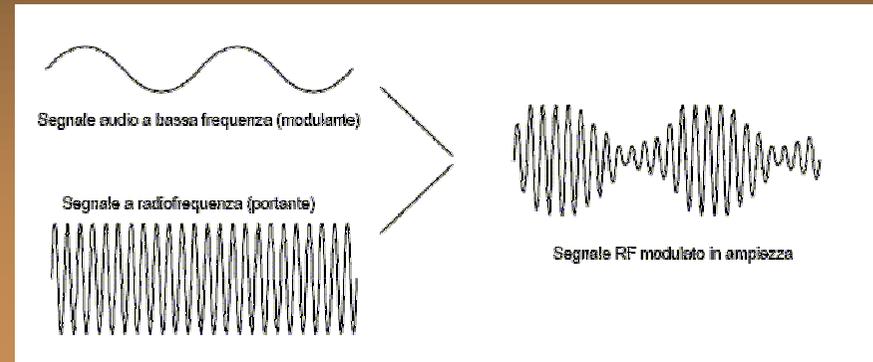
La metafora della nave

- L'elettrone potrebbe essere rappresentato come una nave con pilota automatico dotata di motori e di radar.
- I motori rappresentano l'interpretazione classica mentre il radar rappresenta il potenziale quantico di Bohm.
- La potenza dei motori spinge la nave; la rotta viene seguita grazie al radar che riceve onde (informazioni attive) che danno forma al movimento della nave secondo la rotta
- L'energia del radar è debole rispetto a quella dei motori
- Il **potenziale quantico** è dunque un'energia debole e informata (segnale radio) in grado di dare forma ad un'energia 'grezza' non informata (motori).



La metafora della Rai-TV

- La forma delle onde radio di una radiotrasmissione possono trasportare la forma della musica o di un discorso. L'energia del suono che udiamo viene dall'energia relativamente senza forma dei cavi, ma la sua forma viene dalla forma dell'onda radio (→ordine implicato).
- Gli apparati di riproduzione rappresentano l'ordine implicato (guida invisibile), mentre il suono o la voce che udiamo, come l'immagine che si forma sullo schermo TV, è l'ordine esplicito.



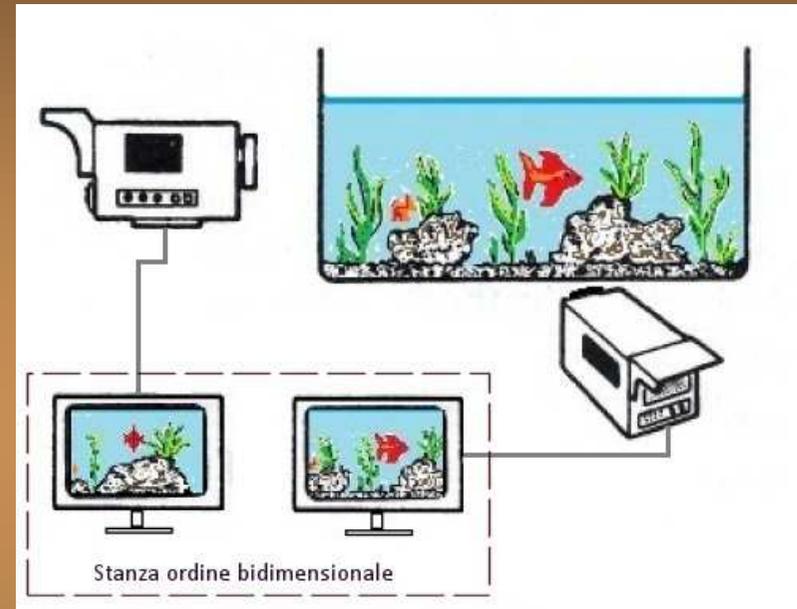
La metafora del foglio di carta

- Prendiamo un foglio di carta e lo ripieghiamo a metà più volte.
 - Praticiamo un solo intaglio (ordine implicato); al dispiegamento del foglio compaiono più elementi distinti (ordine esplicito).
 - *implicare = piegare verso l'interno*
 - *esplicare = piegare verso l'esterno*
- 2 oggetti distinti nell'ordine esplicito potrebbero essere un singolo oggetto nell'ordine implicato (ciò potrebbe giustificare l'esistenza di una connessione non-locale)

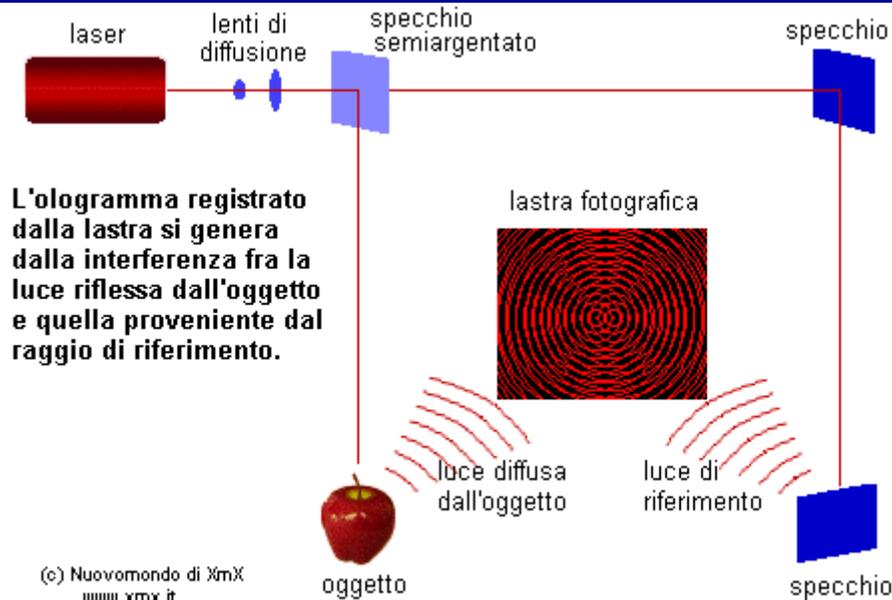


La metafora dell'acquario

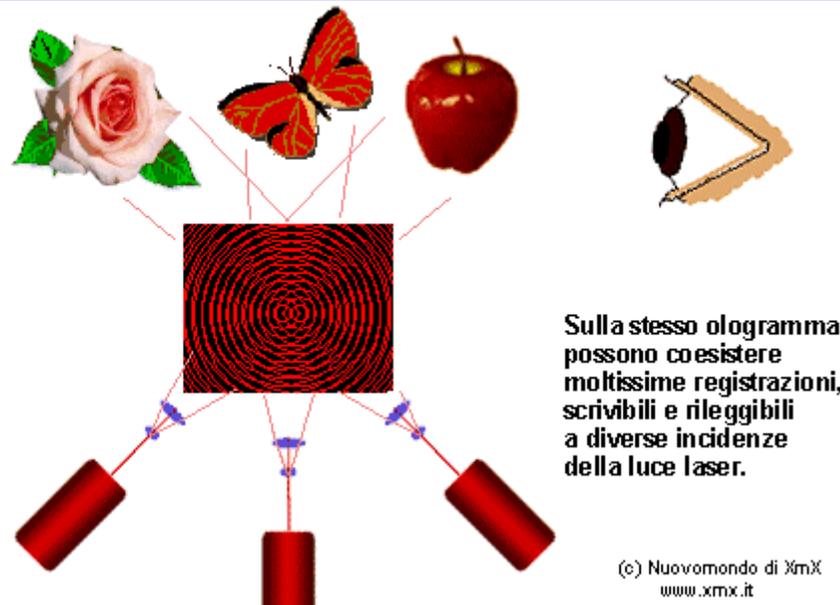
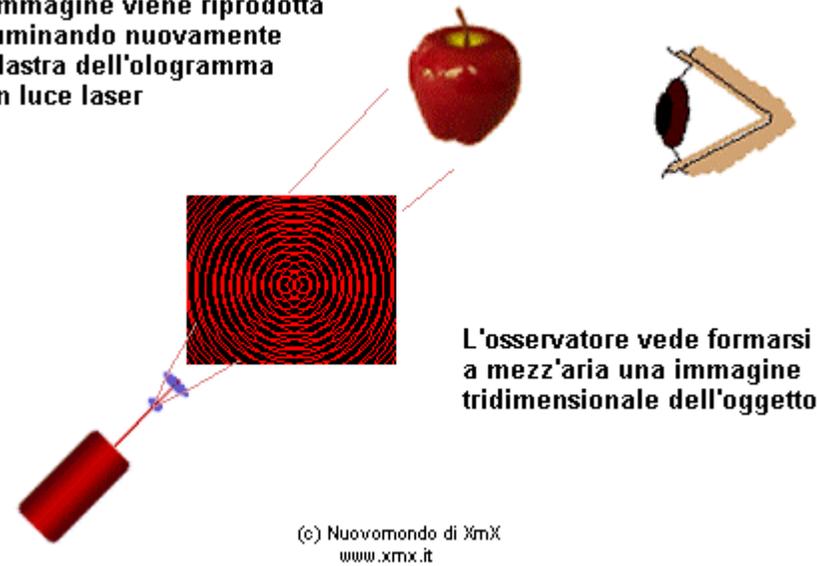
- Un pesce è in un acquario, ma non è possibile vederlo direttamente.
- Ci sono due telecamere poste a 90° una dall'altra che inviano le immagini su due monitor distinti.
- Un osservatore, guardando solo nei monitor, in un primo momento potrebbe pensare che le due immagini siano di pesci diversi.
- Tuttavia, continuando a guardare, noterà che i movimenti dei due pesci sono correlati e i mutamenti di movimento e di forma avvengono simultaneamente.
Cosa può pensare?
- Frammentazione, separazione, spazio e tempo sono un'illusione nata dalla nostra limitata 'percezione' della realtà!



Tecnica olografica



L'immagine viene riprodotta illuminando nuovamente la lastra dell'ologramma con luce laser



Metafora dell'olografia

- *Ordine esplicito* → fotografia convenzionale (chiara corrispondenza tra oggetto reale e la sua immagine; un pezzo ha informazioni relative solo a ciò che contiene)
- *Ordine implicito* → olografia/ologramma (anche una piccola porzione di supporto su cui viene impressa l'olografia contiene l'informazione completa di tutta l'immagine)
- Quando si ricostruisce l'immagine olografica è come dischiudere l'ordine implicito in uno esplicito(esplicitare).
- L'ologramma rappresenta l'esplicitazione nella nostra realtà di un'informazione 'nascosta' in cui ogni parte racchiude in sé l'informazione totale
- Ogni parte della realtà contiene l'informazione su ogni altra parte all'interno di essa → ogni regione di spazio e tempo contiene informazioni su tutto l'altro spazio e su tutto l'altro tempo!!!!

Ologramma e olomovimento

- Bohm: modello 'olografico' della realtà → descrive un Tutto organico (Oneness) governato da un ordine implicato a cui è asservito il potenziale quantico
- Processo dinamico e continuo di implicazione/esplicazione → **OLOMOVIMENTO!**
- **Olomovimento = movimento che rende attivo l'ordine implicato**
- Il movimento generato dall'olomovimento in una regione porta informazione (attraverso il potenziale quantico) su ogni altra parte della realtà, rende l'informazione 'attiva'.
- ~~Interazione (classica)~~ → partecipazione (bohiana)
- **Connessione 'partecipativa'**

Possibili test sperimentali

- Nella teoria classica il concetto di probabilità potrebbe essere erroneamente assunto a concetto assoluto a causa della difficoltà di:
 - 1) misurare il moto degli e^- (distanze inferiori a 10^{-15} m);
 - 2) ridurre l'intervallo di tempo tra due operazioni di misura consecutive, in cui il sistema tende a randomizzare (sovrapposizione di stati quantistici)
→ $\Delta t < 10^{-9}$ s
- Le equazioni 'classiche' potrebbero rappresentare la media temporale di eventi che accadono ad un livello di realtà ancora più profondo!
- Non si è ancora riusciti a mettere a punto calcoli che permettano di evidenziare e predire gli effetti del potenziale quantico sulle particelle.
- **Per ora, non esistono test cruciali!**

Conclusioni

- La MB è una teoria quantistica non-classica, sia razionale che deterministica, che implica concetti che al suo tempo parvero molto 'out' da ciò che era riconosciuto come 'classico'.
- **“Quando ho iniziato a studiare la meccanica quantistica ho avuto una sensazione di relazione, sentivo di descrivere qualcosa che sperimentavo direttamente, piuttosto che qualcosa a cui pensavo solamente.” D.Bohm**
- La teoria di Bohm è esplicitamente non-locale: la velocità di ogni singola particella dipende dal valore dell'equazione guida che a sua volta dipende dalla configurazione dell'intero universo.
- **Interpretazione ONTOLOGICA e CAUSALE**
- Essa afferma che l'universo evolve nel tempo, senza dover ricorrere al **collasso delle funzioni d'onda**, in maniera interamente causale governato da un 'Logos' che è onnipresente ed onnipervadente e in un **livello di esistenza molto oltre il nostro mondo 'esplicito'**.
- A causa del fatto che le leggi note della fisica sono tutte locali, e del fatto che le interazioni non-locali combinate con la relatività portano a paradossi causali, molti fisici la considerano inaccettabile.

Documento

Alcune riflessioni di **Ervin Schrödinger** (1887 – 1961)

- Uno dei grandi ed eterni dilemmi sulla natura della coscienza è questo: perché, se ci sono tanti ego coscienti, c'è soltanto un mondo percepito da tutti quanti? Perché non un mondo diverso per ciascuna persona? Perché non viviamo in una Torre di Babele, ciascuno di noi con una diversa immagine della realtà, incapace di comunicare con gli altri?
Quale altra alternativa può esserci per spiegare come possa una singola visione del mondo scaturire da coscienze che appaiono separate?
- Schrödinger dà questa risposta: "C'è evidentemente una sola alternativa, vale a dire l'unificazione delle coscienze o della coscienza. La loro molteplicità è solo apparente: in realtà esiste una sola coscienza".
- Con queste parole Schrödinger ci conduce oltre il primato della persona. La coscienza non è più localizzata e confinata all'individuo, ma è transpersonale, universale, collettiva: ossia è **non localizzata**.

Documento

“La coscienza può essere descritta in termini di una serie di momenti. Un momento fa nascere il momento successivo, in una dinamica tale che ciò che era prima implicato diventa esplicito mentre il precedente contenuto esplicito è ora diventato implicato. La coscienza non è altro che uno scambio, un processo di feed-back il cui risultato è un accumulo crescente di comprensione della realtà»

David Bohm, 1987

Documento

« Questa mente cosmica (*Logos*) agisce sperimentando continuamente se stessa in maniera creativa e utilizza il mondo cristallizzato dell'ordine esplicito per prendere coscienza della propria esistenza. Al contempo le coscienze apparentemente frammentate che vivono nella dimensione dell'ordine esplicito restituiscono alla dimensione dell'ordine implicito il distillato di quanto hanno sperimentato nel loro universo apparentemente limitato ... Il nostro stesso essere umani è un esempio che racchiude in sé un aspetto implicito e uno esplicito che si interpenetrano a vicenda. Questi due aspetti sono inseparabili. »

Massimo Teodorani, «La fisica dell'infinito», 2006

Testi suggeriti

- David Bohm, **Quantum Theory**, (1951) New York: Prentice Hall. 1989 reprint, New York: Dover, [ISBN 0-486-65969-0](#)
- David Bohm - Jiddu Krishnamurti (1986), **Dove il tempo finisce**, Astrolabio-Ubaldini, Roma
- Bohm, David (1990). ["A new theory of the relationship of mind and matter"](#)
(http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/~mdt26/local_papers/bohm_mind_matter_1990.pdf)
- Bohm, David; B.J. Hiley (1993). **The Undivided Universe: An ontological interpretation of quantum theory**. London: Routledge. [ISBN 0-415-12185-X](#).
- David Peat (1996), **Infinite Potential: The Life and Times of David Bohm**, Perseus Books
- David Bohm –Jiddu Krisnamurti (1999), **The limit of thought - Discussions**, Krishnamurti Foundation Trust; ristampato nel 2009: **«I limiti del pensiero – Discussioni»**, Armando Editore, Roma
- John Gribbin (2004), **Q come quanto**, dizionario enciclopedico illustrato, 2004, Macro Edizioni
- Dürr, Detlef; Sheldon Goldstein, Roderich Tumulka and Nino Zanghì (December 2004). ["Bohmian Mechanics"](#)
<http://www.math.rutgers.edu/~oldstein/papers/bohmech.pdf>
- Massimo Teodorani (2006), **Bohm: la fisica dell'infinito**, Macro Edizioni
- A. Amadori, L. Lussardi (2009); **Meccanica quantistica non relativistica**, Matematicamente
- Manjit Kumar (2010), **Quantum**, Oscar Mondadori

Grazie per l'attenzione e la partecipazione!!!!