

ma, Dio è un grande orologiaio

Liceo Scientifico P. Frisi

pomeriggi culturali 2006

oppure gioca ai dadi?

Claudio Cereda - 16 febbraio 2006 - Riflessioni sulla certezza nella conoscenza scientifica

Dio fabbrica orologi



o



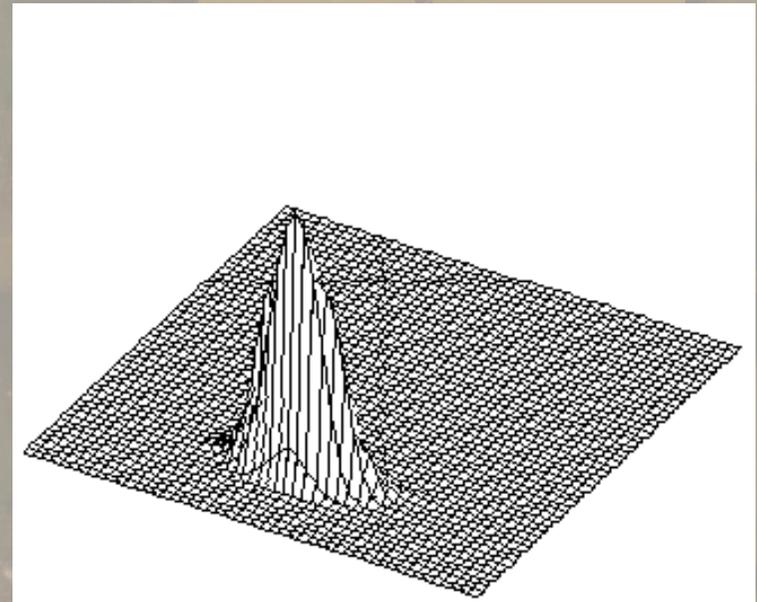
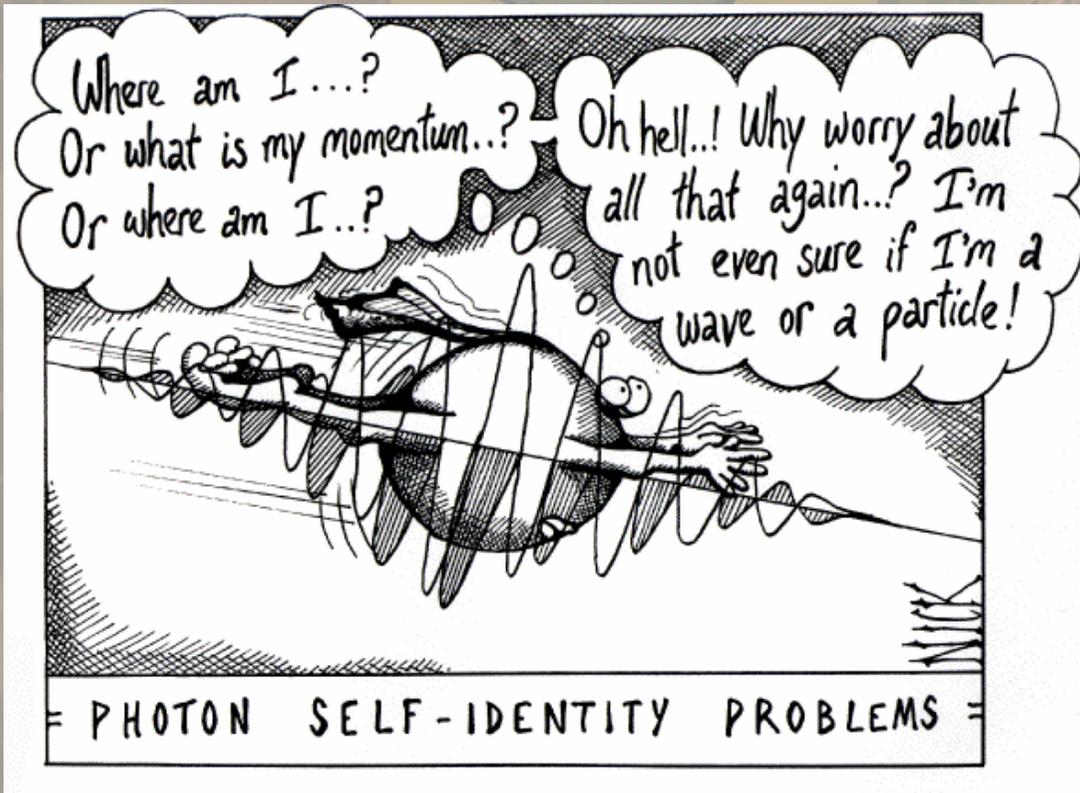
lavora in un casinò?

Claudio Cereda - 16 febbraio 2006 - Riflessioni sulla certezza nella conoscenza scientifica

I fisici
indagano la realtà o
fanno i croupier?

Two white dice with black pips are shown in a 3D perspective. The die on the left is slightly behind and to the left of the die on the right. The background is a collage of faint images including a portrait of Albert Einstein, a diagram of a particle detector, and the text 'ma, Dio è un grande'.

E la natura ...



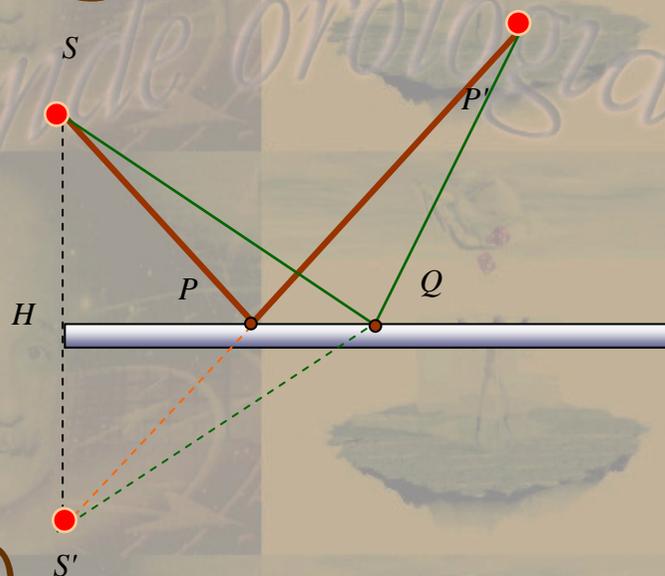
cosa ne penso?

Claudio Cereda - 16 febbraio 2006 - Riflessioni sulla certezza nella conoscenza scientifica

Leggi dell'ottica geometrica

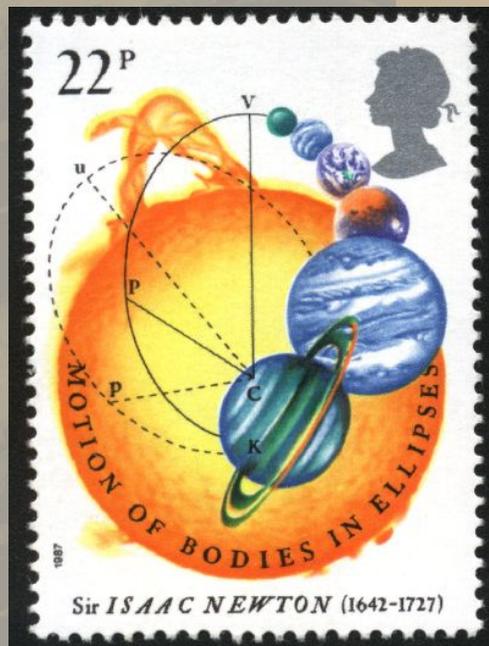
La luce si comporta
con intelligenza?

- Riflessione (lunghezza minima)
- Rifrazione (tempo minimo)
- La luce segue la strada di minima durata temporale come se sapesse già cosa fare



La meccanica di Newton

Nascono insieme
dinamica e gravitazione



- Le forze e le condizioni iniziali
- Basta poco per prevedere molto
- Si inventa una matematica ad hoc
- Si spiega Kepler

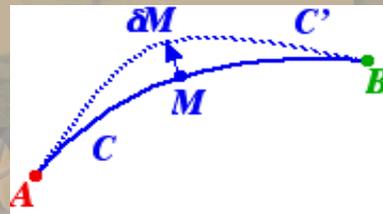


I principi variazionali

Sta nascendo la Meccanica Razionale

- Minima azione e mondo reale: la natura forse segue un principio razionale
- Maupertuis e Lagrange
- Si può derivare tutto da un principio di minimo: nell'800 Hamilton
- La fisica di oggi è profondamente diversa ma costruita sul medesimo paradigma

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$$



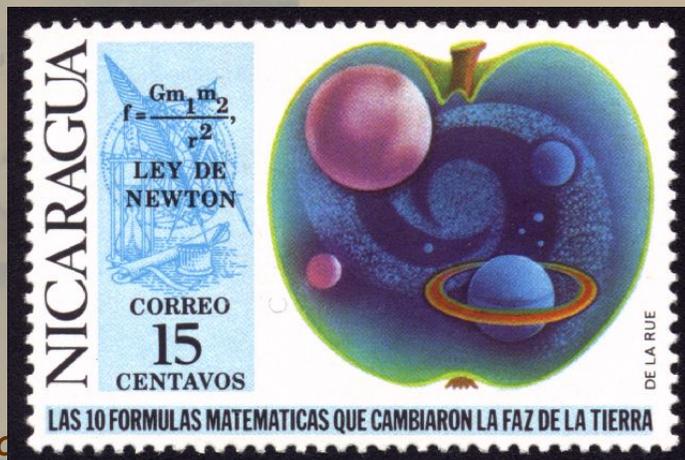
$$S = \int L dt.$$



Non sono solo speculazioni

La astronomia fa previsioni raffinate

- 1758 ritardo previsto (20 mesi) nella comparsa della cometa di Halley (Giove e Saturno)
- Herschel scoperta di Urano 1781
- Le Verrier scoperta calcolata di Nettuno 1846 anomalie di Urano
- Cavendish 1798 misura G e con la teoria pesa la Terra, il Sole e i pianeti



Cl... sioni sulla certezza nella conoscenza scientifica

Dio costruttore di orologi

Si occupa al più di caricare la molla

- Il meccanicismo nasce insieme al probabilismo che gli fa da spalla
- Laplace è il personaggio simbolo ma dietro ci sono: l'Illuminismo, l'Analisi, la Meccanica Razionale, Lavoisier, la pila di Volta, Euler, i Bernoulli, l'astronomia
- 3 opere: Il sistema del mondo; Il trattato di Meccanica Celeste; Il saggio filosofico sulle probabilità



Una citazione famosa

I limiti della mente umana

Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de ce qui va suivre.

Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux.

*L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'Astronomie, une faible esquisse de cette intelligence
(Laplace, Saggio filosofico sulle probabilità, 1814)*



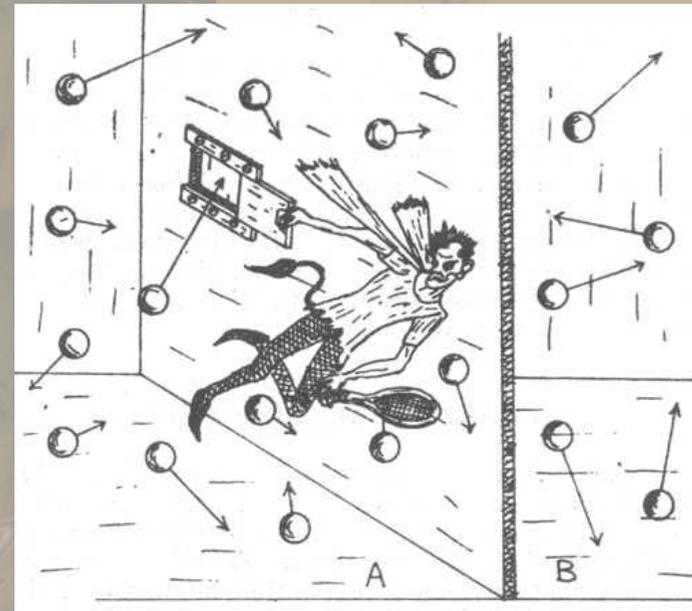
Pierre Simone
Laplace
1749-1827

Termodinamica o Meccanica Statistica ?

I principio: nasce il concetto di energia come conservazione

II principio: il tempo ha una freccia

- Teoria cinetica: la meccanica spiega le leggi termodinamiche ...con qualche problema ... come il diavoletto di Maxwell
- Macrostatato e microstatato: riecco la probabilità



Ludwig Boltzmann 1844-1906

La statistica entra ufficialmente in Fisica:
i sistemi complessi come insiemi
numerosi di sistemi semplici

Ma si avvicina la percezione di una grande
tempesta: la probabilità sta per entrare
dalla porta e non dalla finestra

Non è la mente umana ad essere limitata:

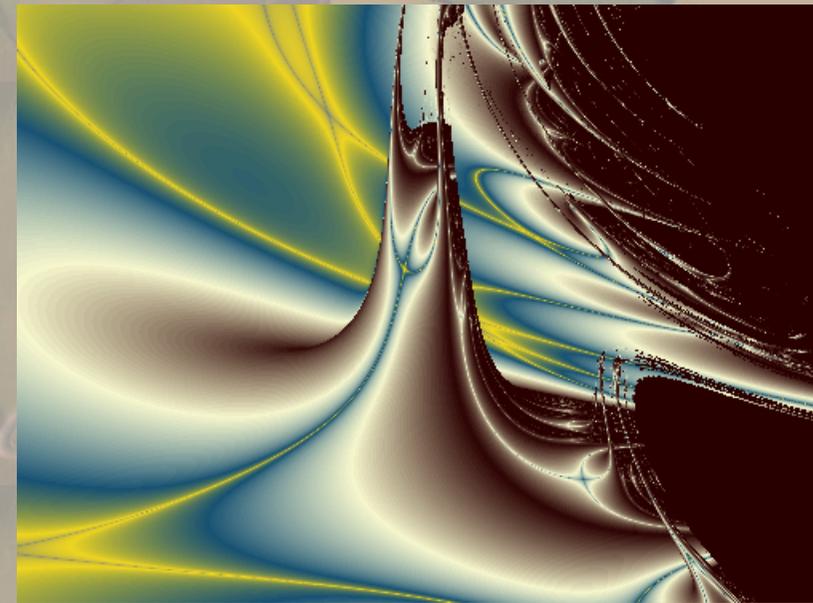
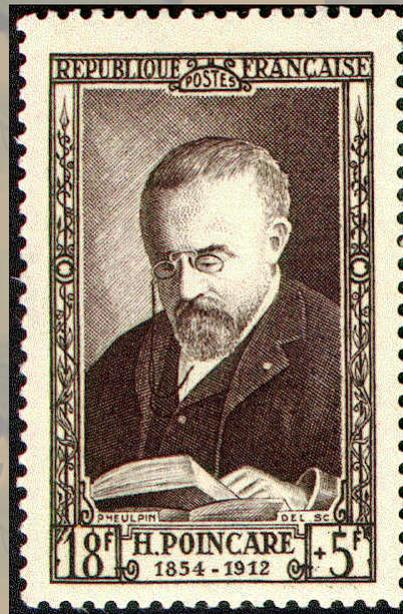
- I sistemi complessi evolvono in modo caotico
- Quando si cambia scala si trovano nuove leggi: crisi del riduzionismo



Henri Poincaré (1854-1912)

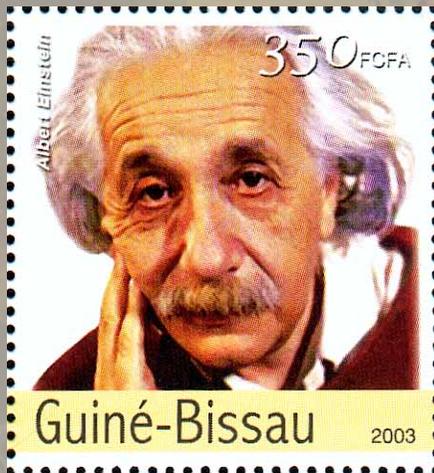
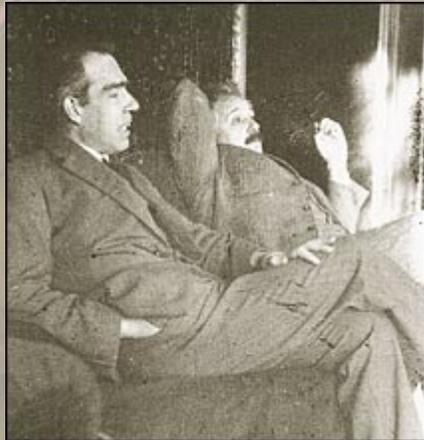
I problemi della stabilità

- Una differenza piccola nelle condizioni iniziali produce evoluzioni temporali profondamente diverse: il sogno di Laplace scricchiola
- Alcune condizioni iniziali non hanno senso in forma esatta: quanto vale la distanza Terra Luna?
- Tempo di Liapunov tipico di ogni sistema
- Effetto farfalla: battito in Brasile implica Tornado in Texas



La meccanica quantistica

Le leggi statistiche dopo aver fatto capolino dalla finestra entrano ora nella scienza fisica dalla porta



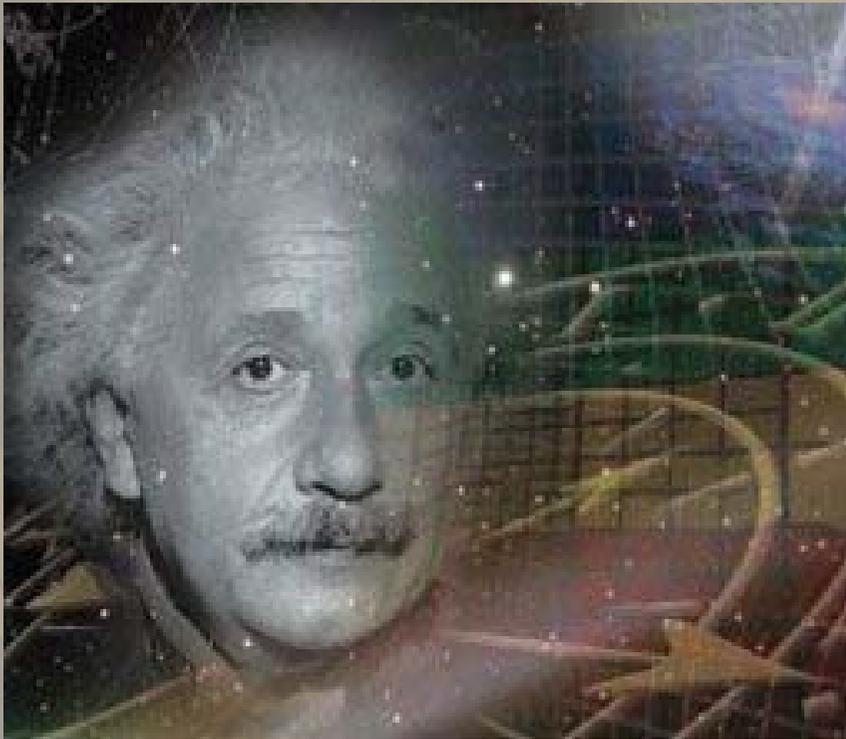
- ❑ Dice **Heisenberg**: il sogno di Laplace si rivela sbagliato nelle premesse non nelle conclusioni (**principio di indeterminazione**)
- ❑ Dice **Einstein**: che cita un adagio tedesco *giovani mignotte - vecchie bigotte* (riferendosi all'amico Born) "le nostre prospettive scientifiche sono ormai agli antipodi tra noi. Tu ritieni che Dio giochi ai dadi col mondo; io credo invece che tutto ubbidisca ad una legge, in un mondo di realtà obiettive che cerco di cogliere per via furiosamente speculativa"

La meccanica quantistica

Qualche opinione illustre

- ❑ Dice **Einstein** "Le teorie di Bohr sulla radiazione mi interessano moltissimo, tuttavia non vorrei essere costretto ad abbandonare la causalità stretta senza difenderla più tenacemente di quanto abbia fatto finora. Trovo assolutamente intollerabile l'idea che un elettrone esposto a radiazione scelga di sua spontanea volontà non soltanto il momento di "saltare", ma anche la direzione del "salto". In questo caso *preferirei fare il croupier di casinò piuttosto che il fisico*"
- ❑ Dice **Bohr**: "non spetta a noi suggerire a Dio come governare il mondo, ma solo scoprirlo"
- ❑ Dice **G. Toraldo di Francia**: "quello che Einstein pensa su cosa faccia Dio con i dadi ha per me solo un interesse anedddotico, o al più storico. E' presunzione? No. Perché gli elementi che ha Einstein per conoscere le abitudini di Dio sono esattamente gli stessi che ho io, cioè nessuno"



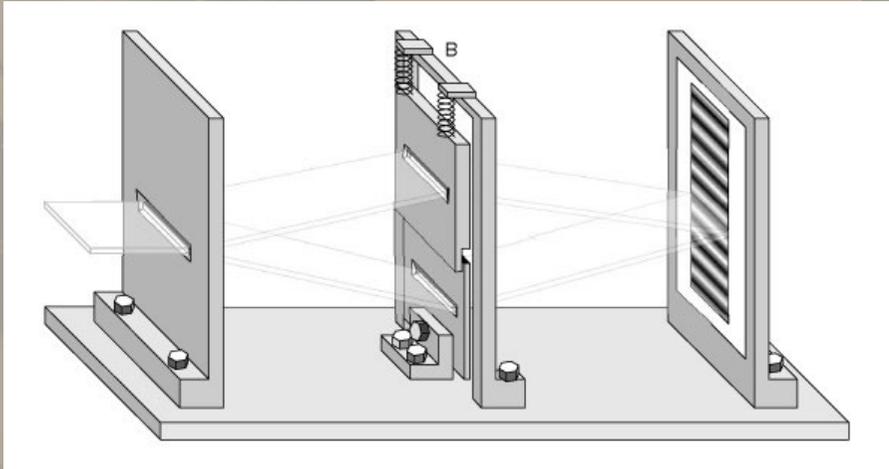


Passando al microscopico qualcosa doveva capitare

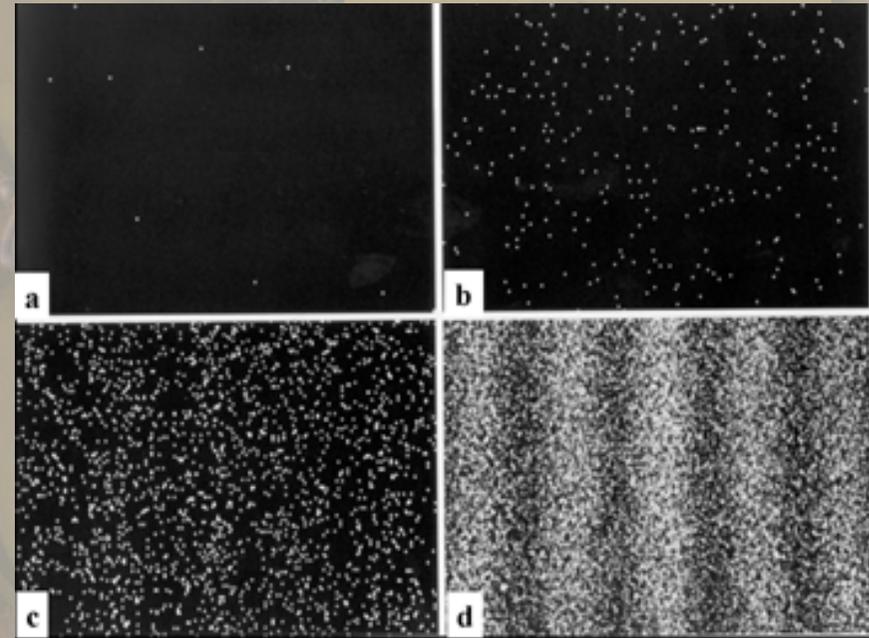
- Come fanno gli atomi ad essere eternamente stabili ?
- Cosa determina il *quando* nei processi di riassetamento ?
- Ha senso parlare di oggetti diversi quando si considerano cose strutturalmente uguali?
- Con la MQ non è una questione di osservatori come in relatività: le leggi sono strutturalmente diverse
- Einstein ne era pienamente cosciente (è uno dei padri della MQ) ma sperava in una rivoluzione meno drastica (nella *provvisorietà* dell'inaccettabile)

Claudio Cereda - 16 febbraio 2006 - Riflessioni sulla certezza nella conoscenza scientifica

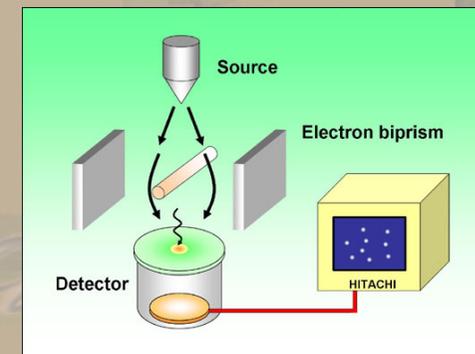
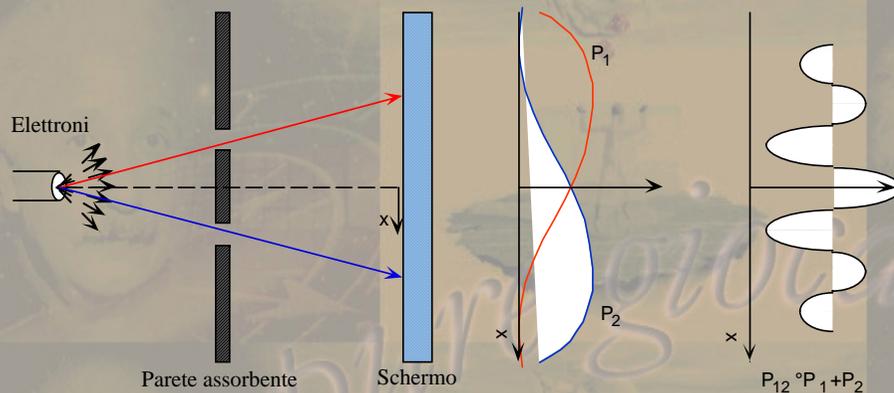
Lo strano comportamento degli elettroni e dei fotoni



Sono corpuscoli quando li rivelo, sono onde quando viaggiano ma non devo chiedere dove passano: la natura mi risponde in modo coerente a ciò che chiedo



Elettroni accumulati sullo schermo: (a) 8, (b) 270, (c) 2000, (d) 6000. Il tempo di esposizione dall'inizio alla fase (d) è di 20 minuti.



La meccanica quantistica: stranezze

Il principio di indeterminazione di Heisenberg

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

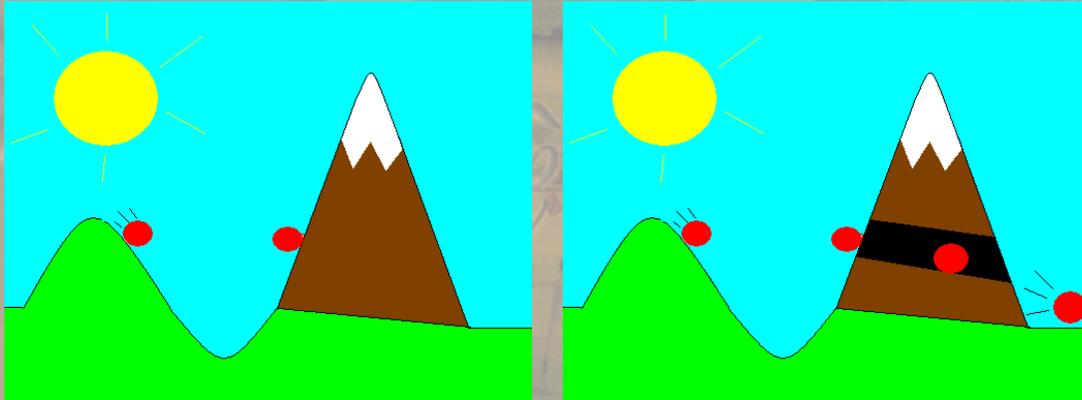
$$\Delta \mathcal{E} \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- ❑ Illustrare numericamente le implicazioni
- ❑ E' un risultato della teoria e non il frutto di limiti sperimentali delle capacità umane
- ❑ Riguarda tutte le coppie di grandezze il cui prodotto è una *azione* (quella dei principi variazionali)
- ❑ Se ne danno interpretazioni basate sul *dualismo* o sulla *interazione tra oggetto e osservatore* ma dice di più
- ❑ E' stato trovato nel 1928 mentre la teoria è la sua prima interpretazione probabilistica sono del 25/26



La meccanica quantistica le stranezze

L'effetto tunnel senza il quale non si avrebbe la radioattività



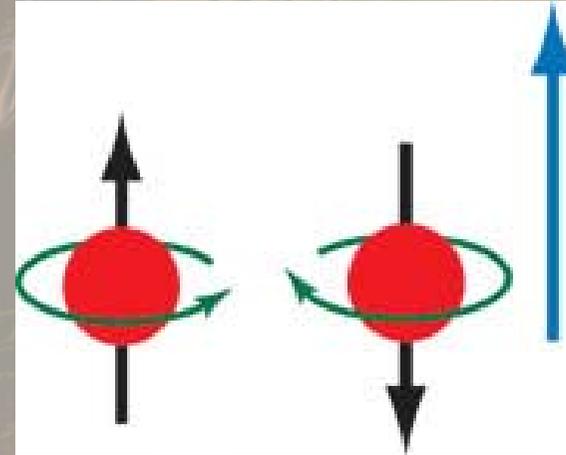
- Le particelle hanno probabilità diversa da zero di uscire dal recipiente
- La probabilità dipende dallo spessore della parete
- In meccanica quantistica ciò che non è vietato da una legge di conservazione *prima o poi accade*
- In fisica delle alte energie è questa la norma



La meccanica quantistica le stranezze

Lo spin e i momenti magnetici

- ✓ Le particelle hanno proprietà magnetiche intrinseche
- ✓ In fisica classica avremmo un vettore, in MQ abbiamo una grandezza quantizzata con gli stessi valori lungo ogni direzione: ho sempre due valori opposti, per il resto sono come tu mi vuoi
- ✓ Quando lo guardo trovo uno dei due valori: e prima di guardarlo come è lo spin?
- ✓ Non si sa? Non ha senso? Non esiste? Non lo sappiamo ma forse un giorno lo sapremo?

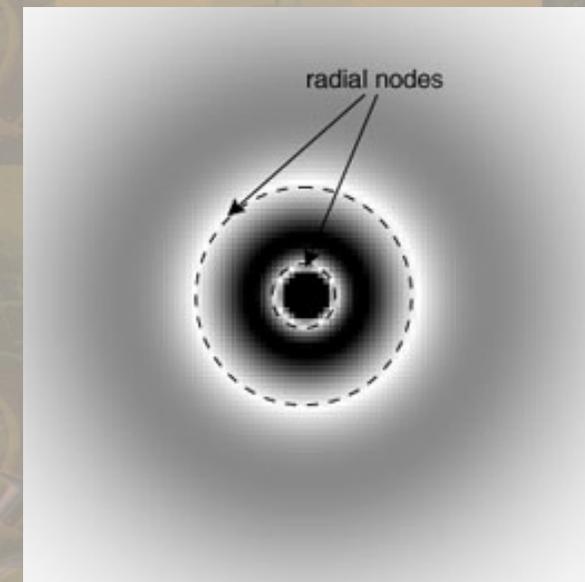


Ma Dio gioca ai dadi?
La natura ci prende in giro?

Formalismo della meccanica quantistica

In questa forma la si usa dai primi anni 30

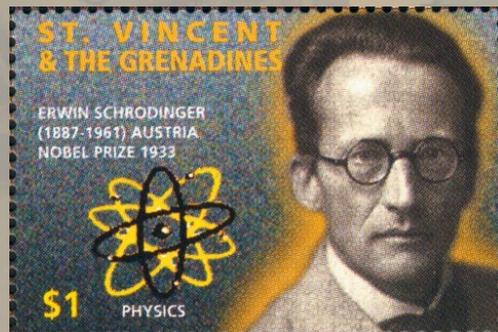
1. Il mondo è descritto in uno spazio matematico astratto (spazio di Hilbert) con infinite componenti complesse. Ad un sistema fisico si fa corrispondere un vettore ψ nello spazio di Hilbert
2. Il vettore $\psi(t)$ evolve nel tempo a partire da una condizione iniziale nota attraverso un'equazione sempre costruibile a partire dalla *Hamiltoniana* (espressione della energia). Si tratta della famosa equazione di Schrödinger
3. Ad ogni grandezza fisica *A osservabile* (energia, quantità di moto, posizione, spin, ...) corrisponde un operatore \hat{A} costruibile con leggi conosciute e che sono la generalizzazione delle leggi di Hamilton. L'equazione $\hat{A} u_i = a_i u_i$ è detta equazione agli **autovalori** (i numeri a_i) ed essi sono gli unici possibili valori che si ottengono dalla misura di *A*. Gli autovalori possono essere finiti o infiniti per le diverse osservabili. Gli u_i sono detti **autovettori**
4. **Gli autovettori** consentono sempre di rappresentare lo stato ψ mediante una loro somma pesata (indichiamo tali pesi con c_i ; essi sono numeri complessi). Gli autovettori sono stati particolari



Formalismo della meccanica quantistica

In questa forma la si usa dai primi anni 30

5. Il $|c_i|^2$ rappresenta la probabilità che la misura di A produca il risultato a_i ;
6. Dopo che si esegue la misura, all'atto della misurazione, il vettore di stato ψ cambia bruscamente valore e, se è stato ottenuto il valore a_i , prende il valore u_i . Si parla allora di **collasso del vettore di stato** che passa di colpo da uno stato *etereo* descrivibile solo in termini di probabilità ad uno stato ben definito (uno degli autovettori)
7. Gli operatori che definiscono le osservabili sono sempre operatori lineari. Ciò vuol dire che se due vettori sono soluzione lo è anche la combinazione lineare e quindi lo stato è un **frullato simultaneo** di ciò che è osservabile



2006 - Riflessioni sulla certezza nella conoscenza scientifica

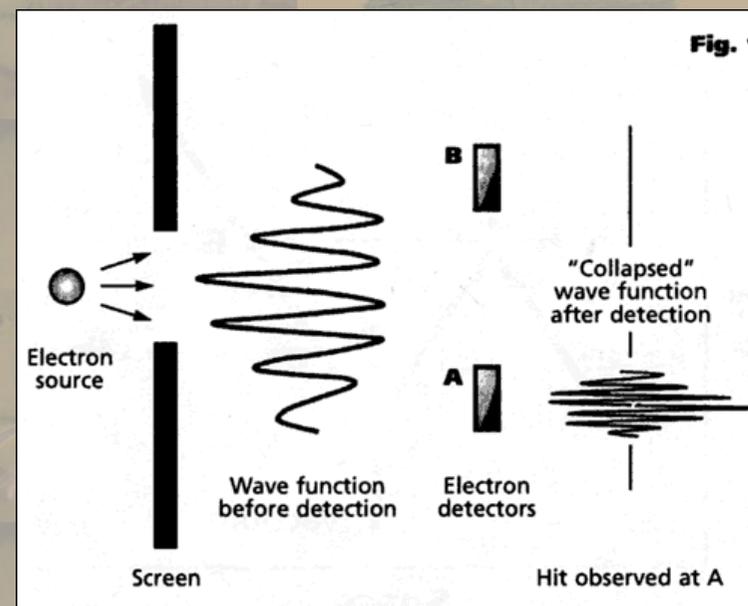
Due parole di commento Per chi è ancora lucido...

1. La cosa **funziona** e funziona bene (previsioni accurate di fenomeni nuovi)
2. I postulati più importanti sono quello della linearità degli operatori e quello del collasso
3. **Linearità**: il sistema vive in una combinazione lineare di autostati (l'elettrone può passare nell'una o nell'altra fenditura, può stare qui ma anche là, può avere lo spin su o lo spin giù, il fotone può essere polarizzato in un modo o nell'altro o nella loro combinazione)
4. **Collasso**: quando si fa una misura la situazione muta di colpo: si passa dalla possibilità alla realtà ... e il gioco ricomincia.
5. Feynman negli anni 40 ha proposto una nuova formulazione **gli integrali di cammino**, con cui si riprende l'idea di Fermat ma questa volta la particella va dappertutto e la probabilità finale si ottiene da $|\psi|^2$ dopo che si sono sommate tutte le possibilità
6. Ma le stranezze continuano: il **vuoto è pieno** di **fotoni e particelle virtuali**; la situazione è sempre più complessa e la MQ continua a funzionare.
7. Ciò che non è vietato da una legge di conservazione **prima o poi accade**



Ma se ... ovvero domande impertinenti

1. Una particella quantistica ha proprietà fisiche anche quando non viene osservata? (la Luna di Einstein)
2. Da quale fenditura passa realmente il fotone?
3. Quando qualcosa viene osservato la ψ che era distribuita nello spazio si annulla dovunque e prende con probabilità 1 il valore di un particolare autovettore (quello dell'autovalore misurato). Nel collasso del pacchetto d'onda come fa la ψ ad annullarsi istantaneamente dovunque?
4. Ma se la particella adesso è qui, poco fa dove stava? (un po' lì e un po' là)

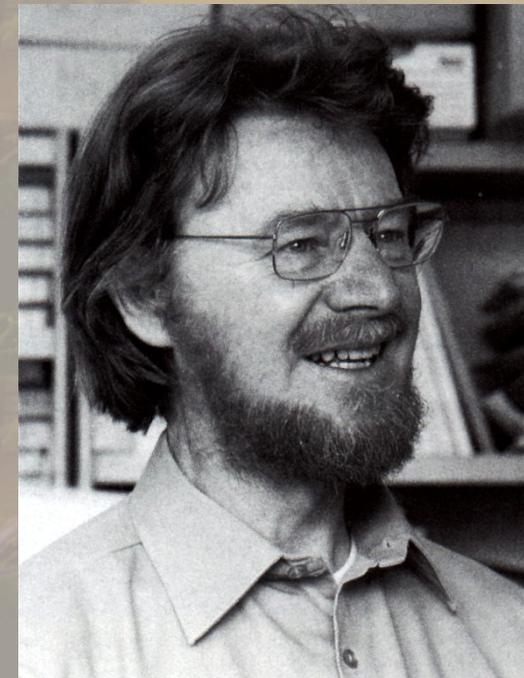


EPR ovvero ... la MQ non è definitiva

- ❑ L'argomento EPR: prevedibilità = realtà \Rightarrow dunque se MQ non ammette ciò che in linea di principio è prevedibile prima o poi sarà sostituita da una visione deterministica
- ❑ Il paradosso EPR (Einstein, Podolsky e Rosen): volevano dimostrare la provvisorietà (incompletezza) e invece hanno dimostrato che la situazione è ancora più radicale: la MQ viola la località
- ❑ A proposito di definitivo: in fisica nulla lo è, ma ...

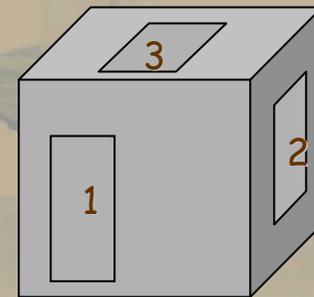
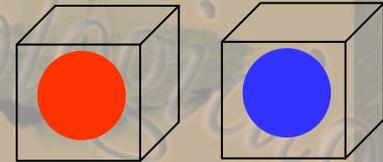
Le repliche

1. Pauli: farsi domande sulla realtà di ciò che non è osservabile è insensato (angeli e aghi)
2. Bell (1964): 30 anni dopo si può sottoporre a verifica sperimentale l'ipotesi di Einstein: se le proprietà sono già scritte nel DNA delle particelle un particolare esperimento di tipo random non dà il 50% di risultati



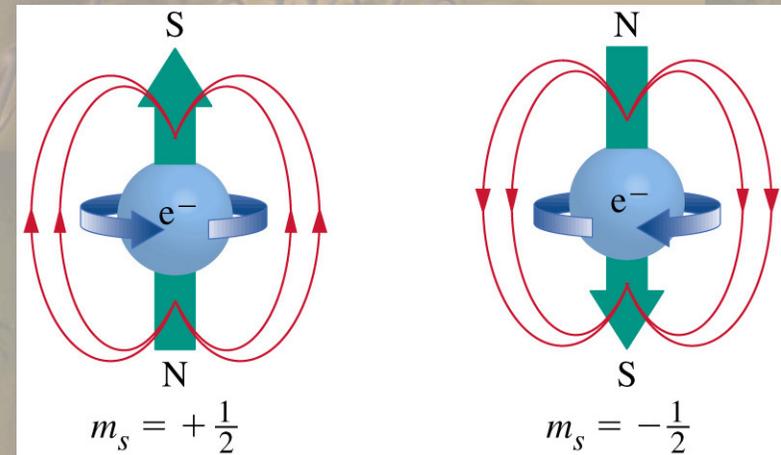
Se avete pazienza ve lo spiego con ... palle e scatole

- ❑ Le **particelle entanglement**: cosa sono (spin degli elettroni, fotoni polarizzati, cose a **due soli stati**)
- ❑ **Palle rosse, palle blu e scatole sigillate**
- ❑ Le scatole sono numerate, magiche, come le palle e solo quando si aprono o si cerca di sapere il contenuto danno colore alle palle
- ❑ Due scatole con lo stesso numero a distanza danno sempre lo stesso colore: lo scettico Einstein dice **sono programmate**
- ❑ C'è modo di sapere se Dio ha messo le palle colorate nelle scatole con lo stesso numero in modo di avere sempre la stessa risposta: prendiamo scatole con 3 sportelli e apriamo gli sportelli a caso confrontando i risultati. Se la scatola è programmata **RRB** avremmo esito positivo per (1,1), (2,2), (3,3), (1,2), (2,1) ed esito negativo per (1,3), (2,3), (3,1) e (3,2). Si ha successo in 5 casi su 9 = 55.6%
- ❑ Se invece le palle sono **davvero magiche** dovremo avere il 50% di successi perché il processo è random



Che diventano... Spin e campi magnetici

- ❑ Le scatole chiuse con 3 sportelli sono coppie di elettroni creati in maniera tale che gli spin siano sempre antiparalleli (lo sappiamo fare, c'è dietro la conservazione del momento angolare)
 - ❑ I due osservatori stanno lontani e agli estremi di un percorso nel vuoto in cui i due elettroni non hanno altre interazioni. Gli sperimentatori fanno un test sullo spin su uno dei 3 assi scelti a caso
 - ❑ I due osservatori, anche in esperimenti a scelta ritardata, cioè con la decisione presa dopo la partenza, trovano 50% di concordanze. Esperimenti sempre più sofisticati dopo il 1980: 10 m, 10 km, anni luce
- ⇒ l'esistenza ↔ non esistenza di cose impossibili da misurare può avere conseguenze rilevabili sperimentalmente
- ⇒ Einstein aveva torto, la località è violata e (la Luna non esiste se non la osserviamo...)



E Dio?

... a quel livello sembra che giochi ai dadi, qualcuno dice che ogni tanto bara, ma noi siamo degli ottimi giocatori e riusciamo a vincere parecchie partite

...anche più del 50%



J. S. Bell

PRIORITY



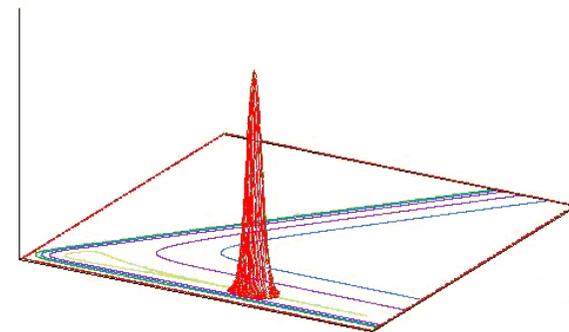
Quantum [Un]speakables

Conference in commemoration of John S. Bell

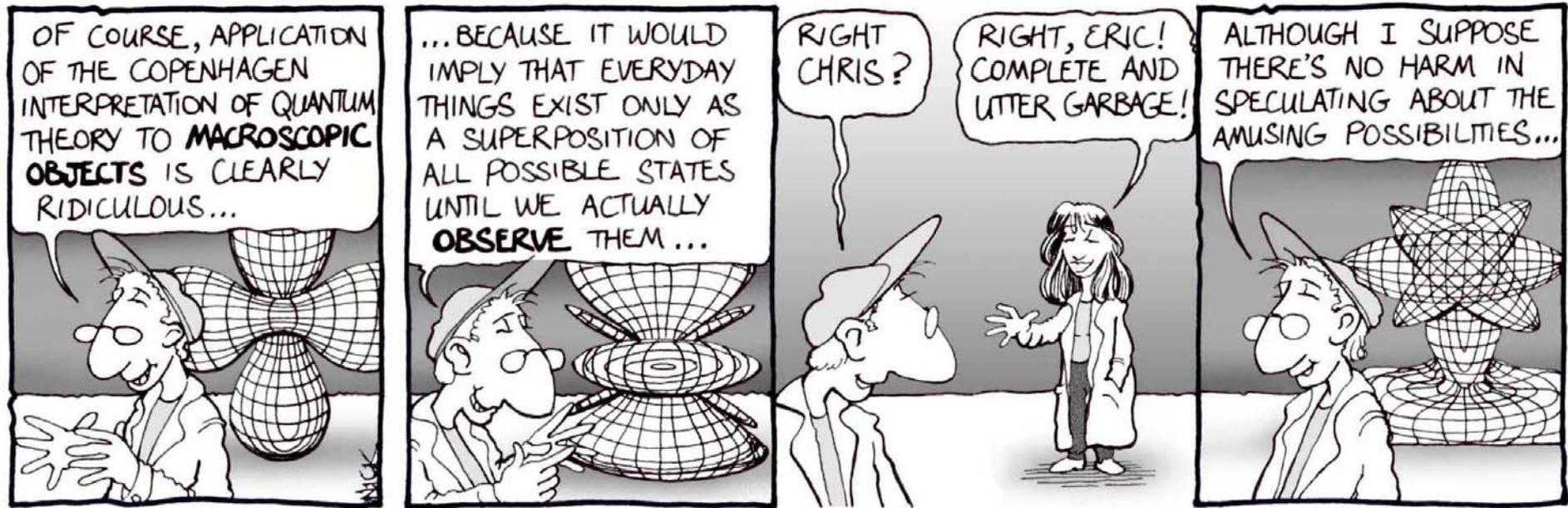
10-14 November 2000

Vienna

AUSTRIA



E anche questa volta abbiamo finito



Non è così perché
...subtle is the Lord but
not malicious