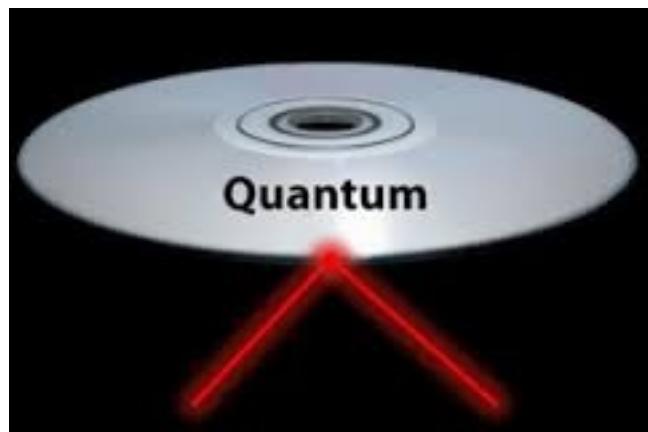


M. Kundera: «*The greater the ambiguity, the greater the pleasure*». Lo strano mondo della Meccanica quantistica



SILVANO TAGLIAGAMBE
UNIVERSITÀ DI MILANO-BICOCCA LUNEDI 2 FEBBRAIO 2026

1

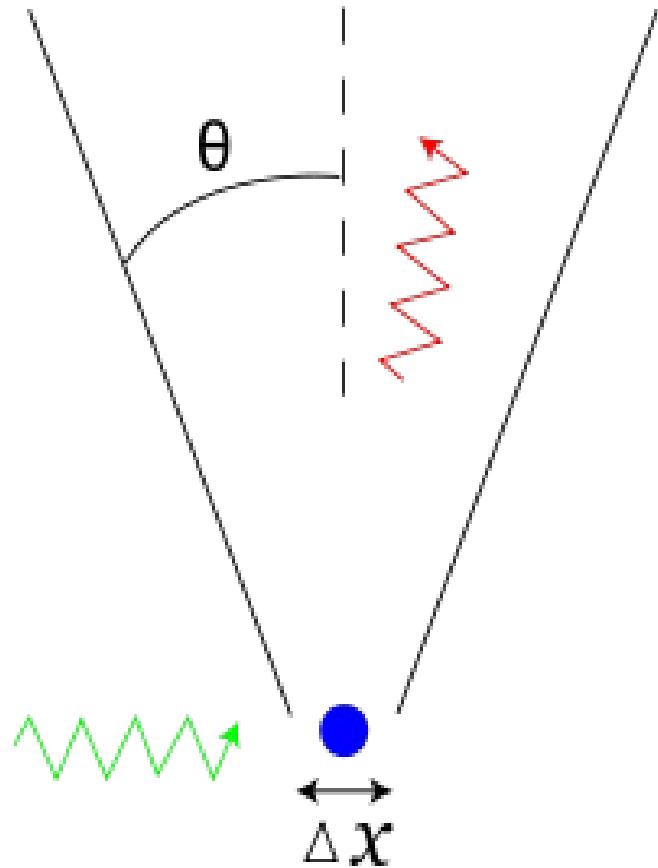
IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG



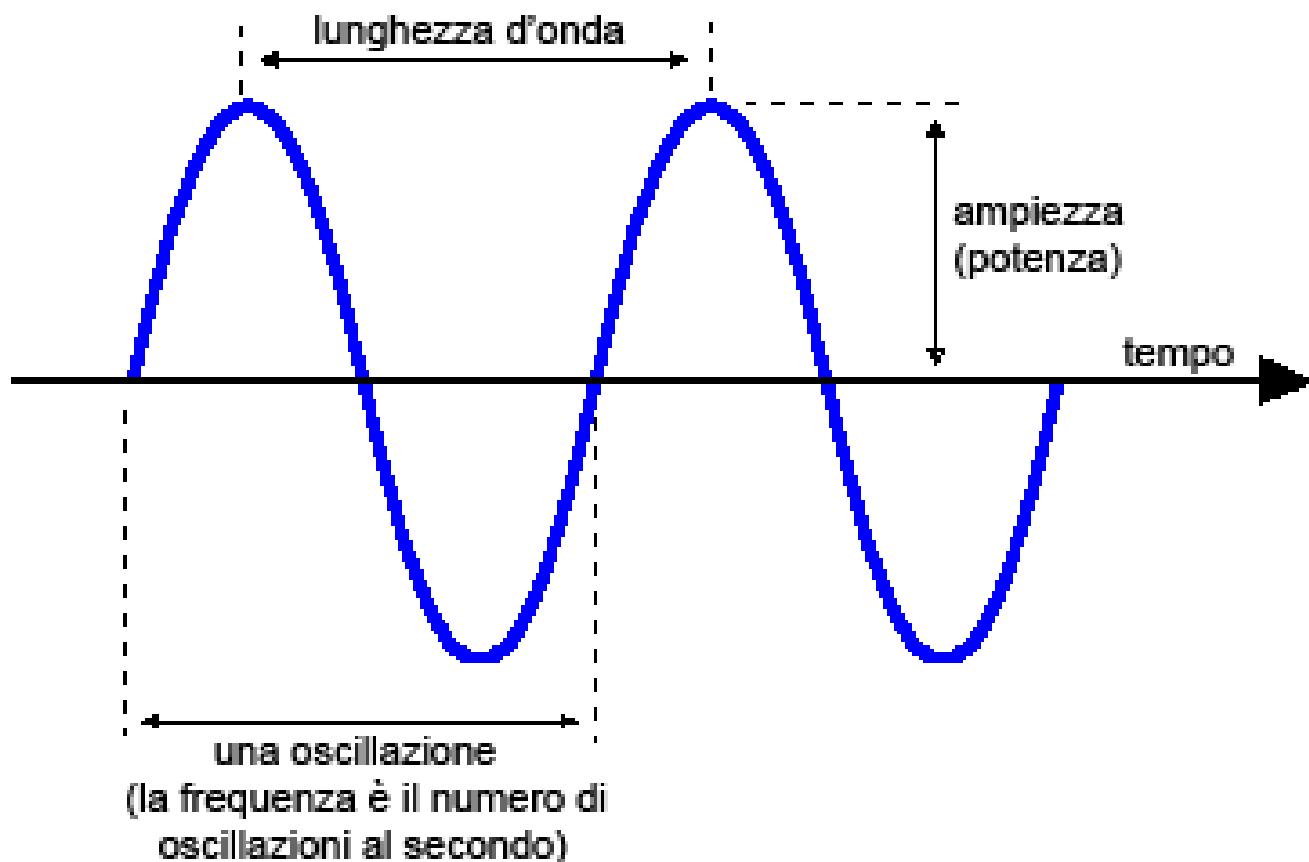
Per il *principio di indeterminazione*
di **Heisenberg**,

tanto più precisa è la misura
della posizione di una particella,
tanto meno precisa è la misura
della sua velocità e viceversa:
vi è un **limite**
alla conoscenza simultanea
di tutte le proprietà di una
particella.

Con la scoperta della
dualità onda-particella
si viene a determinare un **limite**
alla conoscenza di proprietà
intrinseche della materia.



L'esperimento mentale di Heisenberg per la localizzazione di un elettrone. Per conoscere la posizione dell'elettrone lo si deve illuminare con un fotone, che tuttavia tanto meglio localizza la posizione tanto più perturba la velocità.
Il fascio incidente è indicato in verde, quello deviato in rosso, mentre in blu è rappresentato l'elettrone.



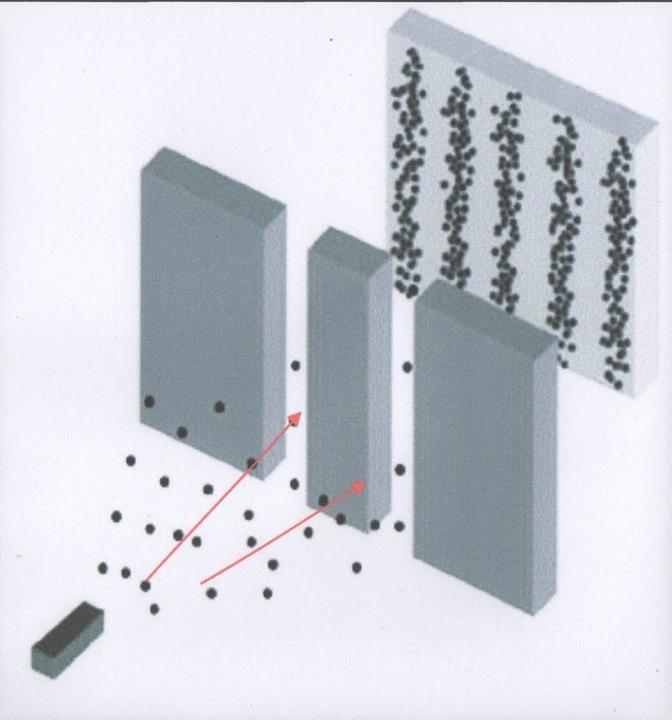
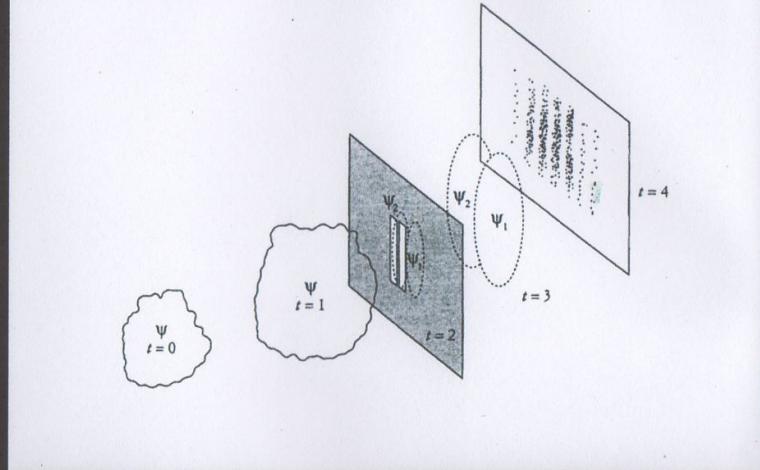


Figura 35.

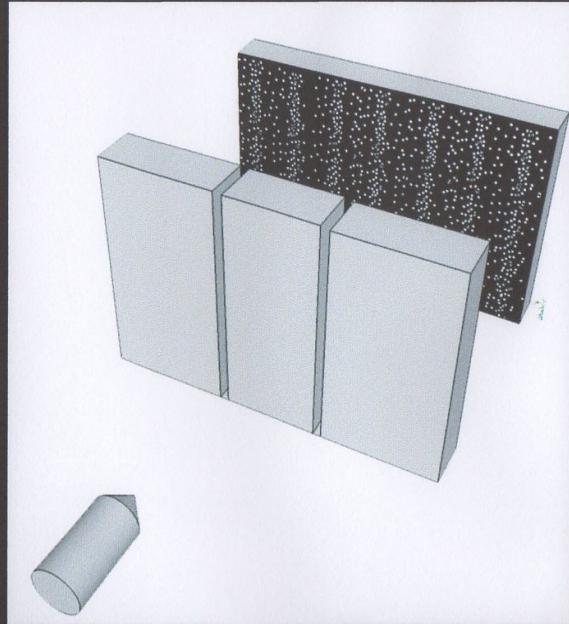
Una «nuvola» di funzione d'onda ψ che si avvicina a due fessure ($t = 0$ e $t = 1$), le attraversa, si divide in due ($t = 2$), si espande e si sovrappone ($t = 3$) e urta lo schermo ($t = 4$).



Ognuna di queste due immagini (corpuscolo o onda) permette di dare significato soltanto ad alcuni fatti.

Nessuna delle due abbraccia tutti i fenomeni noti

**SI TRATTA DI IMMAGINI PARZIALI
E COMPLEMENTARI**



“Non esiste assolutamente alcuna possibilità di descrivere ciò che accade tra due osservazioni consecutive. Può essere certo allettante dire che l'elettrone deve essere stato in qualche posto fra le due osservazioni e che perciò deve aver descritto un certo percorso, o un'orbita, anche se può risultare impossibile sapere quale sia.” (W. Heisenberg)

“a modo suo”

la teoria funziona perfettamente: il suo formalismo ha permesso di fare previsioni precisissime

ma

assorbe dentro di sé (eleva a principi) l'idea che si debba rinunciare ad alcune categorie su cui si basava la spiegazione dei fenomeni della fisica classica:

- *il principio di causalità* (il determinismo);
- *il principio di non-contraddizione* (un oggetto o è una cosa o un'altra);
- *la rappresentabilità* dei fenomeni nello spaziotempo.

Il principio di indeterminazione

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

“h tagliato” = $1,054 \times 10^{-34} \text{ Js}$

Apparentemente...

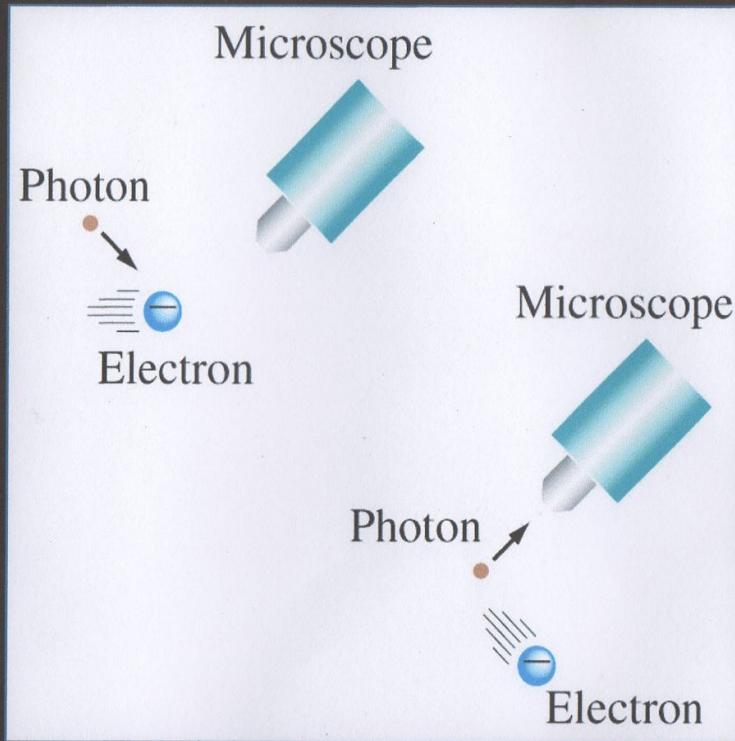
“[...] una formuletta - in sé piuttosto arida e arcana - che abbiamo imparato a recitare sui libri di Liceo, dal nome fastidiosamente indimenticabile: il principio di indeterminazione di Heisenberg.”

(M. Cattaneo, Heisenberg e la rivoluzione quantistica, I grandi della scienza, Le Scienze, 2000)

Esperimento mentale: microscopio a raggi gamma

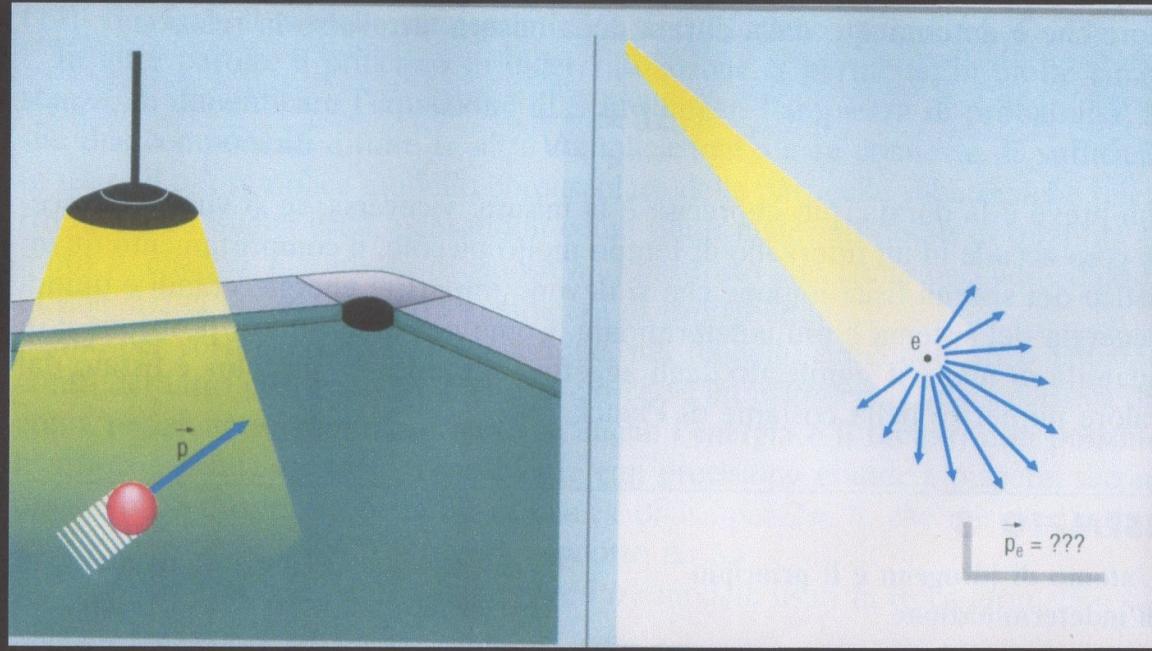
Microscopio ad altissima risoluzione che utilizza, per “illuminare” l’oggetto, radiazione di lunghezza d’onda molto piccola

L'interpretazione "a disturbo" di Heisenberg



Dal libro di testo “U.Amaldi”

Per “vedere” una particella dobbiamo fare in modo che essa diffonda la “luce” che incide su di essa in maniera che una parte della “luce” diffusa giunga ai nostri occhi o agli strumenti di rivelazione. Per fare ciò è necessario che la lunghezza d’onda della luce utilizzata sia al più delle dimensioni dell’oggetto che si vuole “vedere”.



[...] ma i fotoni che compongono un fascio di luce di piccola lunghezza d'onda [...] sono molto energetici e interagiscono con le particelle materiali producendo l'effetto Compton.

In definitiva la particella che noi riusciamo a vedere, perché urtata da un fotone che poi è giunto fino al nostro rivelatore, ha subito un urto che l'ha accelerata in modo casuale. Dopo la misura possiamo quindi sapere qual è la sua posizione, ma nello stesso tempo abbiamo perduto ogni possibilità di determinare con precisione la quantità di moto.

E' interessante notare che si vuole diminuire l'indeterminazione Δx sulla posizione, utilizzando luce di lunghezza d'onda minore, aumenta l'energia dei fotoni incidenti e, di conseguenza aumenta l'indeterminazione sulla quantità di moto della particella.

(U. Amaldi)

“Al momento della determinazione della posizione dell'elettrone, quando il quanto di luce è diffuso, cambia la quantità di moto *in modo discontinuo*. Questo cambiamento è tanto maggiore quanto minore è la lunghezza d'onda della luce cioè quanto maggiore è la precisione nel determinare la posizione. Quindi, nel momento in cui si sta determinando la posizione dell'elettrone la quantità di moto può essere conosciuta solo entro un valore che corrisponde al *cambiamento discontinuo*; allora, *più esattamente si determina la posizione, tanto più imprecisa sarà, nello stesso istante, la determinazione della velocità e viceversa*”

(Heisenberg, 1927)

“... in certo senso cessa di essere valida la legge di causalità”

“Nella formulazione rigorosa della legge causale - se *conosciamo il presente possiamo calcolare il futuro* - non è la conclusione ad essere sbagliata bensì la premessa.

Non si possono conoscere con certezza la posizione e la velocità iniziali per cui si può calcolare solo un intervallo di possibilità, per posizione e velocità, in ogni istante futuro.

[....] le leggi e le predizioni della meccanica quantistica ‘sono in generale solo di tipo statistico’. Non si può mai predire esattamente il risultato di una singola misura di un qualsiasi processo atomico, ma si può predire solo la probabilità di un risultato in un intervallo di possibilità.”

Heisenberg,1927

Dal dibattito Heisenberg-Bohr

- cade il principio di causalità, così come il concetto di traiettoria;
- la “complementarità” *spiega* il principio di indeterminazione (nella formulazione di Heisenberg);
- “complementarità” come dualismo onda-corpuscolo (il raggio gamma “si propaga come un’onda e interagisce come un corpuscolo”) (Primo significato);
- l’apparato di misura svolge un ruolo “attivo” nel processo di misura.

2

ALICE NEL PAESE DEI QUANTI



ALICE NEL PAESE DEI QUANTI

Robert Gilmor, professore di fisica a Bristol, in un suo gustoso libro, osserva giustamente che l'universo della fisica quantistica è lo scenario in cui Lewis Carroll avrebbe ambientato le avventure di Alice se fosse vissuto nella nostra epoca. Lo sconcerto della protagonista anziché dal gatto del Cheshire, sarebbe stato provocato da quello di Schrödinger e dai cambiamenti percettivi, logici e metodologici richiesti per addentrarsi in questo nuovo mondo e comprenderne le regole. Cerchiamo di capire allora, prima di tutto, di che natura sia questo nuovo paradigma e per quale ragione esso provochi in Alice, di cui seguiremo le tracce, una meraviglia e uno stupore paragonabili a quelli così magistralmente descritti da Carroll.

- R. Gilmore, *Alice nel paese dei quanti. Le avventure della fisica*, Raffaello Cortina, Milano, 1996.

Alice e l'universo della precisione

Alice viveva nell'universo della precisione, di cui Koiré ci ha fornito una rappresentazione approfondita ed efficace. Un mondo ordinato, nel quale le teorie si riferiscono a *universi del discorso*, costituiti da *oggetti* (o individui) che godono di *proprietà* e *relazioni*. Queste teorie si valgono di un linguaggio che usa le informazioni, particolarmente quelle della realtà circostante, per elaborarle secondo procedure collaudate, concepite al fine di conseguire, secondo una successione di argomentazioni riproducibili e logicamente analizzabili, risultati non contenuti già nelle informazioni di partenza. Si tratta di un linguaggio formale, simbolico, che, usando regole di manipolazione logica autoconsistente di un repertorio di simboli condivisi (per significato e per uso) rende manifesta una conclusione verificabile degli assunti di partenza: non è difficile verificare che il suo contenuto dominante è soprattutto equivalente alla proposizione inespressa "se...allora", di cui riempie i puntini.

A. Koyré, *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Einaudi, Torino, 2000.

Alice e l'universo della precisione

All'interno di questo linguaggio le regole semantiche si comportano in modo *composizionale*, seguendo il principio di Frege, secondo il quale “il significato di un'espressione composta è determinato dalla struttura dell'espressione e dai significati delle espressioni componenti”, per cui i significati delle parti determinano il significato del tutto. Ogni ambiguità è bandita, in quanto i significati delle espressioni del linguaggio medesimo sono precisi e in linea di principio non sono ammesse situazioni semantiche sfumate o indeterminate. A maggior ragione sono escluse le contraddizioni, in un duplice senso.

Per il principio semantico di non contraddizione, una proposizione *A* e la sua negazione *non – A* non possono essere entrambe vere. E per il principio logico di non contraddizione, ogni proposizione contraddittoria che abbia la forma *A* e *non – A* è sempre falsa.

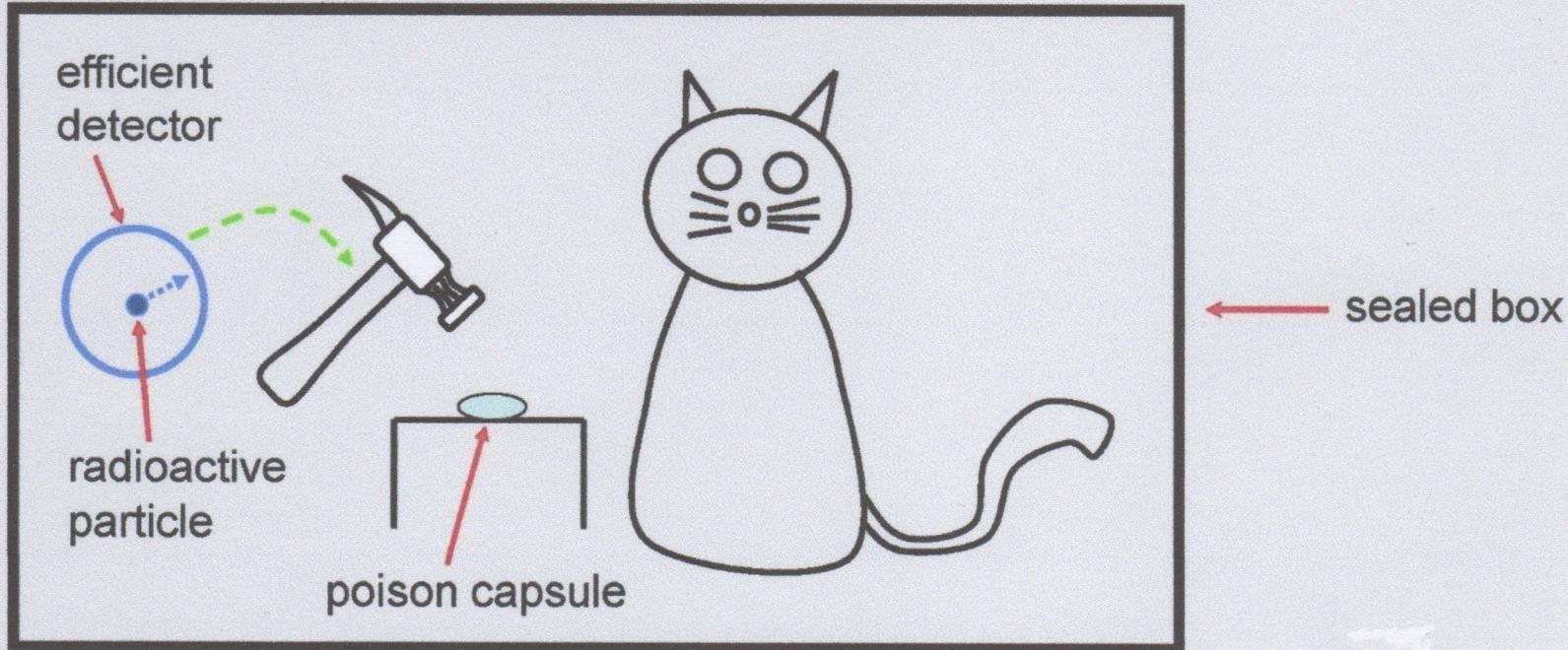
Alice e l'universo della precisione

Infine, ogni problema formulato nel linguaggio di una teoria è *semanticamente deciso*, in quanto vale il principio semantico del terzo escluso, secondo cui ogni proposizione è *vera* oppure *falsa*. E anche se a stabilire questa rigorosa linea di demarcazione tra ciò che è *vero* e ciò che è *falso* non può essere, in tutti i casi possibili, la mente umana, la quale non è in grado di risolvere in modo esaustivo i problemi che si pone, può comunque essere invocata e fatta valere l'«istanza superiore» messa in gioco da Galileo, una “*mente onnisciente*” in grado di fornire una riposta positiva o negativa a ogni questione formulata in maniera sensata.

Lo « scandaloso » mondo della teoria quantistica

All'improvviso, sognando di aprire una scatola d'acciaio nella quale si trova, in questo caso, non un coniglio bianco, ma un gatto, quello di Schrödinger, Alice cade in un mondo del tutto diverso, fatto di paradossi, assurdità e nonsensi. Interrogato dalla nuova venuta, il gatto le spiega infatti che la scatola da lei provvidenzialmente aperta era collegata a un meccanismo infernale che ne avrebbe provocato la morte per avvelenamento, o assicurato la sopravvivenza, a seconda del decadimento o meno (eventi con identica probabilità di realizzarsi) di un atomo di una sostanza radioattiva, messo in un contatore Geiger. In caso di decadimento il contatore avrebbe azionato un relais di un martelletto che avrebbe rotto una fiala con del cianuro. Prima dell'apertura della scatola l'intero sistema, le spiega ancora il gatto, era descritto da un'equazione, quella di Schrödinger appunto, in grado di determinare come evolvono spontaneamente, in assenza di osservatori che guardano e misurano, gli stati degli oggetti di quel mondo (e dunque anche la sua specifica situazione, in quanto animale macroscopico, la cui sorte risulta però inscindibilmente intrecciata con il mondo microscopico dell'atomo della sostanza radioattiva, dalla quale dipende la sua vita).

Erwin Schrödinger's Cat (1935)



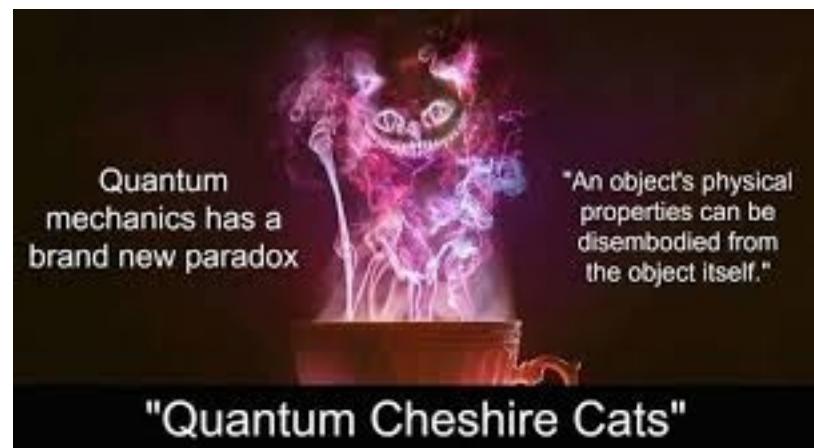
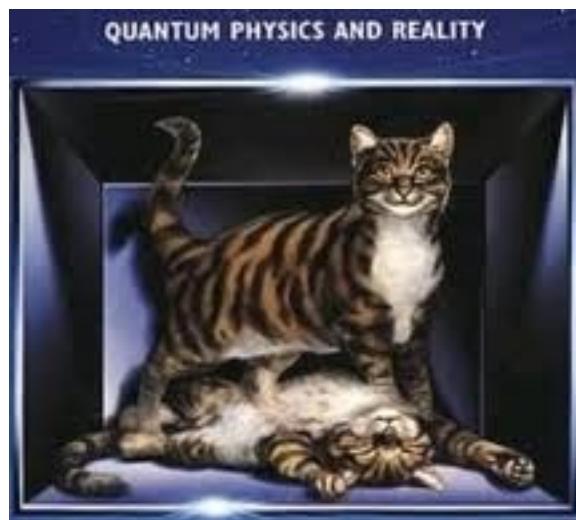
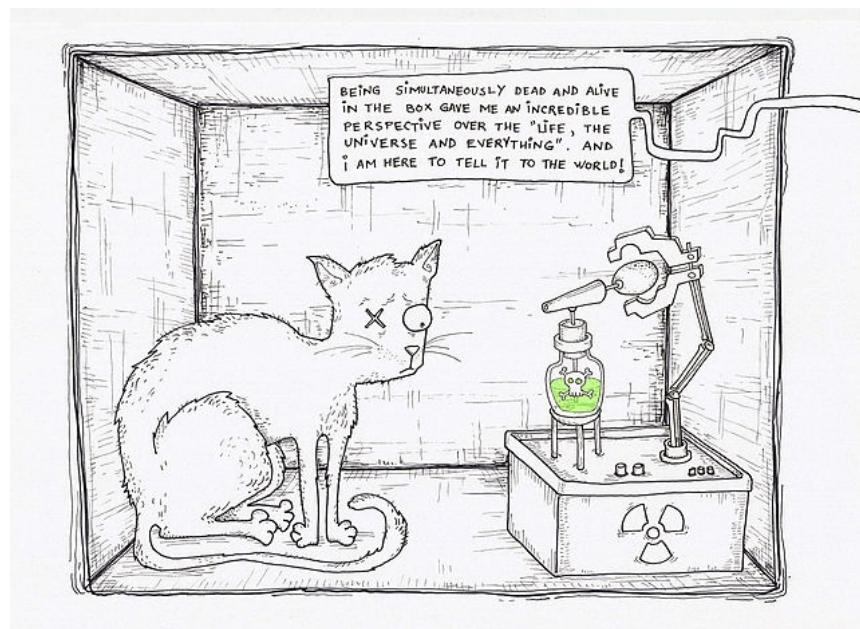
at half-life: $\Psi = |\text{blue circle with dot}\rangle|\text{alive cat}\rangle + |\text{blue circle with dashed arrow}\rangle|\text{dead cat}\rangle$

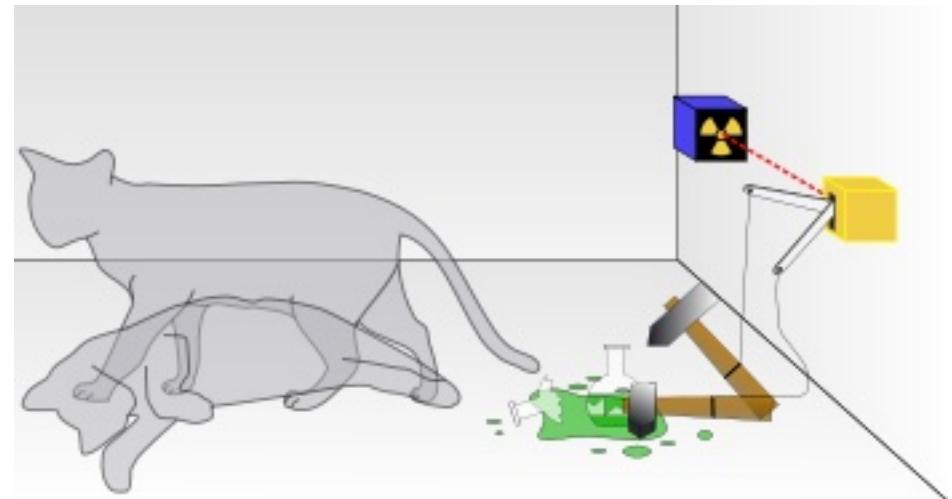
- state of cat is “entangled” with state of radioactive particle
- measured states are correlated

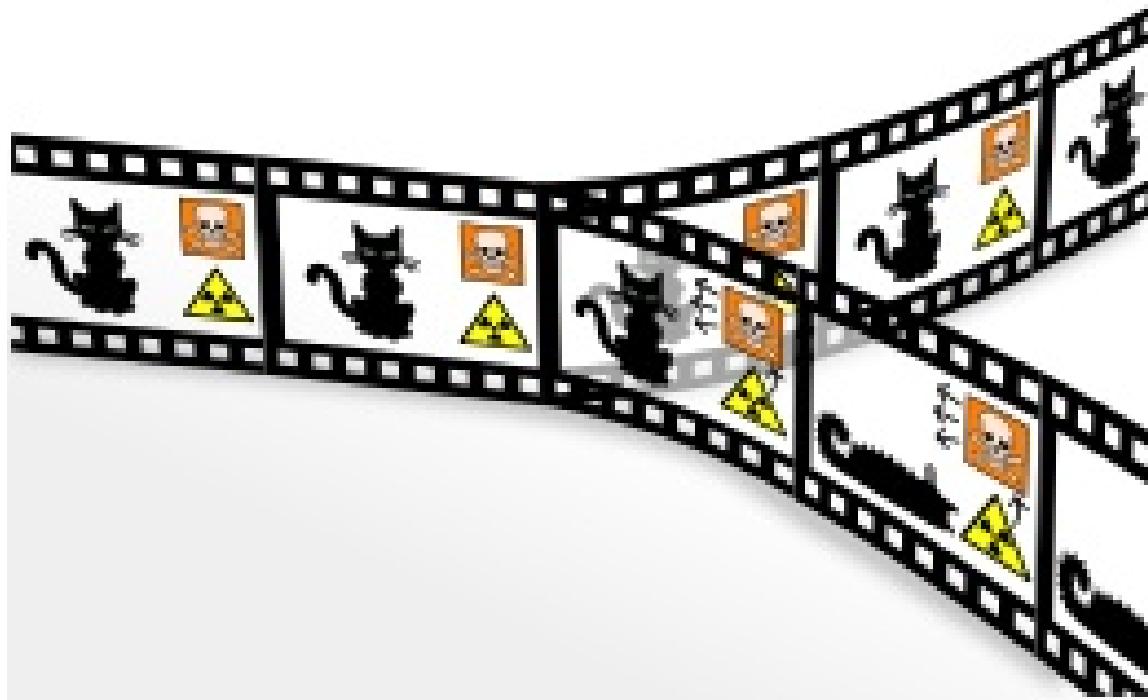


Il gatto di Schroedinger. Immagine proiettata da David J. Wineland durante la sua lezione Nobel tenuta a Stoccolma l'8 dicembre 2012.

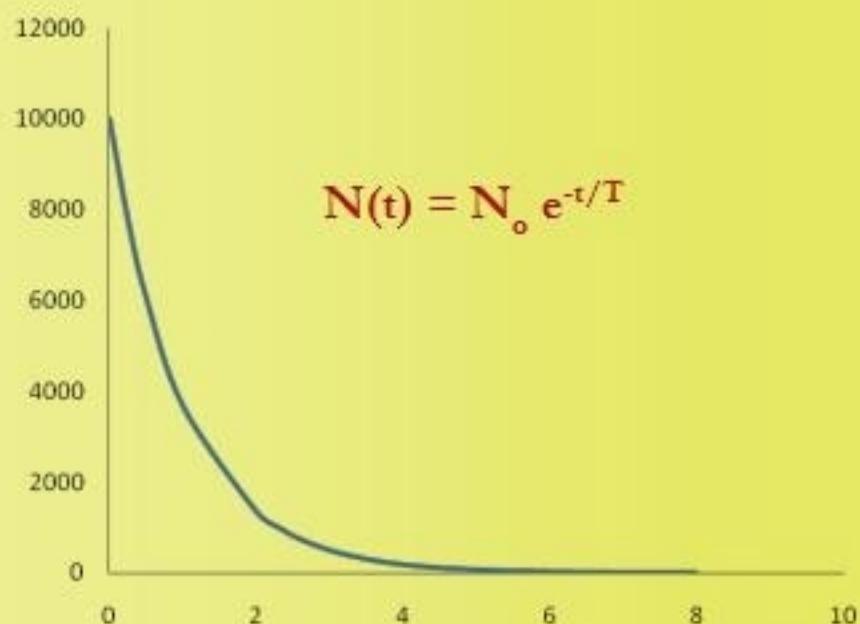
Schrödinger's Cat







Aleatorietà non epistemica



I nuclei radioattivi decadono con il tempo emettendo particelle di vario genere.

Alcune decadono rapidamente, altre impiegano anni o anche secoli.

Possiamo fare previsioni statistiche per un insieme di nuclei ma non si può prevedere il momento esatto quando un particolare nucleo decadrà.

Lo « scandaloso » mondo della teoria quantistica

L'evoluzione temporale descritta da questa equazione è *continua* e *lineare*: le sue soluzioni matematicamente possibili non sono soltanto quelle per le quali lo stato dell'oggetto (in questo caso, lo stato di vita o lo stato di morte del gatto medesimo) è determinato in modo esatto e preciso, ma anche quelle nelle quali il gatto si trova in una condizione di *sovraposizione* degli stati di vita e di morte. L'apertura della scatola da parte di Alice e il suo atto di guardare dentro di essa hanno determinato il *precipitare* della situazione dell'animale nello stato di vita, eliminando le altre possibilità.

Lo « scandaloso » mondo della teoria quantistica

Di fronte all'incredulità di Alice il gatto le spiega pazientemente che mentre nel suo universo di provenienza, quello della precisione, è del tutto ovvio ammettere che il gatto si trovi, a ogni istante, in uno stato determinato (o di vita o di morte), ed è di conseguenza completamente irragionevole pensare a un meccanismo in seguito al quale sia il fatto di guardare a produrre il verificarsi dell'una o dell'altra condizione, il mondo nel quale è capitata è invece descritto da una teoria nell'ambito della quale è impossibile limitarsi alle soluzioni dell'equazione di Schrödinger di una classe speciale K^0 che presenta le seguenti proprietà:

- 1. Se $\varphi_1(x)$ e $\varphi_2(x)$ fanno entrambe parte di K^0 , ma a posizioni medie molto diverse, la loro sovrapposizione $C_1\varphi_1(x) + C_2\varphi_2(x) = \varphi(x)$ (A) non fa più parte di K^0 ;
- 2. Se $\varphi_1(xt_0)$ fa parte di K^0 a un certo istante t_0 , $\varphi_1(xt)$ non fa più parte di K^0 quando l'intervallo di tempo trascorso $[t-t_0]$ è sufficientemente grande.

Lo « scandaloso » mondo della teoria quantistica

Ciò significa, detto più semplicemente, che in questo mondo non si può fare a meno di tenere presente anche le sovrapposizioni di tipo A, che non fanno parte della classe speciale K^0 . L'esigenza di tener conto anche di questo tipo di soluzioni dipende dal fatto che quella che porta il nome di Schrödinger è un'equazione d'onda e contiene la possibilità di descrivere fenomeni d'interferenza tipici del comportamento ondulatorio. Essa, inoltre, una volta che sia stato definito e preparato il sistema da studiare all'istante iniziale, fornisce, *in modo perfettamente deterministico*, le *previsioni* sul comportamento del sistema medesimo attraverso il calcolo della probabilità di trovarlo in un certo posto. Se abbiamo, ad esempio, un fascio di particelle che hanno attraversato la fenditura di uno schermo, è possibile prevedere le posizioni delle frange di diffrazione da esse provocate su una parete che si trovi al di là dello schermo, ma non il preciso punto della parete colpito da una specifica particella.

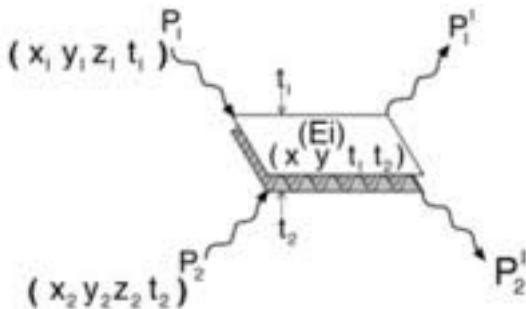
Lo « scandaloso » mondo della teoria quantistica

La meccanica quantistica dunque è essenzialmente una teoria statistica: essa descrive i processi fisici attraverso il *calcolo del valore medio* che una quantità fisica può assumere, quando viene misurata su un insieme di sistemi fisici identici, rinunciando alla previsione del valore preciso che questa quantità assume in un sistema particolare. Con la sua descrizione in termini di *funzione d'onda* ψ , questa teoria ha pertanto a che fare con una serie di casi possibili. Ciò vale anche, continua a spiegare pazientemente il gatto ad Alice, per la sua specifica situazione di oggetto macroscopico finito nel mondo dei quanti e legato in modo inestricabile a essi.

Lo «scandaloso» mondo della teoria quantistica

In più in questo mondo vige un principio, quello di “sovraposizione”, in virtù del quale viene violato uno dei presupposti di fondo dell'universo della precisione, cioè la convinzione di poter, almeno in linea di principio, pervenire, nell'ambito del linguaggio della teoria, a una *conoscenza non contraddittoria massimale*, che non può essere estesa in modo coerente a una informazione più precisa, e che *decide semanticamente* tutte le proprietà fisiche rilevanti di cui può godere un oggetto qualsiasi studiato. Informazioni di questo tipo, tali che anche l'ipotetica *mente onnisciente* di Galileo non potrebbe saperne di più, vengono chiamate *stati puri*. Stati che rappresentano conoscenze non massimali sono invece chiamati *miscele* (o anche *stati misti*).

ENTANGLEMENT



STATIONARY-STATES OVERPOSITION

Il principio di sovrapposizione

- cardine del distacco dalla visione classica
- impone una nuova concezione nella descrizione dei fenomeni

Anche quando si consideri una teoria alternativa in cui viene reintrodotto il principio di causalità e in cui si usano concetti classici (traiettoria)



Lo «scandaloso» mondo della teoria quantistica

Nel formalismo matematico della teoria, che descrive il mondo nel quale si trovano attualmente, sia gli stati puri sia quelli misti vengono identificati con tipi speciali di oggetti astratti: essi vivono in uno spazio astratto che rappresenta *l'ambiente matematico* per gli oggetti fisici studiati (teoricamente, questi spazi sono chiamati *spazi di Hilbert*). Diversamente da quello che accade nel caso degli stati puri dell'universo della precisione, tutti gli stati di questo mondo alternativo sono *logicamente incompleti*. Questo significa che uno stato puro non può *decidere semanticamente* tutte le proprietà fisiche rilevanti di cui può godere l'oggetto descritto da quello stato.

Lo « scandaloso » mondo della teoria quantistica

La ragione di ciò sta nel fatto che in questo mondo, come si è visto, vige il *principio di indeterminazione* di Heisenberg, in seguito al quale molte proprietà sono necessariamente *indeterminate*. Il suddetto principio stabilisce infatti che, in ciò che chiamiamo “realtà fisica” c’è un grado di incertezza intrinseco, che non dipende dai limiti della nostra conoscenza, ma è oggettivo e invalicabile anche per la mente onnisciente di Galileo, per cui, nel caso di una qualsiasi coppia di variabili canonicamente coniugate, ad esempio la posizione e la velocità di una particella, non si può misurare contemporaneamente l’una e l’altra con accuratezza arbitraria. Migliore è la misura della velocità e peggiore diventa quella della posizione, e viceversa. Heisenberg quantificò questa relazione, stabilendo esattamente l’imprecisione della misura dell’una nel caso che l’altra sia invece misurata nel modo più preciso possibile.

In fisica, le onde elettromagnetiche (cioè quello che comunemente chiamiamo "luce") sono caratterizzate dalla loro lunghezza d'onda(indicata con la lettera greca lambda), cioè dalla distanza tra due suoi massimi (o tra due minimi) consecutivi.La frequenza v , invece, e' data dal numero di massimi (o minimi) che si possono misurare nell'unita' di tempo (che e' il secondo); essa si misura in numero di "cicli" al secondo = Hertz o $1/s$. Quindi la frequenza e' espressa come inverso del tempo. Tra le due grandezze fisiche esiste una relazione di proporzionalità inversa, per cui maggiore è l'una e minore sarà l'altra. Questo dipende dal fatto che in fisica, in un moto rettilineo uniforme, la relazione tra spazio percorso e tempo impiegato a percorrerlo e' data da $s = v * t$. In questo caso lo spazio s è dato dalla lunghezza d'onda λ ,la velocità e' data dalla velocità della luce (costante $c=3\times10^8$ m/s) e il tempo t è l'inverso della frequenza. Quindi: $\lambda = c/v$

Lo « scandaloso » mondo della teoria quantistica

Proprio a causa della presenza di questo principio e del fatto, che ne consegue, che uno stato puro ψ non decide semanticamente tutte le proprietà di cui può godere l'oggetto da esso descritto, per cui alcune proprietà, come già evidenziato, restano indeterminate, *stati puri quantistici* (cioè gli stati che, giova ripeterlo, rappresentano un massimo d'informazione sul sistema studiato, un'informazione che non può essere estesa in modo coerente a una più ricca) possono essere *sommati*, determinando nuovi stati puri. Se prendiamo dunque due informazioni massimali ψ_1 e ψ_2 , è possibile sommarle ottenendo un nuovo stato puro ψ :

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$$

dove c_1 e c_2 sono due opportuni coefficienti numerici (complessi).

Lo « scandaloso » mondo della teoria quantistica

Questo nuovo stato di informazione massimale, dato dalla somma di ψ_1 e ψ_2 determina una *nuvola di proprietà potenziali* di cui, in un certo senso, il sistema sembra godere nello stesso tempo. È come se si dicesse: le cose *stanno così*, tuttavia *potrebbero stare anche* come asseriscono descrizioni alternative che non possiamo fare a meno di tener presenti. “Per questo nella situazione in cui io mi trovavo prima del tuo intervento”, dice il gatto a un’Alice sempre più sorpresa e perplessa, “bisognava tener conto contemporaneamente degli stati di vita, di morte e anche di sovrapposizione tra la vita e la morte. Nell’universo dal quale tu provieni *gli oggetti attuali*, quelli che esistono in uno spazio e in un tempo ben determinati e precisi, e *quelli possibili* sono distinti in modo netto, per cui l’insieme degli oggetti attuali è considerato un *sottoinsieme proprio* (senza contorni sfumati) della classe degli oggetti possibili. Nel mondo in cui ci troviamo, invece, non si può fare a meno di ammettere che *l’esistenza attuale possa, in generale, dipendere da esistenze virtuali*, per cui il concetto tradizionale di *oggetto fisico* tende a evaporare e *la realtà risulta, appunto, strettamente intrecciata con la possibilità*”.



Sovrapposizioni di stati

Lo “scandaloso” PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

Stati puri possono essere *sommati* determinando nuovi stati puri, per cui un sistema quantistico si può trovare in una *sovraposizione* di stati.

Stati puri

Uno **stato puro quantistico** ψ rappresenta un **massimo di informazione dell' osservatore sul sistema studiato**. Un' informazione che non può essere estesa in modo coerente a un'informazione più ricca.

Anche una ipotetica ***MENTE ONNISCIENTE*** non potrebbe saperne di più!

Heisenberg

Diversamente dagli stati puri classici, gli stati quantistici sono **LOGICAMENTE INCOMPLETI**.

Uno stato puro ψ non decide semanticamente **TUTTE LE PROPRIETA'** di cui può godere l'oggetto descritto da ψ . Molte proprietà restano indeterminate!

Questo è una conseguenza del **PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG**.⁴²

Nell'entanglement,

due o più particelle descritte da un'unica funzione d'onda possono, in particolari condizioni, mostrare correlazioni istantanee senza scambio d'energia.

Il fenomeno, verificato nel 1982 da Alain Aspect,
ha dato il via alle moderne ricerche sul teletrasporto.

Con la aleatorietà non epistemica e il fenomeno dell'*entanglement*
si determina un ridimensionamento in senso probabilistico
del principio di causa ed effetto.

Hans Hartung
T 1983-R22
Acrilico su tela

L'INDETERMINAZIONE SEMANTICA DELLA MQ

Per capire bene cosa significhi affermare che nella MQ molte proprietà restano indeterminate partiamo da due esempi di tipi diversi di indeterminazione semantica, proposti da Marisa Dalla Chiara e Roberto Giuntini (in *Filosofia della fisica*, a cura di G. Boniolo, Bruno Mondadori, Milano 1997, p. 637).

1. Amleto è alto un metro e settanta
2. Bruto è un uomo d'onore

L'INDETERMINAZIONE SEMANTICA DELLA MQ

Nel primo caso, l'incertezza del valore di verità sembra dipendere dall'incompletezza del concetto individuale associato al nome "Amleto". Com'è ben noto, diversamente dagli individui reale, i personaggi letterari hanno di solito molte proprietà che restano indefinite. Senza dubbio "essere alti un metro e settanta" rappresenta una proprietà precisa (*sharp*). Tuttavia il concetto che abbiamo associato ad Amleto non è completo: pertanto non è in grado di decidere una simile proprietà. Molto diversa è invece l'indeterminazione semantica del secondo esempio. In questo caso, è la stessa proprietà che è ambigua e imprecisa (*unsharp*). Che cosa significa esattamente "essere un uomo d'onore"? È inutile ricordare come proprio l'ambiguità intrinseca di questa espressione giochi un ruolo importante nel celebre monologo del *Giulio Cesare* di William Shakespeare.

L'INDETERMINAZIONE SEMANTICA DELLA MQ

In MQ i concetti individuali (gli stati puri del sistema) sono *logicamente incompleti*: pertanto non sono in grado di decidere tutte le proprietà rilevanti del sistema medesimo. In ogni caso, quando una proprietà non è impossibile esiste sempre uno stato puro che ne gode con certezza (ossia che le attribuisce valore di probabilità 1).

Una caratteristica dell'approccio *unsharp* è lo studio di indeterminazioni semantiche concernenti proprietà *intrinsecamente ambigue*.

I complessi concetti della meccanica quantistica appaiono dunque infarciti di un'ambiguità intrinseca e di paradossi: ingredienti, questi, usualmente presenti nella produzione artistica, ma generalmente ritenuti estranei al mondo delle scienze esatte.

LE LOGICHE QUANTISTICHE *UNSHARP*

Il riferimento a queste proprietà intrinsecamente ambigue legittima il ricorso a una *logica quantistica parziale* fondata sulla seguente idea: dal punto di vista meramente linguistico, le congiunzioni e le disgiunzioni fra enunciati quantistici sono sempre sintatticamente corrette. Tuttavia dal punto di vista semantico, congiunzioni e disgiunzioni possono non avere un significato determinato. Ciò avviene, in particolare, quando si ha a che fare con enunciati che riguardano *grandezze fisiche incompatibili fra loro* (come la posizione e la quantità di moto, oppure lo spin in due direzioni diverse).

In generale, le logiche quantistiche *unsharp* sono esempi di logiche *fuzzy* o *paraconsistenti*, che tollerano violazioni del principio di non contraddizione: se α descrive una proposizione “sufficientemente ambigua”, la contraddizione $\alpha \wedge \neg \alpha$ non è necessariamente falsa! Cade inoltre il principio classico di Duns Scoto, secondo cui *ex absurdo sequitur quodlibet* (da una contraddizione segue logicamente qualunque cosa).

LE LOGICHE QUANTISTICHE *UNSHARP*

La logica quantistica ci ha dunque costretti a cambiare la nostra idea tradizionale di disgiunzione: “avere un valore” non significa “avere un valore determinato”. Riferiamoci per esempio a un elettrone in un certo stato ψ e supponiamo di sapere che per la nostra particella in quello stato il valore della grandezza spin nella direzione x è positivo. Dunque, secondo la semantica logico-quantistica, possiamo dire che ψ verifica l'enunciato “lo spin nella direzione x è positivo”.

In virtù del principio di indeterminazione, il valore dello spin in ogni altra direzione, ad esempio nella direzione y , sarà allora totalmente indeterminato. Tuttavia, nello stesso tempo, dovrà valere la disgiunzione “il valore dello spin nella direzione y è positivo oppure negativo”.

LE LOGICHE QUANTISTICHE *UNSHARP*

In ogni caso, è chiaro che la logica quantistica interessa solo particolari frammenti linguistici della MQ, e non tutta la teoria, nella sua globalità. Infatti la parte matematica della MQ continua a usare esclusivamente la logica classica. A tutt'oggi non esiste una teoria degli spazi di Hilbert formalizzata nella logica quantistica invece che nella logica classica.

La logica quantistica interviene nel sottolinguaggio sperimentale della teoria, i cui enunciati atomici hanno il seguente significato: “il valore per la tale grandezza fisica cade nel tale insieme di possibili valori”.

Entanglement

L' ENTANGLEMENT QUANTISTICO

Un oggetto composto

- lo **stato** dell' oggetto composto è **puro** (una informazione massimale)
- questo stato determina gli stati delle **parti**, che non possono essere puri.

Entanglement

Il fenomeno dell'*entanglement* è una conseguenza della linearità dell'equazione di Schrödinger, la quale implica che il sistema composto costituito dall'oggetto più l'apparato misuratore evolva in una sovrapposizione di stati, quando lo stato del sistema oggetto è esso stesso una sovrapposizione.

Somma

Che cosa può significare la somma fra due informazioni massimali?

$$\psi = a \psi_1 + b \psi_2$$

Fonte: M.L. Dalla Chiara e G. Toraldo di Francia, *Fisica, Logica e Musica*

NUVOLA

Ψ_1 e Ψ_2 determinano una

“nuvola di proprietà potenziali”

di cui, in un certo senso, il sistema sembra godere nello stesso tempo!

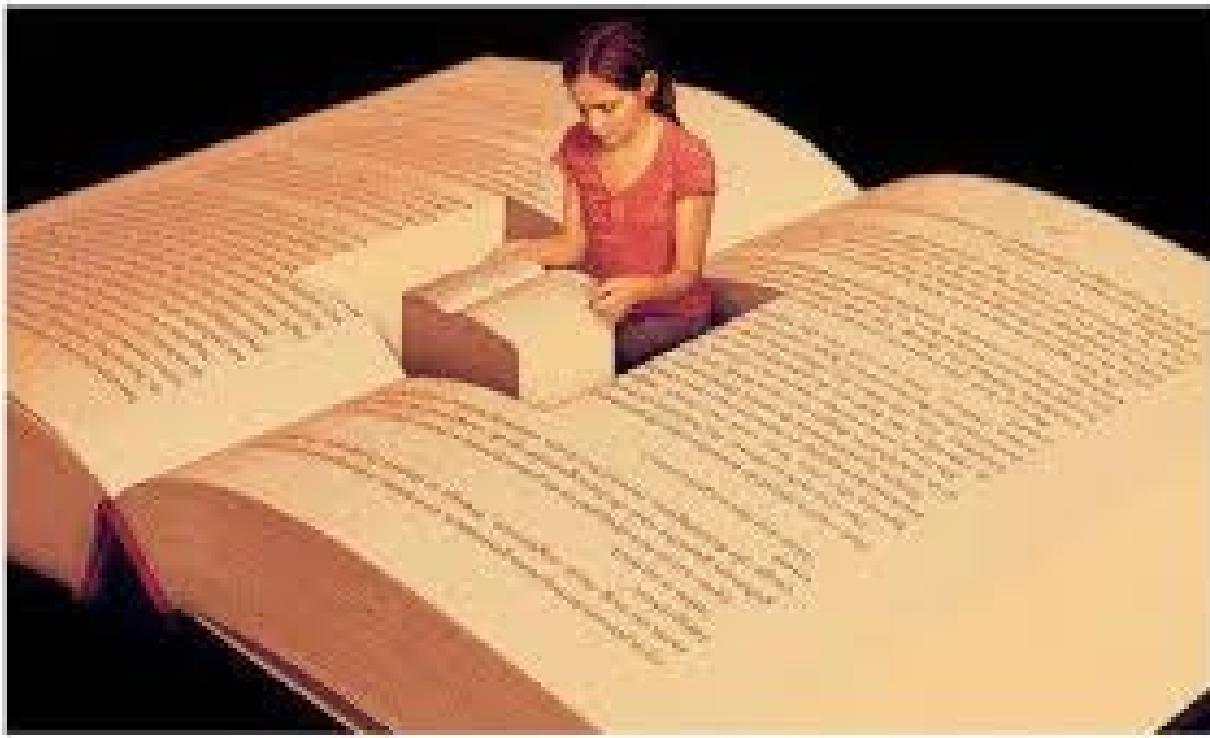
Fonte: M.L. Dalla Chiara e G. Toraldo di Francia, *Fisica, Logica e Musica*

Realtà-Possibilità

La **REALTA'** sembra intrecciata
(entangled)

con la **POSSIBILITA'**!

Fonte: M.L. Dalla Chiara e G. Toraldo di Francia, *Fisica, Logica e Musica*



L'evento della MQ come STRATO INTERMEDIO

Heisenberg: «Le onde di probabilità di Bohr, Kramers, Slater possono essere interpretate come una formulazione quantitativa del concetto aristotelico di $\delta\upsilon\upsilon\alpha\mu\iota\varsigma$, di possibilità, chiamato anche più tardi col nome latino di *potentia*. L'idea che quanto succede non sia determinato in modo perentorio, ma che già la possibilità o 'tendenza' al verificarsi d'un fatto possieda una specie di verità ha, nella filosofia di Aristotele, una parte decisiva. Si tratta d'una specie di STRATO INTERMEDIO, che sta in mezzo fra la verità massiccia della materia e la verità spirituale dell'idea o dell'immagine».

KANT: REALITÄT ED EXISTENZ

In questo quadro è interessante richiamare la distinzione, netta e precisa, proposta da Kant tra la *Realität*, categoria della qualità, corrispondente al giudizio affermativo, da una parte, e il concetto di *Dasein* e quelli di *Existenz* e di *Wirklichkeit*, cioè di esistenza e di effettualità, strettamente associati a esso, dall'altra, che rientrano invece nell'ambito delle categorie della modalità. Ciò che emerge da questa distinzione è che la realtà in quanto categoria della qualità non si riferisce all'esistenza effettiva di un qualcosa nel "mondo" esterno, bensì alle determinazioni e ai contenuti che sono propri di un qualcosa in quanto *res*, cioè alla determinazione del contenuto di una cosa in quanto cosa.

KANT: REALITÄT ED EXISTENZ

Quale sia il senso e quale l'oggetto di questo sguardo rivolto verso la cerchia dei possibili e puntato su ciò che ne traccia i limiti è ben illustrato e spiegato dall'esempio, proposto nella *Critica della Ragion pura*, là dove si afferma che cento talleri possibili non si distinguono affatto da cento talleri effettivi, se questi ultimi vengono considerati dal punto di vista che Kant ci invita ad assumere, quello del *Gegenstand* e della sua *Position an sich selbst*, cioè della *res*, che non può variare, sia che venga considerata come possibile o come effettiva, dal momento che si tratta, nell'un caso e nell'altro, dello stesso *quid*.

KANT: REALITÄT ED EXISTENZ

Questo *quid* è l'essenza al quale l'effettualità non fa che aggiungersi successivamente, per cui si può dire che anche l'esistenza ha il valore e il significato d'una realtà. Ma è il *quid* in se stesso, in quanto tale, che consente all'oggetto di definirsi, di qualificarsi in un modo specifico che sia sufficiente a differenziarlo da ogni altro: esso, pertanto, costituisce la risposta appropriata e sufficiente alla domanda tendente a stabilire ciò che una cosa è, e non ad appurare se tale cosa esista. Intesa in questo modo la realtà, come si è detto, designa la *totalità della determinazione possibile della res*.

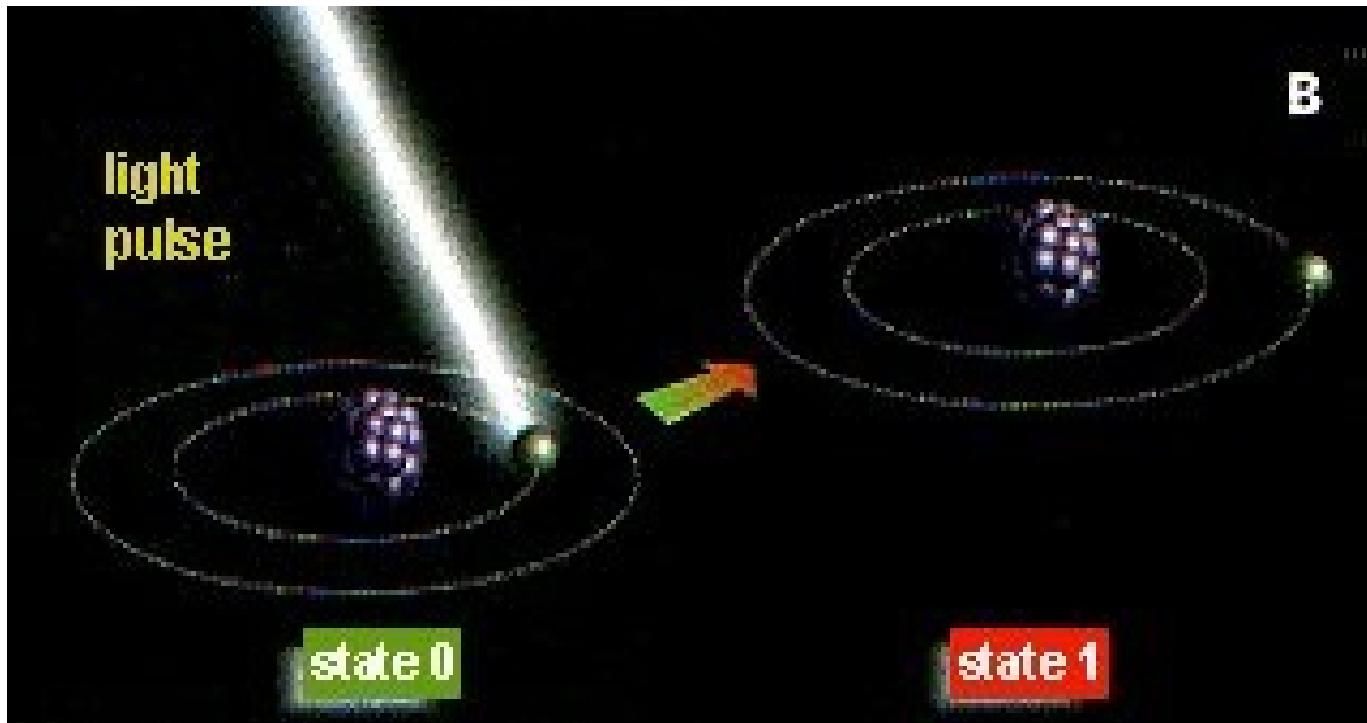
ESPLORIAMO IL MONDO INTERMÉDIO 1

Per cominciare a capire cosa sia questo «mondo intermedio» riprendiamo il concetto di proprietà intrinsecamente ambigue (*unsharp*) come “Bruto è un uomo d'onore”.

Un caso limite di assoluta ambiguità è rappresentato dalla cosiddetta *proprietà semitrasparente (translucida)*, a cui ogni stato puro associa valore di verità $\frac{1}{2}$. Questa proprietà corrisponde all'operatore $1/2I$ (dove I è l'operatore d'identità).

Immaginiamo ad esempio, in un modello del tutto intuitivo, un atomo che abbia un solo elettrone nell'orbita più esterna. Questo elettrone può essere eccitato in un'orbita più ampia illuminandolo con una luce di una particolare frequenza. Se lo stato eccitato è abbastanza stabile possiamo utilizzare quest'ultimo e lo stato precedente (ossia quello relativo all'orbita interna) rispettivamente come gli stati 1 e 0. Se poi lo stesso raggio di luce viene inviato sull'elettrone quando questo si trova nell'orbita esterna esso ritorna all'orbita interna, emettendo un fotone. In sostanza questo meccanismo, descritto in maniera quanto mai approssimativa, potrebbe essere utilizzato per realizzare a livello di un singolo atomo l'operatore NOT.

ESPLORIAMO IL MONDO INTERMÉDIO 2



Un tipico modello fisico per l'operatore Not
 $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$; $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$.

ESPLORIAMO IL MONDO INTERMÉDIO 3

Ma che succede se inviamo sull'elettrone un raggio di luce per una durata di tempo che è la metà di quella necessaria a farlo saltare nell'altra orbita e dunque per portare a compimento l'operazione logica NOT appena descritta? In questo caso lo stato dell'elettrone non sarà né $|0\rangle$ né $|1\rangle$, ma piuttosto una sovrapposizione di entrambi gli stati.

Dal punto di vista logico per avere un analogo di questa situazione dobbiamo introdurre un nuovo operatore $\sqrt{\text{Not}}$ che può essere considerato come un «tentativo di negazione parziale», una sorta di «mezza negazione», che trasforma valori precisi e ben definiti d'informazione come $|0\rangle$ o $|1\rangle$ in qualcosa di massimamente incerto. Nella logica booleana e in quella fuzzy non c'è alcuna operazione logica corrispondente a questa.

ESPLORIAMO IL MONDO INTERMEDIUM 4

Il ricorso a questa nuova operazione logica $\sqrt{\text{Not}}$ non va tuttavia ritenuto arbitrario, in quanto risulta motivato dall'esistenza in natura di un suo fedele modello fisico.



Un tipico modello fisico per l'operatore $\sqrt{\text{Not}}$

UN'ONTOLOGIA INTERMEDIA

Comincia così ad affacciarsi un'ontologia non arbitraria, intermedia, corrispondente a stati translucidi riguardanti proprietà semitrasparenti.

Per trattare adeguatamente questo tipo di ontologia ci vuole un'epistemologia ad hoc, un'*epistemologia del simbolo*, in quanto il simbolo, nell'accezione che ne fornisce Jung, è caratterizzato da una proprietà, la *pregnanza*, che lo mette in condizione di avvertire la presenza di un qualcosa e di alludere a questo “qualcosa”, senza tuttavia essere in grado di specificarne la natura e di fornirne una descrizione soddisfacente.

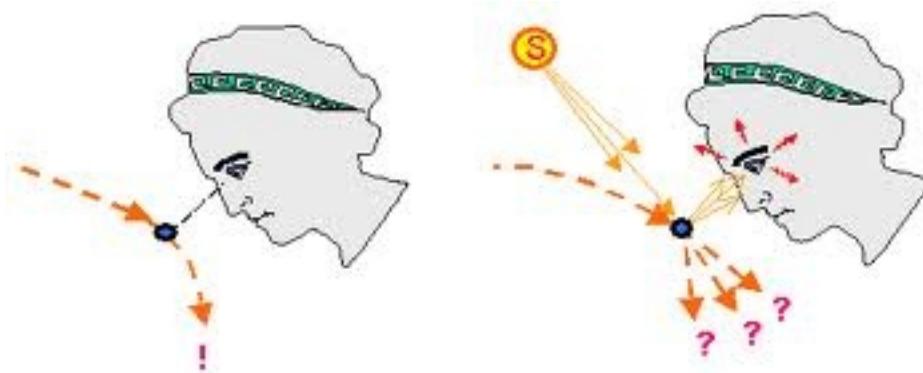
IL MONDO INTERMÉDIO

L'idea di "mondo intermedio" scaturisce dalla convinzione che il dominio dell'esperienza, nel suo insieme, acquisti un significato e un valore tanto più profondi quanto più si raccorda al mondo invisibile (quella "realtà invisibile" in riferimento alla quale Pauli osserva che disponiamo solo di piccoli frammenti di evidenza e di luce) traendo da esso forza, alimento e stimoli continui. Tra interno ed esterno, tra soggetto e oggetto, tra realtà e illusione c'è dunque un processo dinamico di continua interazione caratterizzato da un elevato livello di flessibilità e di scambio interattivo, in virtù del quale il gioco degli opposti non separa, ma integra. I ruoli, le funzioni si ribaltano di continuo e si donano reciprocamente senso. Si ha così un esplicito distacco dall'usuale modalità di pensiero accentuato sulla sostanza, al quale subentra l'idea che, come modalità primitiva ed equipollente del reale, vada assunta la *relazione*.

IL DUBBIO DI ALICE

Ciò che tu hai fatto ha provocato una trasformazione di stato *discontinua, stocastica* e non *prevedibile* dal punto di vista della teoria: mentre in base all'equazione suddetta il mio stato era delocalizzato rispetto alle condizioni di vita, di morte e di sovrapposizione tra di esse, e tale era destinato a rimanere anche nei tempi successivi, aprendo la scatola e guardandoci dentro tu hai osservato che ero in vita e in questo modo hai localizzato e reso attuale questo mio specifico stato, spazzando via anche dall'orizzonte delle semplici possibilità tutti gli altri".

"Se non ho capito male", osserva a questo punto Alice, "ciò significa che ci troviamo in un mondo diviso, intrinsecamente conflittuale, nel quale coesistono due modalità di evoluzione della stessa situazione profondamente diverse e reciprocamente incompatibili, una continua, lineare e perfettamente prevedibile, l'altra discontinua, stocastica e non prevedibile, determinata da un osservatore che interviene e guarda o esegue una misura, come ho fatto io".



IL DUBBIO DI ALICE

“Proprio così”, risponde il gatto, “vedo che cominci a capire dove sei capitata e quali siano le conseguenze del fatto che qui *quel che si calcola*, con la funzione d’onda (l’equazione di Schrödinger), *non è quel che si misura* e del tipo di interazione che, proprio in seguito a questa discrepanza, si viene a creare quando un *soggetto osservatore* agisce su un *oggetto osservato*, eseguendo una misura su di esso. Mentre nel tuo universo di provenienza ogni operazione di misura costituisce una “scoperta epistemica” di qualcosa che preesisteva alla misura stessa, in questo mondo è la scelta dell’osservatore, il quale decide di misurare la posizione piuttosto che la grandezza di una particella qualunque, a rendere determinato ciò che prima era *oggettivamente* del tutto indeterminato e a rendere attuali proprietà che in precedenza erano soltanto potenziali.

IL DUBBIO DI ALICE

Diciamolo in termini più rigorosi e precisi. Quando si fa una misura, quest'ultima provoca il collasso (o riduzione) del pacchetto d'onda, per cui lo stato ψ , rispetto a cui una data proprietà (ad esempio la posizione A) era indeterminata, si trasforma nello stato ψ_1 , che *decide* quella proprietà. A questo punto si può effettuare una seconda misurazione, che provoca una diversa riduzione del pacchetto d'onda, in seguito alla quale lo stato ψ , rispetto al quale era indeterminato anche il momento (B) della particella, si trasforma, per esempio, nello stato ψ_2 che decide questa seconda proprietà, lasciando ovviamente indeterminata la posizione. A e B non commutano, cioè $AB \neq BA$, e quindi la conoscenza precisa dell'una preclude questa stessa conoscenza per l'altra. La disuguaglianza $AB \neq BA$ andrebbe letta, per correttezza, come 'disuguaglianza condizionata', dal momento che l'esistenza del prodotto $A \cdot B$ e $B \cdot A$ non sempre è garantita. Non essendoci una particella che viaggia con le sue proprietà e stati *già dati* e che, al più, si disturba con la misura, ed essendo quest'ultima decisiva al fine di determinare la posizione o il momento, che non possono avere simultaneamente la specificazione e il grado di precisione voluti, i valori ottenuti *dipendono dall'ordine* in cui vengono fatte le misure. La teoria, di conseguenza, ci pone di fronte a stati che sono la sovrapposizione di due o più altri.

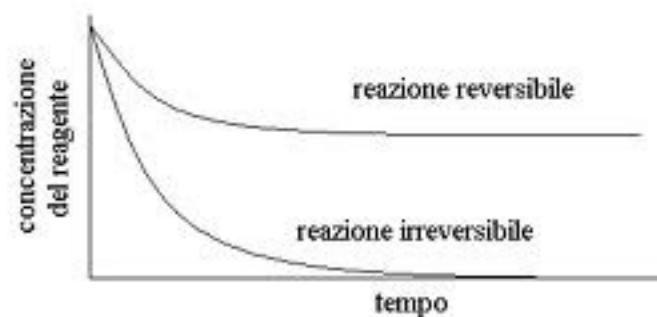
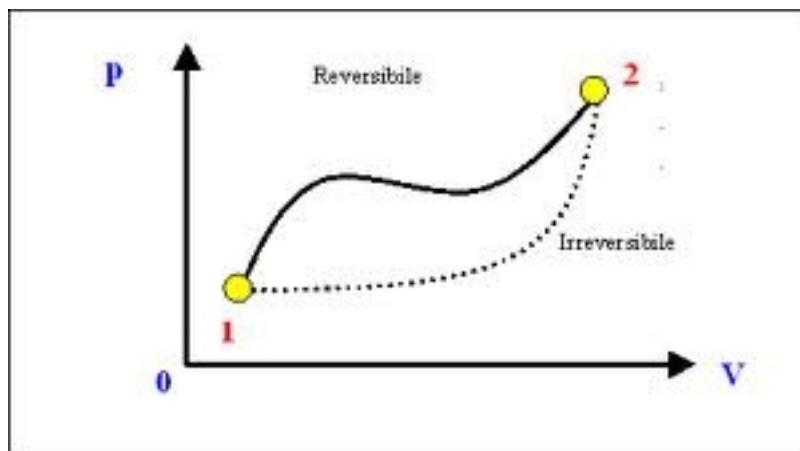
DESCRIVERE E MISURARE

Descrivere non equivale a misurare: di per sé la descrizione prescinde dalla dimensione temporale, mentre la misura implica un'azione irreversibile che auspicabilmente porta a un'informazione – un'informazione intesa quale esito di un'azione che dà forma –; d'altra parte, per definizione, ogni azione richiede tempo ed energia (nella fisica quantistica l'azione è un concetto fondamentale; essa è espressa dal prodotto di un'energia per un tempo e si misura in unità della costante di Planck, $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$).

IL RUOLO DEL TEMPO NEL PROCESSO DI MISURAZIONE

Per passare da una descrizione in cui il soggetto non ha un ruolo di effettiva partecipazione a una misura attiva occorre dunque rimuovere la stazionarietà e entrare nella *dimensione tempo*.

Il problema maggiore della meccanica quantistica è proprio quello di conciliare l'aspetto reversibile dell'evoluzione con quello intrinsecamente irreversibile della misurazione. La teoria quantistica “senza osservazione, come afferma Heisenberg “non determina più i fenomeni stessi, ma la loro *possibilità, la probabilità che succeda qualche cosa*”.



MISURA

Che cosa succede quando si fa una misura?

La misura provoca

**IL COLLASSO (o RIDUZIONE)
del PACCHETTO d'ONDA**

FUNZIONE D'ONDA DI SCHRODINGER

Nobel per la Fisica 1933



Classical Conservation of Energy Hamilton's Law

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E$$

Energy = Potential + Kinetic Energy

$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx^2 \rightarrow E = kx^2 + \frac{1}{2}mv^2$

Quantum Conservation of Energy Schrödinger Equation

In analogy the Hamiltonian is a linear operator, physical variables take the form of "operators"

$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{1}{2}k\hat{x}^2$

The energy becomes the Hamiltonian operator

$\hat{H}\Psi = E\Psi$

Wavfunction

The form of the Hamiltonian operator for a quantum harmonic oscillator

Energy "operator" for the system.

Fino a quando non avviene una interazione che determina (attualizza) cosa, delle infinite possibilità, diviene REALTA' (collasso della equazione d'onda),

TUTTO E' POSSIBILE !

In MQ, il *problema della misura* con il collasso irreversibile della funzione d'onda ci dice che l'osservatore e l'oggetto osservato non sono del tutto distinguibili.

Si ha il superamento della **distinzione cartesiana** fra soggetto e oggetto e della **reversibilità temporale** della fisica classica.



Yves Tanguy, *Indefinite Divisibility*. Olio su tela, 1942

IL COLLASSO

$$\Psi \rightarrow \Psi_1$$

Lo stato Ψ , rispetto a cui una data proprietà era indeterminata, si trasforma nello stato Ψ_1 , che decide quella proprietà.

La scelta dell'osservatore

PROBLEMA CRUCIALE

Che cosa ha determinato il passaggio dalla
POSSIBILITA' alla **REALTA'** ?

**La scelta e l'azione
dell' OSSERVATORE?**

LA SEMANTICA DELLA MQ

Riassumendo, nella semantica, suggerita dalla teoria quantistica e dal tipo di computazione che vige all'interno di essa, risultano soddisfatte le condizioni seguenti:

1. i *significati globali* (che possono corrispondere a una *Gestalt*) sono intrinsecamente *vaghi*, in quanto lasciano semanticamente indecise molte proprietà rilevanti degli oggetti studiati;
2. ogni significato determina alcuni *significati parziali*, che sono di solito più vaghi del significato globale;
3. i significati (*Gestalten*) possono essere rappresentati come *sovraposizioni* di altri significati, eventualmente associati a valori di probabilità;
4. l'osservazione e l'esecuzione di una misurazione fanno sparire questa sovrapposizione di significati, riducendo a uno solo, quello riscontrato con questi atti, il precedente spettro di possibilità alternative”.

LA CONCLUSIONE DEL GATTO

“Spero”, concluse il gatto, “che a questo punto ti sia chiaro quello che mi è capitato e quale sia il mio destino. Pur provenendo, come te, dall'universo della precisione, il meccanismo infernale ideato da quel diavolo di Schrödinger mi ha fatto acquisire i tratti distintivi di questo mondo bizzarro e delle entità presenti all'interno di esso: in particolare quelli di non poter rivendicare una mia specifica *individualità* e di non essere mai ripetibile in modo identico. In quanto *inghiottito nel paese dei quanti*, anch'io sono soggetto a un'*interferenza irreversibile* con le condizioni nelle quali si sviluppa un processo di osservazione e di misurazione. In seguito a ciò, questo processo diventa parte del mio stesso essere e costitutivo di esso, cioè l'osservazione e la misurazione danno la specificazione a ciò che sono, per cui l'interazione con chi mi ha osservato, in questo caso con te, forma una parte inseparabile del mio essere e lascia tracce irreversibili sul corso della mia vita. Insomma, apprendo quella scatola e osservandomi, tu hai condizionato la mia esistenza e ne sei diventata, in modo irreversibile, una parte dalla quale non potrei più prescindere”.

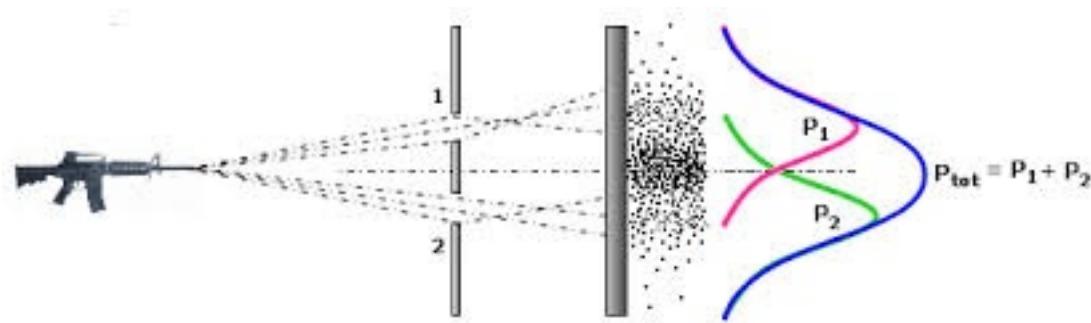
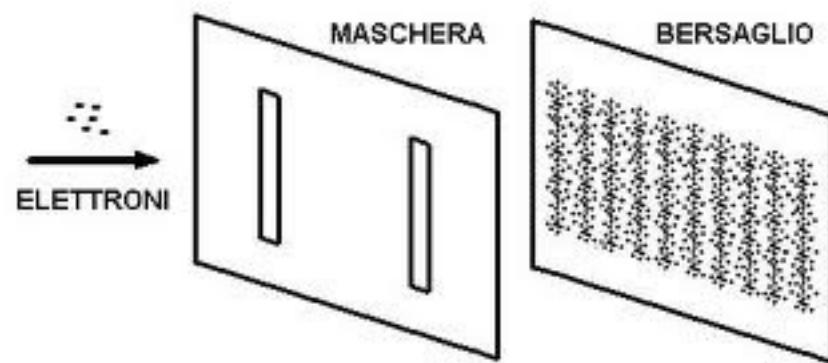
COME DESCRIVERE IL MONDO DELLA MQ

“Ho capito”, rispose Alice, “e proprio per questo ho un’ultima domanda da farti. Se questo mondo è così eccentrico, rispetto al nostro universo di provenienza, e se il nostro linguaggio è stato forgiato per parlare di quest’ultimo, come possiamo descrivere situazioni così strane e tanto diverse dalla nostra esperienza abituale?”

“Questa si che è una domanda sensata e profonda”, osservò il gatto. “Piuttosto che cercare legami con la nostra comune esperienza pregressa dobbiamo usare metodi più astratti e concettuali. Come dice nel suo manuale dedicato al mondo nel quale ci troviamo Richard Feynman, che ne è uno studioso profondo, ‘non possiamo eliminare il mistero «spiegando» come avviene. Ci limiteremo a *descrivere* come avviene: e nel far questo avremo descritto le principali caratteristiche’ di un ambiente che tu giustamente definisci eccentrico”.

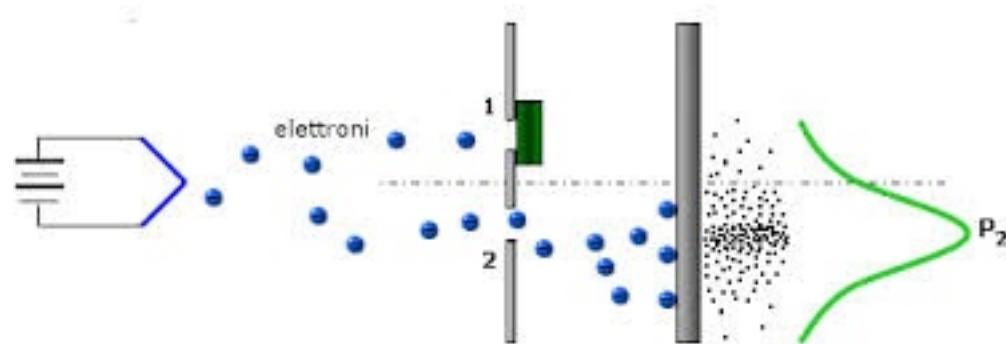
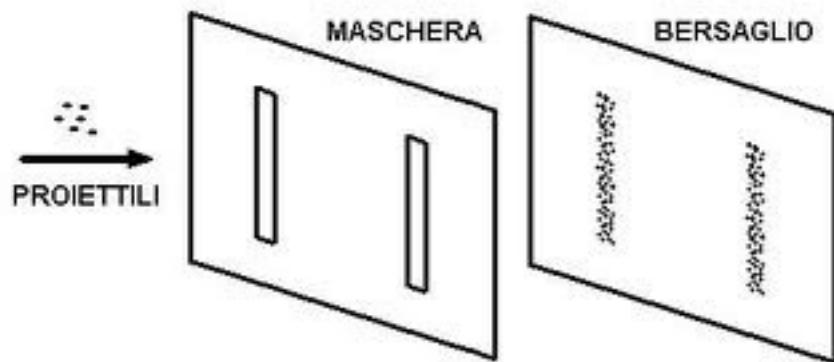
COME DESCRIVERE IL MONDO DELLA MQ

E sai come lo stesso Feynman cerca di capire e di far capire le situazioni che si verificano qui e il comportamento dei fenomeni di cui ti ho diffusamente parlato? Ce lo dice ancora lui stesso: ‘mettendoli a confronto, in una particolare situazione sperimentale, con particelle a noi più familiari, come ad esempio dei piccoli proiettili, e poi anche delle onde, per esempio del tipo di quelle che si formano nell’acqua’. Prendendo cioè il linguaggio di cui ci serviamo per descrivere il nostro universo della precisione e usandolo come metafora, attraverso un processo di *trasferimento analogico* di un vocabolario in un altro, per poter parlare di ciò per cui non è disponibile un linguaggio osservativo e sperimentale. Naturalmente questo trasferimento analogico, in virtù del quale adottiamo i nostri abituali strumenti linguistici come metafore per parlare di ciò che altrimenti sarebbe muto e indescrivibile, non deve e non può cancellare le differenze tra la realtà e gli oggetti del nostro universo e quelli di questo mondo, dove, come ti ho detto, è come se gli oggetti tendessero a «evaporare» e la realtà è profondamente intrecciata con la possibilità.



COME DESCRIVERE IL MONDO DELLA MQ

Infatti Feynman si affretta a chiarire, ad esempio, che “dobbiamo immaginare un’esperienza leggermente più idealizzata, in cui i proiettili non siano delle pallottole reali, ma siano *indistruttibili* – che non possano cioè spezzarsi in due’. Vedere e pensare la pallottola come un blocco indivisibile, che si comporta sempre come una pallottola intera, cioè come qualcosa di sensibilmente diverso da ciò che usualmente chiamiamo con quel nome, è il prezzo che dobbiamo pagare per riuscire a dar voce al mondo in cui siamo capitati. Il linguaggio che ne scaturisce non è, pertanto, né quello del nostro universo della precisione, né quello di quest’ultimo mondo: è piuttosto il linguaggio della loro ideale convergenza, di una sorta di «terra di mezzo» astratta e ibrida nella quale questi due ambienti così diversi s’ incontrano e dialogano.



3

IL DIBATTITO SUL CONCETTO DI REALTÀ FISICA



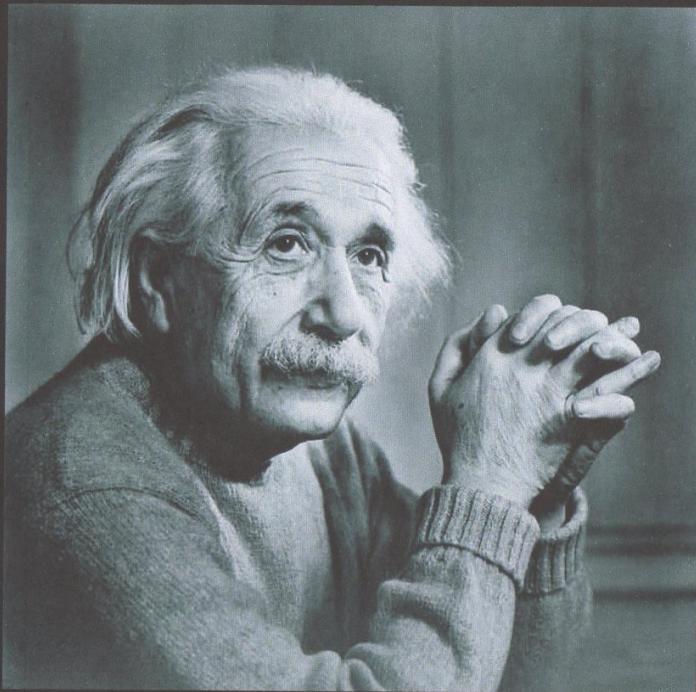
A. Einstein



B. Podolsky



N. Rosen



Albert Einstein

Alcuni fisici, tra cui ci sono anch'io, non possono credere che si debba abbandonare, ora e per sempre, l'idea che la realtà sia direttamente rappresentabile nello spazio e nel tempo; o che si debba accettare l'idea che gli eventi in natura siano analoghi a giochi del caso.

Probabilmente mai prima d'ora una teoria era in grado di fornirci una chiave per interpretare e calcolare un gruppo così eterogeneo di fenomeni come la teoria quantistica.

Nonostante questo, io credo che questa teoria ci induca in errore, perché, secondo me, è una rappresentazione incompleta delle cose reali.[...] L'incompletezza della rappresentazione porta necessariamente alla natura statistica (incompleta) delle leggi.

IL PARADOSSO EPR

Questa situazione richiama in modo tutt'altro che forzato quella esposta in un articolo del 1935 di Einstein, scritto in collaborazione con i fisici Nathan Rosen e Boris Podolsky, nel quale veniva esposto il paradosso che porta il nome dei tre autori (il paradosso EPR). In meccanica quantistica, argomentavano i tre fisici, secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg, è impossibile, come si è visto, misurare con arbitraria precisione, a un dato istante, *sia* la posizione *sia* la velocità di una particella. Ma immaginiamo una particella che si disintegri in due particelle, che schizzino via in direzioni opposte a uguale velocità: semplificando molto ma cercando di rispettare la sostanza dell'argomento, possiamo dire che se misuriamo la posizione di una delle due particelle e la velocità dell'altra, riusciremo, unendo le informazioni raccolte, a conoscere sia la velocità sia la posizione di ogni singola particella. Insomma, due particelle opportunamente predisposte – particelle *entangled*, o *intricate* come le abbiamo chiamate – rimangono soggette a una correlazione a distanza che agisce in maniera istantanea.

IL PARADOSSO EPR

L'esperimento mentale di Einstein-Podolsky-Rosen lasciava pertanto aperte solo due possibilità:

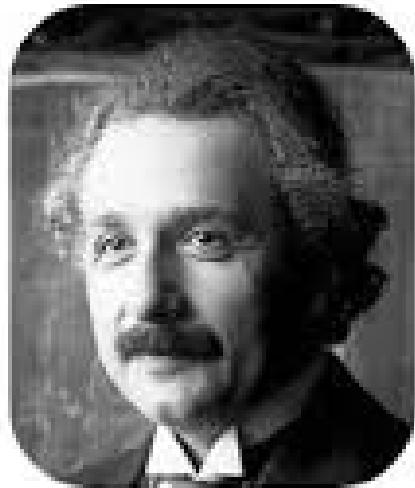
- o esistono proprietà fisiche nascoste che eludono la descrizione della realtà fisica fornita dalla meccanica quantistica, basata sul presupposto di realtà assunto dai tre autori, da essi così definito: “Se, senza turbare in alcun modo un sistema, si può prevedere con certezza il valore di una *quantità fisica*, allora esiste un elemento della *realtà fisica* che corrisponde a questa *quantità fisica*”. In tal caso la meccanica quantistica risulta incompleta proprio perché non riesce a definire questo elemento;
- o si verificano *effetti non locali* che ci obbligano a rivedere radicalmente la nostra concezione dello spazio e del tempo.

Secondo Einstein, Podolsky e Rosen il mondo di cui parla la scienza va concepito come un complesso di entità localizzabili nello spazio-tempo dotate di proprietà che costituiscono la loro realtà fisica (ontologia delle proprietà). Queste entità possono interagire localmente in senso relativistico, vale a dire attraverso interazioni che non si propaghino con velocità superiore a quella della luce.

IL PARADOSSO EPR

In forma semplificata, che non ne altera la sostanza, il paradosso EPR può essere descritto nel modo seguente. Supponiamo di avere una particella subatomica priva di rotazione, un piona neutro che, disintegrandosi, emette, oltre a un raggio γ , un elettrone e un positrone e immaginiamo che essi si allontanino fino a una distanza tale da escludere ogni possibile interazione reciproca. Queste due particelle figlie del piona ruotano e, in virtù della legge di conservazione del momento di rotazione, devono farlo in verso opposto l'una rispetto all'altra dal momento che la rotazione complessiva deve essere zero, essendo la particella madre a rotazione nulla. Prima di qualsiasi misurazione le loro rispettive rotazioni sono sintetizzate in due funzioni d'onda in cui coesistono entrambe le possibilità, rotazione in senso orario e rotazione in senso antiorario. Se però eseguiamo sull'elettrone una misura che dà come risultato una rotazione in senso orario, ne dobbiamo concludere necessariamente, senza effettuare alcuna osservazione diretta, che il positrone ruota in senso antiorario. Ovviamente vale anche l'inverso: possiamo effettuare la misura sul positrone e stabilire simultaneamente, senza alcuna osservazione, il tipo di rotazione dell'elettrone.

Questa precisazione, per quanto banale possa apparire, è invece importante, perché costituisce un ulteriore argomento a sostegno dell'insussistenza di una relazione di causalità, nella quale l'ordine di successione degli eventi e delle osservazioni costituisce un aspetto imprescindibile.



A. Einstein



B. Podolsky



N. Rosen

IL PARADOSSO EPR

In effetti il paradosso EPR coglieva un tratto distintivo fondamentale della MQ. L'informazione sul sistema composto dalle due particelle dopo la loro separazione determina due informazioni parziali sulle loro componenti. Tuttavia queste informazioni parziali (chiamate anche *stati ridotti*) non sono rappresentabili da stati puri. Pertanto, prima delle misure effettuate su di esse, le due particelle *si comportano come due oggetti interscambiabili e indiscernibili fra loro*. Dall'equazione di Schrödinger si deduce pertanto che se due sistemi hanno interagito a un istante $t = 0$ e risultano poi separati, senza più alcuna interazione fra loro all'istante $T > 0$, si può, misurando solo uno di essi, conoscere con certezza il valore di una stessa misura sull'altro, all'istante T . Due particelle “intricate”, si dirà poi, permettono una conoscenza istantanea del valore di una misura fatta sull'una grazie alla misura fatta sull'altra. Se la prima ha lo spin “up”, per dire, si è certi, che lo spin dell'altra è “down”, se *misurato*. Iterando lo stesso identico processo, si può ottenere spin “down” per la prima: allora la seconda avrà spin “up”.



Due quanti interconnessi tra loro...
[entangled]



...mantengono l'interconnessione
indipendentemente dalla distanza che li separa!

IL PARADOSSO EPR

Così, il formalismo della meccanica quantistica permette di calcolare l'evoluzione di un sistema di particelle intricate e fornisce dei valori "correlati" di probabilità, per eventuali misure. Questa situazione è ovviamente paradossale e del tutto inspiegabile dal punto di vista della fisica precedente a questa rivoluzione: infatti, se si lanciano due monete *classiche* in aria e queste interagiscono (si toccano, per dire) per poi separarsi definitivamente, le analisi probabilistiche dei valori testa-croce assunti dalle due monete sono del tutto indipendenti. Ecco perché Einstein-Podolsky-Rosen ritenevano che tra le due possibilità che il loro esperimento mentale lasciava aperte (l'esistenza di proprietà fisiche nascoste che eludono la descrizione della realtà fornita dalla meccanica quantistica, con conseguente incompletezza della teoria, o il verificarsi di *effetti non locali* tali da costringerci a una radicale revisione della usuale concezione dello spazio e del tempo) si dovesse optare, senza incertezza e in modo esplicito, per la prima. La seconda era infatti presso che inammissibile, dal punto di vista della concezione della *realtà fisica* alla quale gli autori aderivano dichiaratamente.

IL PARADOSSO EPR

In effetti i tre autori individuavano correttamente i tre possibili “colpevoli” della situazione paradossale che si veniva a determinare in seguito al loro esperimento ideale. Si tratta delle seguenti tre ipotesi di carattere generale:

- Il principio di realtà;
- Il principio di località;
- Il principio di completezza fisica.

Ritenendo intangibili il principio di realtà e quello di località, la conclusione che traevano dal quadro generale che si veniva così a profilare era che il capo d'imputazione doveva necessariamente venire attribuito al principio di completezza fisica, negando, di conseguenza, che la teoria quantistica potesse fregiarsi di questa caratteristica.



IL PARADOSSO EPR

Oggi, al contrario, i fisici aderiscono per lo più a soluzioni fondate sul rifiuto del principio di località: l'azione eseguita operando una misurazione su una delle due particelle nell'intervallo $[t_1, t_2]$ ha una vera "influenza" sull'altra particella, anche se questa è spazialmente separata sia dalla particella che ha subito la misura, sia dall'osservatore che l'ha effettuata. Questo non significa però ammettere la possibilità di inviare nell'intervallo $[t_1, t_2]$ un segnale qualunque da questo primo osservatore a un secondo il quale voglia controllare l'esattezza delle previsioni statistiche fatte sui parametri in gioco dell'altra particella misurandoli. Infatti quest'altro osservatore non può in alcun modo accorgersi che le proprietà determinate di questa seconda particella dipendono dalle azioni realizzate dal primo osservatore lontano da lui. Qualora decidesse di eseguire effettivamente una misura sulla particella che è nei dintorni riscontrerebbe un risultato in accordo con le previsioni statistiche dello stato di essa che egli conosceva già prima di procedere a questa sua misura. Non si crea quindi alcuna situazione di incompatibilità logica con la relatività speciale, come paventava Einstein: la non località quantistica non consente di inviare messaggi che viaggino a una velocità superiore rispetto a quella della luce.

LA VERIFICA Sperimentale DI EPR/1

Dovevano passare trent'anni perché le intuizioni puramente speculative di Einstein-Podolsky-Rosen fossero espresse in una forma suscettibile di verifica sperimentale. Il fisico irlandese John S. Bell in un articolo magistrale del 1964 dimostrò in maniera matematicamente rigorosa, sulla base di certe disuguaglianze, che la meccanica quantistica è incompatibile con l'ipotesi dell'esistenza di «variabili nascoste» e che i processi fisici hanno una natura fondamentalmente non locale.

Nel 1972 John F. Clauser e Stuart Freedman dell'Università della California a Berkeley, effettuarono un primo esperimento ispirato alle idee innovative di Bell, seguiti l'anno successivo da Ed S. Frey e Randal C. Thomson della Texas A&M University.

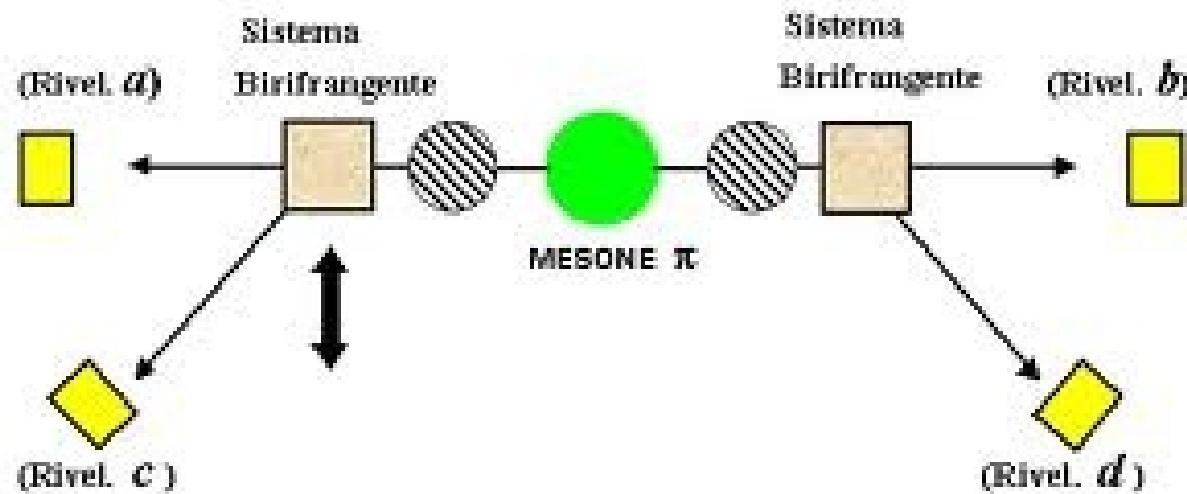
LA VERIFICA Sperimentale DI EPR/2

Il merito di Bell è stato quello di trasformare il paradosso EPR (se risultati ipotizzabile che sistemi lontani e non interagenti posseggano proprietà oggettive le quali non possono venire influenzate istantaneamente a distanza) in un problema sperimentale, consistente nello stabilire se le correlazioni quantistiche risultano di fatto verificate negli esperimenti che possiamo eseguire nei nostri laboratori (riguardanti, in particolare, le misure di correlazione tra gli stati di polarizzazione, in direzioni arbitrarie e diverse, di due particelle).

Tutti gli esperimenti di questa natura effettuati hanno confermato le previsioni della MQ, per cui si deve concludere che risulta contraddittorio pensare che le proprietà messe in evidenza dal processo di misura preesistano alla misura stessa, a meno di non essere propensi a rinunciare alla pretesa di località.

Settore A

Settore B



SETTORE A

SETTORE B

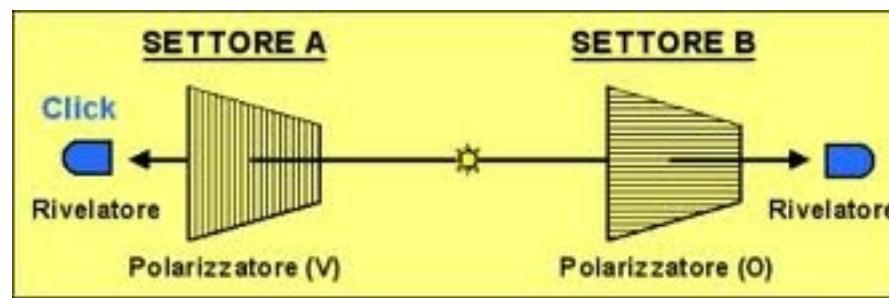
Click

Rivelatore

Polarizzatore (V)

Rivelatore

Polarizzatore (O)



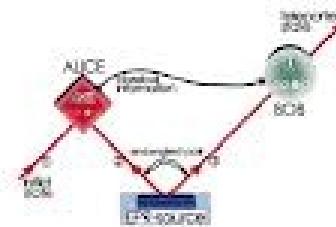
LA VERIFICA Sperimentale DI EPR/3

La serie di esperimenti effettuati nei primi anni '80 da Alain Aspect nel suo laboratorio dell'Università di Orsay, a Parigi, utilizzando atomi di calcio eccitati come sorgente di fotoni *entangled*, ebbe come risultato quello di mostrare che viene violata la richiesta di Bell che le probabilità di eventi con separazione di tipo spazio fattorizzino nei prodotti delle probabilità degli eventi separati, fornendo così una inconfondibile prova sperimentale a sostegno del carattere non locale della meccanica quantistica. Nel 1997 Nicolas Gisin e la sua équipe dell'Università di Ginevra eseguirono con un successo una versione dell'esperimento di Aspect in cui i rivelatori si trovavano a un distanza di 11 chilometri l'uno dall'altro.

LE CONSEGUENZE DI EPR

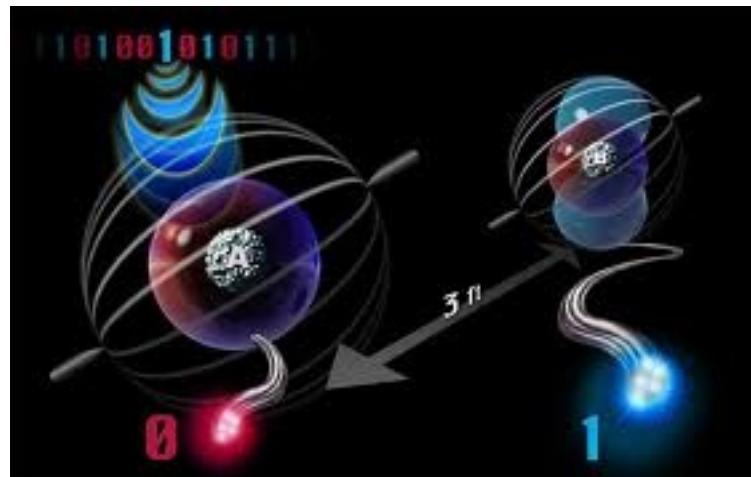
È interessante notare che proprio discussioni che da molti fisici erano considerate filosofiche e astratte hanno portato a risultati pratici sbalorditivi e hanno aperto prospettive prima impensabili anche in campi tecnologicamente avanzati, come l'interferometria a neuroni, l'ottica quantistica, la crittografia quantistica e le ricerche sui computer quantomeccanici.

La più spettacolare applicazione di EPR e del fenomeno dell'*entanglement* è il teletrasporto quantistico, una procedura che permette di trasferire lo stato fisico di una particella a un'altra particella, anche molto lontana dalla prima. Questa idea, che appare così bizzarra, ha avuto una prima conferma sperimentale nel 1997, quando due gruppi di ricerca – uno diretto da Anton Zeilinger a Vienna, l'altro da Francesco De Martini a Roma – riuscirono a teletrasportare un singolo fotone. Nessuno sa con certezza se il teletrasporto si potrà realizzare anche per atomi e molecole, o addirittura per oggetti macroscopici.



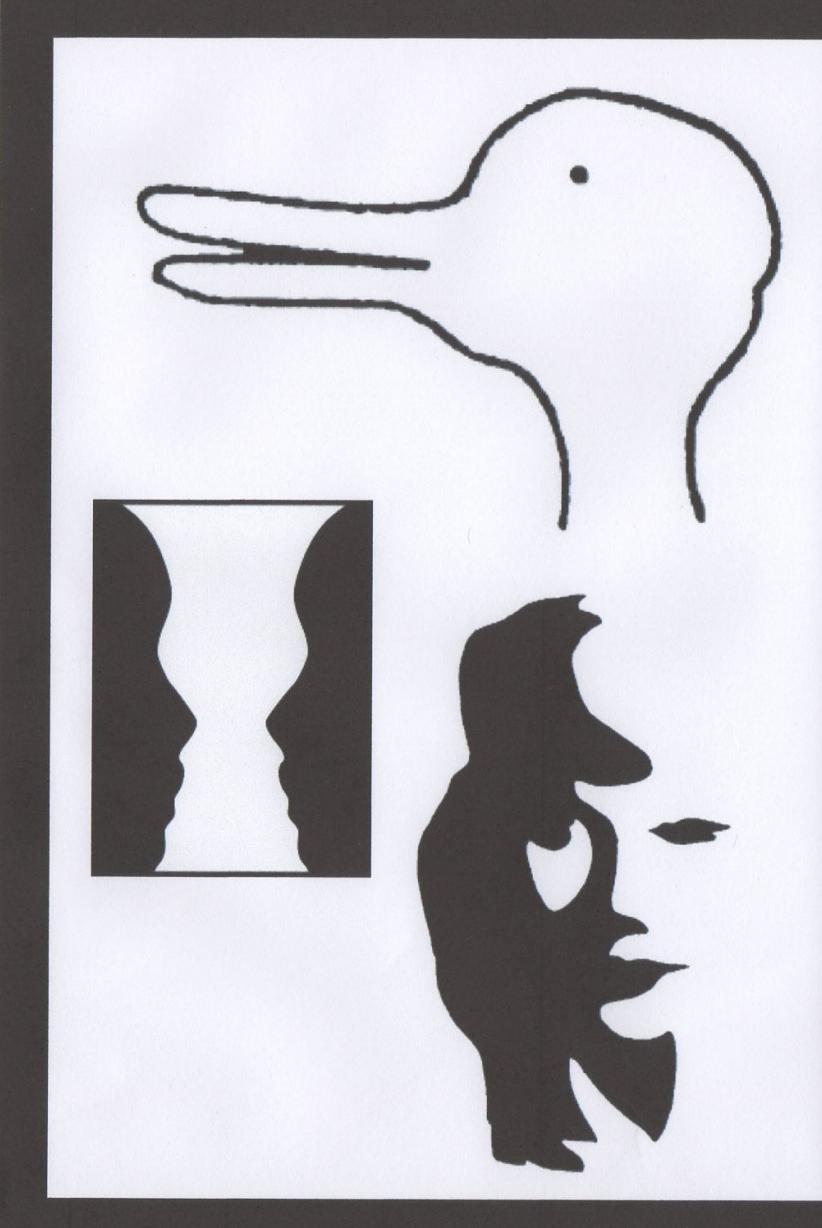
TELETRASPORTO QUANTISTICO

Lorenzo Marrucci

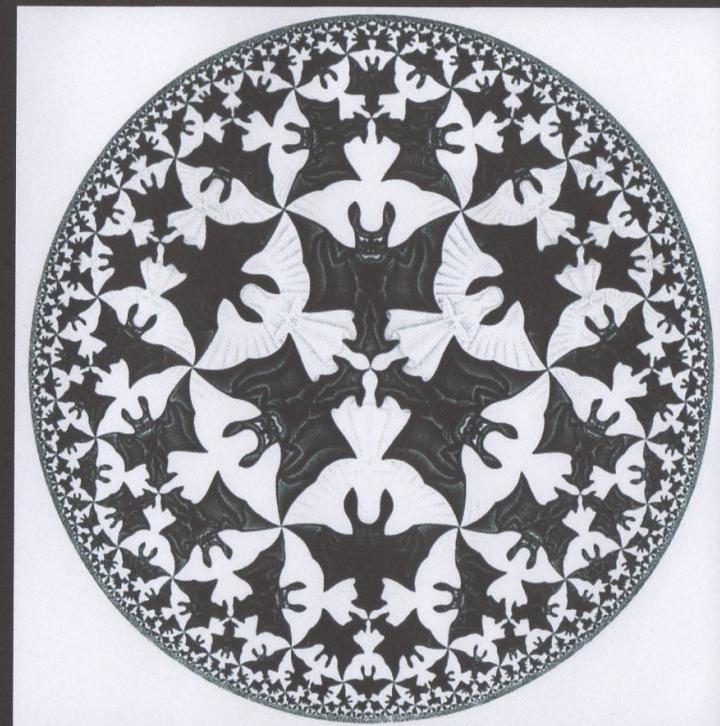


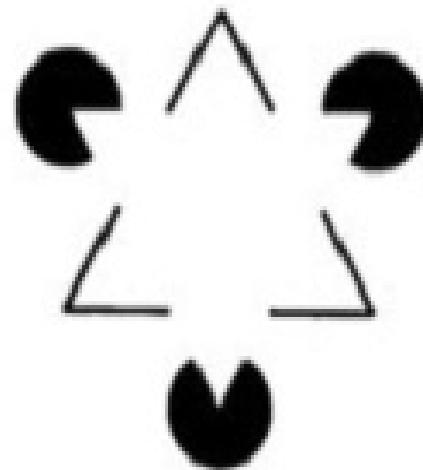
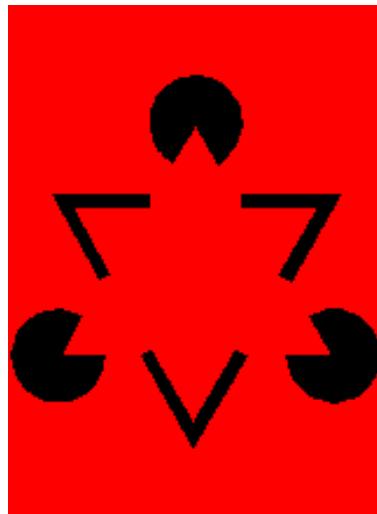
Alcuni dibattiti che hanno coinvolto i padri della meccanica quantistica:

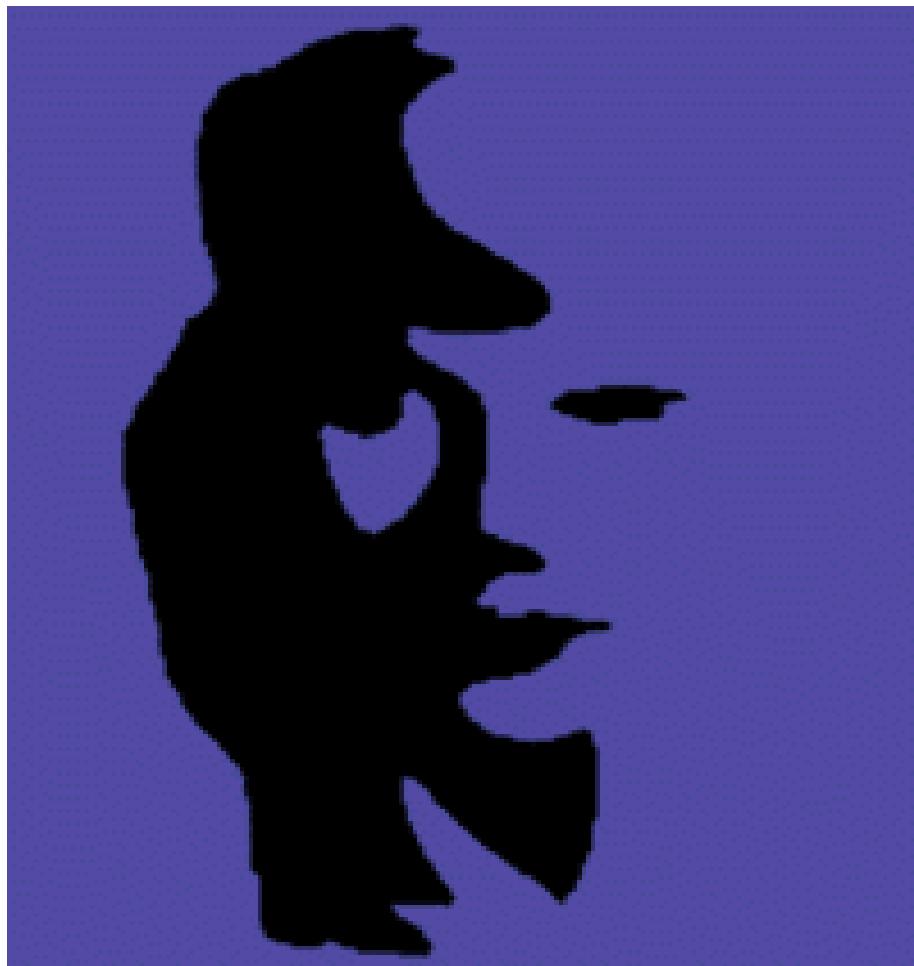
- **Che cosa vuol dire “capire una teoria” quando non è più possibile formarsi immagini visualizzabili nello spaziotempo e occorre invece immaginare gli oggetti in spazi astratti? Che spazio rimane in fisica per l’intuizione quando il formalismo si fa sempre più astratto?**
- **Che cosa significa, per la fisica, dover rinunciare al determinismo e assumere il caso, la probabilità, come parte integrante della spiegazione fisica?**
- **Che cosa significa rinunciare all’idea di poter racchiudere tutti i fatti in un’unica immagine e assumere la complementarità?**
- **(su un piano forse più estetico): una teoria fisica “bella” (convincente) può ammettere al suo interno aspetti di ambiguità o deve essere armoniosa?**



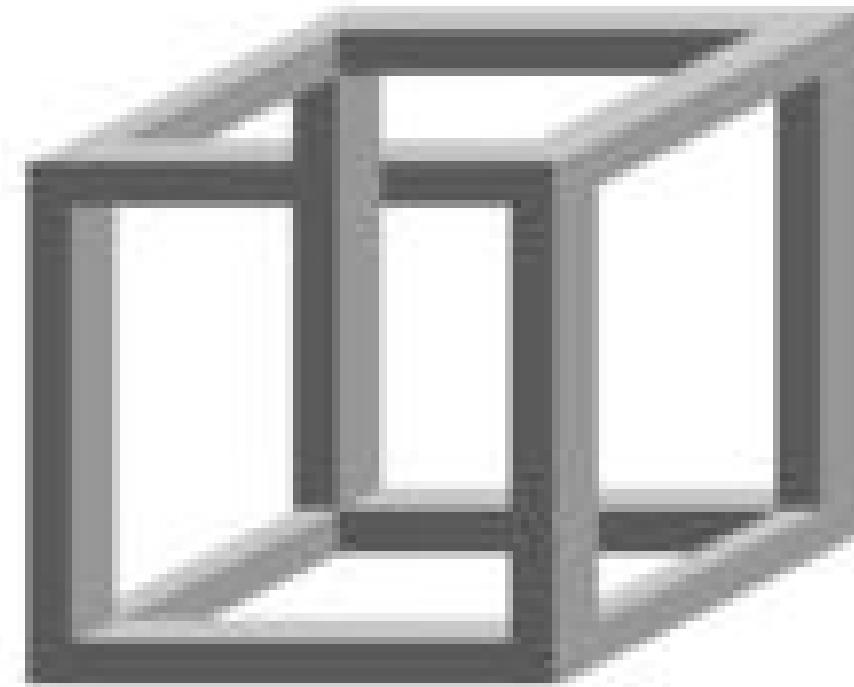
ambiguità











Heisenberg e la «realtà fisica»

«La cinematica e la meccanica della teoria quantistica sono nettamente diverse da quelle usuali (*gewöhnlichen*). L'applicabilità dei concetti classici (*klassischen*) di cinematica e meccanica non può essere però dedotta né dalla nostra logica né dall'esperienza. L'utilizzo del termine *gewöhnlichen* invece di *klassischen* non è casuale: fa riferimento al fatto che la teoria quantistica descrive fenomeni diversi da quelli a cui siamo abituati, ovvero quelli familiari. Anche quando, per abitudine e semplicità, utilizziamo le stesse parole, ad esempio cinematica e meccanica, dobbiamo necessariamente tener conto della variazione di significato che questi termini subiscono allorché non abbiamo più a che fare con i concetti classici, come posizione, impulso ed energia, a suo tempo messi a punto per descrivere questi fenomeni, ma dobbiamo prendere in considerazione aspetti “non usuali”, appunto, che ci obbligano a ridefinire i concetti antecedentemente compresi per tenere conto dello scarto, cioè del distacco, anche netto con il precedente ambito di applicazione».

W. Heisenberg, “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik” (Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica quantoteoriche), ‘Zeitschrift für Physik 9, 43: 172-198, 1927, tr. it. in W. Heisenberg, *Indeterminazione e realtà*, a cura di G. Gembillo, Guida, Napoli 1991, p.65.

Heisenberg e la «realtà fisica»

«L'interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanta parte da un paradosso. Qualsiasi esperimento fisico, sia che si riferisca ai fenomeni della vita quotidiana o ad eventi atomici, deve essere descritto nei termini della fisica classica. I concetti della fisica classica formano il linguaggio per mezzo del quale descriviamo la preparazione dei nostri esperimenti e ne esprimiamo i risultati. Non possiamo né dobbiamo sostituire questi concetti con altri. Tuttavia l'applicazione di questi concetti risulta limitata dalle relazioni d'incertezza. Dobbiamo tener presente questa limitata area di applicabilità dei concetti classici mentre li applichiamo, ma non possiamo e non dovremmo sforzarci per migliorarli».

W. Heisenberg, *L'interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanta*, p. 57.

Heisenberg e la «realtà fisica»

Nel penultimo articolo della raccolta *Fisica e filosofia*, intitolato *Linguaggio e realtà nella fisica moderna*, (in ID., *Fisica e filosofia*, pp. 195-216), trascrizione, abbondantemente modificata, di una conferenza del 1960, Heisenberg compie un passo estremamente significativo, introducendo nella relazione tra linguaggio e matematica il riferimento a un terzo elemento; la tecnica. Questa integrazione è certamente il frutto dei suoi dialoghi a distanza con Martin Heidegger sul rapporto tra scienza, metafisica e linguaggio e sulla crescente incidenza della tecnica, appunto, in questa relazione.

Egli comincia col sottolineare il fatto che: «il linguaggio che generalmente emerge dal processo di chiarificazione scientifica nella fisica teoretica è usualmente un linguaggio matematico, lo schema matematico, che ci permette di prevedere i risultati degli esperimenti. Il fisico può dirsi soddisfatto quando ha a disposizione lo schema matematico e sa come usarlo per l'interpretazione degli esperimenti».

Ivi, p. 196.

Heisenberg e la «realtà fisica»

Più avanti questa riflessione viene ulteriormente approfondita e chiarita: «Nella fisica teoretica noi cerchiamo di intendere gruppi di fenomeni introducendo simboli matematici che possono essere messi in correlazione con i fatti, vale a dire con i risultati delle misurazioni. Per i simboli noi usiamo nomi che raffigurino la loro correlazione con la misurazione. I simboli sono così legati al linguaggio. I simboli vengono poi collegati fra loro da un rigoroso sistema di definizioni e assiomi, ed infine le leggi naturali vengono espresse come equazioni tra i simboli. L'infinita varietà di soluzioni di queste equazioni corrisponde allora all'infinita varietà di fenomeni particolari possibili in quel settore della natura. In tal modo lo schema matematico rappresenta il gruppo di fenomeni finché è valida la correlazione fra simboli e misurazioni. È questa correlazione che permette di dare espressione alle leggi naturali nei termini del linguaggio comune, giacché i nostri esperimenti consistenti di azioni e di osservazioni possono sempre venir descritti col linguaggio ordinario. Tuttavia, con l'evolversi della conoscenza scientifica, anche il linguaggio si evolve; vengono introdotti nuovi termini e quelli vecchi vengono applicati a un campo più vasto oppure in un modo diverso da quello del linguaggio ordinario».

Ivi, pp. 201-202.

Heisenberg e la «realtà fisica»

Queste parole, con le quali si conclude la conferenza del 1960, sono inequivocabili: ci dicono che la fisica non parla ormai più direttamente della natura e dei diversi livelli in cui si articola, ma degli esperimenti e dei loro risultati, dunque di apparati tecnici, di un mondo artificiale che si sovrappone sempre più a quello naturale. Questa conclusione viene ribadita in modo ancora più esplicito in un articolo dal titolo *L'immagine della natura nella fisica moderna*, contenuto nella raccolta *Das Naturbild der heutigen Physik*, pubblicata nel 1976. In esso Heisenberg sottolinea che:

«Nella tecnica atomica, infine, si ha a che fare con lo sfruttamento di forze alle quali manca assolutamente ogni accesso dall'esperienza quotidiana. Anche questa tecnica ci diverrà forse, alla fine, altrettanto familiare quanto lo è, per un uomo moderno, l'elettrotecnica, che non si può più pensare assente dal nostro mondo abituale. Ma anche le cose che ogni giorno ci circondano non divengono per questo parte della natura nel senso originario della parola. Forse i molti apparecchi tecnici finiranno in seguito con l'appartenere all'uomo in modo altrettanto ineliminabile quanto il guscio alla lumaca o la tela al ragno, ma anche in tal caso questi apparecchi sarebbero piuttosto parti dell'organismo umano che non della natura circostante».

W. Heisenberg, *Das Naturbild der heutigen Physik*, Rowohlt, Hamburg 1976, tr. it. di E. Casari, *Natura e fisica moderna*, Garzanti, Milano 1985.

Heisenberg e la «realtà fisica»

La riflessione che comincia in tal modo a emergere va al di là dei limiti di una semplice riflessione sulla tecnica sperimentale o sulla struttura epistemologica della conoscenza scientifica: ciò che è in questione, riguarda, letteralmente, la «cosa» [*Das Ding*], della quale si dice che la sua definizione, così come viene formulata dalla scienza, non può prescindere dalla manipolazione tecnica del mondo. Questa tecnicità del naturale, già presente nel processo di oggettivazione della natura con cui la scienza moderna inaugura la propria impresa, si fa del tutto esplicita con la meccanica quantistica.

Nella MQ la matematica, dato che non disponiamo di alcuna guida per mettere in relazione i simboli matematici con i concetti del linguaggio ordinario e non abbiamo, di conseguenza, la possibilità di conoscere fenomeni che in essi occorrono non descrivibili nei termini della scienza classica, crea concetti e forme autonome e a sé stanti, distaccandosi dagli aspetti rispetto ai quali era stata chiamata in causa dalla tradizione della fisica galileiana e newtoniana. Essa non ha più alcun rapporto diretto con la realtà, avendo raggiunto un grado di “estrema astrattezza” e formalismo: interpretare i fenomeni non descrivibili nei termini della fisica classica significa pertanto ridurli alla loro misurabilità e prevedibilità sperimentale. Il fisico è soddisfatto se possiede lo schema matematico e sa usarlo per interpretare gli esperimenti.

D’altro canto, quello schema matematico può essere considerato valido non solo se in base a esso risulta possibile progettare ed eseguire un esperimento, ma se ci mette altresì in condizione di prevederne gli esiti.

Heisenberg e la «realtà fisica»

Da questo approccio è scaturito un orientamento, che può essere definito come “fenomenotecnica”, che considera l'esperimento e l'apparato tecnico che deve essere messo in campo per progettarlo e realizzarlo una sorta di produzione strumentale del fenomeno, nel senso che quest'ultimo deve essere smistato, filtrato, purificato, colato nello stampo degli strumenti. Si può parlare in proposito di un “realismo tecnico” che non mostra il reale, ma lo dimostra, lo ricostruisce sui propri schemi.

Con la matematizzazione, dunque, non si è raggiunto solo un maggiore grado di precisione e di astrazione, come si credette inizialmente, *ma si è essenzialmente passati da un linguaggio teorico a un linguaggio tecnico*, dal linguaggio della «comprendere» a quello del «progetto sperimentale», rappresentato da una forma di linguaggio che richiama l'operazionismo.

L'operazionismo di Bridgman

Per capire di cosa si tratta occorre prendere avvio dalla proposta teorica di Percy Williams Bridgman, premio Nobel della fisica nel 1946 per i suoi studi sugli effetti delle alte pressioni sulla termodinamica di materiali vari, ma noto anche per la formulazione della teoria dell'*operazionismo*, da lui proposta nel 1927, che ebbe una certa risonanza in ambito epistemologico.

In realtà il termine “operazionismo” con cui fu definita è un omaggio alla moda degli “ismi”, dura a morire in ambito filosofico ma poco in sintonia con la concezione generale dell’autore, il quale preferiva di gran lunga usare espressioni come “operational viewpoint”, “operational attitude”, “operational approach”, che riteneva più in linea con il suo tentativo di attribuire ai concetti scientifici un significato, sinonimo del corrispondente gruppo di operazioni con cui esso viene introdotto, in coerenza con l’idea di base da lui sostenuta, che l’atteggiamento del fisico deve essere ispirato al puro empirismo, per cui egli non deve ammettere alcun principio a priori che determini o limiti le possibilità di nuove esperienze.

P.W. Bridgman, *The Logic of Modern Physics*, Macmillan, New York 1927, tr. it. di V. Somenzi, Einaudi, Torino 1952.

L'operazionismo di Bridgman

Nel caso dei concetti della fisica, come per esempio quello di lunghezza, le operazioni di riferimento saranno appunto quelle di misura della lunghezza medesima, che devono tener conto del fatto che la lunghezza di qualsiasi cosa è determinata dalle operazioni fisiche necessarie per misurarla, che prevedono l'utilizzo di uno strumento, nel caso specifico un metro. Le stesse operazioni non sono però applicabili per misurare la distanza di un corpo dalla luna. Inoltre, ogni misurazione, anche la più semplice, è sempre accompagnata da un errore sperimentale. A distanze sempre maggiori, non solo l'accuratezza sperimentale diminuisce, ma la natura stessa delle operazioni con cui deve essere determinata la lunghezza diventa indefinita. Pertanto, l'analisi operativa rivela che la lunghezza non è un concetto omogeneo che si applica in maniera uguale a tutti gli intervalli in cui lo usiamo. Per quanto riguarda il suo uso non può esistere più una verità assoluta, ma solo verità relative. Alla luce di questo approccio un concetto come quello di "tempo assoluto", introdotto da Newton, va ritenuto privo di significato, non essendo correlabile a una serie definita di operazioni, che non abbia appunto carattere relativo. Questa regola è funzionale all'esigenza di ottenere un'assoluta univocità di significato dei termini utilizzati, evitando gli inconvenienti ai quali avevano dato luogo, a giudizio dell'autore, le teorie fisiche tradizionali, sino alla relatività einsteiniana e alla meccanica quantistica.

L'operazionismo di Bridgman

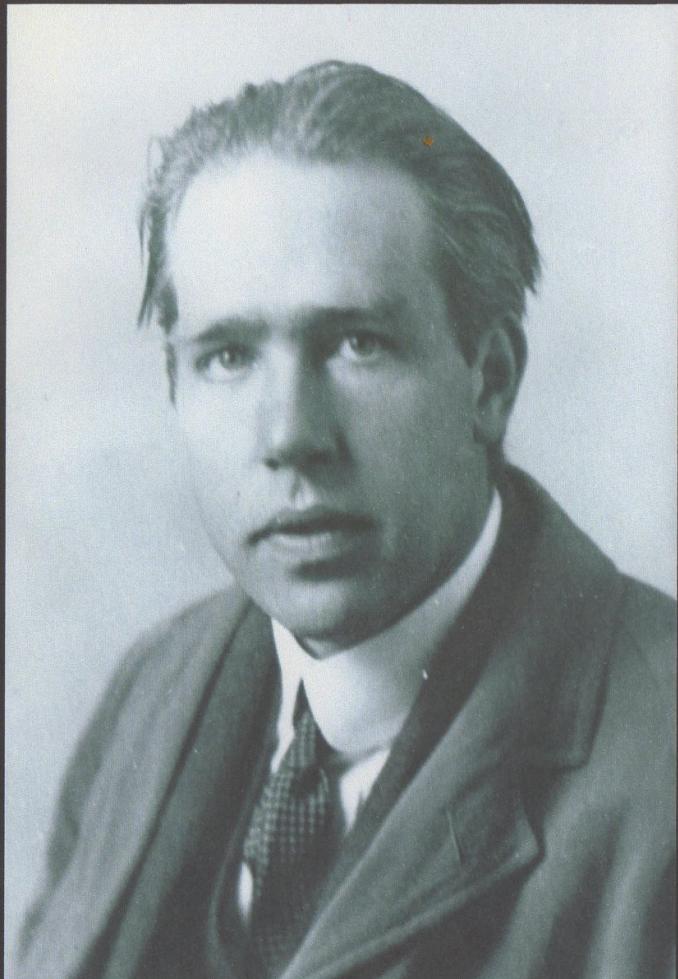
Per quanto riguarda la prima, la tesi di Bridgman è che Einstein non abbia riportato nella sua teoria della relatività generale la profondità e gli insegnamenti ch'egli stesso ci aveva dato con la sua teoria particolare. I suoi dubbi riguardano, in particolare, le operazioni che si devono compiere per applicare le equazioni a una qualsiasi situazione fisica concreta, l'identificazione del "punto", dato il carattere amorfo dello "spazio vuoto" e cosa possa intendersi per "orologio" dal momento che la sua specificazione ha presentato molte difficoltà, legate soprattutto al fatto che per definirlo sembra che si faccia implicitamente ricorso a un circolo vizioso, consistente nel dire che esso è un apparecchio fisico costruito in modo da funzionare così come prescrive la teoria della relatività. Gli eventi sarebbero inoltre trattati da Einstein "conventionalmente", come "elementi primitivi non analizzati e non analizzabili", cosa che, a giudizio di Bridgman, è in contrasto con quello che egli ritiene un dato di fatto, e cioè che essi, una volta assunti alla stregua di qualcosa che può essere osservato contemporaneamente da due sistemi di riferimento, non possono più essere considerati tali. La conclusione che viene tratta è che Einstein, con la sua duplice convinzione che sia possibile liberarsi da qualsiasi sistema particolare di coordinate e che sia utile farlo, e col suo modo di trattare l'evento come qualcosa di primitivo e non analizzato, abbia introdotto nella teoria della relatività generale proprio quel punto di vista preinsteiniano, non critico, che, come egli stesso ci ha dimostrato in modo così convincente nella sua teoria particolare, corrisponde a una forma di realismo non dichiarato e di ontologia mascherata, viziata da un pregiudizio da cui è necessario liberarsi.

Il principio di corrispondenza di Bohr

A mettere in evidenza la discontinuità tra la fisica classica con il suo linguaggio e la meccanica quantistica fu in particolare Bohr con la formulazione del suo «principio di complementarità», da lui enunciato nel corso del congresso internazionale di fisica, tenutosi a Como nel settembre del 1927 per celebrare il centesimo anniversario della morte di Alessandro Volta. «Da una parte», osservava Bohr nella sua relazione su “The Quantum Postulate and the Development of Modern Physics”, «la definizione dello stato di un sistema fisico, come viene inteso di solito, richiede l’eliminazione di ogni perturbazione esterna. Ma in questo caso, secondo il postulato dei quanti, ogni osservazione sarebbe impossibile e, soprattutto, i concetti di spazio e di tempo perderebbero il loro senso immediato. D’altra parte, se allo scopo di rendere possibile l’osservazione noi ammettiamo certe interazioni con opportuni dispositivi di misurazione, non appartenenti al sistema, una definizione univoca dello stato del sistema diventa naturalmente impossibile e non si potrà parlare di causalità nel senso ordinario della parola». (N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Wiley, New York, 1958, pp. 83-93. Tr. it. *Il postulato dei quanti e il recente sviluppo della teoria atomica*, in Id., *Teoria dell’atomo e conoscenza umana*, Boringhieri, Torino, 1961, p. 325).

A partire da queste considerazioni Bohr giunge così alla seguente formulazione del principio di complementarità: “La natura stessa della teoria quantistica ci costringe così a considerare la coordinazione spazio-temporale e l’esigenza della connessione causale, la cui unione caratterizza le teorie classiche, come aspetti complementari ma reciprocamente escludentisi della descrizione, i quali simbolizzano l’idealizzazione dei concetti di osservazione e di definizione rispettivamente”.

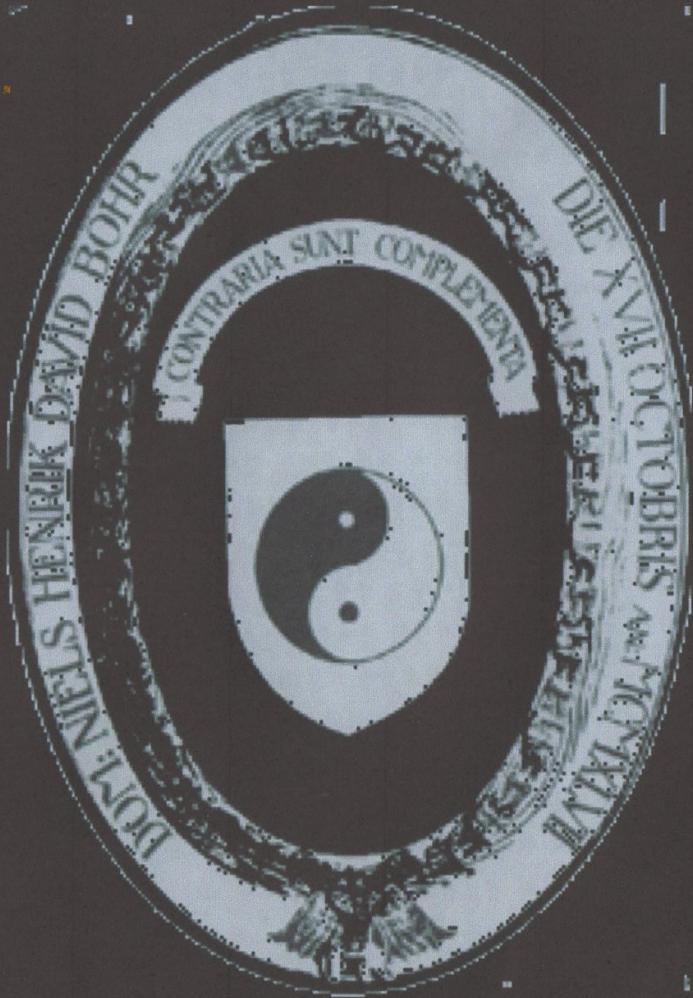
Ibidem.



Niels Bohr

I dati ottenuti in condizioni sperimentali diverse non si possono racchiudere in una singola immagine, ma debbono essere considerati complementari. Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica un elemento essenziale di ambiguità, come si vede immediatamente nella contraddizione relativa alle proprietà corpuscolari e ondulatorie degli elettroni e dei fotoni, in cui ci troviamo di fronte a immagini contrastanti, ognuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dei dati sperimentali.

(Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica, 1949, in Autobiografia scientifica, pp. 113- 114)



Contraria sunt complementa.

In sintesi

L'esperimento più bello impone di ripensare in modo critico ad alcune peculiarità della fisica classica:

- il concetto di traiettoria, basato su un particolare principio di causalità (*il determinismo classico*);
- il modello classico (così come il formalismo classico) di oggetto, basato su un principio di *non contraddizione*;
- la modellizzazione classica dell'oggetto, basata sulla possibilità di “proiettare” le costruzioni simboliche in uno “stesso spazio” (isomorfo a quello ordinario) (permettendo la *visualizzabilità*);
- l'assunzione della *separabilità* tra le misure relative alle proprietà degli oggetti e l'apparato di misura;
- il significato di alcuni termini riferiti a modelli fondamentali della fisica classica.

In sintesi

L'esperimento più bello impone di ripensare in modo critico ad alcune peculiarità della fisica classica:

- il concetto di traiettoria, basato su un particolare principio di causalità (*il determinismo classico*);
- il modello classico (così come il formalismo classico) di oggetto, basato su un principio di *non contraddizione*;
- la modellizzazione classica dell'oggetto, basata sulla possibilità di “proiettare” le costruzioni simboliche in uno “stesso spazio” (isomorfo a quello ordinario) (permettendo la *visualizzabilità*);
- l'assunzione della *separabilità* tra le misure relative alle proprietà degli oggetti e l'apparato di misura;
- il significato di alcuni termini riferiti a modelli fondamentali della fisica classica.

appare esserci una *interdipendenza* tra l'oggetto **microscopico**, il modo che esso ha di rivelarsi, le sue proprietà ... e l'**apparato sperimentale** che abbiamo predisposto per studiarlo

“*osservare*” significa necessariamente interagire con l'oggetto della osservazione (dove l'interazione non deve essere intesa semplicemente nel modo classico di “perturbazione” o “disturbo”) modificandone la realtà ...

In definitiva:

- La configurazione dell'apparato sperimentale determina il modo in cui si manifesta la natura dell'oggetto quantistico che si studia.

Da qui la difficoltà a separare l'oggetto dello studio *in sè* dall'apparato sperimentale che serve a studiarlo ...

...Ma la configurazione dell' apparato sperimentale, p.es. il fatto di mettere o non mettere il rivelatore *which way?*, lo decide lo sperimentatore ...



Alanis Morissette 1998

sil.tagliagambe@gmail.com