

Tra quasi-storia e pseudo-scienza

Trappole epistemologiche, culturali, concettuali, nell'approccio standard all'insegnamento della meccanica quantistica

Massimiliano Malgieri

Dipartimento di fisica, Università di Pavia



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

- ▶ Al momento di iniziare l'insegnamento-apprendimento della meccanica quantistica al liceo viene spesso riportata da insegnanti e studenti l'impressione che si instauri una discontinuità nel linguaggio utilizzato nel corso di fisica.
- ▶ Dal linguaggio concettuale e formale utilizzato nel resto della disciplina si passa ad una narrazione, dal taglio storico o storico-filosofico, legata solo episodicamente alla modellizzazione di sistemi fisici. Questa rottura, visibile anche in molti libri di testo, può rafforzare nello studente l'impressione che la fisica quantistica costituisca per la fisica nel suo insieme un punto di rottura anche metodologico.
- ▶ In questa relazione si vogliono analizzare diversi aspetti di questo problema, dalle difficoltà di apprendimento degli studenti alle possibili ricadute anche sociali di una comprensione deformata del contenuto della fisica quantistica.

- ▶ I libri di testo generalmente adottano quello che viene chiamato dalla ricerca in didattica un approccio *quasi-storico*. La quasi-storia è una storia passata attraverso una lente ideologica, che ha lo scopo di indottrinare lo studente alla grandezza e alla perfezione della scienza.
- ▶ Nella sostanza, l'approccio seguito dai libri di testo ha tutti gli svantaggi di un approccio realmente storico (ad esempio, la difficoltà di giungere alla formulazione moderna della teoria) e nessuno dei suoi vantaggi (in termini di comprensione della reale natura della scienza, e di costruzione concettuale graduale e progressiva).
- ▶ Ciò che i libri di testo propongono riguarda perlopiù la 'old quantum theory' e gli inizi della vera teoria quantistica. Manca un modello matematico complessivo; vi sono solo formule disconnesse che riguardano alcuni casi specifici. La percezione di frammentarietà della fisica come disciplina viene acuita, e diventa impossibile per lo studente andare oltre l'applicazione di alcune formule.

- ▶ Alcuni elementi del paradigma concettuale della meccanica quantistica sono talmente in contrasto con il senso comune che possono dar luogo a fenomeni di rifiuto emotivamente anche molto forti.
- ▶ Il problema è acuito dal fatto che la meccanica quantistica è una teoria in un certo senso ancora in via di sviluppo, in quanto vi sono problemi fondazionali (primo fra tutti, il paradosso della misura) non ancora, o non completamente, risolti. Secondo la ricerca, ignorare il dibattito su tali questioni non è produttivo e potrebbe esacerbare il problema del rifiuto della teoria da parte degli studenti.
- ▶ Va tenuta presente da parte dell'insegnante la possibilità di trovarsi di fronte a nodi concettuali che non sono di per sé risolti, dal punto di vista scientifico e non solo dal punto di vista didattico. Una ipotesi è che il collegamento diretto con dispositivi tecnologici oggettivamente funzionanti sulla base dei principi della meccanica quantistica possa invece attenuare queste forme di rifiuto.

- ▶ Sebbene la meccanica quantistica sia obiettivamente diversa dalla fisica classica, essa rimane all'interno della tradizione scientifica-razionale. Tuttavia, esistono una varietà di siti e mezzi di informazione che utilizzano impropriamente e in modo deformato alcuni concetti o termini della meccanica quantistica per giustificare pseudo-scienza, medicine alternative, teorie del complotto, ed è possibile che queste facciano breccia nelle idee di alcuni studenti.
- ▶ Insegnare la meccanica quantistica al Liceo Scientifico è particolarmente importante al fine di inquadrare questa teoria nel solco del pensiero scientifico e razionale.

QUASI-STORIA NEI LIBRI DI TESTO

Il caso dell'effetto fotoelettrico

A decorative graphic consisting of several parallel white lines of varying lengths, slanted diagonally from the bottom right towards the top right, set against the blue background.

In this article I shall discuss another type of material which looks historical, but in which there is no attempt to convey history truthfully: the aim is solely to put over scientific facts, and the 'history' is there to provide a framework inside which the scientific facts fit easily, appear to 'make sense' and may be easily remembered for examination purposes. It also provides, maybe, a little light relief from the hard facts of the science itself. I shall call this 'quasi-history', and many examples will be given below, followed by a discussion of its effects.

Whitaker (1979) History and quasi-history in physics education

La quasi-storia è "Una storia mitica, preparata appositamente per indottrinare a certi punti di vista metodologici e didattici".

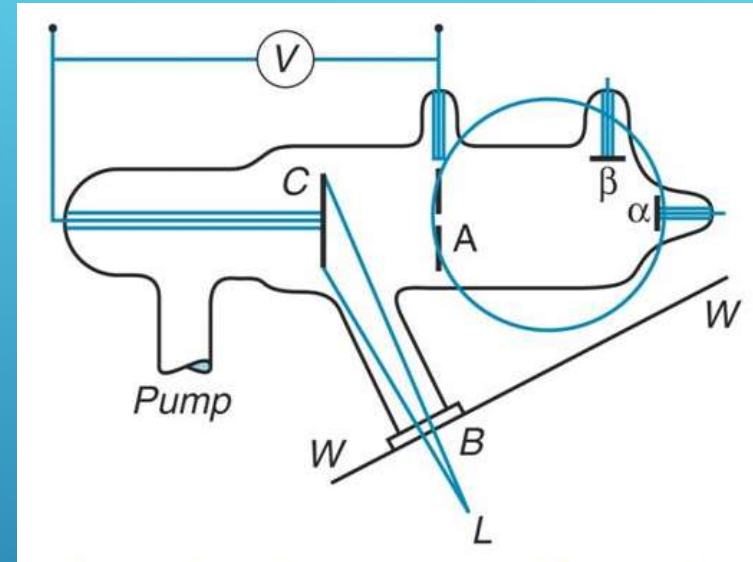
La storia viene ricostruita in modo tale da far apparire a posteriori le scelte degli scienziati le cui idee si sono imposte come razionali e inevitabili.

Nel caso dell'effetto fotoelettrico, i principali "miti" propagati dai libri di testo possono essere riassunti come segue:

- a) La teoria di Einstein del 1905 era basata sull'ipotesi di Planck del 1900 e ne era la naturale estensione;
- b) I fatti sperimentali dell'effetto fotoelettrico erano inspiegabili senza l'ipotesi del fotone; e siccome non vi erano alternative l'ipotesi di Einstein venne naturalmente accettata.
- c) La verifica finale dell'ipotesi di Einstein fu fornita da Millikan con il suo esperimento del 1916

Lenard, nei suoi esperimenti sull'effetto fotoelettrico (1902-1905) scoprì che la massima velocità con cui gli elettroni sono espulsi dalla luce ultravioletta è completamente indipendente dall'intensità della luce stessa. Questo risultato lo convinse che non ci potesse essere alcuna trasformazione di energia della luce in energia cinetica degli elettroni. Al contrario, egli propose che gli elettroni già possedessero, all'interno degli atomi, la velocità con cui sarebbero stati espulsi, a causa del loro ruolo nel sistema atomico.

In questa teoria, la luce ha solo il ruolo di innescare (trigger) l'emissione di fotoelettroni, ma non vi aggiunge energia. Fino al 1911, questa "ipotesi dell'innesco" (triggering hypothesis) formò la base della comprensione dell'effetto fotoelettrico da parte dei fisici. Nel 1909, una autorevole pubblicazione di rassegna inserì l'ipotesi dell'innesco tra le «verità accettate della fisica».



Bisogna ricordare che Lenard fu insignito del premio Nobel nel 1905 per le sue ricerche sui raggi catodici, e che la sua Nobel Lecture menziona esplicitamente l'effetto fotoelettrico e l'ipotesi dell'innesco.

Questa teoria quindi, lungi dall'essere di nicchia, era propugnata da uno scienziato che aveva ottenuto un premio Nobel su un tema affine.

Secondly, considering the effect of the ultraviolet light on the plate, we must imagine that the light waves cause the interior of the metal atoms in the plate to vibrate. We have previously mentioned that Zeeman's discovery has proved atoms to contain negative electricity capable of vibration. If the co-vibration of a negative quantum in the atom with the light waves becomes too violent, the quantum escapes from the atom* and so from the plate; we have a cathode ray.

The velocity at escape we have already mentioned as very low. I have also found that the velocity is independent of the ultraviolet light intensity (M), and thus concluded that the energy at escape does not come from the light at all, but from the interior of the particular atom. The light only has an initiating action, rather like that of the fuse in firing a loaded gun. I find this conclusion important since from it we learn that not only the atoms of radium - the properties of which were just beginning to be discerned in more detail at that time - contain reserves of energy, but also the atoms of the other elements; these too are capable of emitting radiation and in doing so perhaps completely break down, corresponding to the disintegration and roughening of the substances in ultraviolet light. This view has quite recently been corroborated at the Kiel Institute by special experiments which also showed that the photoelectric effect occurs with unchanged initial velocities even at the temperature of liquid air.

Nel 1905 Einstein propose che la luce fosse formata da quanti (il termine "fotone" fu introdotto nel 1926). Come implicazione di questa ipotesi, egli fornì una teoria dell'effetto fotoelettrico. La previsione più importante è racchiusa nella formula per l'energia cinetica massima degli elettroni emessi:

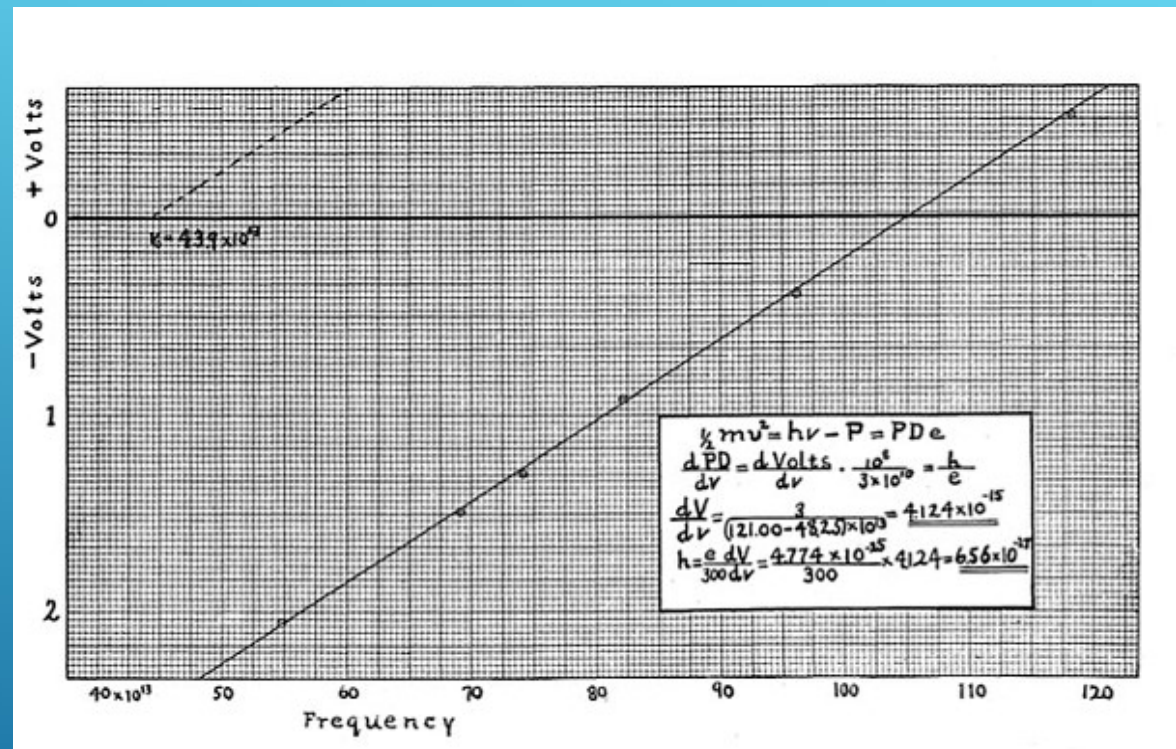
$$K_{max} = h\nu - \phi$$

Dove ϕ è una qualche energia, caratteristica del materiale, necessaria a liberare gli elettroni. Di conseguenza, Einstein fece la previsione cruciale che "il potenziale necessario per fermare gli elettroni dovrebbe essere una funzione lineare della frequenza della luce incidente, e quando tale relazione viene riportata in coordinate cartesiane, la sua pendenza dovrebbe essere indipendente dalla natura della sostanza studiata".

Questa previsione divenne la pietra angolare del programma di ricerca di Millikan degli anni successivi; in altre parole, si trattava di un esperimento cruciale per differenziare la teoria di Einstein da quella di Lenard.

A partire dal 1913, Millikan intraprese una serie di esperimenti sull'effetto fotoelettrico per verificare l'equazione scritta da Einstein. Al termine di questo lavoro, in un articolo dal titolo "A Direct Photoelectric Determination of Planck's 'h'" (Millikan; Phys. Rev., 7, 362, 1916) egli utilizzò l'equazione di Einstein per determinare la costante di Planck h.

Nonostante questo risultato, Millikan rimase per molto tempo critico sull'ipotesi del quanto di luce, e rimase convinto che l'equazione scritta da Einstein avrebbe dovuto essere ricavata in altro modo.



Despite then the apparently complete success of the Einstein equation, the physical theory of which it was designed to be the symbolic expression is found so untenable that Einstein himself, I believe, no longer holds to it. But how else can the equation be obtained?

Millikan; Phys. Rev., 7, 362, 1916

electromagnetic energy into heat energy. Yet the semi-corpuseular theory by which Einstein arrived at his equation seems at present to be wholly untenable. I have pointed out elsewhere¹ that this theory was but a very particular form of the ether-string theory advanced by J. J. Thomson² two years earlier, for it simply superposed upon that theory the additional hypotheses (1) that the bunches of energy which are as-

Millikan; Phys. Rev., 7, 362, 1916

EINSTEIN'S photoelectric equation for the maximum energy of emission of a negative electron under the influence of ultra-violet light, namely,

$$\frac{1}{2}mv^2 = Ve = h\nu - \phi \quad (1)$$

cannot in my judgment be looked upon at present as resting upon any sort of a satisfactory theoretical foundation. Its credentials are thus far purely empirical, but it is an equation which, if correct, is certainly destined to play a scarcely less important rôle in the future development of the relations between radiant electromagnetic energy and thermal energy than Maxwell's equations have played in the past.

Millikan; Phys. Rev., 7, 18, 1916

L'ipotesi di Einstein dei quanti di luce non fu presa sul serio dalla maggioranza dei fisici per circa 15 anni. **La ragione principale è che sembrava portare ad abbandonare la teoria classica della radiazione, che aveva numerosissime verifiche sperimentali.** L'obiezione centrale riguardava **l'impossibilità dei quanti di luce di spiegare i fenomeni di interferenza.**

Planck, ad esempio, nel 1913 tentò di fornire una spiegazione alternativa, che conciliasse la teoria di Lenard dell'innesco con l'ipotesi di assorbimento di radiazione in pacchetti discreti. Su teorie alternative a quella di Einstein lavorarono anche Sommerfeld e Richardson, mostrando come fosse possibile ottenere una relazione lineare tra energia cinetica degli elettroni e frequenza della luce senza l'ipotesi del fotone. In un intervento all'Accademia delle Scienze Prussiana del 1913, Planck si esprime in questi termini riguardo l'ipotesi di Einstein:

"Che Einstein possa aver occasionalmente mancato il bersaglio nelle sue speculazioni, come per esempio con la sua ipotesi dei quanti di luce, non dovrebbe essere portato eccessivamente a suo detrimento, perchè è impossibile introdurre nuove idee, perfino nelle scienze esatte, senza prendere dei rischi."

Millikan considerava il suo lavoro del 1916 una conferma dell'equazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico, ma non della sua ipotesi dei quanti di luce.

Millikan espresse riserve addirittura fino al 1923, quando ricevette il premio Nobel proprio per i suoi contributi sperimentali, sia alla determinazione della carica dell'elettrone, sia della costante di Planck. Nel suo discorso di accettazione del nobel (1924) egli si espresse così:

"il concetto di quanti di luce localizzati, dal quale Einstein derivò la sua equazione, deve ancora essere considerato ben lontano dall'essere consolidato.... Fino a che esso non sarà in grado di spiegare i fatti dell'interferenza e altri effetti che sono apparsi fino ad ora inconciliabili con esso. Forse, i recenti passi intrapresi da Duane, Compton, Epstein ed Ehrenfest potranno alla fine portare frutti, nel portare anche l'interferenza sotto controllo dei quanti di luce localizzati. Ma per ora, la via è oscura."

Lo stesso Bohr nel 1922, nel suo discorso di accettazione del Nobel, dirà che "L'ipotesi dei quanti di luce è incapace di chiarire la natura della radiazione". In sostanza quindi l'effetto fotoelettrico ha giocato un ruolo del tutto marginale nel condurre all'accettazione della teoria quantistica. Al contrario, la spiegazione di Einstein fu accettata solo quando la comunità scientifica, per altri motivi, si convinse della validità della meccanica quantistica.

Quanta parte di questo dibattito è riportata sui libri di testo? Niaz et al. (2010) hanno svolto una ricerca esaustiva sui libri di testo americani, mostrando come praticamente nessuno di essi soddisfi i criteri di una corretta ricostruzione storica. Il loro lavoro è basato su sei criteri, a ciascuno dei quali può essere assegnato un punteggio da 0 a 3:

1. Riportare l'ipotesi di innesco di Lenard
2. Descrivere correttamente le ipotesi e la teoria di Einstein
3. Riportare la mancata accettazione dell'ipotesi di Einstein del quanto di luce nella comunità scientifica
4. Descrivere correttamente l'esperimento di Millikan e i suoi risultati
5. Riportare le critiche di Millikan all'ipotesi di Einstein, e le sue assunzioni a priori sulla natura della luce
6. Interpretare il dibattito alla luce della storia e della filosofia della scienza.

In questa valutazione, nessun libro di testo americano ha ottenuto più di 10 punti, e la maggior parte dei libri (79/103) stanno nella fascia 0-3 punti.

E i libri di testo italiani?

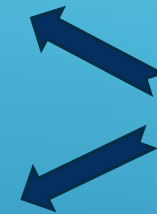
Le curve del grafico tensione-corrente precedente mostrano che il valore di ΔV_{st} e quindi l'energia cinetica massima degli elettroni, non dipendono dall'irradiazione determinata dalla radiazione ultravioletta incidente sulla piastra.

Questo risultato sperimentale non può essere spiegato con l'elettromagnetismo classico.

Il modello dei fotoni di Einstein non è in contraddizione con la teoria elettromagnetica di Maxwell: l'enorme numero di fotoni che costituisce un fascio di luce ordinario si comporta come un'onda, esattamente come le molecole di un corpo, pur avendo proprietà «granulari», costituiscono un mezzo che appare continuo su scala macroscopica.

Einstein era consapevole del fatto che la sua ipotesi del quanto di luce contrastava apertamente con la teoria di Maxwell che fino ad allora aveva riportato grandi successi interpretativi in tutti i fenomeni relativi alle onde elettromagnetiche. Perché fosse accettata, la sua teoria avrebbe dovuto spiegare uno o più fenomeni di emissione e di assorbimento della luce che la teoria di Maxwell non era in grado di interpretare.

Amaldi si distingue per palese inaccuratezza storica e ricostruzioni che appaiono programmaticamente quasi-storiche.



Amaldi

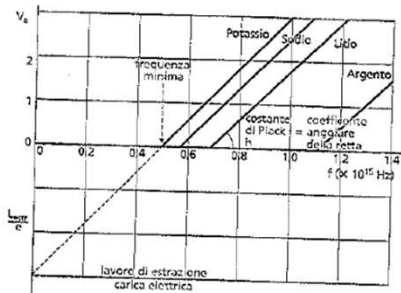


Romeni

In Romeni, d'altro canto, c'è una qualche maggiore attenzione all'accuratezza della ricostruzione

rimentali sull'effetto fotoelettrico: «Se la formula è corretta, allora, rappresentando V_s in coordinate cartesiane in funzione della frequenza della luce incidente, si deve ottenere una retta la cui pendenza è indipendente dalla natura del metallo irraggiato».

Le evidenze sperimentali che confermarono in modo definitivo la correttezza della relazione (11) furono pubblicate nel 1916 dall'americano Robert Millikan, che dimostrò per vari metalli la linearità fra V_s e f .



Riportando in uno stesso grafico i dati sperimentali, si osservano i fatti seguenti:

- la relazione tra potenziale di arresto V_s e frequenza f è lineare in quanto il grafico è una retta per tutti i metalli. Esplicitando rispetto a V_s la (11) diventa

$$V_s = \frac{h}{e} f - \frac{W_0}{e}$$

Come si vede il coefficiente angolare della retta sperimentale è il rapporto h/e fra la costante di Planck e la carica dell'elettrone. Millikan calcolò per metalli diversi questo rapporto e ottenne valori molto simili, derivando per la costante di Planck il valore numerico

$$h = 6,58 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

- esiste una frequenza minima per ogni metallo, al di sotto della quale non si rilevano fotoelettroni. Per uscire dal metallo, un elettrone deve assorbire un fotone con energia tale da vincere l'energia potenziale elettrostatica caratteristica del metallo, che lo lega al reticolo cristallino.

A ulteriore conferma dell'ipotesi del fotone di Einstein, nel 1914 fu dimostrato che i fotoelettroni sono emessi entro 10^{-8} s dall'assorbimento della radiazione: se l'intensità della radiazione è molto bassa, secondo le previsioni della fisica classica sarebbe necessario un intervallo di tempo molto più lungo per assorbire l'energia in grado di far uscire un elettrone dal metallo.

Romeni

L'effetto fotoelettrico secondo Einstein

Einstein utilizzò l'ipotesi del fotone per spiegare le caratteristiche dell'effetto fotoelettrico, studiato sistematicamente negli ultimi anni dell'Ottocento dal fisico tedesco Philipp Lenard (1862-1947). La figura 26.4 mostra l'apparato sperimentale: un fascio di luce incide su una placca metallica, racchiusa all'interno di un tubo in cui è stato praticato il vuoto. La superficie del metallo emette elettroni, che si muovono verso un elettrodo positivo, chiamato *collettore*, e producono una corrente di elettroni rilevabile con un amperometro. Tali elettroni, prodotti con l'ausilio della luce, vengono chiamati *fotoelettroni*.

Secondo Einstein, quando la luce colpisce un metallo un fotone può cedere la propria energia a un elettrone del metallo. Se il fotone ha energia sufficiente per compiere il lavoro necessario a estrarre l'elettrone dal metallo, l'elettrone viene emesso.

In base a questa equazione, $K_{\text{max}} = hf - W_0$. La figura 26.5 mostra il grafico di K_{max} in funzione della frequenza f . Il grafico è una retta che incontra l'asse x per $f = f_0$ detta *frequenza di soglia*. Quando la luce ha questa frequenza, gli elettroni «si staccano» dal metallo con energia cinetica nulla ($K_{\text{max}} = 0 \text{ J}$). Per l'equazione (26.3) quando $K_{\text{max}} = 0 \text{ J}$ l'energia hf_0 del fotone incidente è uguale al lavoro di estrazione del metallo: $hf_0 = W_0$.

Il concetto di fotone permette di spiegare una caratteristica dell'effetto fotoelettrico:

si ha emissione di fotoelettroni da parte di un metallo solo se la frequenza della luce incidente è superiore a un valore di soglia f_0 che dipende dal metallo.

Cutnell-Johnson si distingue per un particolare understatement e una narrazione che evita affermazioni sull'accettazione o meno delle ipotesi riportate

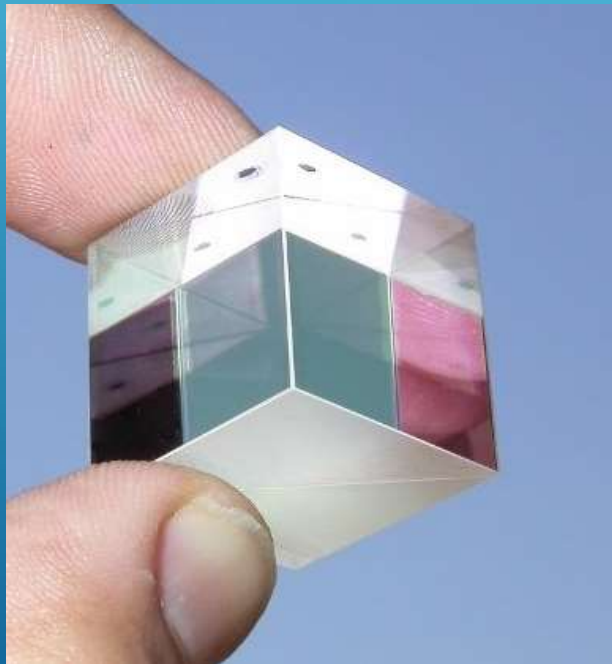
Cutnell-Johnson

Alcuni problemi riscontrati in laboratorio con gli studenti italiani

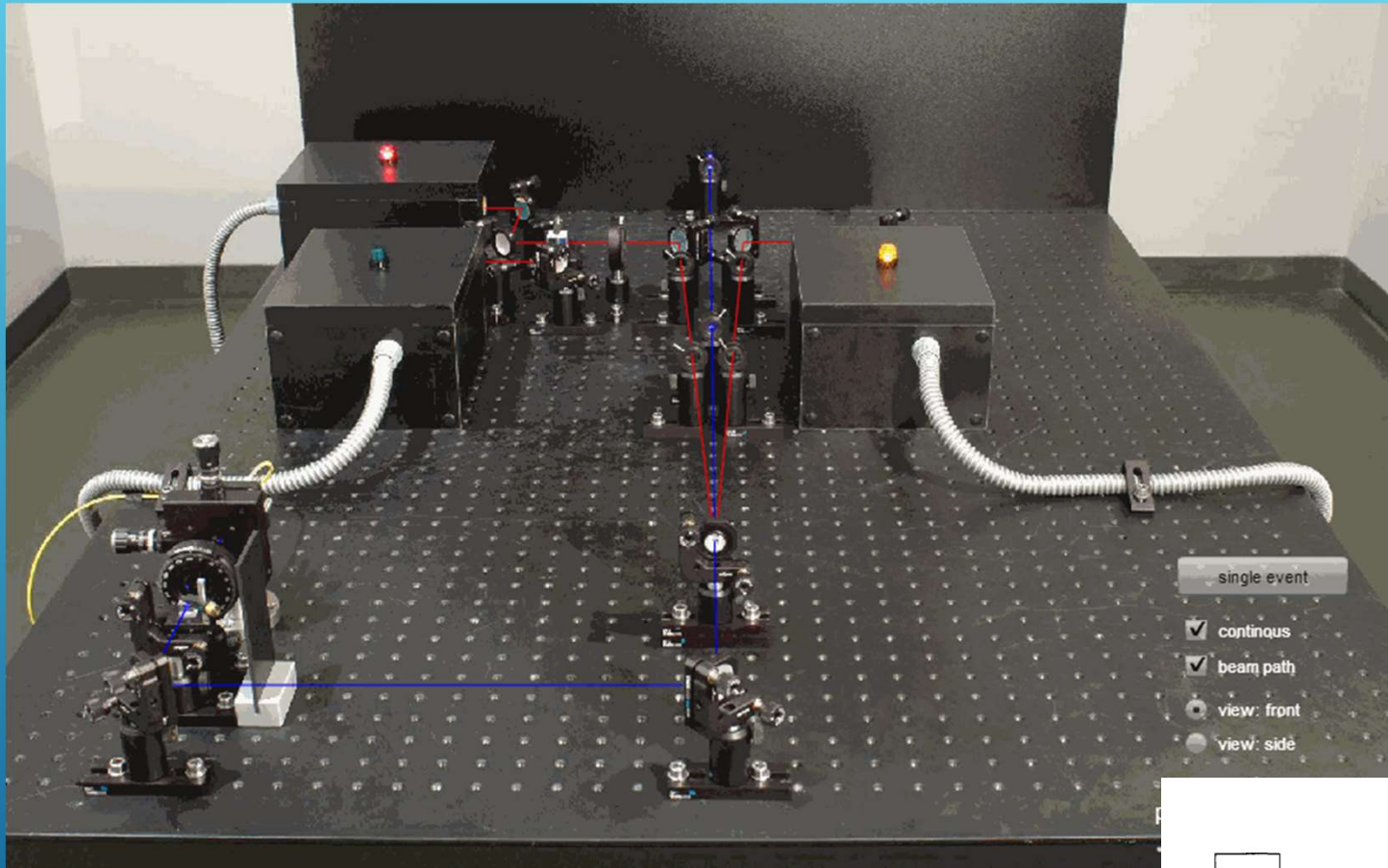
- ▶ Diversi anni di sperimentazione di un percorso sperimentale che include anche l'effetto fotoelettrico come laboratorio (PLS / orientamento) hanno consolidato alcuni risultati riguardo gli studenti italiani di quinta liceo
- ▶ Gli studenti spesso non sono in grado di spiegare a parole cosa sia l'effetto fotoelettrico e spesso **pensano che esso sia un fenomeno non previsto, in nessuna forma, dalla fisica classica (iper-semplificazione storica)**, quasi sempre non avendo chiaro perché la radiazione elettromagnetica (luce) dovrebbe interagire con l'elettrone.
- ▶ Anche questo effetto può essere almeno in parte dovuto alla trattazione presente nei libri di testo.

- Ironicamente, oggi si ritiene generalmente che l'ipotesi del fotone non sia necessaria per spiegare l'effetto fotoelettrico, che si può trattare in 'modo semiclassico' come interazione tra la materia descritta dall'equazione di Schrödinger e un campo elettromagnetico descritto dalle equazioni di Maxwell.
- Il più semplice fenomeno che logicamente implica l'esistenza del fotone sarebbe l'emissione spontanea (l'emissione stimolata si può analogamente trattare in teoria delle perturbazioni). Un esperimento cruciale per dimostrare l'esistenza del fotone è quello di Grangier, Roger e Aspect (1986).
- Va detto comunque che lo stesso Grangier ritiene di dubbia consistenza la trattazione in teoria delle perturbazioni di fenomeni come l'effetto fotoelettrico. Personalmente ritengo non vi sia nulla di male nell'affermare che l'effetto fotoelettrico è stato tra i fenomeni che hanno 'suggerito' l'esistenza del fotone (anche per non entrare apertamente in conflitto con tutta la letteratura scolastica), poi dimostrata in altri modi.

ESPERIMENTO DI GRANGIER, ROGER, ASPECT

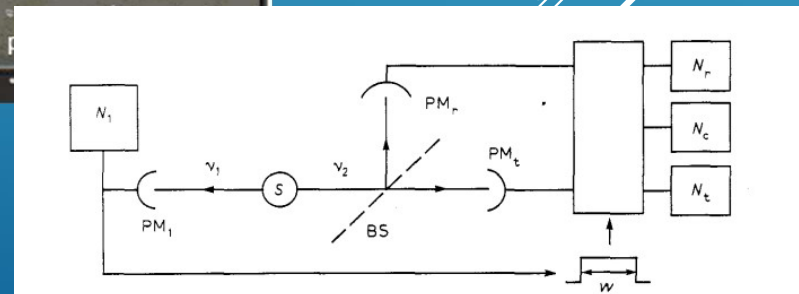


Un **beam splitter** (divisore di fascio) è un elemento base degli esperimenti di ottica, anche classica, e in particolare degli interferometri. Esso può essere costituito da due prismi triangolari incollati alla loro base mediante una colla. Lo spessore dello strato di resina è tale che, per un certo intervallo di lunghezze d'onda, metà della luce incidente attraverso la "porta" (ossia una faccia del cubo) sia riflessa e che l'altra metà sia trasmessa.



L'esperimento rivisitato in chiave didattica (l'esperimento originale usa una vera sorgente atomica mentre qui viene utilizzato un cristallo non lineare).

<http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/english/> (non più mantenuto)



Conseguenze culturali di una narrazione quasi-storica

- Questo tipo di presentazione risulta 'esclusiva' (inteso come contrario di inclusiva) per gli studenti: se gli scienziati, di fatto, sono sempre razionali, prendono sempre la via corretta e non sbagliano mai, allora IO non posso essere uno scienziato. Gli scopi pedagogici di indottrinamento alla scienza della narrazione quasi-storica, se mai sono stati sensati, sono oggi superati (le scienze non sono, oggi, discipline elitarie).
- Chiaramente, raccontare la storia nella sua complessità richiede tempo. Per questo può essere opportuno affrontare, a titolo di 'case studies' alcune controversie cruciali, adottando, per la maggior parte dell'insegnamento, un punto di vista semplicemente non storico.
- La narrazione quasi-storica tende a creare figure leggendarie come quella di Einstein, il cui contributo, sebbene importante, è stato da tempo messo in prospettiva dalla critica storica.
- D'altro canto, l'esclusione degli oppositori e delle opposizioni dal discorso didattico sulla fisica può contribuire a ingrandire le figure di 'geni eretici' che rappresenterebbero la necessaria antitesi dei campioni della scienza 'ufficiale'. L'esempio principale è la figura di Nikola Tesla, assunto a patrono quasi di ogni asserzione pseudo-scientifica riguardante la fisica moderna.

MISCONCEZIONI E PSEUDOSCIENZA

Sugli aspetti concettuali della meccanica
quantistica

A decorative graphic consisting of several parallel white lines of varying lengths, slanted upwards from left to right, located in the bottom right corner of the slide.

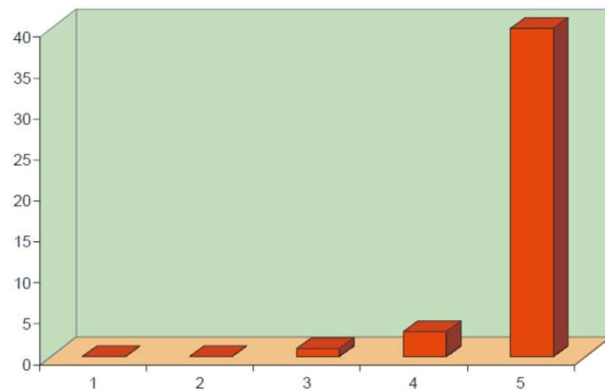
Difficoltà riguardo le relazioni di indeterminazione

Le relazioni di indeterminazione spesso sono interpretate dagli studenti come un particolare aspetto della presenza inevitabile di incertezze e disturbi nelle misure. Le previsioni sarebbero probabilistiche perché non si possiedono conoscenze sufficientemente precise, perché in ogni misura c'è sempre un margine di errore, oppure perché le condizioni esterne possono cambiare, anche di poco, ma in modo sufficiente a modificare il moto delle particelle microscopiche e quindi i risultati delle misurazioni.

Questo tipo di difficoltà porta spesso gli studenti a non comprendere a fondo la formula del principio di indeterminazione, non cogliendo la relazione di proporzionalità inversa fra le indeterminazioni di variabili complementari. Al contrario, essi possono ritenere non sia possibile in nessun caso effettuare una misura di una delle variabili più accurato di un certo limite.

La spiegazione storica del principio di indeterminazione basata sull'esperimento mentale del "microscopio di Heisenberg", proposta da alcuni libri di testo, può incoraggiare questo tipo di concezioni alternative (Levrini e Fantini, 2013). Pertanto tale spiegazione, se introdotta, dovrebbe essere discussa criticamente, giustappollandola ad una interpretazione più moderna del principio di indeterminazione, al fine di mostrare l'incompatibilità di fondo tra la fisica classica e quantistica (Hadzizaki, 2006).

(a)



(b)

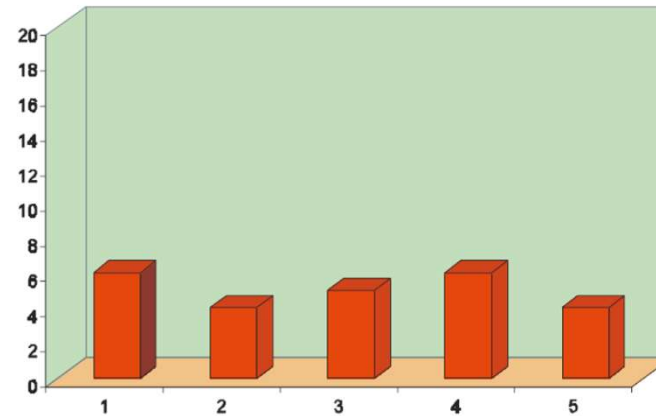


Fig. 10: Response to the statement: : “In principle, quantum objects can possess simultaneously position and momentum” (a) experimental group (b) control group

Per quanto riguarda la scuola secondaria vi sono studi su campioni abbastanza ridotti (Müller and Wiesner, 2002; Papaphotis and Tsapalis, 2008) che riportano un'interpretazione giudicata adeguata del principio per percentuali **tra il 30 e il 40%** di studenti istruiti con metodi tradizionali. Corsi che hanno adottato metodologie basate sulla ricerca, come quello di Muller e Wiesner (2002) hanno ottenuto risultati molto superiori.

È questa l'essenza del *principio di indeterminazione*, formulato da Heisenberg nel 1927. Intuitivamente, lo si può concepire pensando che se vogliamo conoscere la posizione di un elettrone, dobbiamo «illuminarlo» con radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda opportuna; così facendo, il fotone che colpisce l'elettrone gli comunica una certa quantità di moto che determinerà l'incertezza su p . Più è corta la lunghezza d'onda λ del fotone, e maggiore è la precisione della misura di posizione, ma contemporaneamente maggiore è la quantità di moto comunicata dal fotone ($p = h/\lambda$) e quindi l'imprecisione sulla misura di velocità. Se-

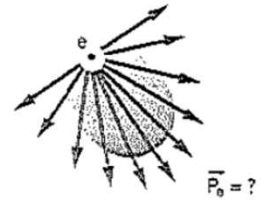
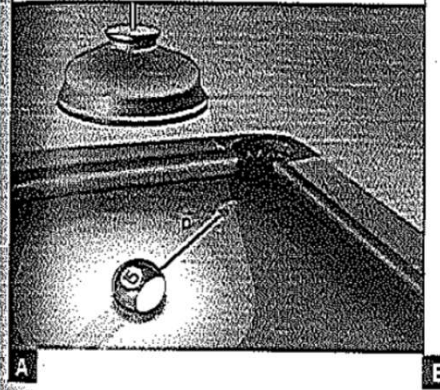
Dal libro di testo Amaldi

Cutnell-Johnson, sezione di «approfondimento storico». Le relazioni non sono introdotte così nella parte di teoria



► La pallina da biliardo, illuminata per essere osservata, riceve quantità di moto dal fascio di luce. Però questa quantità di moto non ha rilevanza, perché non esercita una forza apprezzabile sulla pallina.

► Il moto di un elettrone è invece perturbato in modo imprevedibile dai fotoni con i quali si vuole determinare la sua posizione e, dopo l'osservazione, la quantità di moto dell'elettrone è indeterminata.



Non è quindi possibile conoscere con precisione dove l'elettrone si trova, senza impartirgli una quantità di moto non determinabile.

È quindi impossibile sapere con precisione e contemporaneamente dove l'elettrone si trova e che velocità ha. Anche il concetto di traiettoria perde senso, perché si può parlare di traiettoria di un corpo soltanto se si può osservare il suo moto senza perturbarlo.

Un libro di letteratura italiana abbastanza diffuso...



...discussione le nozioni assolute di spazio, tempo e accelerazione della fisica newtoniana. Poi il secolo si era aperto con i mutamenti legati alla **teoria dei quanti** (1900) di Max Planck, che aveva rovesciato l'idea che l'energia avesse una natura continua e uniforme. Nel 1927 il **principio di indeterminazione**, formulato da **Werner Karl Heisenberg**, avrebbe polverizzato quel che restava delle impalcature tradizionali della fisica. Il principio di indeterminazione postulava infatti, sempre all'interno della quantistica, l'impossibilità di misurare in modo certo un sistema a causa delle – mai evitabili – interferenze del misuratore. Su un altro piano di interpretazione del reale, tale principio portava a ipotizzare l'**ineliminabile influenza dell'osservatore sul fenomeno osservato** (trattando di Carlo Emilio Gadda torneremo su questo principio probabilmente noto al grande scrittore ➔ p. 714 sgg.).

Una spinta notevole...

Measurement error or uncertainty	<p>Describing Δx as an uncertainty or error varies from the exact value; if the minimum error is known in position measurement the minimum error in the momentum measurement is also known.</p> <p>Uncertainties in the measurement of observables are subject to only technical or random errors. Uncertainty is described as an error that occurred during measurement.</p> <p>Uncertainty is seen as some limitation or error of the instrument.</p> <p>No measurement is found without at least minimum error.</p> <p>Uncertainty is depicted as measurement errors due to the lack of skilled technicians who measure without a small error.</p> <p>Uncertainty is understood as measurement errors related to mistakes or wrong measurements.</p>
Measurement disturbance	<p>Measurement of a particle's position greatly disturbs its momentum.</p> <p>Regarding the uncertainty relation as a consequence of the disturbance of the measurement process.</p> <p>Describing the uncertainty principle as a consequence of unavoidable disturbance to the system resulting from the act of measurement.</p> <p>The position of a particle is well defined when one specifies a suitable experiment that allows the position of a particle to be measured.</p> <p>The momentum of a particle changes, due to a position measurement.</p>
Uncertainty as a quantum mechanical uncertainty principle	<p>The position and momentum cannot be simultaneously and accurately measured.</p> <p>Uncertainty does not work practically since $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ and \hbar is very small.</p> <p>Δx is the variation during measurement.</p> <p>Uncertainty is described as an intrinsic property of measurement.</p> <p>$\Delta x \Delta p$ is described as an uncertainty relation which illustrates more accurately the measurement of the position (minimum Δx) the greater the uncertainty of momentum (maximum Δp).</p> <p>Uncertainty relation is described in terms of Planck's constant. That is, the smaller Δx, the larger Δp has to be, and the relation always holds true.</p>

Categorie fenomenografiche di risposte degli studenti sul significato delle relazioni di indeterminazione, da (Ayene, Kriek e Damtie, 2011).

Nella prospettiva moderna il principio di indeterminazione *non* riguarda un disturbo causato al sistema col processo di misura, sebbene vi sia stato su questo un lungo dibattito storico. Riguarda invece una proprietà intrinseca dei sistemi quantistici, ossia l'impossibilità che essi si trovino in uno stato in cui i valori di grandezze tra loro *incompatibili* siano entrambe precisamente definite, oltre un certo limite intrinseco.

Per quanto riguarda la forma di indeterminazione più comune, quella tra la posizione di un oggetto quantistico lungo una certa direzione, e la sua quantità di moto lungo la stessa direzione, tale indeterminazione ha come ordine di grandezza la costante di Planck h , costante fondamentale della natura.

Distorsioni della MQ basate sulle relazioni di indeterminazione

- L'(errata) interpretazione errore-disturbo delle relazioni di indeterminazione è spesso associata a. o confusa con, il problema della misura, che prenderemo in considerazione in seguito, per argomentare che 'la realtà dipende dall'osservatore', o che 'l'osservatore può modificare la realtà'. Come si può facilmente capire, queste affermazioni fuorvianti possono costituire un appoggio per filosofie sincretistiche in stile new age (mind over matter, etc.).
- Al principio di indeterminazione viene spesso data un'interpretazione epistemica iper-estensiva del tipo 'è impossibile per l'uomo conoscere fino in fondo la natura', da cui possono seguire affermazioni ancora meno fondate come 'nessun esperimento può dare risultati non ambigui' o 'la scienza non consente di avere alcuna certezza' che possono giustificare ogni tipo di posizione anti-scientifica o di negazione della scienza.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg è stato un elemento chiave nello sviluppo della meccanica quantistica e del pensiero filosofico moderno.



Il principio di indeterminazione di Heisenberg afferma che il semplice fatto di osservare una particella subatomica come un elettrone ne altererà lo stato.

Questo fenomeno ci impedirà di sapere con certezza dove si trova e come si muove. Al tempo stesso, questa teoria dell'universo quantistico può essere applicata anche al mondo macroscopico per capire quanto può essere inaspettata la realtà.

Un unico Mondo: la nascita della Psicologia Quantistica

Che cos'è la psicologia quantistica



227 condivisioni

Condividi la conoscenza!

Redazione - [Scienza e Conoscenza](#) - 01/01/2016

Cosa è la psicologia quantistica?

La psicologia quantistica è un approccio multidisciplinare di differenti modelli scientifici e conoscenze umanistiche tra cui la psicologia, la biologia, le neuroscienze, la fisica quantistica e la filosofia.

Quando e dove è nata?

Il quando è identificabile, più che in termini temporali, comunque cronologicamente recenti, come riflesso alla mancanza di risposte esaustive da parte delle metodologie e dei modelli psicologici classici più diffusi. L'approccio si basa, in realtà, sui modelli teorici relativi al funzionamento dei processi mentali, sia consci che inconsci, e bio-neurologici, nonché sul funzionamento della psiche umana. Prendendo come campione un qualsiasi modello scientifico, appare evidente come di frequente esso non sia in grado di spiegare l'intero o i fenomeni conosciuti della mente umana. Ciò implica, come conseguenza, la necessità del ricorso a nuovi paradigmi scientifici cui riferirsi. Il nuovo paradigma della psicologia quantistica emerge, dunque, per offrire risposte più soddisfacenti, soprattutto in direzione dell'integrazione delle maggiori conoscenze scientifiche. Il metodo scientifico sperimentale sorge dalla crisi del metodo osservativo e della pura fede e integra, nella sua evoluzione, conoscenze e approcci differenti. Fondamentale è, inoltre, anche per via delle limitate conoscenze scientifiche e tecnologiche attuali, il ricorso alla matematica per spiegare, anche su base puramente teorica, i fenomeni coinvolti.

Anche il dove, per rispondere in modo quantistico, non è ben localizzabile. È nell'aria, gira nelle menti degli scienziati visionari, ma forse tutto parte dai primi anni del secolo scorso con le geniali intuizioni di Erwin Schrodinger, Werner Heisenberg, Nils Bohr, David Bohm che cominciano ad inserire la parola "coscienza" e "spirito" nel loro ragionamento fisico-matematico.

Difficoltà riguardo il dualismo onda-particella

Altre concezioni alternative o ibride sono state evidenziate in associazione al cosiddetto “dualismo onda-particella”. Per esempio, il fatto che le particelle siano rappresentate da un pacchetto d’onda porta alcuni studenti a pensare, con una interpretazione ibrida e realista, che la particella si muova su un percorso ondulato, come suggerito dal disegno della forma d’onda.

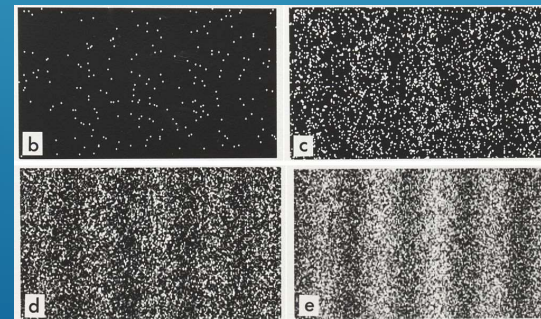
In genere, gli studenti sono portati ad associare un qualche tipo di natura duale al fotone (anche se spesso con un’immagine non corretta di tale dualità), ma tendono invece ad immaginare l’elettrone come una semplice particella classica (Olsen, 2002; Ayene, Kriek e Damtie, 2011). Nello studio di Muller e Wiesner (2002) il 17% di $n = 550$ studenti tedeschi pre-universitari hanno fornito tale rappresentazione per il fotone.



Che cosa è il 'dualismo onda-particella'?

I libri di testo sono spesso confusi riguardo a cosa in realtà il dualismo onda-particella sia. Peraltro, anche dal punto di vista terminologico, alcuni autori hanno messo in dubbio che parlare di dualismo onda-particella sia di per sé corretto. Comunque, il concetto può essere descritto in questi termini:

- 1) Gli oggetti quantistici sono *sempre* rivelati come particelle, ossia appaiono avere natura corpuscolare al rivelatore.
- 2) Tuttavia, in esperimenti nei quali la rivelazione avviene dopo che l'oggetto quantistico ha subito un'evoluzione per la quale diverse «storie» sono possibili tra sorgente e rivelatore, si osserverà, nella statistica dei dati, interferenza tra le alternative.



3) Se si cerca di ottenere informazione di tipo «corpuscolare», cioè di sapere, mediante misure o altro, quale delle diverse possibilità è stata effettivamente realizzata dall'oggetto quantistica (nella doppia fenditura: sapere da quale fenditura è passato l'oggetto quantistico) i fenomeni di interferenza saranno persi, o resi meno visibili;

3 bis) In particolare, definendo in modo opportuno la distinguibilità D delle diverse alternative, e la visibilità V delle frange di interferenza, vale la disuguaglianza (Englert, 1996)

$$D^2 + V^2 \leq 1$$

La quale include ed estende il dualismo *a la* Bohr, ossia i casi $D=0, V=1$ (comportamento 'ondulatorio'), e $D=1, V=0$ (comportamento 'corpuscolare').

lo studio più esteso effettuato nella scuola secondaria rimane quello di Olsen su N=236 studenti norvegesi (Olsen, 2002). In tale studio, le risposte che rivelavano un modello "genuinamente quantistico" della dualità risultarono lo 0.4% per i fotoni e il 2.5% per gli elettroni. Lo studio ha anche rivelato differenze molto significative in come gli studenti immaginavano gli elettroni rispetto ai fotoni, rivelando anche in questo caso la creazione di modelli separati e disconnessi.

<i>Group</i>	<i>Category</i>	<i>Description</i>	<i>L</i>	<i>E</i>
1 Particle nature	A	Light/Electrons are particles.	0.4	27.9
	B	Light/Electrons are particles but they have some wave properties.	1.7	22.0
	C	Light/Electrons are particles that travels in waves.	8.1	6.4
2 Wave nature	D	Light/Electrons are waves.	6.7	0
	E	Light/Electrons are waves but they have some particle properties.	2.5	0
3 Dual nature	F	<i>Vaguely formulated duality:</i> Light/Electrons are (or have the properties as) both particles and waves <i>or</i> Some phenomena can be explained by wave properties and other by particle properties.	59.2	17.4
	G	<i>Genuine duality:</i> Some phenomena can be explained by a wave model and other by a particle model \Rightarrow We have to apply both a wave model and a particle model when describing the behaviour of light/electrons \Rightarrow Therefore Light/Electrons are simultaneously both wave and particle.	0.4	2.5
	H	<i>Concrete duality:</i> Light/Electrons consists of two parts; a wave part and particles.	3.4	0.0
	I	<i>Either-or duality:</i> Light/Electrons are either waves or particles depending on experiment/observation.	4.2	0.0
	J	<i>Anti-duality:</i> Nothing can be both wave and particle at the same time \Rightarrow Light/Electrons are neither waves nor particles but they have properties from both models.	0.4	0.0
	4 Non-response	R	Impossible to interpret/irrelevant answers.	8.1
	S	Blank.	4.7	14.8

Note: L = light; E = electrons

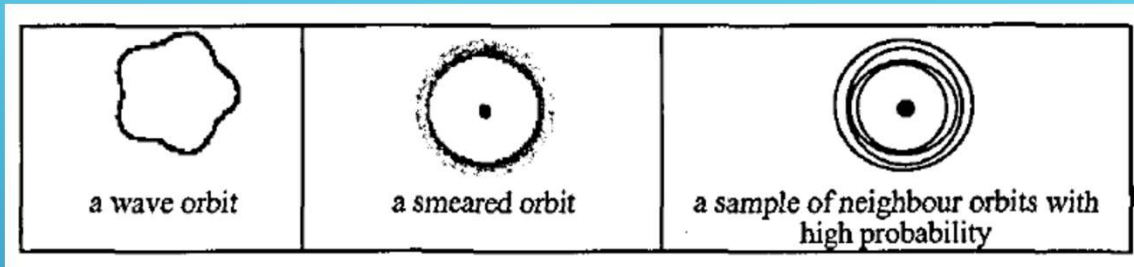
Difficoltà riguardo la struttura atomica della materia

Per quanto riguarda la descrizione quantistica della struttura atomica, in particolare dell'atomo di idrogeno, si trova una forte prevalenza delle descrizioni in termini di orbite, in analogia con le orbite dei pianeti e con riferimenti al modello atomico di Bohr (Kalkanis et al 2003, Müller & Wiesner 2002, Petri & Niederer 1996, Ke et al 2005).

Spesso gli studenti tendono a conservare le loro precedenti concezioni, basate su un modello di orbite planetarie o di gusci, oppure costruiscono nuove personali interpretazioni che mescolano caratteristiche delle particelle classiche con nuove proprietà probabilistiche.

L'elettrone può essere considerato una particella classica, come una pallina da biliardo, che ha sempre una precisa posizione, che però non può essere misurata con esattezza per il principio di indeterminazione; i disegni di nuvole di punti utilizzati nei libri per rappresentare la distribuzione di probabilità possono essere interpretate come misure successive delle posizioni di uno stesso elettrone, che si muove in modo continuo a zig-zag o a salti.

Si ritrova, anche qui, l'idea dell'elettrone che percorre l'orbita con oscillazioni di tipo sinusoidale, probabilmente mutuata anche da illustrazioni riguardanti l'interpretazione alla DeBroglie del modello di Bohr.



Possibili "attrattori" ibridi tra il modello planetario e quello quantistico (da Petri e Niedderer, 1996)

La forza con la quale il modello di Bohr rimane impresso nella mente degli studenti ha indotto alcuni autori (Zollman et al., 2002) a suggerire di evitarne interpretazioni spaziali, utilizzando solo la rappresentazione per livelli di energia.

Sinarcas e Solbes (2013) hanno osservato che studenti liceali spagnoli (16-18 anni) hanno difficoltà a spiegare spettri discontinui usando il modello di Bohr. Riferiscono che solo circa il 20% degli studenti è in grado di spiegare gli spettri discontinui come transizioni elettroniche tra orbite stazionarie con energia ben definita. Inoltre, in questo studio circa la metà (54%) degli studenti non ha risposto alla domanda e oltre un quarto (27%) ha fornito risposte logicamente incoerente.

Distorsioni della MQ basate sul dualismo onda particella o sulla struttura quantistica della materia

- Sia il 'dualismo onda-particella' sia gli aspetti quantistici della struttura della materia vengono evocati per giustificare posizioni pseudo-scientifiche, specialmente nella categoria delle medicine alternative, fondandosi in particolare su fraintendimenti lessicali.
- Per esempio, sulla base dell'affermazione vaga che 'ogni cosa è anche un'onda' si potrebbe affermare che il nostro corpo, o particolari suoi organi, risuonano a particolari frequenze 'positive', che possono permettere guarigioni miracolose. O addirittura che, accordando la frequenza del nostro corpo alla 'frequenza dell'universo', si possa ottenere il realizzarsi di particolari realtà desiderate (anche qui, in collegamento con il problema della misura).
- Appare quindi importante discostarsi, nell'insegnamento di questi concetti, da linguaggi vaghi, imprecisi o metaforici per discuterne invece il vero contenuto scientifico.

MEDICINA QUANTICA

DALLA FISICA QUANTISTICA ALLA MEDICINA QUANTICA



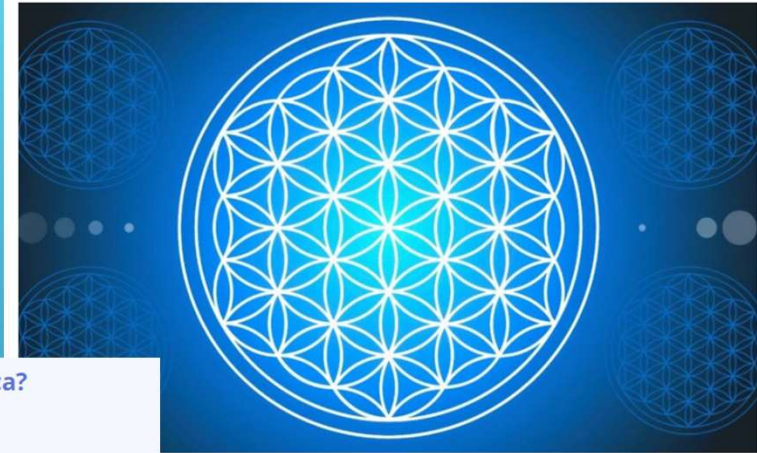
Gli esseri biologici sono organizzati grazie ad un continuo scambio di miliardi di informazioni di natura elettrodinamico, da molecola a molecola, da cellula a cellula, da organo ad organo. Questi messaggi con modulazione armoniosa dell'insieme dell'organismo.



Gli antichi cinesi l'avevano già descritto grazie al loro senso analogico di osservazione dei fenomeni. La scienza moderna conferma le loro leggi antiche.

In analogia quantistica moderna : lo Yang corrisponde all'energia nella sua fase cinetica con scambi fotonici in continuo movimento, tendenza alla fibrosi. In questa fase c'è una grande attività informatica.

La nuova medicina si basa sulle frequenze- gli scienziati lo affermano

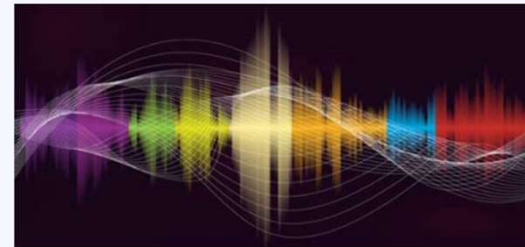


Che cos'è la Medicina Quantistica?

Publicato il 3 Ottobre 2019 da beatrice



La Medicina Quantistica rappresenta un'innovazione nell'ambito della salute, in quanto racchiude in un nuovo approccio clinico le più recenti scoperte nel campo della bio-fisica e delle scienze olistiche.



In questo articolo andremo ad evidenziarne i concetti base e le implicazioni terapeutiche.

Onde e frequenze

Nell'universo tutto vibra e l'organismo non è da meno. La vita è caratterizzata da vibrazioni ed oscillazioni continue, il che fa sì che tutto nell'organismo vibri e pulsi secondo le leggi della fisica. Qualsiasi struttura biologica ha una corrispondenza precisa dal punto di vista ondulatorio e frequenziale. Ciò è ben noto da tempo e l'elettrocardiogramma e l'elettroencefalogramma sono solo alcuni degli esempi più conosciuti. Ma la ricerca scientifica si è spinta ancora più avanti, mostrando come le onde e le oscillazioni proprie dell'organismo costituiscano aspetti essenziali di ogni forma di vita.

ta da sempre associata alla creazione della materia e alla forza vitale che . Dai Veda in Oriente, a Pitagora, da San Giovanni alle scoperte di Plank ed chiaro che tutto è energia e questa energia è vibrazione. Pitagora diceva che la medicina e nelle antiche tradizioni religiose ed esoteriche i canti e i suoni indure guarigioni fisiche e spirituali. Oggi la scienza sta riscoprendo tutto porte a quella che viene chiamata: medicina quantistica.

L'entanglement quantistico

La parola Entanglement (Verschränkung) fu coniata da Erwin Schrödinger in una lettera del 1935 ad Einstein "per descrivere le correlazioni tra due particelle che interagiscono e poi si separano come nell'esperimento EPR."

In un importante articolo del 1935, Schrödinger riconobbe l'importanza del concetto di entanglement: "Non chiamerei [l'entanglement] uno ma piuttosto il tratto caratteristico della meccanica quantistica, quello che rafforza tutto il suo allontanamento dalle linee di pensiero classiche."

Gli stati entangled furono usati da Einstein in un celebre esperimento mentale (Gedankenexperiment) in un articolo del 1935 con Boris Podolsky e Nathan Rosen (EPR, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?") che voleva mostrare che la meccanica quantistica era incompleta o in contraddizione con alcune ipotesi ragionevoli sulla realtà fisica.

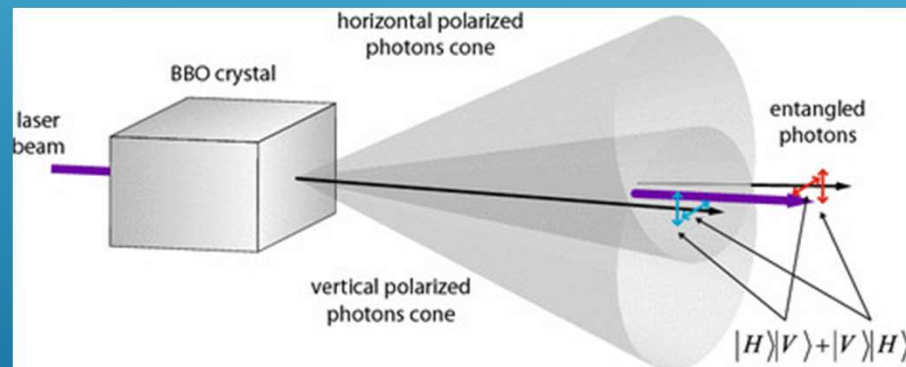
Questo esperimento è noto come il **Paradosso EPR**.

L'entanglement quantistico

Consideriamo un apparato che genera una coppia di fotoni nello stato di polarizzazione descritto da uno degli stati di Bell (massimamente entangled)

$$|\psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0^\circ\rangle_A|90^\circ\rangle_B + |90^\circ\rangle_A|0^\circ\rangle_B) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|1\rangle_B + |1\rangle_A|0\rangle_B) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$$

Ad esempio: Il processo di “down conversion di tipo II” produce **coppie di fotoni entangled** in polarizzazione.



A seguito del decadimento del fotone in due fotoni di metà energia ciascuno, nel cristallo birifrangente si creano due fasci di fotoni conici con polarizzazione opposta (raggio superiore con polarizzazione verticale e raggio inferiore con polarizzazione orizzontale); all'intersezione dei coni, gli stati non hanno una polarizzazione determinata e descrivono coppie di fotoni entangled

L'entanglement quantistico e il paradosso EPR

Realismo secondo EPR

"Se possiamo predire con certezza il risultato di una misura su un sistema senza interagire in alcun modo con esso, la misura deve corrispondere ad una proprietà reale".

Località:

l'informazione derivante da una misura su uno di due sistemi isolati non può produrre un cambiamento reale nell'altro, ovvero le misure fatte da B non possono dipendere dalle misure fatte da A se la loro distanza è sufficientemente grande.

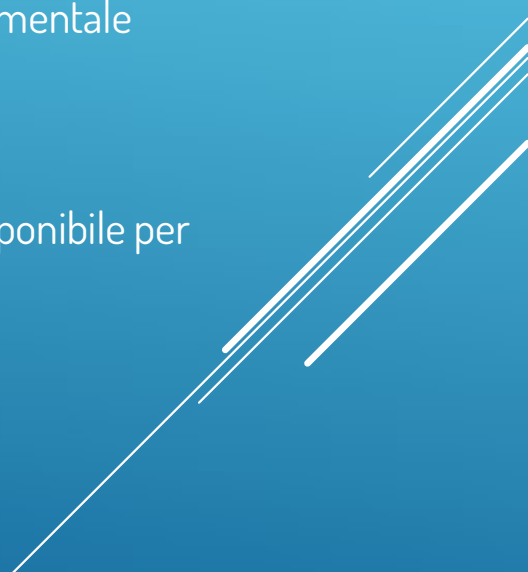
L'entanglement quantistico e il paradosso EPR

- Nell'esperimento EPR, data la misura sul fotone in A, la polarizzazione del fotone in B può essere prevista senza interagire con esso. Quindi la polarizzazione di B, non misurata direttamente, deve essere reale.
- Questo vale anche per misure di polarizzazione ad angoli diversi (che sono fra loro incompatibili).
- Componenti di polarizzazione diverse sono reali contemporaneamente, ma la Meccanica Quantistica non lo permette.

Abbiamo tre possibili uscite

- non vale il realismo (non è vero che ci sono elementi di realtà pre-esistenti alle misure)
- non vale la località (la misura su una parte dello stato entangled determina istantaneamente il cambiamento dello stato dell'altra)
- la Meccanica Quantistica è incompleta

L'entanglement quantistico e le disuguaglianze di Bell

- Assumendo i principi di realismo e località, John Bell derivò delle relazioni matematiche di validità generale (delle disuguaglianze) che devono essere soddisfatte da tutti i sistemi che rispettano i due principi.
 - Le disuguaglianze di Bell possono essere sottoposte a verifica matematica che sperimentale
 - La Meccanica Quantistica soddisfa le disuguaglianze di Bell?
 - Quando l'articolo di Bell fu scritto (1964), non c'era nessun risultato sperimentale disponibile per metterla alla prova le disuguaglianze.
 - A partire dalla fine degli anni '60 furono tentati molti esperimenti.
- 

L'entanglement quantistico le disuguaglianze di Bell

Primi esperimenti (1972-76): Berkeley, Harvard, Texas A&M

- Primi risultati contraddittori (Clauser = QM; Pipkin \neq QM)
- Chiare indicazioni a favore della Meccanica Quantistica (Clauser, Fry)
- Esperimenti molto lontani da quelli ideali

Esperimenti all'Institut d'optique (1975-82): Aspect, Dalibard, Roger

- Sorgente di fotoni entangled molto efficiente
- Schemi sempre più vicini al caso ideale
- Test di non-località (separazione relativistica)

Esperimenti di terza generazione (1988-): Maryland, Rochester, Malvern, Genève, Innsbruck, Los Alamos, Boulder, Urbana Champaign...

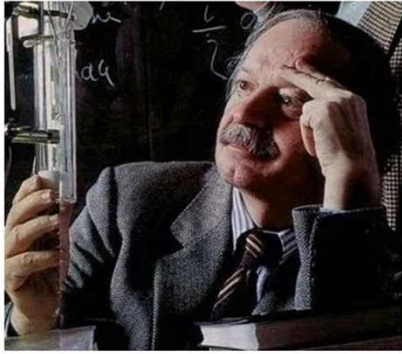
- Nuove sorgenti di coppie entangled
- Chiusura degli ultimi "loophole"
- Entanglement a grandissima distanza
- Entanglement on demand

L'entanglement quantistico le disuguaglianze di Bell

- Nel 2015 il fenomeno della nonlocalità quantistica è stato dimostrato con livello di confidenza del 96% sulla base di un test loophole-free.
- La violazione delle disuguaglianze di Bell dimostra sperimentalmente che la meccanica quantistica viola l'ipotesi di località per coppie di particelle entangled. Esse sono sottoposte a correlazioni a distanza, tramite le quali non è però possibile trasmettere informazione se non utilizzando anche un canale classico (no communication theorem). Questo preserva la struttura causale degli eventi.
- Molte attuali tecnologie quantistiche, funzionanti o in via di sviluppo, si basano sull'entanglement. Per capire se un sistema è dotato di un livello sufficiente di entanglement si effettuano test delle disuguaglianze di Bell che diventano dei testimoni di entanglement (entanglement witness) stabilendo una linea di demarcazione tra stati quantistici entangled e stati quantistici separabili.
- Le disuguaglianze di Bell sono importanti per le tecnologie quantistiche ed è evidente che esse hanno anche implicazioni filosofico/epistemologiche che vanno però presentate entro i loro confini precisi.

Distorsioni della MQ basate sull'entanglement

- Le difficoltà di apprendimento riguardanti il fenomeno dell'entanglement quantistico sono poco, o per niente, studiate a livello di scuola secondaria, perché solitamente questo argomento viene introdotto ad un livello più avanzato. Le difficoltà rilevate al livello di istruzione terziaria sono perlopiù tecniche; hanno a che vedere, per esempio, con la difficoltà nel distinguere chiaramente gli stati prodotto da quelli entangled, sulla base della forma matematica o delle rispettive proprietà (e.g. Kohlne e Deffebach, 2015).
- Tuttavia, l'entanglement è un fenomeno che viene spesso menzionato sui media, solitamente con buone intenzioni, ad esempio per la descrizione divulgativa di esperimenti come quelli per testare le disuguaglianze di Bell. Questo significa che molte persone ne acquisiscono un'idea, almeno basata su un'immagine metaforica.
- L'entanglement è tra gli argomenti di fisica quantistica più spesso evocati a giustificazione di teorie pseudo-scientifiche. Molto spesso queste teorie hanno a che fare con la telepatia, la psicocinesi e specialmente la guarigione a distanza. Un sito web, riportato in Gazzola, 2019, vendeva 'medicinali quantistici' *scaricabili da internet* sotto forma di codice che si sarebbe poi teletrasportato, naturalmente grazie all'entanglement quantistico, dal cellulare al corpo della persona malata.



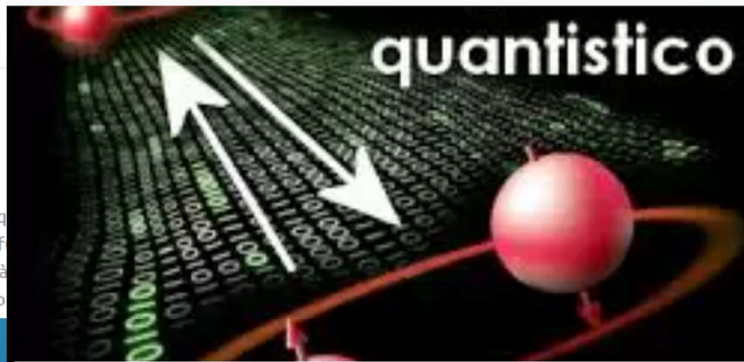
La teoria quantistica che può spiegare l'omeopatia

DI BRUNO 23 GIUGNO 2018

HRI newsletter 2010

Traduzione:

Questa Newsletter presenta un nuovo sviluppo della teoria quantistica osservati delle diluizioni omeopatiche. Questa nuova teoria fu sviluppata da Giuliano Preparata (1942-2000), un fisico teorico italiano all'Università di Padova. Ricordiamoci della necessità di una tale teoria in omeopatia.



Entanglement quantistico, oltre lo spazio tempo

Di GaiaQuantica / Dicembre 24, 2022 / Lascia un commento

I concetti spirituali non hanno nulla a che fare con lo spazio scientifico. Ma sono esclusivamente proprietà di stato d' **anima** e coscienza. Essendo lo Stato un attributo di amore, vita, saggezza, desideri. In generale, attributi di ciò che è buono e vero. Un concetto veramente spirituale di queste realtà non ha nulla in comune con lo spazio. Si tratta dell'**Entanglement quantistico**, .

Tuttavia, poiché gli **Angeli** e gli **Spiriti** vedono le nostre modalità di vita terrene. E poiché gli oggetti possono essere visti solo nello spazio, sembra che ci sia spazio nel mondo spirituale in cui si trovano **angeli** e **spiriti**. (controparte subatomica o spirituale della materia). Quindi non è spazio, ma apparenza di spazio. Non è fisso e invariante come il nostro. Può essere allungato, accorciato,

La danza della guarigione

Fisica quantistica e medicina, tra spirito e materia

Francesca Poli

Le scienze di frontiera, le neuroscienze e la fisica quantistica, ci conducono a riaffermare il principio fisico per il quale noi siamo un campo energetico che si manifesta per mezzo di un corpo. Rendendo sempre più coscienza che questo stato ed emotivo è oggettivo e interagisce a un livello con la rete in cui siamo immersi, un ecosistema sino all'Universo e oltre.

Il campo energetico emotivo necessita sempre più di essere compreso per comprendere realmente chi siamo e come siamo, come ci ammaliamo e come guariamo.

Se abbiamo dedicato finora il nostro impegno a studiare sistematicamente la materia di cui siamo composti, è giunto il tempo di studiare sistematicamente il campo energetico di cui siamo fatti e le vie di integrazione della materia con la nostra parte energetica.



La natura è sempre in equilibrio dinamico, non statico e per i fisici moderni la danza di Shiva è la danza della materia subatomica, un processo infinito di creazione e distruzione. La metafora della danza cosmica unifica la fisica con la nostra parte energetica.

IL PROBLEMA DELLA MISURA

La formulazione di Von Neumann



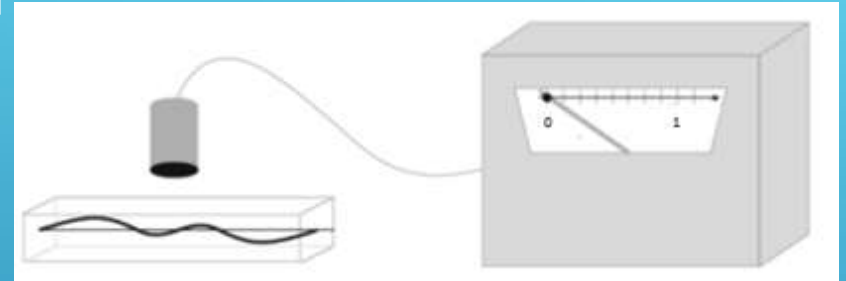
SCHEMA DI VON NEUMANN PER LA MISURAZIONE IDEALE

- Descrivere l'atto della misurazione quantistica in termini interamente quantomeccanici come interazione dinamica tra il sistema misurato e l'apparato, trattando ambedue come oggetti quantistici
- Del resto, grandi oggetti macroscopici sono solo grandi insiemi di elettroni e altre particelle microscopiche
 - ➔ Almeno in principio, se non proprio in pratica, non dovrebbe bastare una piena descrizione microscopica?
 - ➔ Il mondo macroscopico familiare (grandi oggetti con proprietà classiche definite che almeno approssimativamente obbediscono alle leggi di Newton) non dovrebbe in qualche modo *emergere* dalla più fondamentale descrizione quantistica?

DESCRIZIONE DEL PROCEDIMENTO

i sistemi in esame

- particella confinata in una buca che può avere energia definita E_0 oppure E_1
- dispositivo misuratore dotato di indicatore con due posizioni possibili
 - 0: posizione di riposo ed energia E_0
 - 1: energia E_1



codifica stati quantistici

Sistema misurato

$|0\rangle$: stato ad energia E_0

$|1\rangle$: stato ad energia E_1

Siamo di fronte ad un sistema a 2 qubit!

interazione quando la particella ha energia definita E_0

INIZIO: $|\psi_{part}\rangle = |0\rangle$ $|\psi_{pointer}\rangle = |0\rangle$

FINE: Stato complessivo: $|\psi_{tot}\rangle = |\psi_{part}\rangle |\psi_{pointer}\rangle = |0\rangle|0\rangle$

Sistema misuratore

$|0\rangle$: stato dell'indicatore nella posizione 0

$|1\rangle$: stato dell'indicatore nella posizione 1

La trasformazione T , che rappresenta la misurazione, manda lo stato in

$$T|\psi_{tot}\rangle = |0\rangle|0\rangle$$

interazione quando la particella ha energia definita E_1

INIZIO: $|\psi_{part}\rangle = |1\rangle$ $|\psi_{pointer}\rangle = |0\rangle$

Stato complessivo: $|\psi_{tot}\rangle = |\psi_{part}\rangle |\psi_{pointer}\rangle = |1\rangle|0\rangle$

FINE: mediante la trasformazione T , lo stato complessivo del sistema si evolve in: $T|\psi_{tot}\rangle = |1\rangle|1\rangle$

Non sembrano esserci problemi fin qui ma... cosa accade quando la particella è nello stato di sovrapposizione $a|0\rangle + b|1\rangle$?

INIZIO: $|\psi_{part}\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ $|\psi_{pointer}\rangle = |0\rangle$

Stato complessivo: $|\psi_{tot}\rangle = (a|0\rangle + b|1\rangle)|0\rangle$

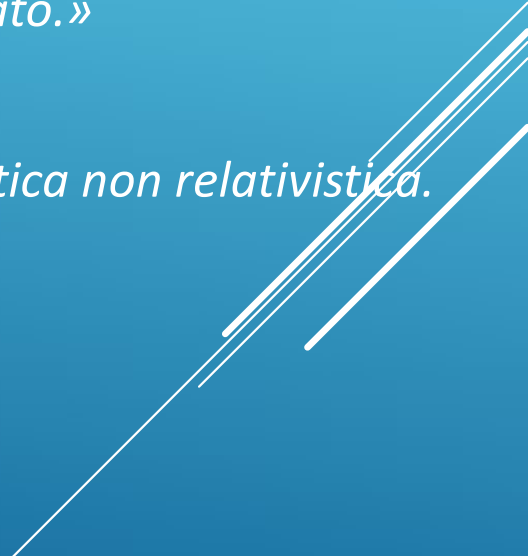
FINE: mediante la trasformazione T , lo stato totale del sistema passa a:
 $T|\psi_{tot}\rangle = T(a|0\rangle + b|1\rangle)|0\rangle = aT|0\rangle|0\rangle + bT|1\rangle|0\rangle = a|0\rangle|0\rangle + b|1\rangle|1\rangle$

Ora il puntatore è anch'esso in uno stato di sovrapposizione.

- La meccanica quantistica introduce una regola aggiuntiva, estranea all'evoluzione alla Schrödinger: la 'regola di Born' secondo la quale come risultato della misura possiamo ottenere uno dei due valori di energia con probabilità definita dal quadrato del coefficiente dello stato esito
- Manifestamente, questa regola è incompatibile con l'evoluzione alla Schrödinger perché introduce una legge di evoluzione stocastica (casuale) mentre l'evoluzione alla Schrödinger, data dall'operatore $U_E(t)$, è deterministica.
- La trasformazione è inoltre irreversibile, e non lineare; anche se enunciamo queste caratteristiche in modo intuitivo, è possibile dimostrarle rigorosamente. Quindi la regola di Born introduce, per l'operazione di misura, una forma di evoluzione del tutto speciale, incompatibile con l'evoluzione temporale di ogni altro sistema quantistico.

«Il processo di misura è quindi, per sua natura, profondamente irreversibile. L'irreversibilità di tale processo introduce nei fenomeni quantistici un'inequivalenza fisica delle due direzioni del tempo, cioè porta a una differenziazione tra futuro e passato.»

--Landau, L. D. e Lifshitz, E. M. (1977) – Teoria quantistica non relativistica.

A series of several parallel white lines of varying lengths and orientations, located in the bottom right corner of the slide, creating a modern, abstract graphic element.

TRATTAZIONE ALLA COPENHAGEN:

Niels Bohr

*“...in ogni caso alcuni strumenti fondamentali di misurazione, come le scale e gli orologi che determinano il sistema di riferimento spazio-temporale – su cui, in ultima istanza, si basano anche le definizioni di quantità di moto ed energia – devono sempre essere descritti **interamente** in forma classica, e conseguentemente tenuti al di fuori del sistema soggetto alla trattazione quantistica”* -- Bohr, N. (1938). The causality problem in atomic physics.

*“...è essenziale rendersi conto che, per quanto i fenomeni possano trascendere le possibilità esplicative della fisica classica, **l'esposizione di ogni esperimento va fatta in termini classici**.”* -- Bohr, N. (1949). Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics.

Werner Heisenberg

*“... in una trattazione matematica del processo, bisogna **tracciare una linea divisoria** tra, da un lato, l'apparato che usiamo per porre la questione, e che possiamo considerare come una parte di noi, e dall'altro il sistema fisico che desideriamo investigare. Il secondo lo rappresentiamo matematicamente come una funzione d'onda. La teoria quantistica ci fornisce un'equazione che determina ogni stato futuro a partire dallo stato presente della funzione ...
La linea divisoria tra il sistema sotto osservazione e l'apparato di misura è immediatamente definita dalla natura del problema ma ovviamente ciò non comporta alcuna discontinuità nel processo fisico. Perciò, entro certi limiti, vi deve essere completa libertà nello scegliere la posizione di questa linea divisoria.”* -- W. Heisenberg, “Questions of principle in modern physics,”

L'interpretazione di Copenhagen postula che

➤ La classicità non va derivata dalla meccanica quantistica, ma andrebbe vista come un elemento indispensabile ed irriducibile di una teoria quantistica completa (un concetto che sta a priori della formulazione della teoria).

Su questo tema possono esservi diverse sfumature in autori seguenti che si rifanno all'interpretazione di Copenhagen; ad esempio Landau:

«In tal modo, la meccanica quantistica occupa una posizione assai particolare nell'ambito delle teorie fisiche: essa contiene la meccanica classica come caso limite e, al tempo stesso, ha bisogno di questo caso limite per la sua stessa fondazione» -- Landau, L. D. e Lifshitz, E. M. (1977) – Teoria quantistica non relativistica.

➤ **Esistono apparati di misura macroscopici che obbediscono alla fisica classica e non vanno descritti in termini quantomeccanici**

Essi sono considerati necessari per rendere i fenomeni quantistici accessibili a noi in termini del mondo "classico" della nostra esperienza.

Questo radicale dualismo tra il sistema S, da descrivere quantisticamente, e l'apparato M, che obbedisce alla fisica classica, implica anche l'esistenza di un confine fondamentale (per quanto mobile in principio) tra S ed A, che separa il micromondo dal macromondo (il "taglio di Heisenberg").

IL GATTO DI SCHRÖDINGER

Si possono anche inventare situazioni piuttosto ridicole. Un gatto è rinchiuso in una camera in acciaio, insieme al seguente dispositivo (che deve essere messo in sicurezza perché il gatto non possa interagirvi direttamente): un contatore Geiger è collegato ad un pezzettino di sostanza radioattiva, così piccolo che vi siano uguali probabilità che nel corso di un'ora di tempo uno degli atomi decada, oppure nessuno; se il decadimento accade, il contatore si attiva e attraverso un relè aziona un martello che frantuma una fiaschetta di acido cianidrico. Se si lascia questo sistema in isolamento per un'ora, si può dire che se nessun atomo è decaduto, allora il gatto è vivo. Ma lo stato dell'intero sistema esprimerebbe questa situazione come una sovrapposizione avendo al suo interno di gatto vivo e morto (scusate l'espressione) in proporzioni uguali.

- Erwin Schrödinger, 1935 «La situazione attuale della meccanica quantistica».

LE POSSIBILI SOLUZIONI

- Il problema centrale che abbiamo formulato è quindi il seguente: l'evoluzione temporale deterministica, reversibile, continua, contenuta nell'equazione di Schrödinger è incompatibile con l'evoluzione stocastica, discontinua, irreversibile che avviene al momento della misura (cosiddetto *collasso della funzione d'onda*).
- Sinteticamente, alcune delle strade tentate:
 - Affermare che il 'collasso' è solo apparente: può essere spiegato (o almeno approssimato) nei termini dell'equazione di Schrödinger, con una diversa interpretazione ontologica (e eventualmente aggiungendo relazioni aggiuntive).
 - Affermare che il 'collasso' è reale, e può essere spiegato nei termini di una qualche proprietà speciale (detta anche in meccanica quantistica *regola di superselezione*) che definisce precisamente perchè la misura è un processo diverso da ogni altro. L'equazione di Schrödinger non deve essere modificata, ma solo non applicata al momento della misura.
 - Affermare che il 'collasso' è reale; può essere spiegato nei termini di una equazione diversa da quella di Schrödinger, che si riconduce ad essa in qualche limite.

L'AMICO DI WIGNER

- Un'altra formulazione ancora del problema è dovuta a Wigner. Supponiamo che io possa conoscere il risultato dell'esperimento solo interrogando al telefono un mio amico, che si trova in una camera chiusa a osservare il puntatore dell'apparato.
- Dal mio punto di vista, io dovrò considerare un sistema complessivo con uno stato del tipo

$$|\psi_{tot}\rangle = |\psi_{part}\rangle |\psi_{pointer}\rangle |\psi_{friend}\rangle$$

il quale, dopo che l'evento quantistico è avvenuto, si troverà in uno stato del tipo

$$|\psi_{tot}\rangle = a|0\rangle|0\rangle|0\rangle + b|1\rangle|1\rangle|1\rangle$$

dove il terzo elemento di ciascun vettore rappresenta lo stato dell'amico

- Dopo che l'amico mi ha comunicato il risultato della misura
=> il sistema, il puntatore e l'amico collasseranno in uno dei due stati, secondo la regola di Born
- Tuttavia, se io chiedo all'amico quando è diventato cosciente del risultato della misura, egli mi risponderà che ne era cosciente subito dopo aver osservato il puntatore, e prima di comunicarmi il risultato
- Secondo Wigner, l'impossibilità che una mente umana si trovi in una sovrapposizione di stati, ma possa al contempo comunicare un risultato, segnala il fatto che la consapevolezza (*consciousness*) deve giocare un ruolo nell'operazione di misura. **Va rimarcato che questa interpretazione ha ormai un valore perlopiù storico.**

IL COLLASSO AVVIENE, LO CAUSA LA CONSAPEVOLEZZA (CONSCIOUSNESS) DELL'OSSERVATORE

L'INTERPRETAZIONE A *MOLTI MONDI*

- Un punto di vista diverso è quello delle cosiddette interpretazioni a molti mondi (Everett-De Witt).
- De Witt partì da una critica molto forte dell'interpretazione di Copenhagen (e dell'*interpretazione standard* di Dirac-Von Neumann, che per lui era coincidente con la prima). Questa critica era basata su tre punti cardine:
 - Non c'è bisogno di postulare l'esistenza di un mondo classico
 - Non c'è alcun collasso
 - Non c'è bisogno di alcuna aggiunta al formalismo della meccanica quantistica.
- Secondo De Witt, i differenti stati del puntatore espressi da sovrapposizioni del tipo
$$|\psi_{tot}\rangle = a|0\rangle|0\rangle_{pointer} + b|1\rangle|1\rangle_{pointer}$$
si realizzano *tutti*, dando origine a differenti universi.
- Sebbene molto popolare (specialmente nei media, ma anche in certa misura fra gli scienziati) l'interpretazione ha diversi problemi. Ad esempio:
 - non risolve il problema che all'operazione di misura viene assegnato uno status speciale e non giustificato (perché nuovi universi vengono creati *solo* quando avviene una misura?);
 - i tentativi di rendere oggettivo il criterio per la formazione dei nuovi universi si scontra con difficoltà tecniche (i nuovi universi dovrebbero essere creati secondo lo sviluppo dello stato su quale base?)

IL COLLASSO NON AVVIENE, L'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER È SEMPRE VALIDA, MA DESCRIVE UN INSIEME DI UNIVERSI

IL COLLASSO OBIETTIVO

- Alcuni autori hanno tentato di rispondere al problema della misura attraverso una modifica dell'equazione di Schrödinger.
- L'esempio più famoso è quello della teoria detta GRW (Ghirardi-Rimini-Weber). In questa teoria viene introdotta una nuova costante di natura η che rappresenta una probabilità molto piccola, ma costante nel tempo, per cui una particella quantistica che si trova in uno stato spaziale esteso nello spazio «collassi» in uno stato spaziale più piccolo (la cui dimensione è precisata da una seconda nuova costante di natura, che ha le dimensioni di una lunghezza).
- Il valore di η è tale che, per una singola particella, il collasso avviene circa ogni 10^8 - 10^9 anni, e quindi i suoi effetti sono di fatto inosservabili. Tuttavia, la probabilità deve essere calcolata per ogni particella e quindi, nel caso di stati come quelli sistema-puntatore, che coinvolgono circa 10^{23} particelle, in una sovrapposizione di stati macroscopicamente separati, il collasso è praticamente certo.
- Sono state create diverse teorie di questo tipo, con caratteristiche in parte diverse. Le critiche e i problemi più frequenti sono:
 - L'introduzione di una nuova costante di natura appare *ad hoc*, non sufficientemente motivata, e il suo valore scelto appositamente per renderne le conseguenze inosservabili.
 - Sembrano esserci grandi difficoltà ad elaborare una versione relativistica della teoria.

IL COLLASSO AVVIENE, L'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER DEVE ESSERE MODIFICATA

LA TEORIA DI BOHM

- Le teorie a «onda pilota» hanno in un certo senso una struttura simile a quelle del collasso obiettivo, nel senso che un ruolo privilegiato viene assegnato all'osservabile *posizione*.
- Una giustificazione spesso riportata per questo ruolo privilegiato è che tutte le misure che facciamo, di qualsiasi grandezza, si riducono infine alla misura di una posizione, fosse anche la posizione di un puntatore.
- Nella teoria di Bohm (sviluppata poi da molti autori) *esistono le particelle, e esse hanno sempre una posizione definita*. Tuttavia la loro evoluzione è guidata (pilotata) dall'evoluzione di un'onda (in certo modo) fisica, che è quella che rappresenta lo stato nella meccanica quantistica ordinaria.
- Quindi lo stato di una particella, nella teoria di Bohm, è rappresentato dalla coppia (ψ, X) , dove X è la posizione della particella. Si aggiunge una equazione, che rappresenta il legame tra X e ψ .
- E' possibile provare che se la distribuzione delle posizioni delle particelle per sistemi identici è stata $|\psi|^2$ in un qualunque istante passato del tempo, allora lo rimarrà per sempre (*equivarianza*). Questo giustifica la regola di Born (*ipotesi dell'equilibrio quantistico*).
- Al momento della misura, le posizioni delle particelle coinvolte nella misura scelgono *una* delle possibili alternative (la stessa per via delle reciproche interazioni). Il collasso non avviene, la parte di stato rimanente (*onda vuota*) diventa solo irrilevante e può essere ignorata.
- Vi sono problemi di plausibilità (immaginare un'onda «reale» che si propaga non nello spazio reale, ma in quello delle configurazioni), problemi tecnici (estensione relativistica, e alcuni altri)
- Nella comunità scientifica attuale, la teoria di Bohm è estremamente minoritaria.

IL COLLASSO NON AVVIENE, L'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER DEVE ESSERE INTEGRATA

LA DECOERENZA

- L'espressione $|\psi_{tot}\rangle = 1/\sqrt{2} (|0\rangle + |1\rangle)$ è molto diversa dall'affermazione che lo stato del sistema è «con il 50% di probabilità $|0\rangle$ oppure $|1\rangle$ » perché l'espressione scritta come $|\psi_{tot}\rangle$ rappresenta una sovrapposizione *coerente*. Questo significa che le due componenti $|0\rangle$ e $|1\rangle$ hanno una relazione di fase ben definita (che, se non consideriamo i numeri complessi, si riduce al segno dei loro rispettivi coefficienti).
- Ad esempio, se volessi misurare l'osservabile «spin lungo l'asse x», otterrei nello stato $|\psi_{tot}\rangle$ sempre un unico valore, perché in effetti $|\psi_{tot}\rangle$ non è che una riscrittura (cambio di base) dello stato $|+\rangle$. Ma se invece misurassi questa osservabile su una *miscela* di sistemi costituita dal 50% di stati $|0\rangle$ e 50% di stati $|1\rangle$, otterrei il 50% delle volte $|+\rangle$ e il 50% delle volte $|-\rangle$.
- Ora, quello che è considerato problematico in una scrittura come quella che nasce dal problema della misura, ossia $|\psi_{tot}\rangle = a|0\rangle|0\rangle_{pointer} + b|1\rangle|1\rangle_{pointer}$ è proprio che la sovrapposizione è coerente. Se si potesse dimostrare che lo stato $|\psi_{tot}\rangle$ in qualche modo, durante la misura, si trasforma in uno stato $|\psi_{tot}\rangle = \text{miscela}$ di $|0\rangle|0\rangle_{pointer}$ (con probabilità a^2) e $|1\rangle|1\rangle_{pointer}$ (con probabilità b^2) il problema, per la maggioranza dei fisici, sarebbe risolto.

LA DECOERENZA

- Nel 1982 Zurek, utilizzando proprio un sistema simile a quello da noi mostrato, in particolare un elettrone con due possibili stati di spin (che rappresenta il sistema da misurare) e un atomo con due livelli atomici (che schematizza il rivelatore) in grado di accoppiarsi ai due stati di spin, dimostrò che distruggere la coerenza tra i due stati $|0\rangle|0\rangle_{pointer}$ e $|1\rangle|1\rangle_{pointer}$ che coesistono nello stato $|\psi_{tot}\rangle$ è proprio l'effetto che ha approssimativamente l'interazione del sistema elettrone + atomo con l'ambiente (formato, ad esempio, da moltissimi fotoni che continuamente interagiscono debolmente con entrambi).
- In gergo, l'effetto viene chiamato *diagonalizzare la matrice densità*, dove la matrice densità rappresenta in effetti i coefficienti dei termini che compaiono se lo stato viene moltiplicato (*prodotto esterno*) per se stesso. Nella matrice densità di una miscela, non compaiono termini misti perché le diverse componenti di una miscela non fanno parte dello *stesso* stato.
- ESEMPIO:

$$|\psi_{tot}\rangle = a|0\rangle|0\rangle_{pointer} + b|1\rangle|1\rangle_{pointer}$$

$$|\psi_{tot}\rangle = \text{miscela di } |0\rangle|0\rangle_{pointer} \text{ (probabilità } a^2) \text{ e } |1\rangle|1\rangle_{pointer} \text{ (probabilità } b^2)$$

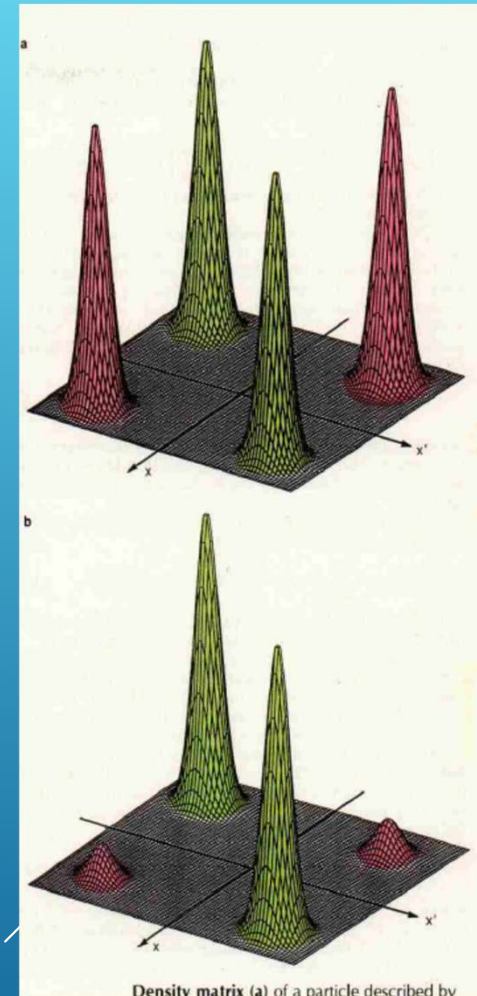
$$\text{Matrice densità: } \begin{pmatrix} a^2 & ab \\ ab & b^2 \end{pmatrix}$$

$$\text{Matrice densità: } \begin{pmatrix} a^2 & 0 \\ 0 & b^2 \end{pmatrix}$$

LA DECOERENZA

- Quindi l'interazione con l'ambiente ha l'effetto di rendere la matrice densità del sistema+apparato approssimativamente diagonale.
- Un buon numero di fisici ritengono che il problema in questo modo sia risolto, o che comunque la soluzione possa essere completata approfondendo alcuni dettagli tecnici lungo questa direzione di ricerca.
- Vi sono critiche sul fatto che quella che viene in realtà utilizzata nelle analisi del tipo di quella di Zurek è in realtà la matrice densità *ridotta* del sistema+apparato, e quand'anche questa fosse perfettamente diagonale, essa non rappresenterebbe una miscela.
- Altri sono soddisfatti dalla diagonalizzazione della matrice densità ridotta, ma non del fatto che questa sia operata solo approssimativamente da meccanismi di decoerenza. Questo risuona anche con l'obiezione di John Bell, secondo il quale la decoerenza non spiega come una coesistenza di diverse realtà si trasformi in una scelta tra realtà alternative.

**IL COLLASSO NON AVVIENE (ma può essere approssimato in modo arbitrariamente fedele),
L'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER È CORRETTA.**



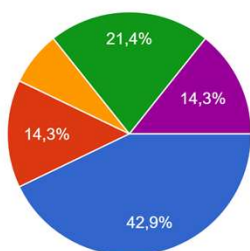
Significato culturale del dibattito fondazionale

- Come abbiamo già visto, alcune interpretazioni storicamente tentate del problema della misura possono essere portate a sostegno di idee pseudo-scientifiche del tipo 'mind over matter'. Talvolta, anche le interpretazioni a molti mondi possono essere distorte, fino ad argomentare che la 'mente' ha il potere di scegliere la propria realtà. In questo senso, può essere importante storicizzare alcune posizioni, o comunque precisarne i confini, e far presente l'avanzamento del dibattito.
- Baily e Finkelstein, tra gli altri, sostengono l'importanza di discutere le posizioni interpretative con gli studenti. Ad esempio, sostengono che se la questione interpretativa è lasciata implicita, gli studenti potrebbero adottare interpretazioni personali, completamente sconnesse dal dibattito scientifico; oppure inconsistenti e dipendenti dal contesto.
- Discutere in classe presenza di un dibattito aperto nella comunità scientifica può ridurre la percezione della fisica come un corpo monolitico, e legittimare gli studenti ad esprimere i loro punti di vista, rendendo di fatto l'insegnamento maggiormente inclusivo. Va notato che, spesso, sono alcuni tra gli studenti migliori a provare disagio per gli aspetti interpretativi della teoria quantistica.

Dati dalle summer school del dipartimento di fisica

2. La fisica quantistica spiega come la nostra coscienza è connessa con l'universo.

14 risposte

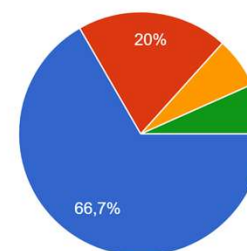


- 1. Per niente d'accordo
- 2. Poco d'accordo
- 3. Abbastanza d'accordo
- 4. Molto d'accordo
- 5. Completamente d'accordo

2022

2. La fisica quantistica spiega come la nostra coscienza è connessa con l'universo.

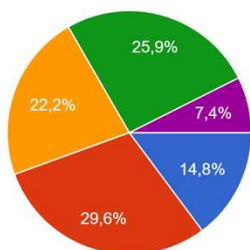
15 risposte



- 1. Per niente d'accordo
- 2. Poco d'accordo
- 3. Abbastanza d'accordo
- 4. Molto d'accordo
- 5. Completamente d'accordo

2. La fisica quantistica spiega come la nostra coscienza è connessa con l'universo.

27 risposte

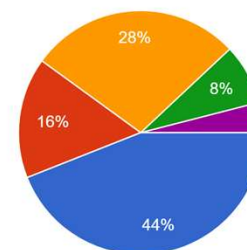


- 1. Per niente d'accordo
- 2. Poco d'accordo
- 3. Abbastanza d'accordo
- 4. Molto d'accordo
- 5. Completamente d'accordo

2023

2. La fisica quantistica spiega come la nostra coscienza è connessa con l'universo.

25 risposte



- 1. Per niente d'accordo
- 2. Poco d'accordo
- 3. Abbastanza d'accordo
- 4. Molto d'accordo
- 5. Completamente d'accordo

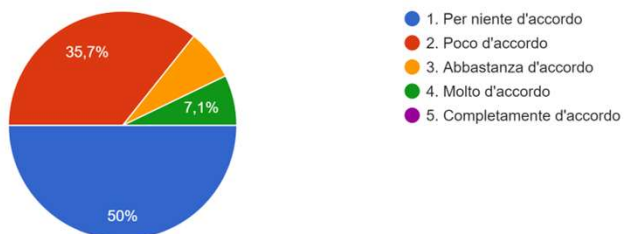
Dati pre-istruzione

Dati post-istruzione

Dati dalle summer school del dipartimento di fisica

5. La fisica quantistica afferma che può essere possibile cambiare la struttura delle cose con il solo pensiero.

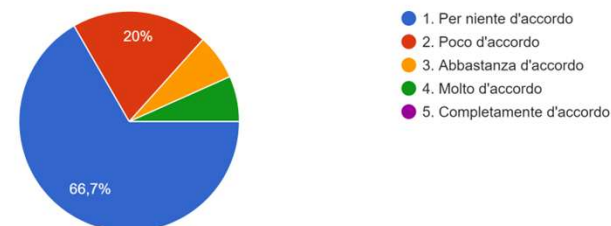
14 risposte



2022

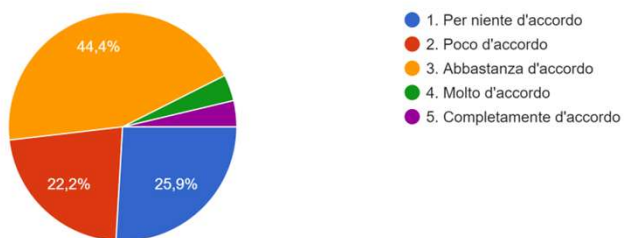
5. La fisica quantistica afferma che può essere possibile cambiare la struttura delle cose con il solo pensiero.

15 risposte



5. La fisica quantistica afferma che può essere possibile cambiare la struttura delle cose con il solo pensiero.

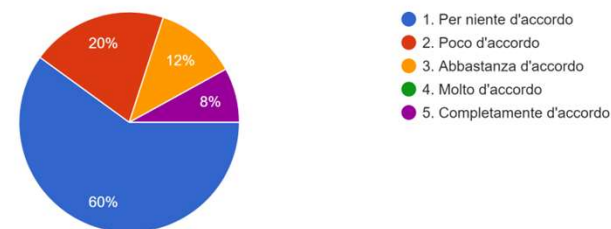
27 risposte



2023

5. La fisica quantistica afferma che può essere possibile cambiare la struttura delle cose con il solo pensiero.

25 risposte



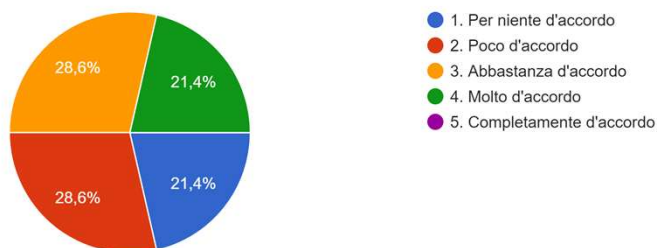
Dati pre-istruzione

Dati post-istruzione

Dati dalle summer school del dipartimento di fisica

7. La fisica quantistica di fatto afferma che non è possibile avere alcuna certezza scientificamente fondata, su nessun argomento.

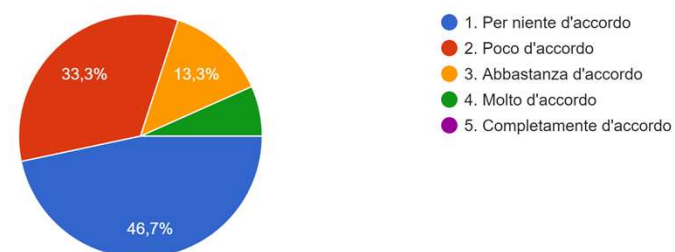
14 risposte



2022

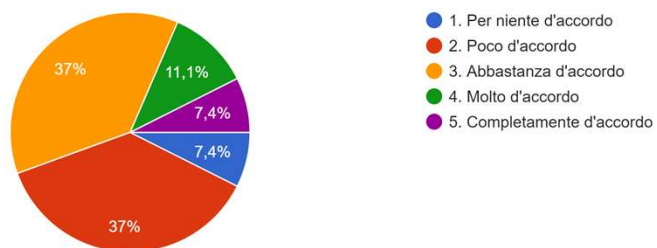
7. La fisica quantistica di fatto afferma che non è possibile avere alcuna certezza scientificamente fondata, su nessun argomento.

15 risposte



7. La fisica quantistica di fatto afferma che non è possibile avere alcuna certezza scientificamente fondata, su nessun argomento.

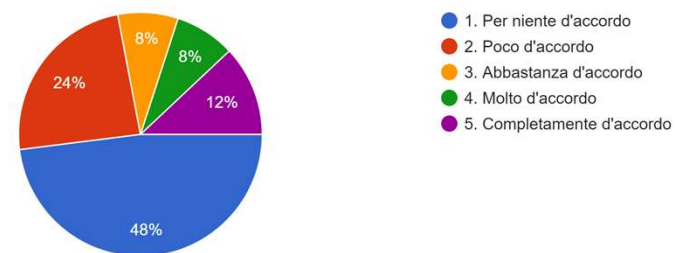
27 risposte



2023

7. La fisica quantistica di fatto afferma che non è possibile avere alcuna certezza scientificamente fondata, su nessun argomento.

25 risposte



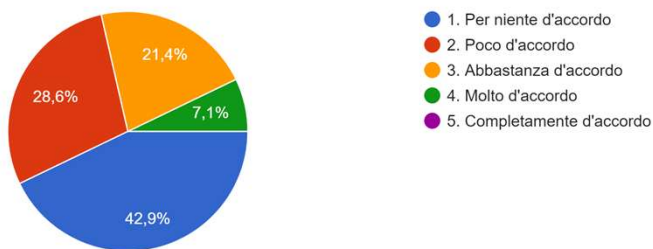
Dati pre-istruzione

Dati post-istruzione

Dati dalle summer school del dipartimento di fisica

9. La fisica quantistica, con il dualismo onda particella, prevede che ogni organo del corpo umano abbia una sua frequenza naturale, che se eccitata può portare a guarire malattie gravi.

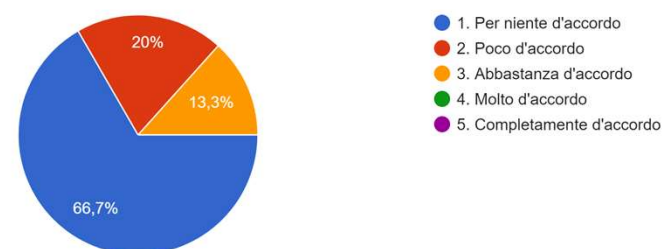
14 risposte



2022

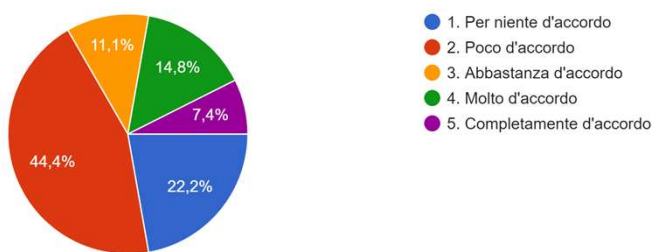
9. La fisica quantistica, con il dualismo onda particella, prevede che ogni organo del corpo umano abbia una sua frequenza naturale, che se eccitata può portare a guarire malattie gravi.

15 risposte



9. La fisica quantistica, con il dualismo onda particella, prevede che ogni organo del corpo umano abbia una sua frequenza naturale, che se eccitata può portare a guarire malattie gravi.

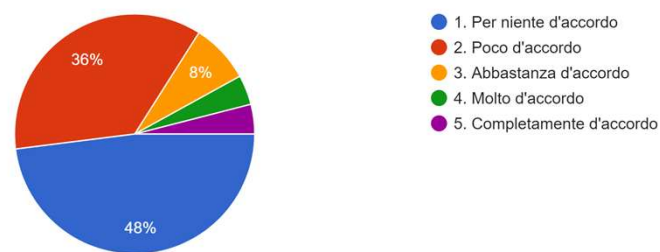
27 risposte



2023

9. La fisica quantistica, con il dualismo onda particella, prevede che ogni organo del corpo umano abbia una sua frequenza naturale, che se eccitata può portare a guarire malattie gravi.

25 risposte



Dati pre-istruzione

Dati post-istruzione

Conclusioni

- Gli studenti sono esposti a ogni tipo di suggestioni che possono portare anche studenti con una base di conoscenze di fisica molto solida ad accogliere idee pseudo-scientifiche riguardo la meccanica quantistica.
- Da una parte, una trattazione storica accurata può contribuire a dissipare l'alone 'esoterico' che può circondare la meccanica quantistica mostrando che, come altra sottodisciplina scientifica, essa è stata costruita mediante un percorso complesso, fatto di tentativi ed errori.
- Dall'altra, diventa importante discutere i confini precisi di alcune caratteristiche peculiari della teoria quantistica al fine di evitare iper-generalizzazioni o anche interpretazioni fantasiose, basate solo su un'assonanza linguistica con i termini scientifici, che possono aprire le porte a concezioni pseudo-scientifiche. Per lo stesso motivo può essere importante affrontare almeno nelle sue linee generali l'articolato dibattito scientifico sui fondamenti della meccanica quantistica e sul problema della misura.