La realtà quantistica

Danilo Babusci

danilo.babusci@lnf.infn.it

Matinées della Scienza – 23 Marzo 2018

non c'è da preoccuparsi ...

(… siamo in buona compagnia)

Penso di poter tranquillamente affermare che nessuno comprende la meccanica quantistica

R. P. Feynman

Però la meccanica quantistica è la teoria fisica di maggior successo mai sviluppata dall'umanità …

Esempio: momento magnetico anomalo del muone

$$\text{Esp.} \qquad a_\mu = 1.16592080(63) \times 10^{-3}$$
$$\text{Teo.} \qquad a_\mu = 1.16591786(66) \times 10^{-3}$$

$$|\delta a_\mu| = (294 \pm 89) \times 10^{-11} \quad !!$$

… e alla base della nostra comprensione della materia (dai quarks agli elementi chimici); dell'evoluzione stellare, delle reazioni chimiche, del laser, del transistor, dei superconduttori …

L'esperimento delle due fenditure

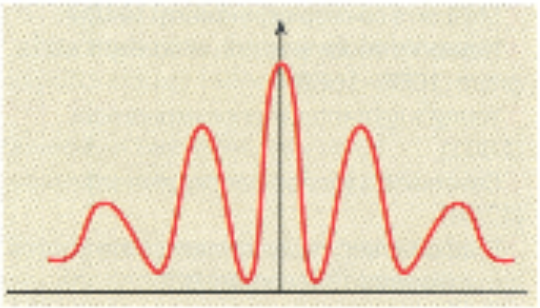
COMMENT: CRITICAL POINT

The most beautiful experiment

The most beautiful experiment in physics, according to a poll of *Physics World* readers, is the interference of single electrons in a Young's double slit. **Robert P Crease** reports

When I asked readers earlier this year to submit candidates for the "most beautiful experiment in physics" (*Physics World* May p17), I was pleased to receive more than 200 replies. The responses covered a broad spectrum, ranging from actual experiments to thought experiments, and from proposed experiments to proofs, theorems and models. However, one experiment – the double-slit experiment with electrons – was cited more often than any other, receiving a total of 20 votes.

Others in the top 10 included Galileo's experiments with falling bodies, Millikan's

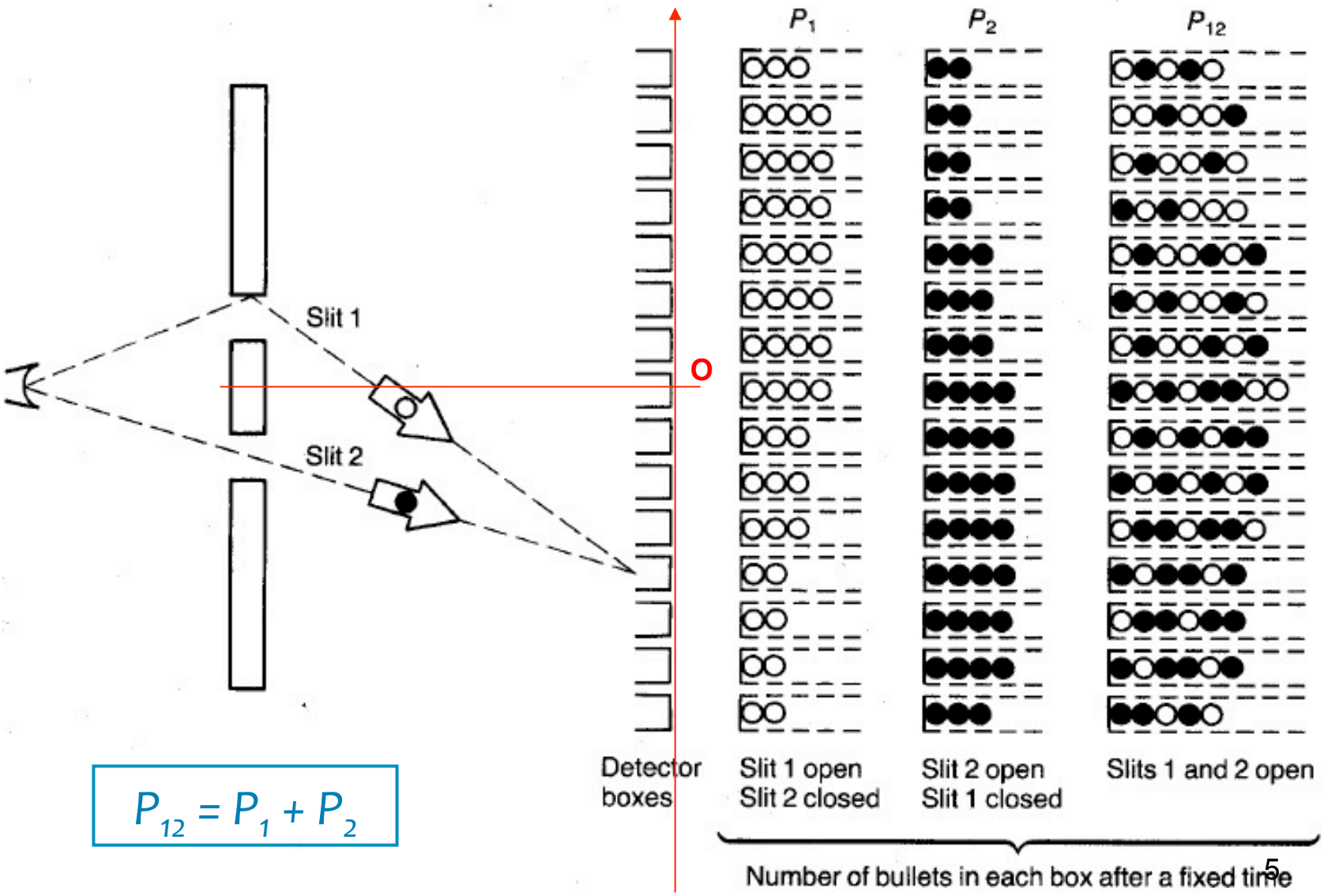


Simply beautiful – the spatial intensity distribution of electrons that have interfered in a Young's double-slit experiment.

out. Economy might refer to either the nature from a detached distance. Readers found beauty in small-scale play with simple things like balls, waves, sounds and coins – allowing order in apparently random and contradictory events to show itself. Other readers found beauty in much larger play – such as Roemer's observations of Jupiter's moon Io to determine the speed of light or Eddington's measurement of the bending of starlight. These astronomical observations turn the entire solar system – and even the galaxy and beyond – into a vast playing field for experiment.

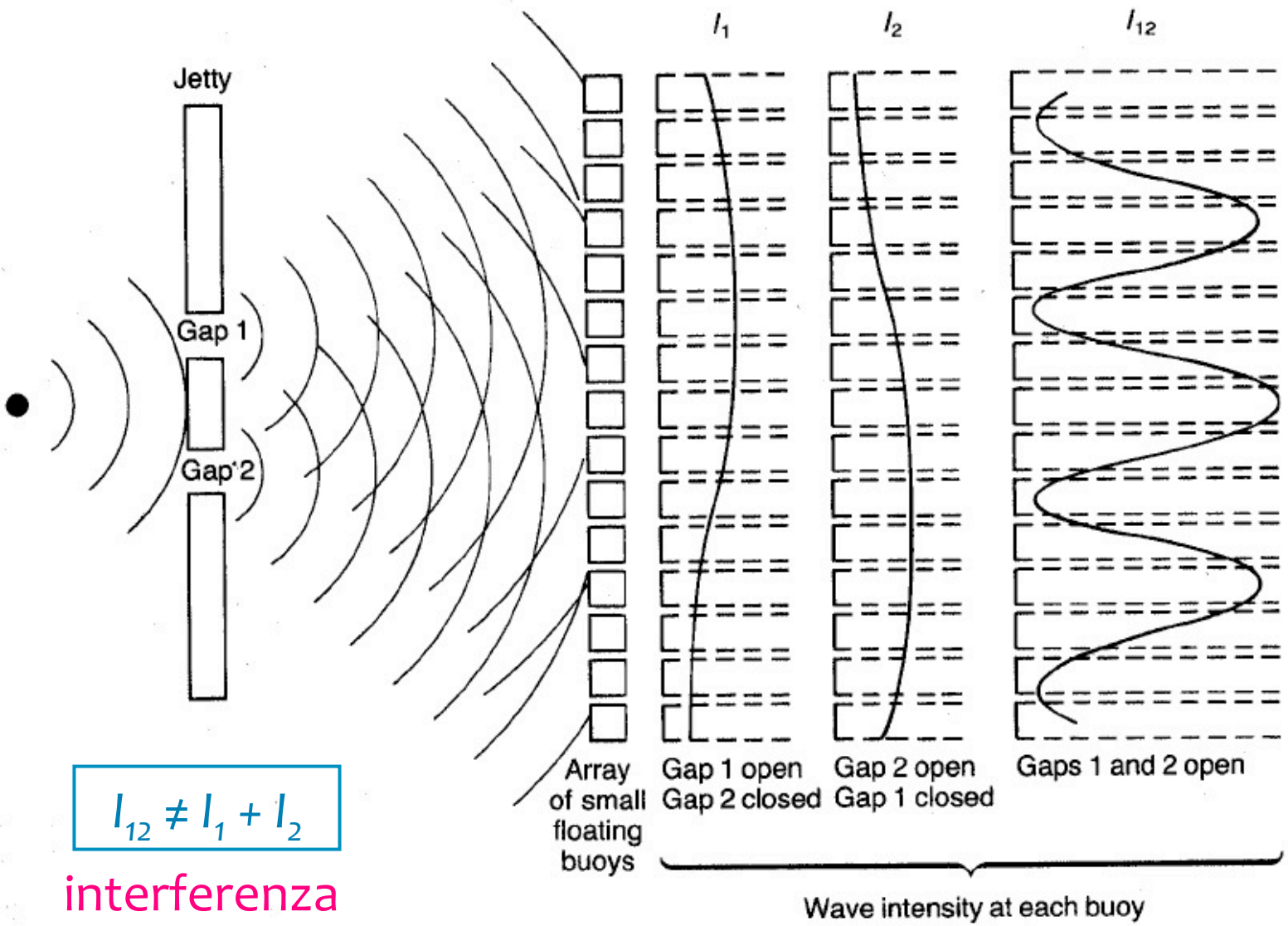
Thomas Young (1802) dimostra definitivamente la natura ondulatoria della luce

2 fenditure: proiettili



$$P_{12} = P_1 + P_2$$

2 fenditure: onde d'acqua

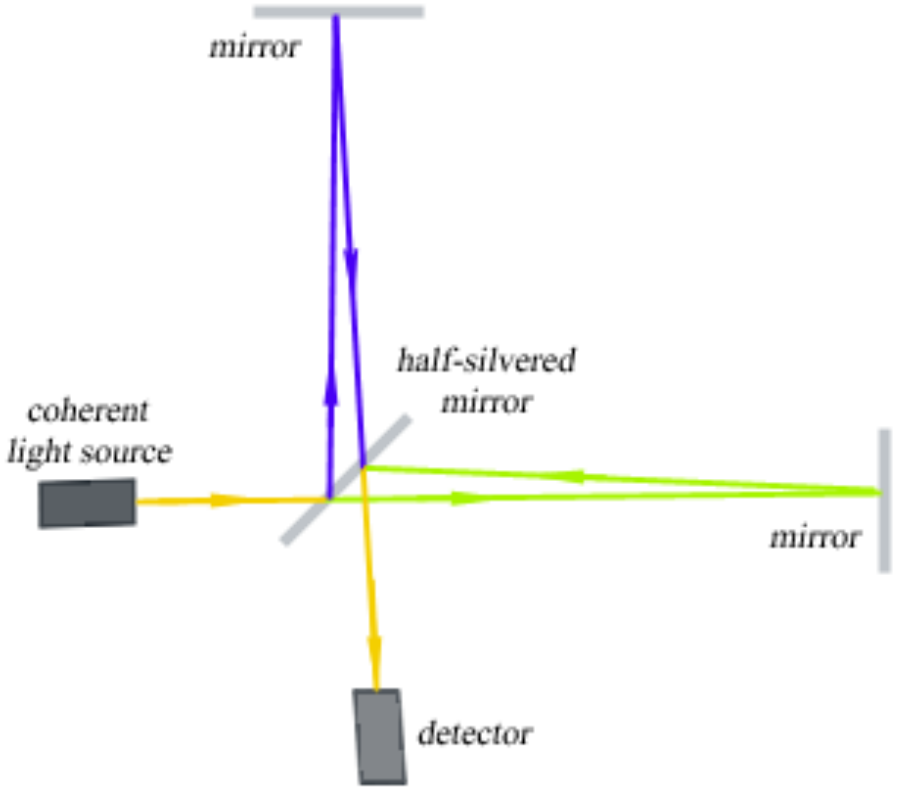


$I_{12} \neq I_1 + I_2$

interferenza

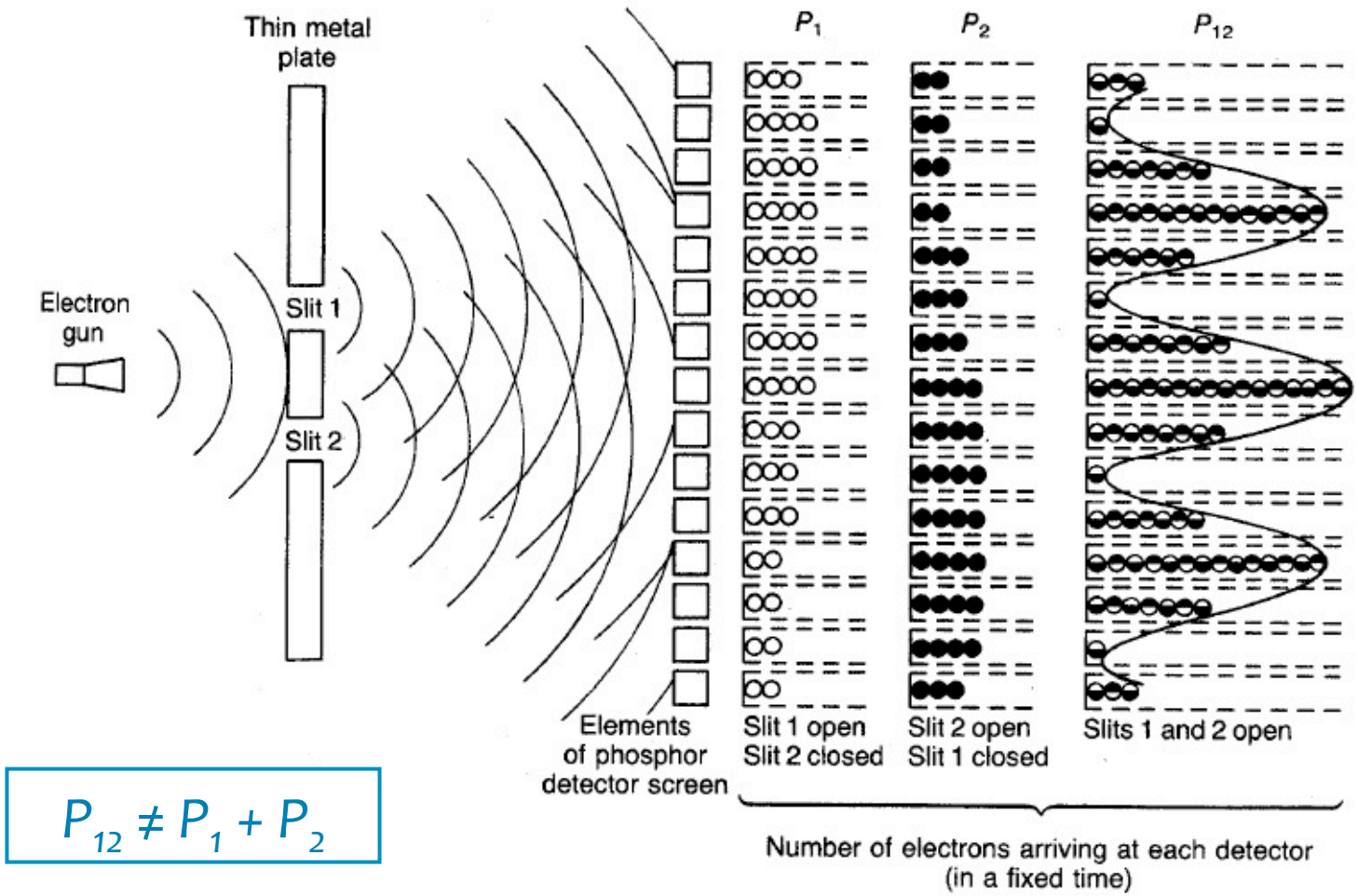
2 fenditure: luce

… anche la luce si comporta come un'onda



interferometro di Michelson

2 fenditure: elettroni



$P_{12} \neq P_1 + P_2$

… anche per gli elettroni si ha interferenza (!?)

2 fenditure: elettroni

come spiegare questo risultato?

1) teoria "della divisione": elettroni si dividono a metà e ciascuna di queste attraversa un foro diverso (come è nel caso delle onde)

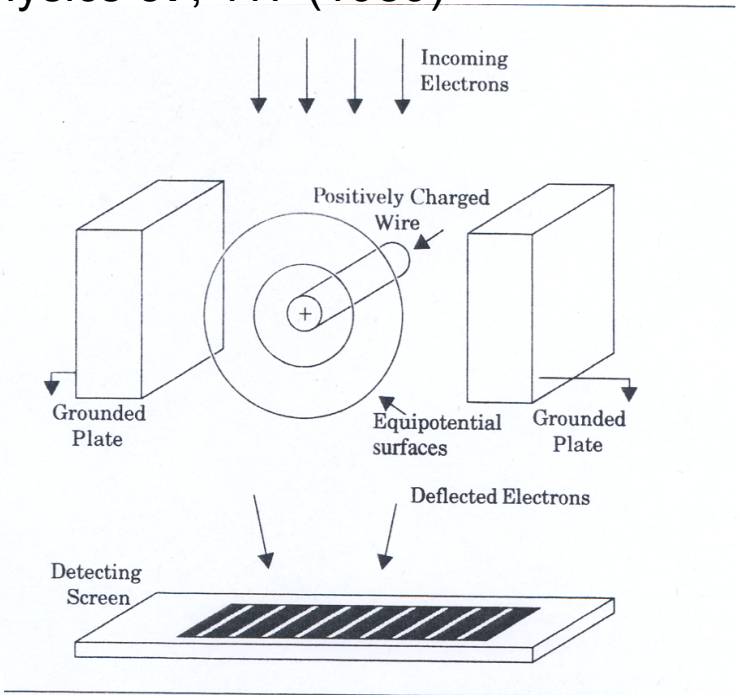
NO: gli elettroni arrivano interi sullo schermo (lo si vede inviando un elettrone alla volta)

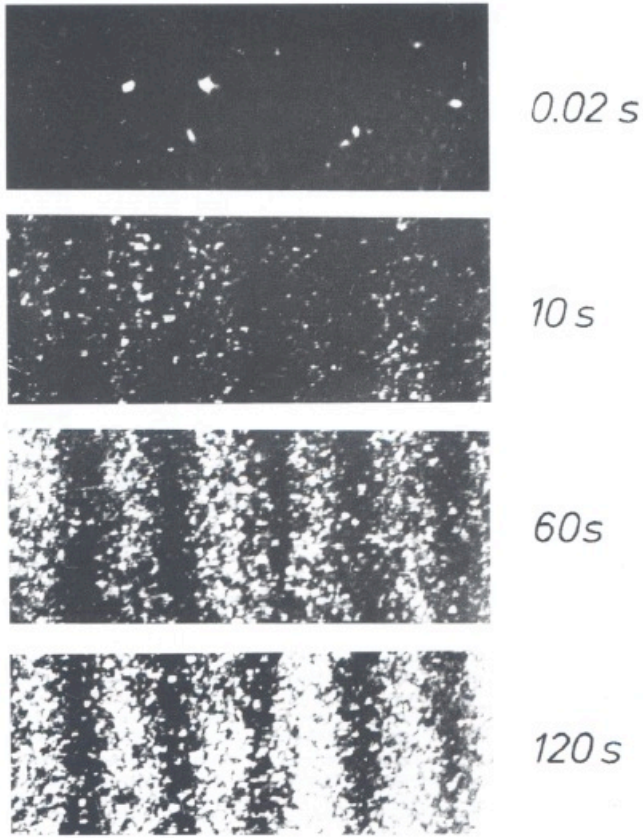
2) teoria "dell'ingorgo": moltissimi elettroni in gioco → elettroni che attraversano una fenditura collidono con quelli che attraversano l'altra

NO: la figura d'interferenza permane anche con un solo elettrone nell'apparato

2 fenditure: elettroni

A. Tonomura et al. American Journal of Physics **57**, 117 (1989)





… ogni elettrone parte dal cannone e arriva al rivelatore come particella, ma percorre lo spazio tra questi come un'onda, attraversando quindi entrambe le fenditure!

2 fenditure: neutroni

Zeilinger et al., *Rev. Mod. Phys.* **60**, 1067 (1988)

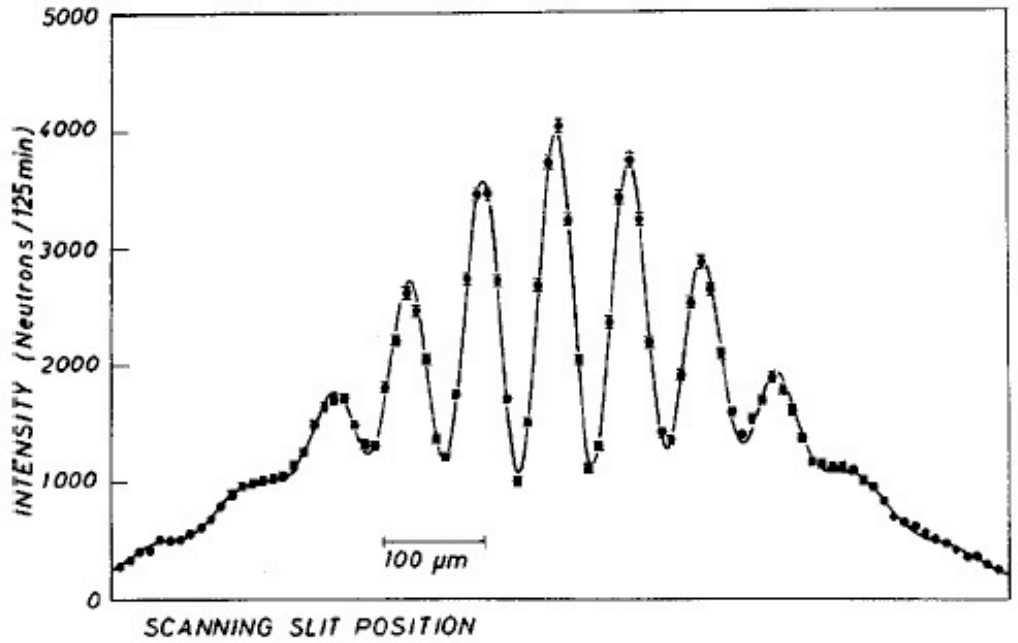


FIG. 1. A double-slit diffraction pattern measured with very cold neutrons with a wavelength of 2 nm corresponding to a velocity of 200 ms^{-1}. The two slits were 22 μm and 23 μm wide, respectively, separated by a distance of 104 μm. The resulting diffraction angles were only of the order of 10 μrad, hence the observation plane was located 5 m downstream from the double slit in order to resolve the interference pattern.

2 fenditure: atomi

(elio metastabile)

O. Carnal and J. Mlynek, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2689 (1991)

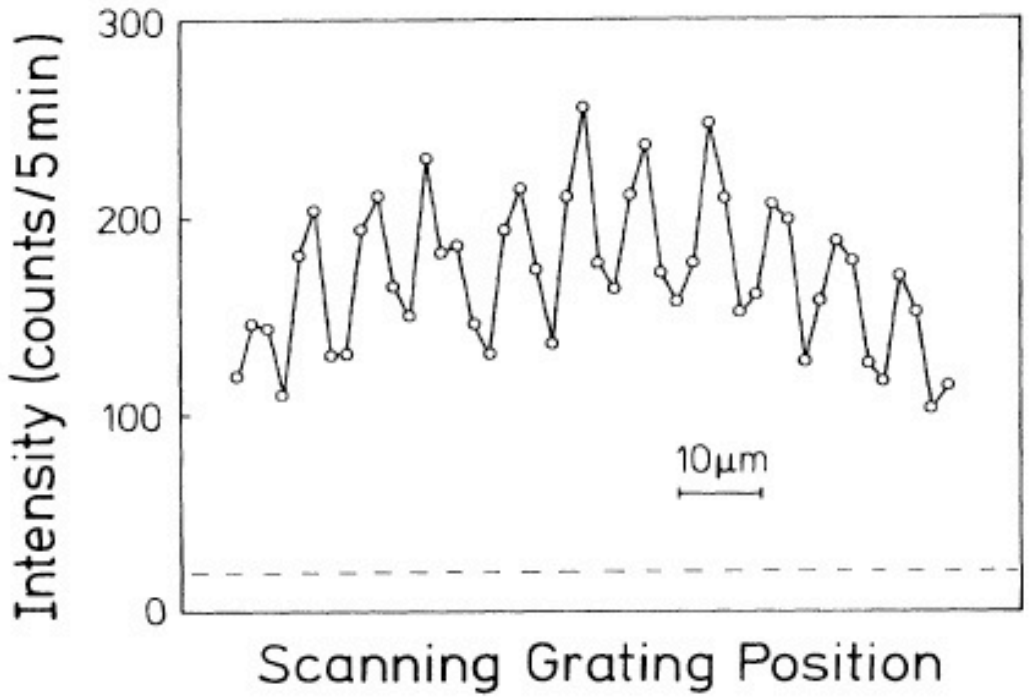


FIG. 5. Atomic density profile, monitored with the 8-μm grating in the detector plane, as a function of the lateral grating displacement. The dashed line is the detector background. The line connecting the experimental points is a guide to the eye.

2 fenditure: fullerene

L. Hackermüller et al., *Nature* **427**, 711 (2004)

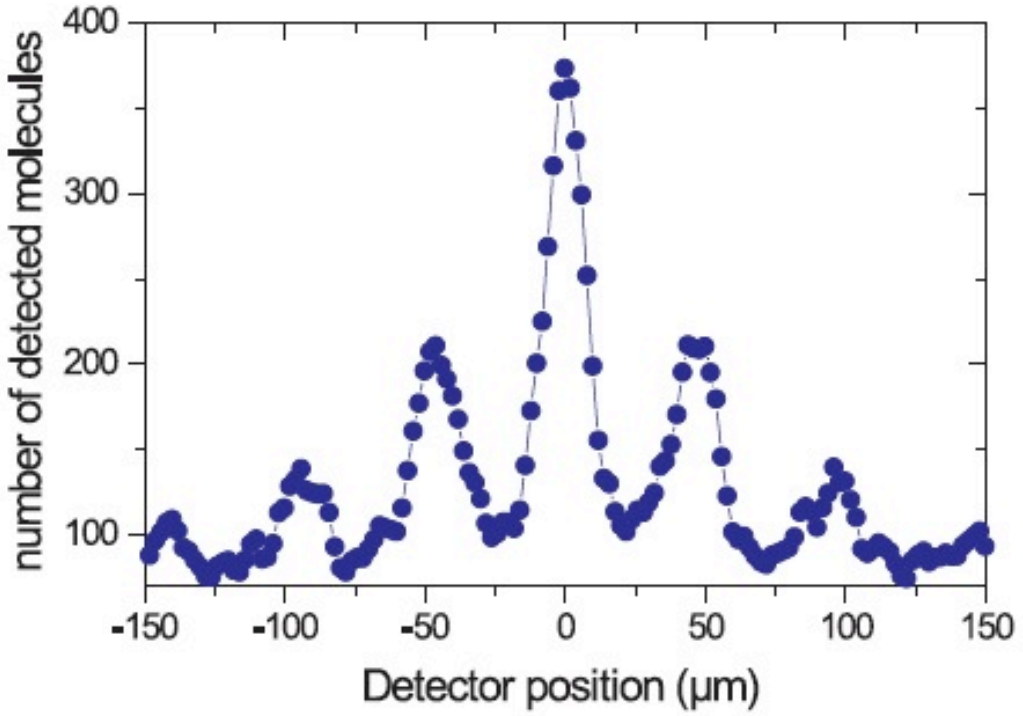
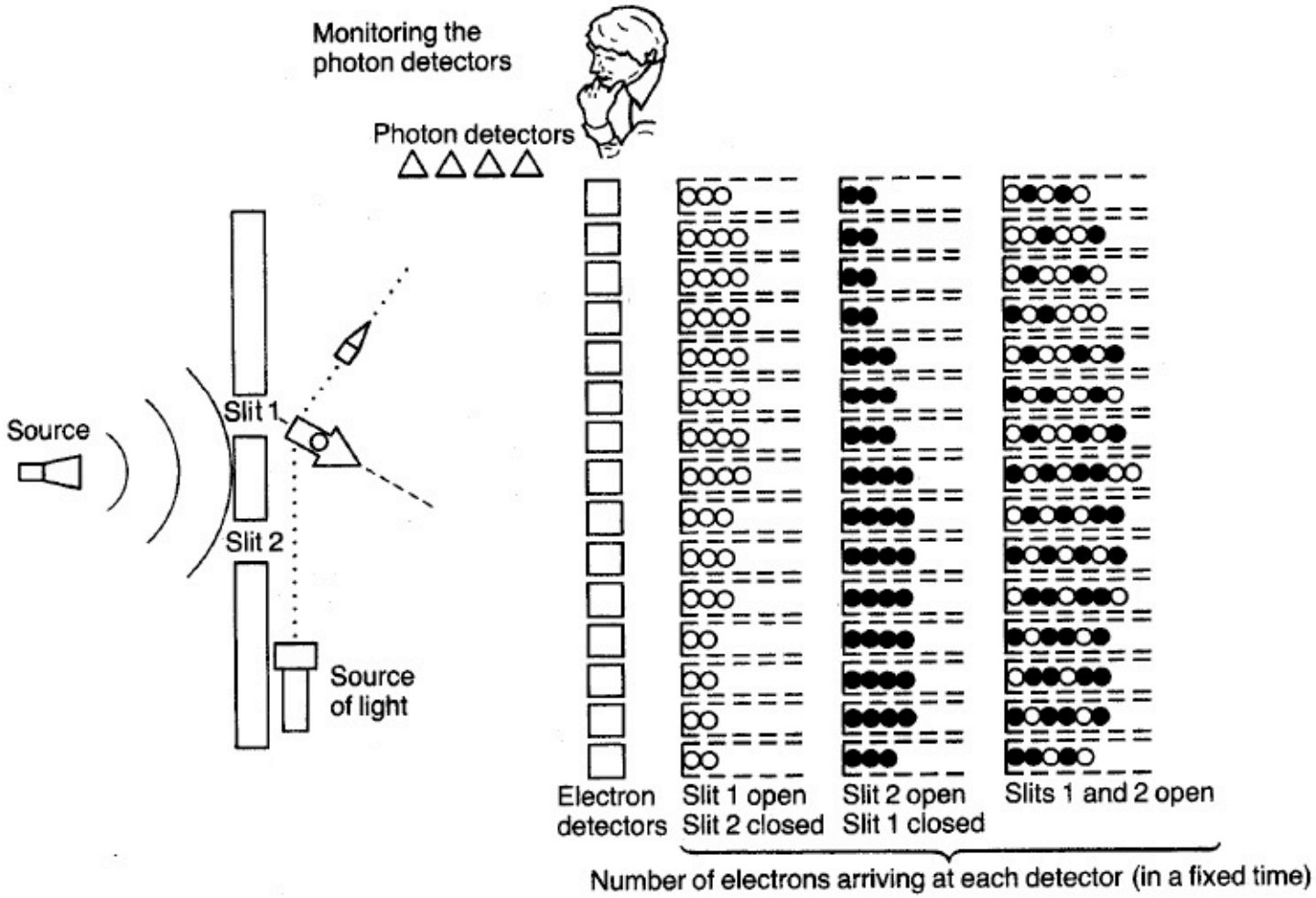


FIG. 2. Interference pattern of C-60 molecules behind a 100 nm grating, which proves the absence of thermal decoherence in the experiment [6], even for molecules with internal temperatures as high as 900 K (M. Arndt, O. Nairz, and A. Zeilinger, in preparation).

Osservando gli elettroni



Osservando gli elettroni

- Non si vedono mai 2 lampi (di intensità dimezzata) simultaneamente: il lampo proviene sempre o dalle vicinanze del foro 1 o di quello 2, mai da tutti e due insieme → elettroni passano per un solo foro

- Distribuzioni P'_1 e P'_2 della posizione d'arrivo sullo schermo di questi 2 gruppi di elettroni sono simili a quelle P_1 e P_2 ottenute con una sola fenditura aperta

… insomma, nulla di paradossale come passare attraverso entrambe le fenditure: quando li osserviamo, gli elettroni si comportano come i proiettili: $P'_{12} = P'_1 + P'_2$

Osservando gli elettroni

e se spegniamo la luce? otteniamo P_{12}, ovvero riappare la figura d'interferenza e, quindi, il problema è nella pretesa di capire quale cammino segue l'elettrone

Interpretare un comportamento di questo tipo richiede una nuova base concettuale per tutta la fisica

dualità onda-corpuscolo: i sistemi quantistici quando vengono rivelati, si comportano come particelle; quando si propagano indisturbati, come onde

Onde di materia

Elettroni come onde: de Broglie (1924)* → ogni particella si propaga "a cavallo" di un'onda "pilota" con

* 3 anni prima dell'osservazione sperimentale di Davisson & Germer e G. P. Thomson

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

→ costante di Planck

→ impulso particella (mv)

rappresentazione matematica della schizofrenia degli elettroni: connette una caratteristica ondulatoria (λ) a una particellare (p); non dice nulla sul '*meccanismo*': com'è possibile che uno stesso oggetto sia in un istante un'onda e in quello successivo una particella ?

Onde di materia

… ma se tutte le particelle sono onde, allora lo sono anch'io, i.e. 84 kg che si muovono a 5 km/h

costante di Planck: $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s

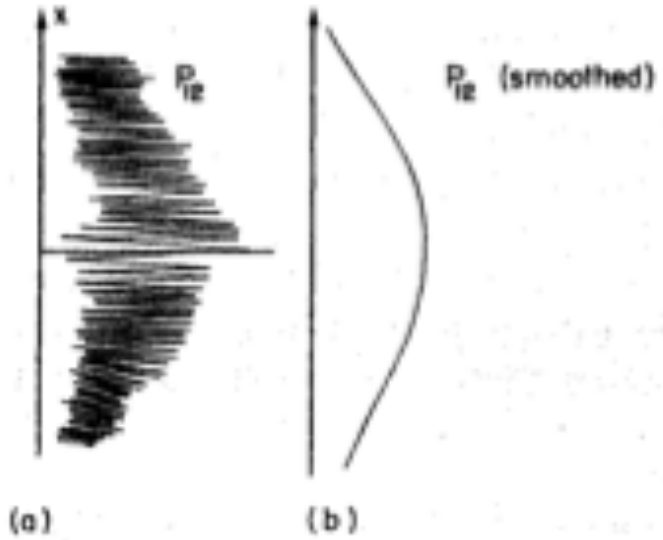
$$\lambda = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{84 \times (5 \times 10^3/3600)} \simeq 5.7 \times 10^{-36}\ \mathrm{m}$$

poiché h è piccolissima e $\lambda \propto m^{-1}$ è evidente che tutte le "particelle" del mondo "classico" risultano associate a onde con λ estremamente piccola, << della scala di distanze caratteristica dei processi che li coinvolgono

Onde di materia

Ad esempio, nell'esperimento delle 2 fenditure con i proiettili:
m = 20 g, v = 1000 km/h $\rightarrow$ $\lambda \sim 10^{-34}$ m

$d >> \lambda$ frange d'interferenza sono molto sottili e fitte $\rightarrow$ sorta di media che corrisponde alla figura "classica"



Onde di materia

Invece, per l'elettrone dell'atomo d'idrogeno

$$m_e \simeq 9.1 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg} \qquad v \simeq 3 \times 10^{3}\ \mathrm{km/s}$$

$$\rightarrow \quad \boxed{\lambda \simeq 2.4 \times 10^{-10}\ \mathrm{m}}$$

confrontabile con le dimensioni dell'atomo, per cui, se l'ipotesi di de Broglie è vera, nella descrizione dell'atomo si dovrà tener conto della natura ondulatoria dell'elettrone

$\rightarrow$ modello atomico di Bohr:
quantizzazione dei livelli energetici

Atomo di Bohr

Carica elettrica accelerata emette radiazione e.m. → modello 'planetario' di Rutherford è instabile: in un tempo $\sim 10^{-11}$ s l'elettrone precipita sul nucleo

Aspetti peculiari della materia (difficili da spiegare con la fisica di inizio'900)

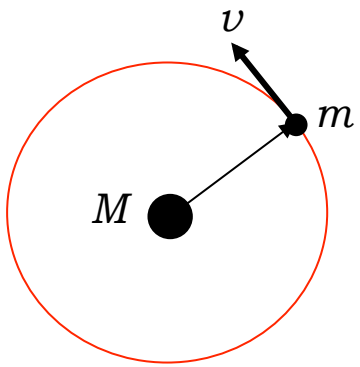
- ✓costanza delle proprietà atomiche;
- ✓cambiamento radicale delle proprietà tra atomi contigui nella tabella di Mendeleev

Osservazione sperimentale: quantizzazione dell'energia degli elettroni atomici (esperimento di Franck-Hertz)

Atomo di Bohr

Ipotesi: quantizzazione del momento angolare dell'elettrone in rotazione intorno al nucleo

N.B. - $[\,h\,] = [\,E\,T\,] = [\,M\,L^2\,T^{-2}\,T\,]$
$= [\,M\,L^2\,T^{-1}\,] = [\,M\,L\,T^{-1}\,] \times [\,L\,]$
= impulso x distanza



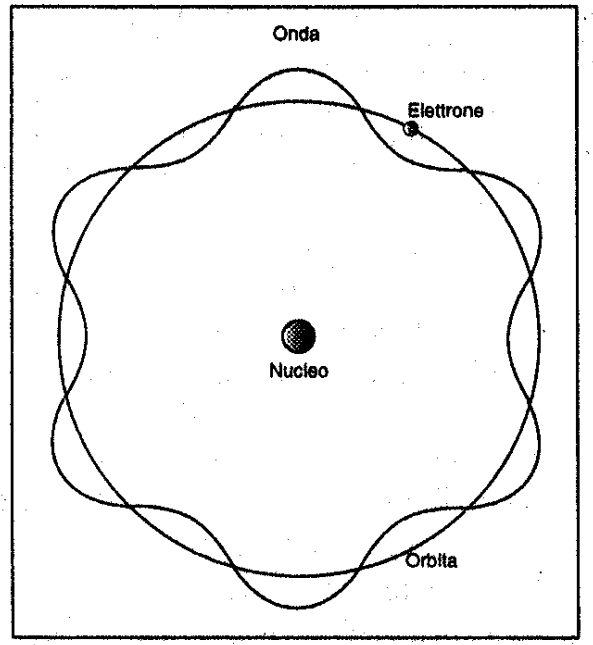
$$m\,v_n\,r_n = n\,\hbar \qquad (n \in N) \qquad (1)$$

$$\rightarrow \quad r_n = n\,\frac{h}{2\pi}\,\frac{1}{m v_n}$$

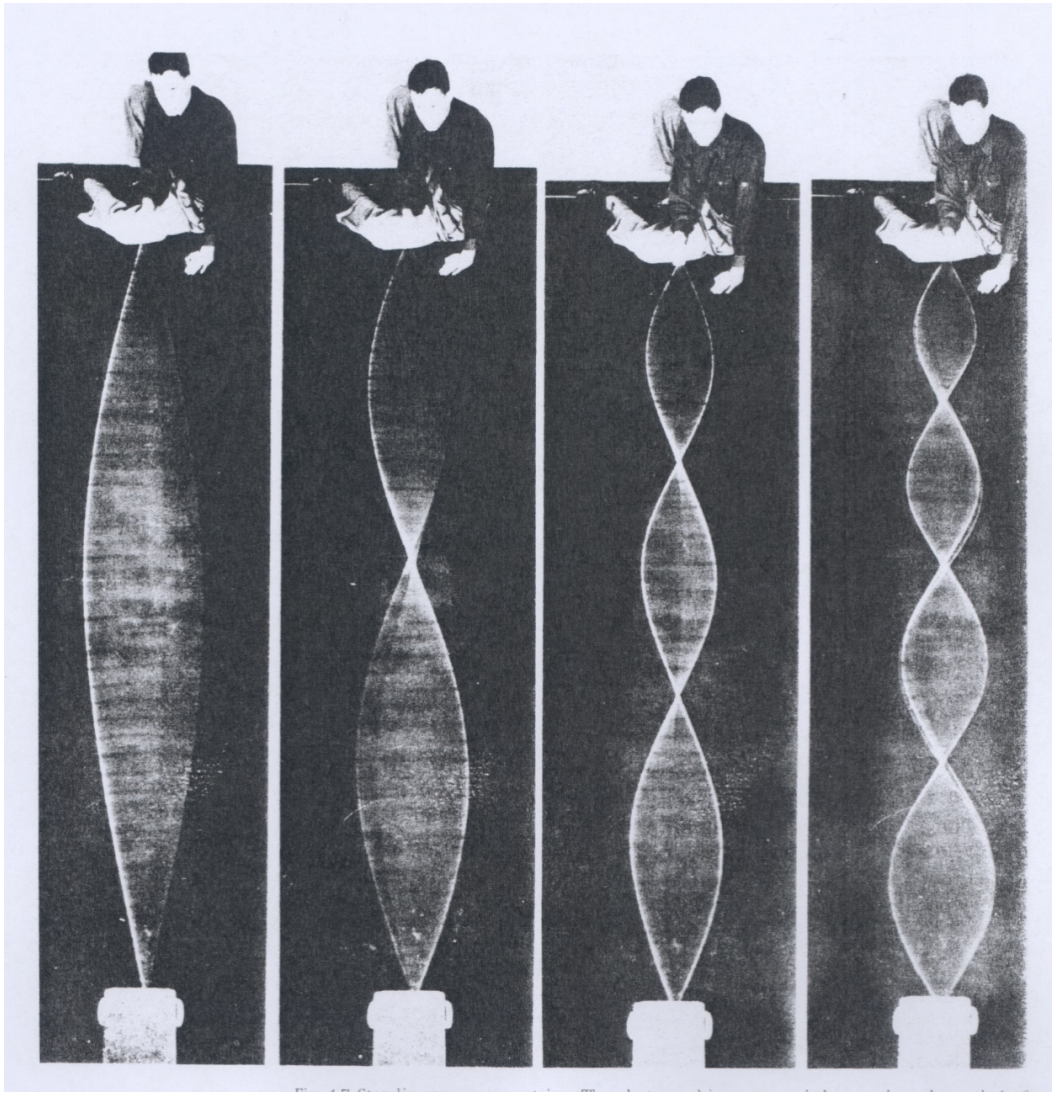
de Broglie $\rightarrow$ $r_n = \frac{n}{2\pi}\,\lambda$ $\rightarrow$ $2\,\pi\,r_n = n\,\lambda$

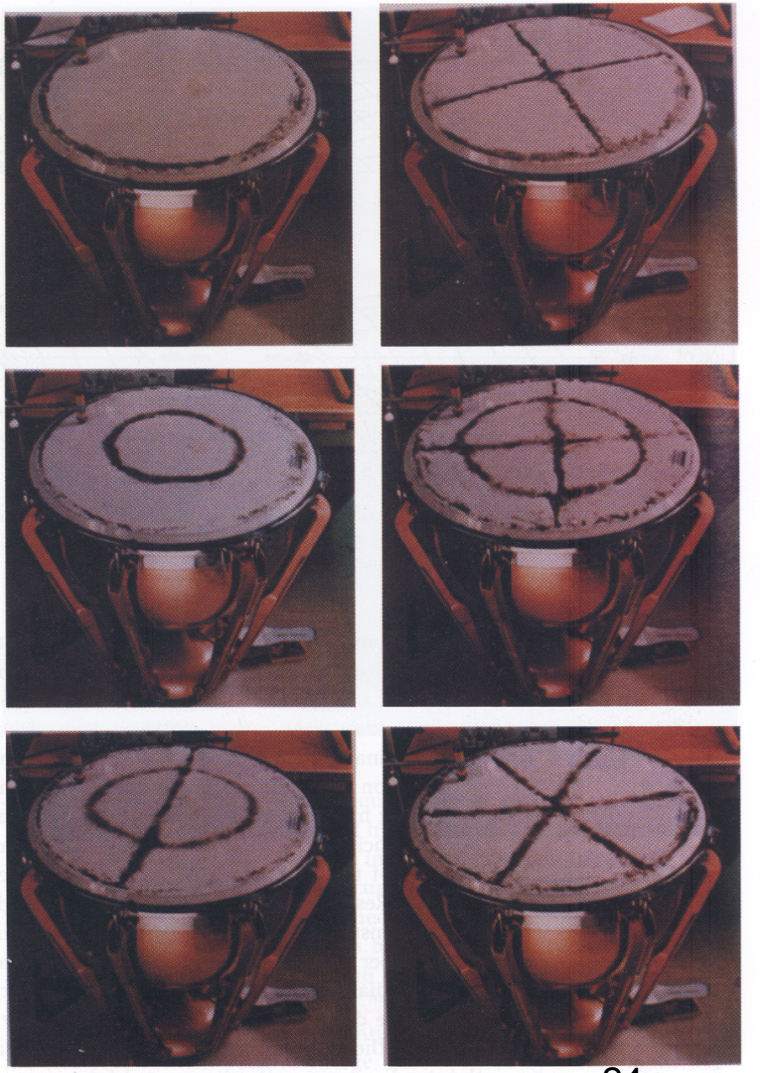
Atomo di Bohr

i.e., le orbite permesse sono quelle nella cui circonferenza sono contenute un numero intero di lunghezze d'onda → condizione di stazionarietà per l'onda di de Broglie associata all'elettrone atomico → l'elettrone non irraggia → proprietà atomiche costanti



Atomo di Bohr





Atomo di Bohr

Conseguenze dell'ipotesi di Bohr

Attrazione coulombiana e^- - p agisce come forza centripeta

$$\frac{m\,v_n^2}{r_n} = k_e\,\frac{e^2}{r_n^2} \qquad (2)$$

$$\longrightarrow \qquad (m\,v_n)^2 = m\,k_e\,\frac{e^2}{r_n} \overset{(1)}{=} n^2\,\frac{\hbar^2}{r_n^2}$$

ovvero: $r_n = n^2\,a_0$ (3) $\qquad a_0 = \dfrac{\hbar^2}{k_e\,e^2\,m} = 0.53\ \text{Å}$

(raggio di Bohr)

Atomo di Bohr

Energia dell'elettrone che percorre *n*-esima orbita

$$E_n = \frac{1}{2} m v_n^2 - k_e \frac{e^2}{r_n}$$

(2) $\rightarrow$ $$= \frac{1}{2} k_e \frac{e^2}{r_n} - k_e \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{2} k_e \frac{e^2}{r_n}$$

(3) $\rightarrow$ $$= -\frac{1}{2\,n^2} \frac{k_e\, e^2}{a_0}$$

$\Rightarrow$ l'energia è quantizzata

N.B. - livello di minima energia E_1 = -13.6 eV (potenziale di ionizzazione dell'idrogeno)

Onde di probabilità

Elettroni come onde, ma che tipo di onde? Come la luce? La luce è una vibrazione del campo e.m. Cosa oscilla nell'elettrone?

de Broglie: onda associata all'elettrone è distinta da questo
→ difficile da immaginare: solo utile formula

2-fenditure: misura della probabilità d'arrivo degli elettroni, che mostra interferenza ed è l'analogo dell'intensità dell'onda d'acqua → ottenuta come 'quadrato' di una ampiezza di probabilità quantistica ψ (funzione d'onda)

$$P_1 = |\psi_1|^2 \qquad P_2 = |\psi_2|^2 \qquad P_{12} = |\psi_1 + \psi_2|^2$$

→ $\boxed{P_{12} \neq P_1 + P_2}$

Onde di probabilità (M. Born)

1. La probabilità di un evento in un esperimento ideale è data dal quadrato di un numero complesso detto ampiezza di probabilità $P = |\psi|^2$

2. Evento che può avvenire secondo varie alternative: ampiezza di probabilità = somma ampiezze per le varie alternative considerate separatamente (principio di sovrapposizione) → interferenza

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 \quad \Rightarrow \quad P = |\psi_1 + \psi_2|^2$$

3. Esperimento in grado di determinare quale tra possibili alternative è realizzata: probabilità = somma di quelle delle alternative → no interferenza $P = P_1 + P_2$

Onde di probabilità

Probabilità è ingrediente essenziale: limitazione di "principio", su cosa possiamo conoscere di un sistema e non come mera limitazione "pratica" (fisica classica)

2-fenditure → punto d'arrivo degli elettroni intrinsecamente impredicibile: possiamo fare solo affermazioni di natura statistica

Arrivo dell'elettrone sullo schermo → f.d'o., inizialmente diffusa in tutto lo spazio, collassa alla regione di spazio delimitata dal rivelatore, in un modo che non sappiamo descrivere (… uno dei tanti misteri) → impossibile definire il concetto di traiettoria: prima che arrivi al rivelatore non possiamo dire nulla di definito sulla posizione dell'elettrone

Effetto Fotoelettrico

Emissione di elettroni da parte di metalli la cui superficie è investita da un intenso fascio di luce (von Lénárd, 1902)

Osservazioni sperimentali:

- maggiore è l'intensità della luce, maggiore è il numero di elettroni (tutti con la stessa energia) emessi
- maggiore è la frequenza della luce incidente, maggiore è l'energia degli elettroni

inspiegabili nell'ambito della fisica classica: l'energia di un'onda e.m. dipende dall'intensità, non dalla frequenza ν

Einstein (1905): l'energia del fascio di luce è distribuita in quanti di grandezza $h\nu$, interamente trasferibili all'elettrone

Effetto Fotoelettrico

Energia elettroni emessi: $T = h\nu - W$

lavoro d'estrazione dell'elettrone dal metallo (indipendente da ν)

maggiore intensità luminosa → maggior numero di quanti → maggior numero di elettroni emessi con energia *T*

Einstein (1915): nelle interazioni con la materia i quanti trasferiscono, oltre all'energia, anche un impulso

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

(la formula di de Broglie è di Einstein !!)

→ rafforzato lo status particellare della luce: fotoni

Fotone

Idea di Einstein corroborata dall'osservazione dell'effetto Compton: diffusione dei raggi X da parte di elettroni

$$E = h\,\nu$$ e. fotoelettrico

$$p = \frac{h}{\lambda}$$ e. Compton

$$E = h\,\frac{c}{\lambda} = p\,c$$

il fotone ha massa = 0 !!

N.B. - relatività speciale → $$E = \sqrt{p^2\,c^2 + m^2\,c^4}$$

Atomo di Bohr

Salto dell'elettrone tra due orbite $r_n \rightarrow r_m$ $(n > m)$ $\rightarrow$ atomo emette fotone di energia

$$E_{nm} = E_n - E_m$$

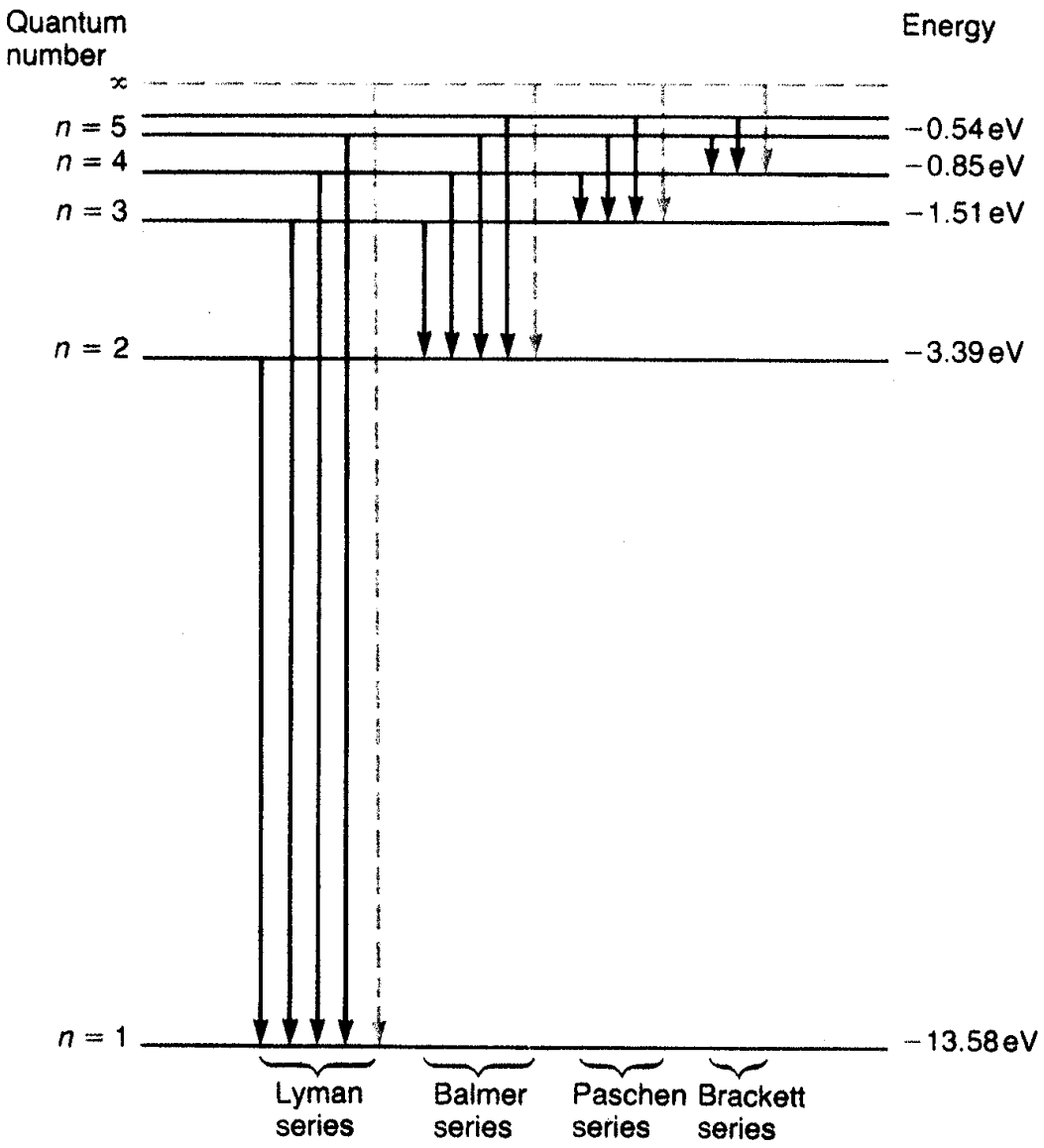
$$= \left(-\frac{1}{2\,n^2} + \frac{1}{2\,m^2}\right) \frac{k_e\,e^2}{a_0}$$

quindi (formula di Einstein), di frequenza:

$$\nu = \frac{E_{nm}}{h} = \frac{k_e\,e^2}{4\,\pi\,\hbar\,a_0} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

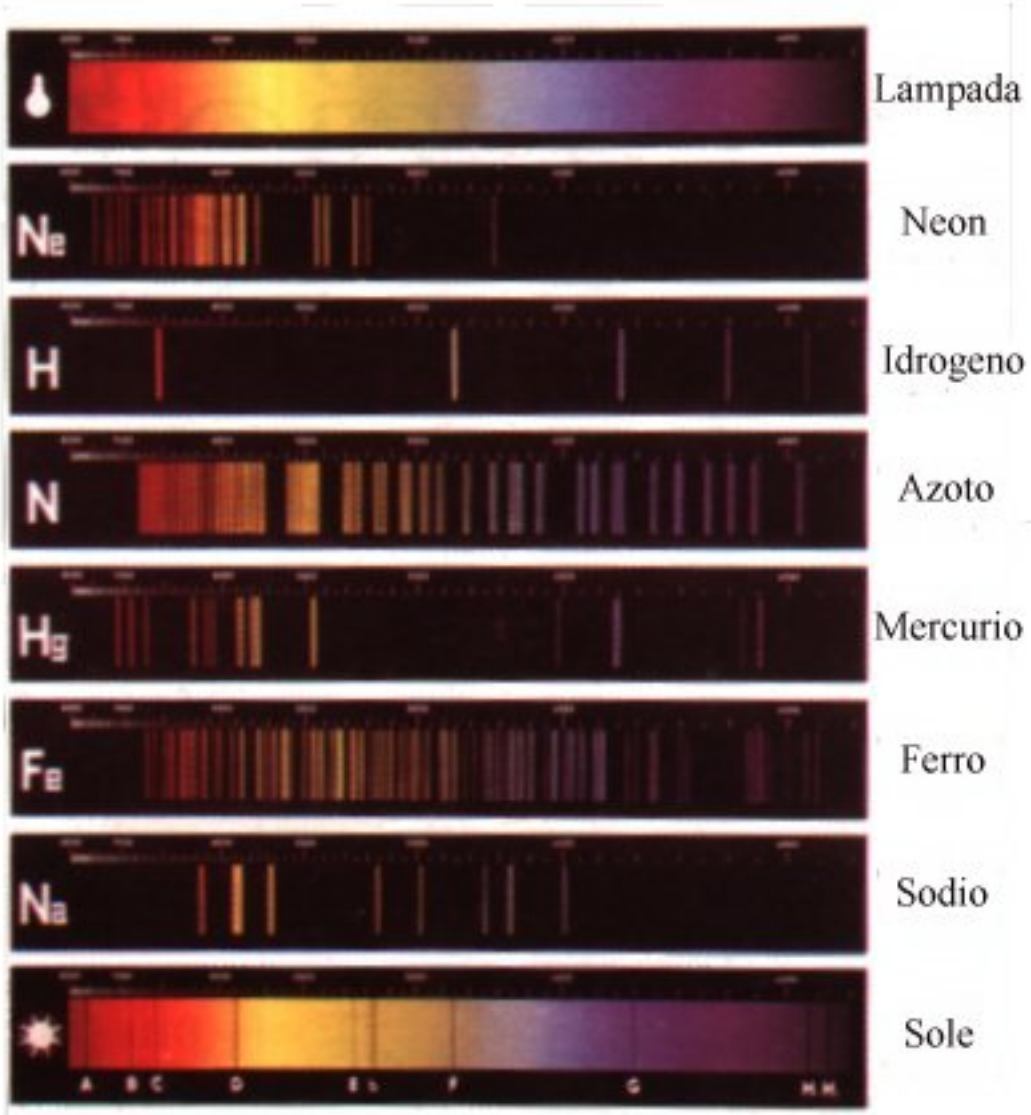
(formula di Rydberg)

Atomo di Bohr (II)



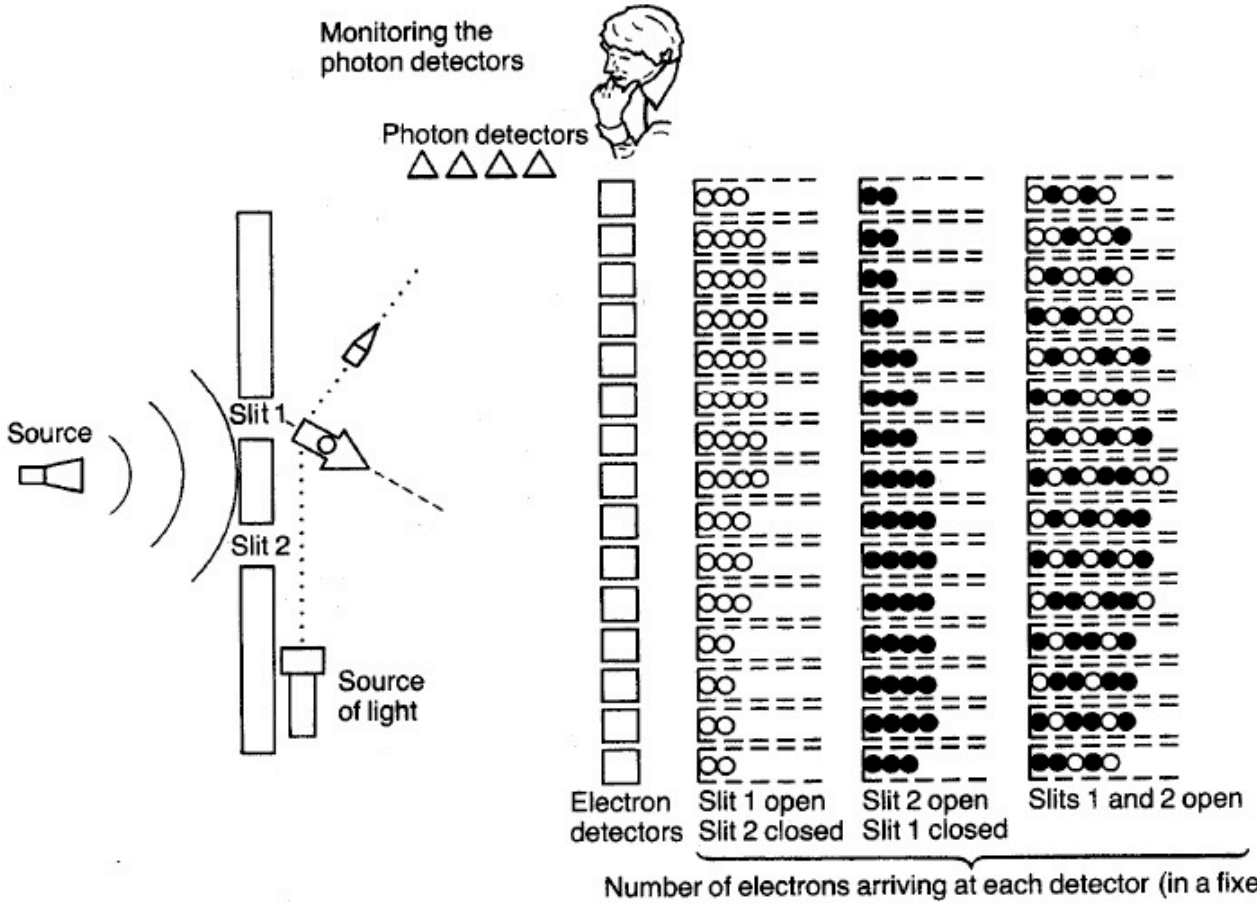
Idrogeno

Spettri atomici



Osservando gli elettroni (II)

2-fenditure con gli elettroni + osservatore rivisto alla luce del concetto di fotone



Osservando gli elettroni (II)

per osservare un oggetto ci vuole almeno un fotone: effetto trascurabile su un proiettile, considerevole sull'elettrone

come ridurre tale effetto? diminuiamo l'intensità della sorgente di luce? NO! riduciamo solo il numero di fotoni, dobbiamo ridurne l'impulso p → diminuire (aumentare) $\nu\,(\lambda)$

quando λ diviene confrontabile con la separazione tra le fenditure d, il lampo diviene sfocato → non siamo più in grado di stabilire per quale fenditura è passato l'elettrone e $P'_{12} \rightarrow P_{12}$

per $\lambda >> d$ la perturbazione introdotta dal fotone è trascurabile → riotteniamo l'interferenza

Principio d'Indeterminazione

(Heisenberg)

Risultato generale della teoria quantistica:

è impossibile realizzare un dispositivo il cui scopo sia quello di determinare per quale foro passa l'elettrone senza nel contempo perturbarlo a tal punto da distruggere la figura d'interferenza

Matematicamente: $\Delta x \, \Delta p \geq h$

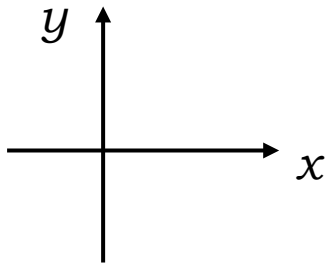
incertezza nella posizione

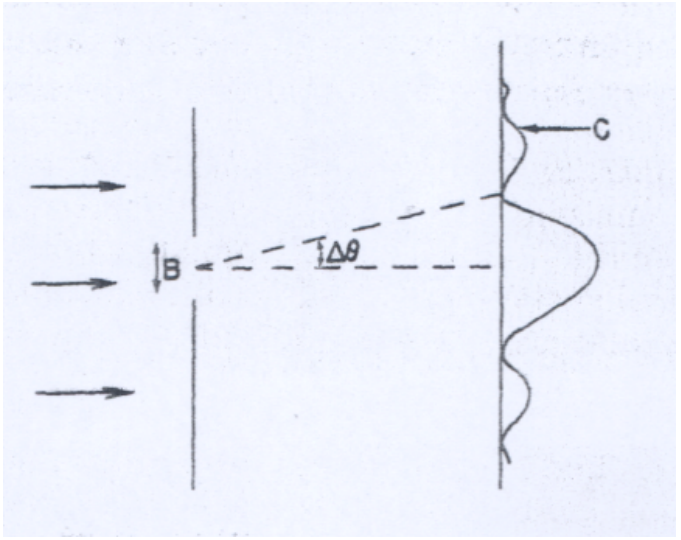
incertezza nell'impulso

Principio d'Indeterminazione

l'indeterminazione è una diretta conseguenza
del carattere ondulatorio delle particelle

Esempio: fascio di particelle che incide su fenditura





particelle hanno tutte $p_x = p_o$ e $p_y = 0$, i.e. componente dell'impulso perpendicolare alla fenditura è perfettamente nota

Principio d'Indeterminazione

Passaggio attraverso fenditura → conoscenza della coordinata y con incertezza $\Delta y \sim l$; diffrazione oltre la fenditura → indeterminazione in p_y

- prima della fenditura: conosco p_y ma non y
- dopo la fenditura: conosco y ma perdo informazione su p_y

$$\Delta p_y \sim p_0 \Delta\theta$$

angolo sotteso dal primo minimo

Principio d'Indeterminazione

$$\Delta\theta \sim \frac{\lambda}{l} \quad \rightarrow \quad \Delta p_y \sim p_0 \frac{\lambda}{l}$$

de Broglie $\rightarrow$ $\Delta p_y \sim \frac{h}{l}$

$$\Delta y \, \Delta p_y \sim h$$

y e p_y sono variabili incompatibili

Principio d'Indeterminazione

ogni operazione di misura disturba il sistema

✓ Mondo Classico

- possibile ridurre a piacere l'entità della perturbazione
- ogni interazione è governata da leggi deterministiche → possibile correggere l'effetto introdotto dalla perturbazione → misure con livello d'accuratezza arbitrario

✓ Mondo Quantistico

- impossibile perturbazione arbitrariamente piccola
- perturbazione non può essere corretta (effetto del fotone nell'interazione con gli elettroni è imprevedibile)

Principio d'Indeterminazione

ignoranza classica *vs* incertezza quantistica

↓ ↓

il mondo è in uno stato ben definito ma si da il caso che non sappiamo qual è

particelle in stato ben definito sono in grado di passare allo stesso tempo attraverso 2 fenditure

↓ ↓

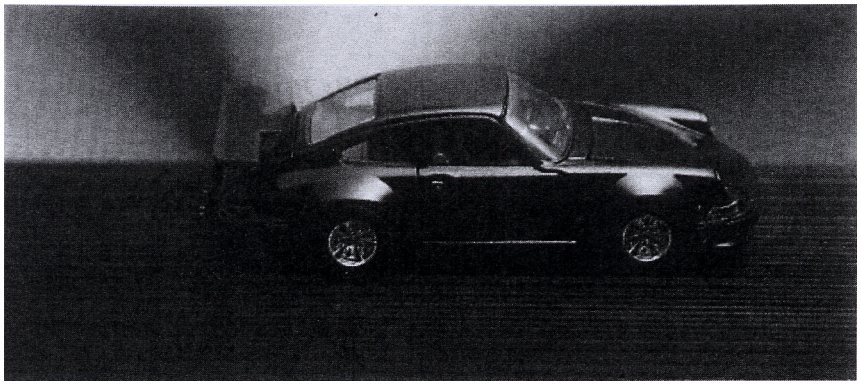
casualità soggettiva casualità oggettiva

dicotomia non astratta: figura d'interferenza !!

Indeterminazione Energia-Tempo

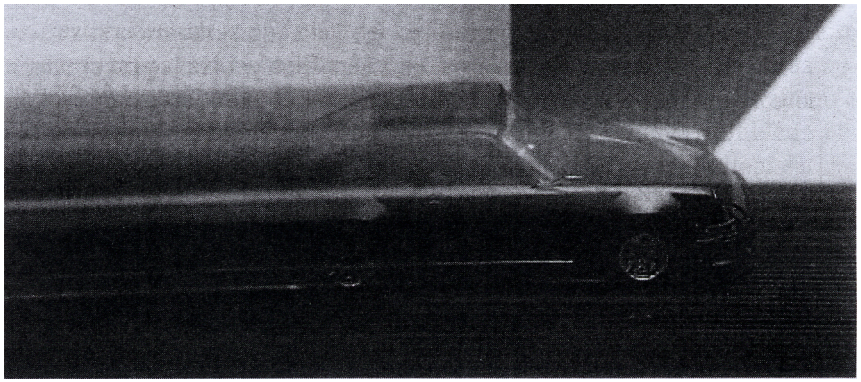
$$\Delta E \, \Delta t \geq h$$

… è concessa qualunque violazione della legge di conservazione dell'energia per un tempo corrispondentemente piccolo



piccolo tempo d'esposizione

forma SI - velocità NO



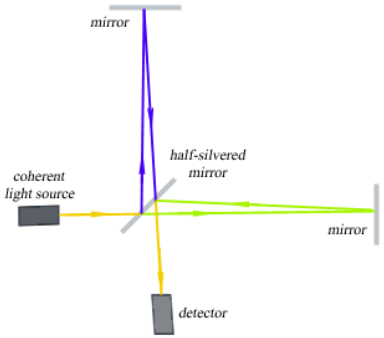
grande tempo d'esposizione

forma NO - velocità SI

Fotoni

Fotone come particella? → attenuiamo intensità della sorgente di luce nell'interferometro di Michelson in modo da avere un solo fotone nell'apparato e inseriamo un rivelatore di fotoni in ciascun ramo (dopo il beam-splitter e prima dello specchio)

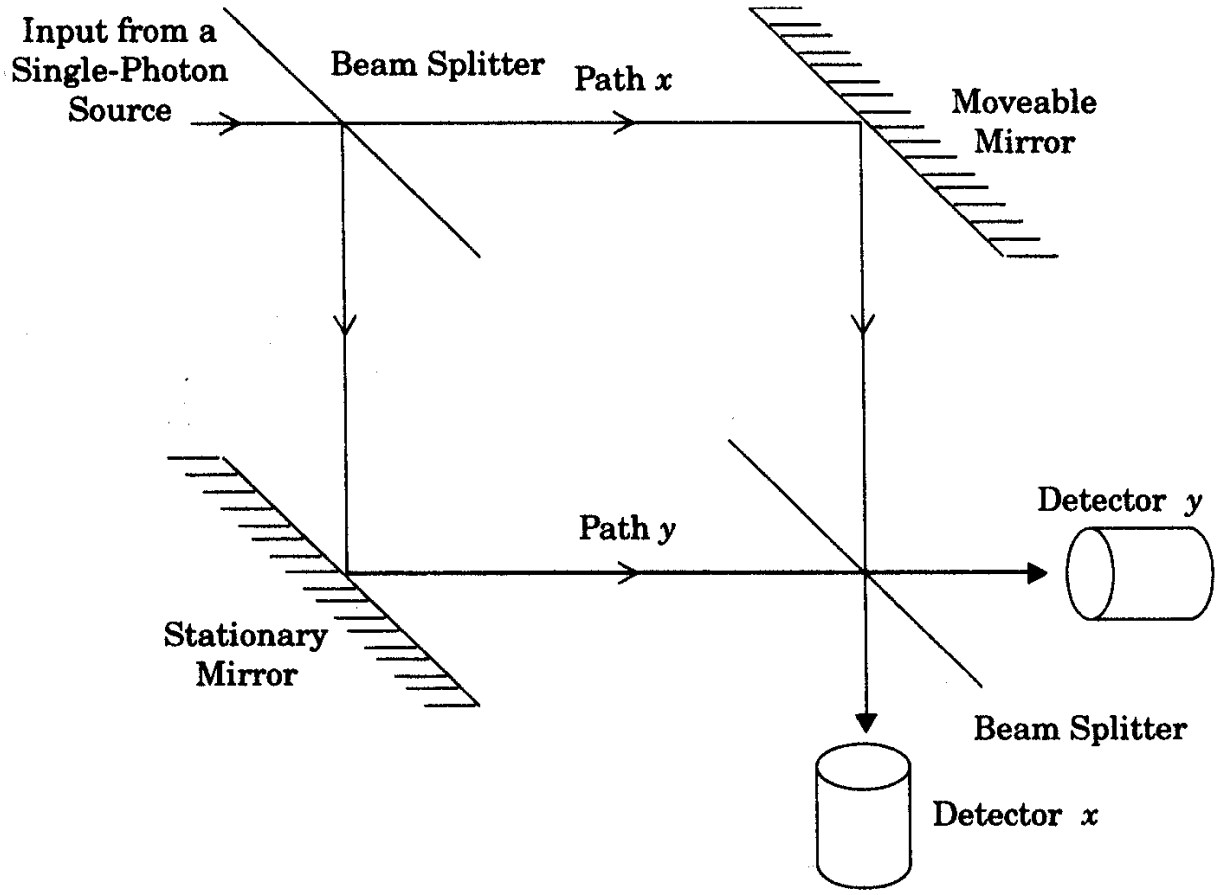
Cosa osserviamo? I rivelatori non producono mai segnale allo stesso istante: il fotone o segue il ramo → o quello ↑



NB - il fotone non viene "spezzato" dal beam-splitter! se così fosse si avrebbero 2 fotoni di energia, e quindi frequenza ($E = h\,\nu$), dimezzata!

Fotoni

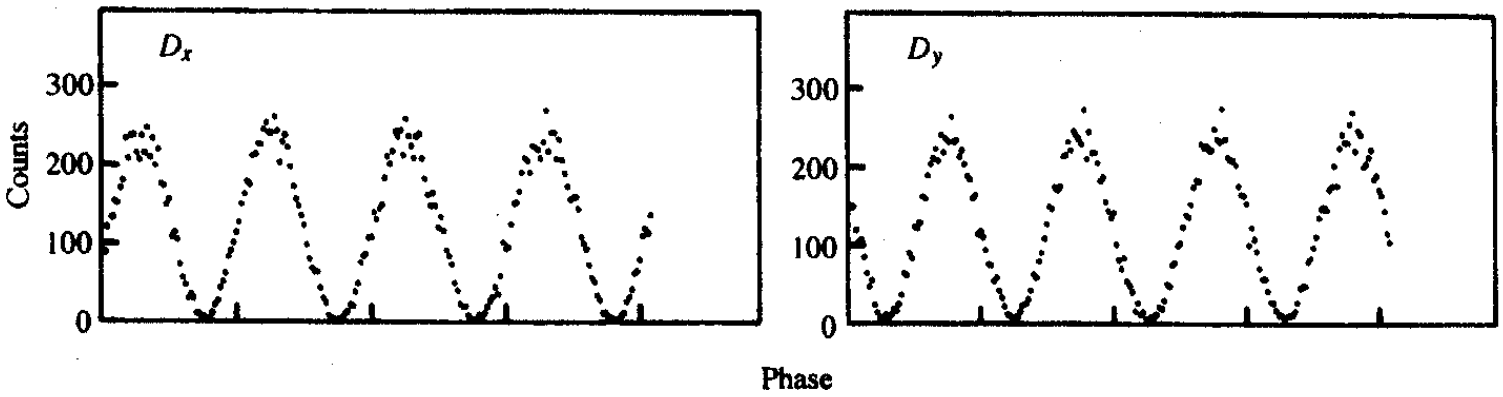
… ancora un esperimento con doppia fenditura: l'interferometro Mach-Zender



Fotoni

… con un solo fotone nell'apparato: esperimento di Grangier, Roger, Aspect (*Europhys. Lett.* **1**, 173 (1986))

figura d'interferenza registrata su ciascun rivelatore al variare della differenza di cammino ottico (fase) tra i 2 rami dell'interferometro



… il fotone percorre entrambe i rami !

Fotoni

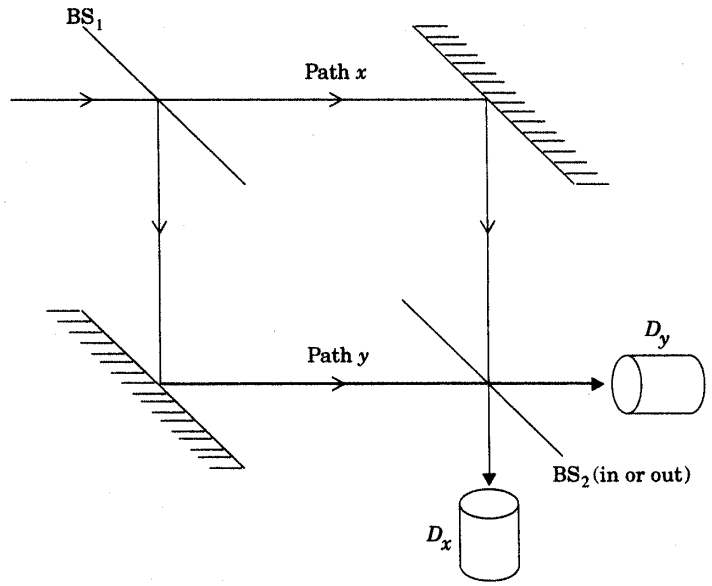
Teoria della cospirazione: il fotone (ma anche, l'elettrone, il neutrone, l'atomo …) riconosce il tipo di apparato sperimentale costruito e aggiusta di conseguenza la sua natura → in un apparato pensato per stabilire per quale ramo (fenditura) è passato si comporta come particella; in uno realizzato per osservare l'interferenza si comporta come onda

possibile che il fotone si comporti davvero così?

Proposta di Wheeler: ritardare la scelta su quale aspetto osservare a dopo che il fotone ha "deciso" cosa essere → esperimenti a scelta ritardata

Fotoni

interferometro Mach-Zender dove il secondo beam-splitter può essere inserito o rimosso a piacere



- BS_2 assente → D_x e D_y registrano quale ramo è stato percorso dal fotone: x → D_x, y → D_y
- BS_2 inserito → esperimento d'interferenza: non sappiamo più nulla sul percorso seguito dal fotone

Fotoni

Scelta ritardata: inizialmente BS_2 è assente e viene inserito solo dopo che il fotone ha passato BS_1

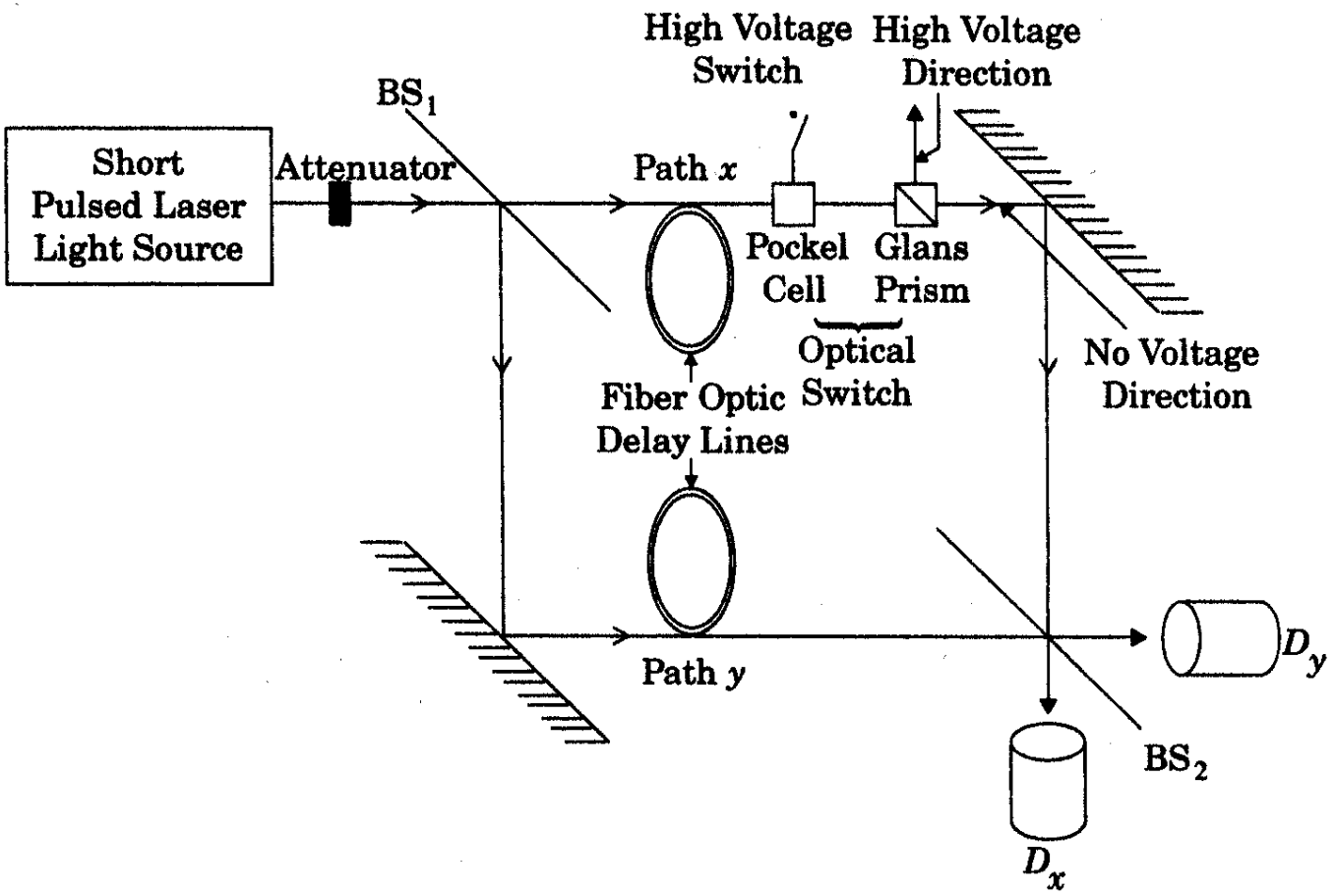
Secondo la teoria della cospirazione ciascun fotone si comporta come una particella (BS_2 è inizialmente disinserito) e sceglie uno dei 2 rami con probabilità 1/2.

La successiva inserzione di BS2 non cambia questa scelta e, anche se esso è presente, quando il fotone lo raggiunge non può dar luogo a interferenza!

Ma cosa succede nella realtà?

Fotoni

T. Hellmuth et al. *Phys. Rev. A* **35**, 2532 (1987)



Fotoni

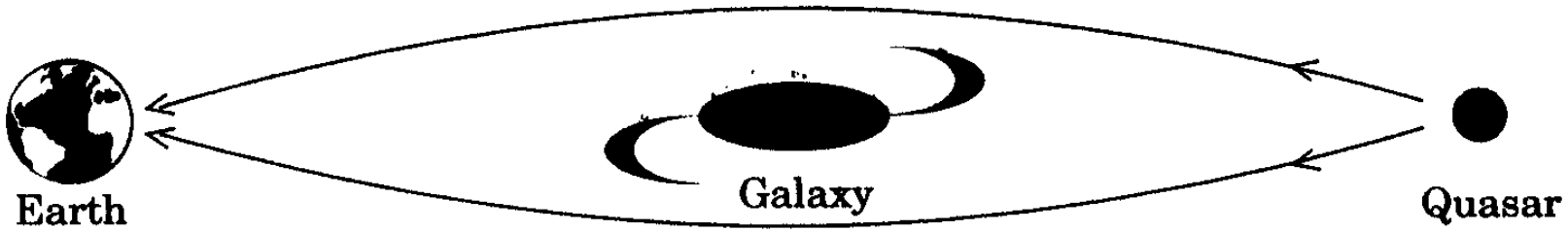
Risultato sperimentale:

non importa quando BS_2 viene inserito, si osserva una figura d'interferenza; viceversa, se si comincia con BS_2 inserito e successivamente (dopo che il fotone ha passato BS_1) lo si rimuove, l'interferenza non è mai visibile → incredibile!

Questo risultato non è quello che ci dice la teoria della cospirazione, ma è in perfetto accordo con la Meccanica Quantistica: il fotone può passare dal percorrere un solo ramo o entrambi in qualunque momento della sua storia, non impazzisce mai! Fa sempre la scelta giusta, anche se cambio le carte!

Fotoni

gedanken experiment proposto da Wheeler



Nel punto di intersezione delle due traiettorie posso mettere o meno un beam-splitter → inserito: vedo due immagini; disinserito vedo l'interferenza

il fotone è partito miliardi di anni fa, quale differenza può fare sul suo percorso la mia decisione di oggi?

Fotoni

Scelta ritardata → la semplice rappresentazione della dualità onda-corpuscolo è inadeguata: quando la luce è entrata nell'interferometro non la possiamo più pensare come un'onda o una particella → nuovo punto di vista, che non sia la composizione di parti di teorie classiche

Chiedere come il fotone sceglie il percorso è un residuo della concezione classica: possiamo solo conoscere la probabilità delle varie possibilità

Principio di sovrapposizione: singola "particella" può essere preparata in una sovrapposizione di stati, e per ciò non è più localizzabile → "… *somma di più ampiezze complesse di cui eseguire il modulo quadro …*"

Paradosso della Misura

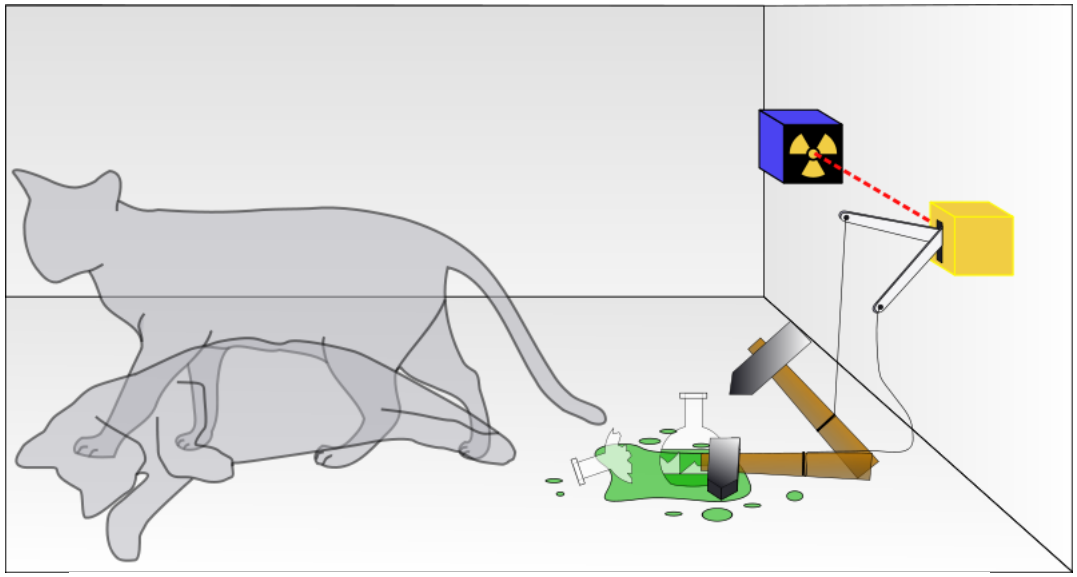
Sistema quantistico può esistere in una sovrapposizione di diversi stati quantistici → processo di misura fa collassare la sovrapposizione in uno stato classico (può essere definito per mezzo dello stato di un rivelatore classico) → soltanto dopo la misura possiamo parlare di sistema quantistico con definite proprietà

apparentemente, è l'osservatore a decidere quali proprietà misurare e quando farlo

Schrödinger insoddisfatto da questa interpretazione: il problema è che ogni cosa è quantistica e quindi non si vede perché dividere il mondo in oggetti classici (rivelatori) e quantistici (atomi, …)

Paradosso della Misura

Schrödinger: nulla che impedisce alla irrealtà microscopica di infettare il mondo macroscopico → paradosso del gatto



$$|\Psi> = \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{gatto vivo}> + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{gatto morto}>$$

Mostra come separazione richiesta dalla teoria tra mondo classico e quantistico sia mal definita e insoddisfacente

Paradosso della Misura

Come fa l'osservazione a far collassare la f.d'o. in una delle 2 alternative? von Neumann & Wigner: coscienza osservatore gioca un ruolo importante

Cosa accade se qualcuno può guardare dentro la scatola tramite una finestra (amico di Wigner)? Possiamo chiedergli se il gatto è morto quando è decaduto il nucleo o quando abbiamo aperto la scatola? O è l'amico di Wigner che, guardando, ha fatto collassare la f.d'o.?

Unico aspetto non-quantistico è la coscienza? → perché differenti osservatori concordano sulla rappresentazione del mondo?

Molti Mondi

(Everett)

REVIEWS OF MODERN PHYSICS VOLUME 29, NUMBER 3 JULY, 1957

"Relative State" Formulation of Quantum Mechanics*

HUGH EVERETT, III†

Palmer Physical Laboratory, Princeton University, Princeton, New Jersey

Bohr: apparato di misura classico seleziona solo uno degli stati della sovrapposizione quantistica

Everett: tutte le possibilità sono realizzate, ma ognuna in una diversa copia dell'universo, ciascuna delle quali è essa stessa costantemente soggetta a moltiplicazione in corrispondenza di ogni processo di misura → no collasso della f.d'o. → "multiverso" di universi paralleli

Molti Mondi

idea affascinante ma problematica:

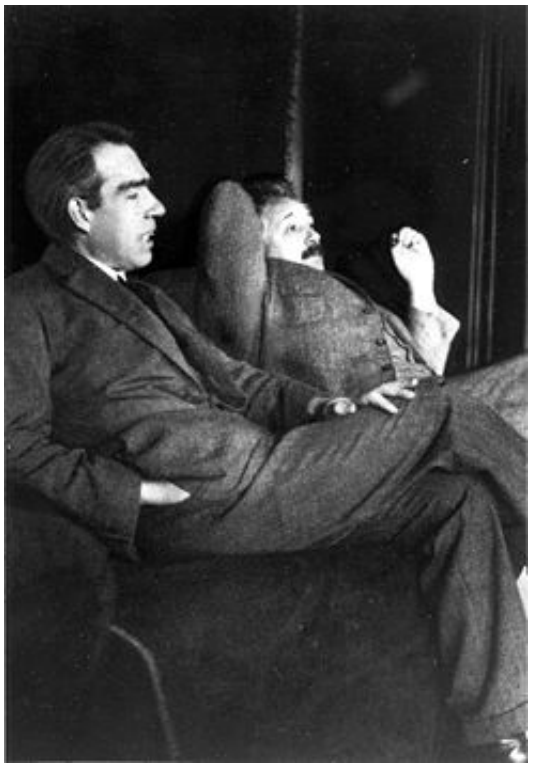
- ✓ costretti a supporre che i vari universi non possono comunicare tra loro e che in ognuno di essi è presente una nostra copia …
- ✓ diramazione della f.d'o. = struttura ad albero → no associazione del particolare presente con alcun particolare passato → la configurazione del mondo - noi compresi - cambia in modo discontinuo → perché, invece, abbiamo l'illusione che il mondo cambi in modo continuo?

qualora questa teoria fosse presa sul serio sarebbe difficile prendere sul serio qualsiasi altra cosa (Bell)

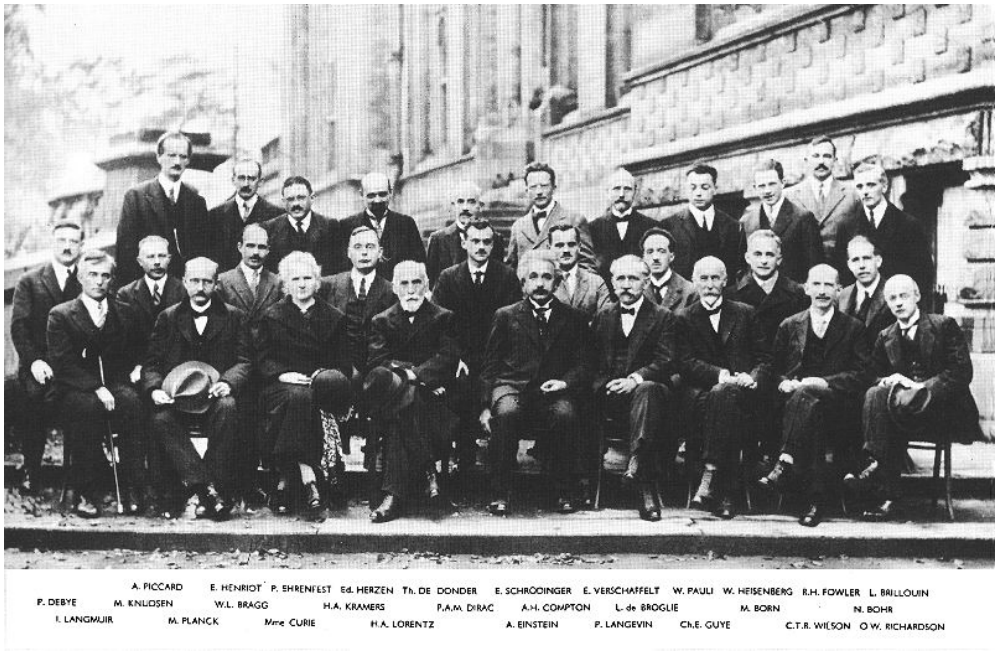
Bohr *vs* Einstein

Il dibattito sull'interpretazione della Meccanica Quantistica imperversò fin dagli inizi degli anni '30.

Attori principali: Bohr e Einstein



Teatro: Conferenza Solvay a Bruxelles



Bohr *vs* Einstein

Bohr

campione della interpretazione di Copenhagen: prima della misura la particella non possiede una posizione definita; tutto ciò che possiamo sperare di conoscere è probabilità che essa si trovi in un certo punto.

Particella ha una posizione definita, nel senso consueto del termine, solo nel momento in cui la 'osserviamo', prima e dopo essa ha solo posizioni potenziali. Questo non significa che la particella ha una posizione che noi non riusciamo a conoscere se non dopo averla misurata: in realtà, prima che sia effettuata la misura, essa non possiede proprio una posizione definita → atto di misura partecipa profondamente alla creazione della realtà osservata

Bohr *vs* Einstein

Einstein

fin dall'inizio a disagio con i salti quantici: violano la località: evento influenzato solo da eventi che si verificano nel passato a tempi maggiori di quelli che impiega la luce a coprire la distanza che li separa

NB: Ψ di particella singola evolve nel tempo espandendosi su distanze arbitrariamente grandi; osservazione della particella in un punto $\rightarrow$ variazione istantanea della f. d'o. in tutto lo spazio in modo da impedire che altri osservatori, arbitrariamente lontani, possano osservare la particella nelle loro posizioni (Copenhagen) $\rightarrow$ misteriosa azione a distanza che svanisce se si rinuncia ad ammettere che Ψ fornisce una descrizione completa dello stato della particella e si ammette che essa possiede una posizione reale in tutti gli istanti di tempo

Bohr *vs* Einstein

Einstein

in realtà, ogni volta che cerchiamo di stabilire dove si trova la particella la troviamo sempre in una posizione definita → la f.d'o. è solo un surrogato temporaneo di una (ancora ignota) descrizione più precisa in grado di prevedere con esattezza la posizione della particella.

cosa c'è di più naturale che attendersi che una particella fosse prima localizzata nel punto in cui viene trovata l'attimo dopo? conoscenza più approfondita della fisica dovrebbe fornirci questa informazione senza far uso della probabilità, che è l'elemento veramente più difficile da accettare (*"credete veramente che la Luna non si trovi lassù se nessuno la guarda?"*)

Bohr *vs* Einstein

Einstein: MQ rinuncia a quello che è sempre stato lo scopo della scienza: la descrizione completa del mondo reale (supposto esistere indipendentemente da qualsiasi atto di osservazione). Questo ha comportato l'elaborazione di nuovi concetti per corrispondere con quella realtà, e così idee scientifiche quali forza, energia e impulso sono emerse nel corso di decenni di dibattito. Esse corrispondevano a importanti proprietà del mondo fisico e, per tale ragione, potevano essere utilizzate in modo produttivo per comprenderlo.

Secondo Bohr questa tradizione deve essere abbandonata.

punto di vista attuale (condiviso): l'universo quantistico implica revisione radicale della nostra concezione del mondo fisico, revisione finora non raggiunta.

Bibliografia

molti mondi
approccio storico

A. Zeilinger, *Il velo di Einstein* (Einaudi, 2005)

G. Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio* (Saggiatore, 1997)

A. Aczel, *Entanglement* (Cortina Raffaello, 2004)

C. Bruce, *I conigli di Schrödinger* (Cortina Raffaello, 2006)

M. Kumar, *Quantum* (Mondadori - 2011)