

La Realtà Quantistica

Danilo Babusci

danilo.babusci@Inf.infn.it



4 – 6 Ottobre 2017

La meccanica quantistica è la teoria fisica di maggior successo mai sviluppata dall'umanità ...

Esempio: momento magnetico anomalo del muone

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

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

... 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

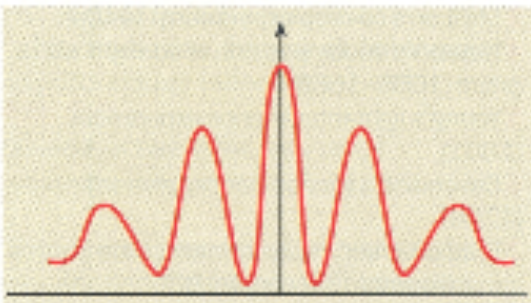
COMMENT: **CRITICAL POINT**

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

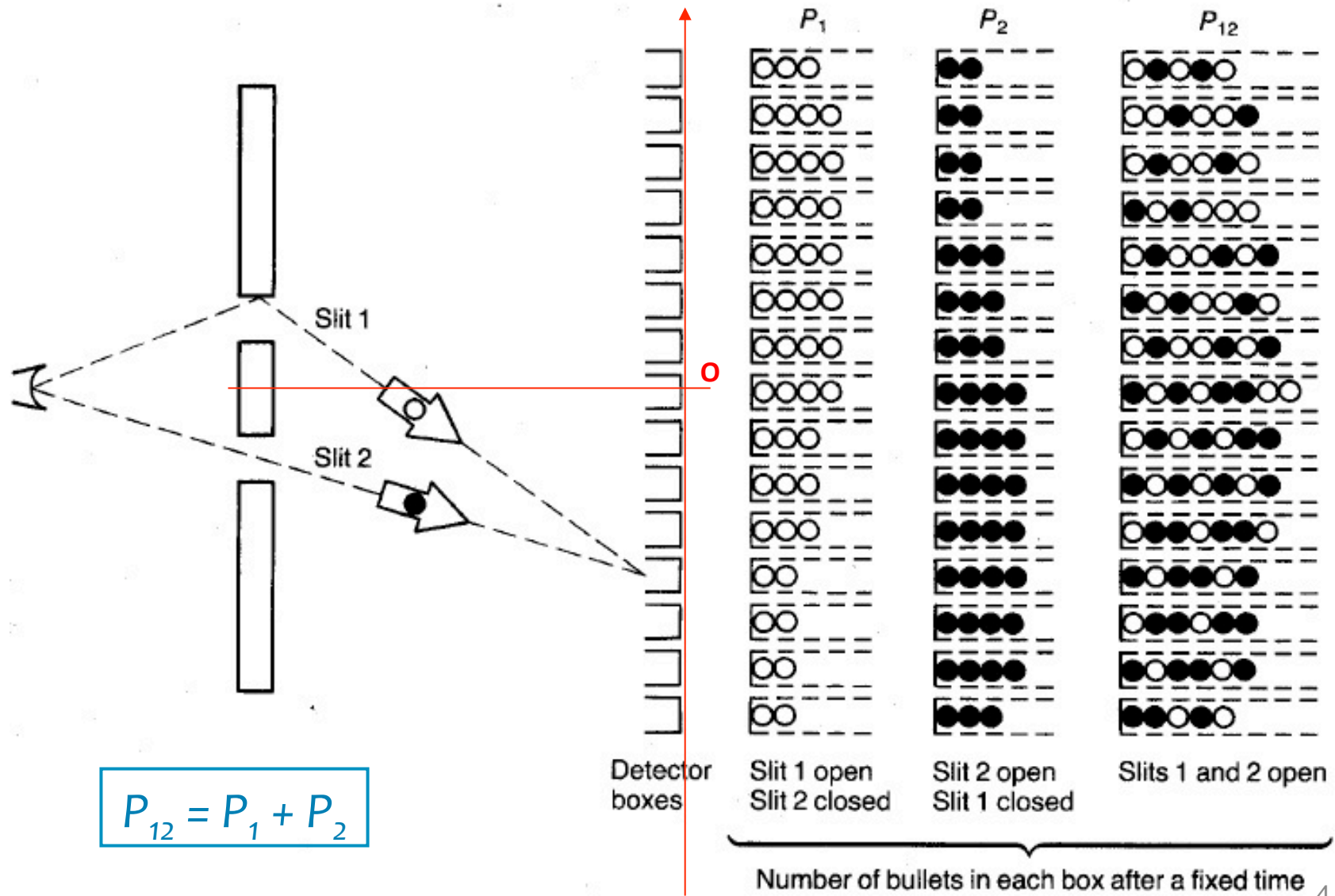


Simply beautiful – the spatial intensity distribution of electrons that have interfered in a Young's double-slit experiment.

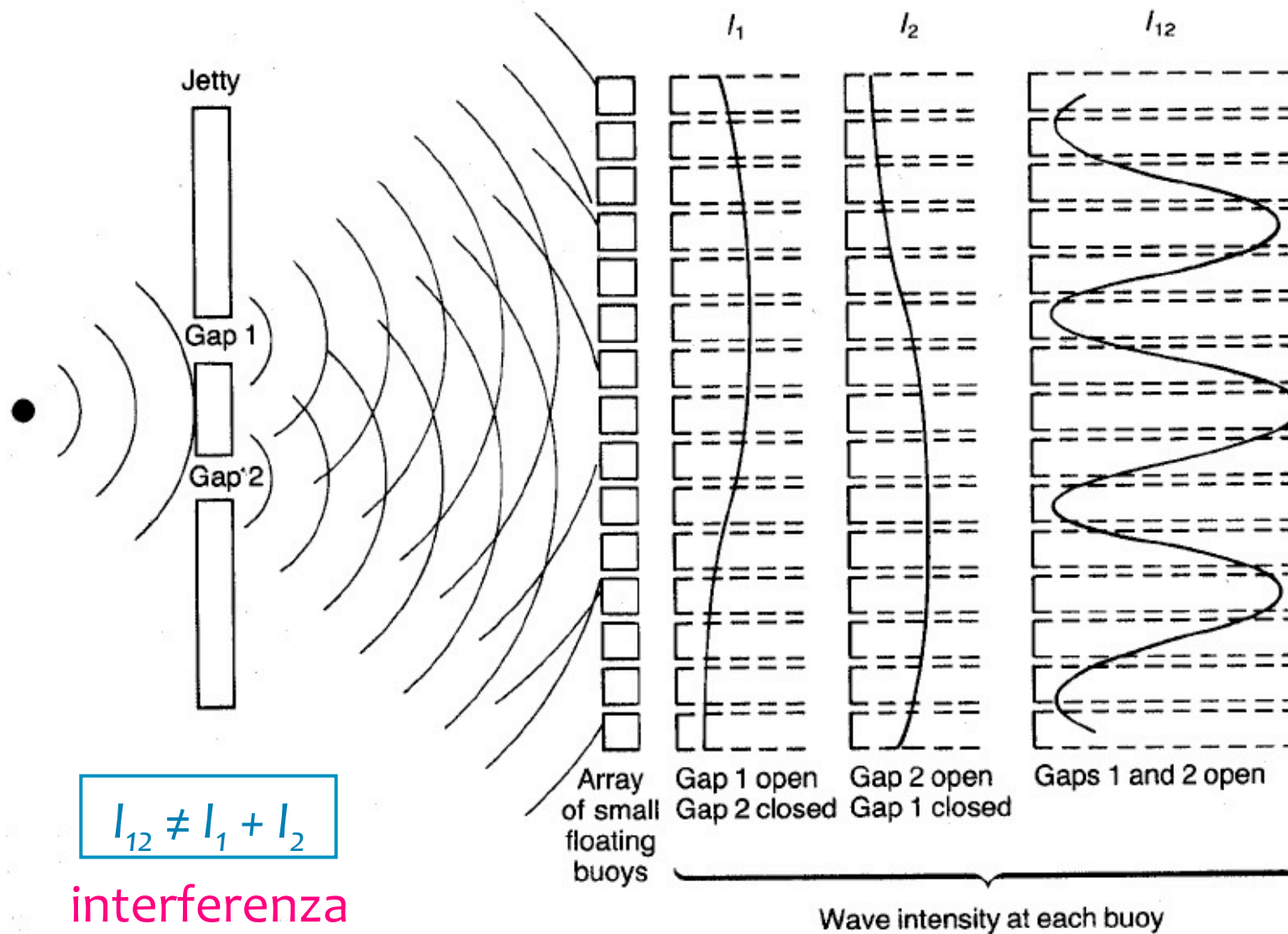
out. Economy might refer to either the nature from a detached distance. Readers found beauty in small-scale play with simple things like balls, waves, sounds and coins – allowing order in apparently random and contradictory events to show itself. Other readers found beauty in much larger play – such 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

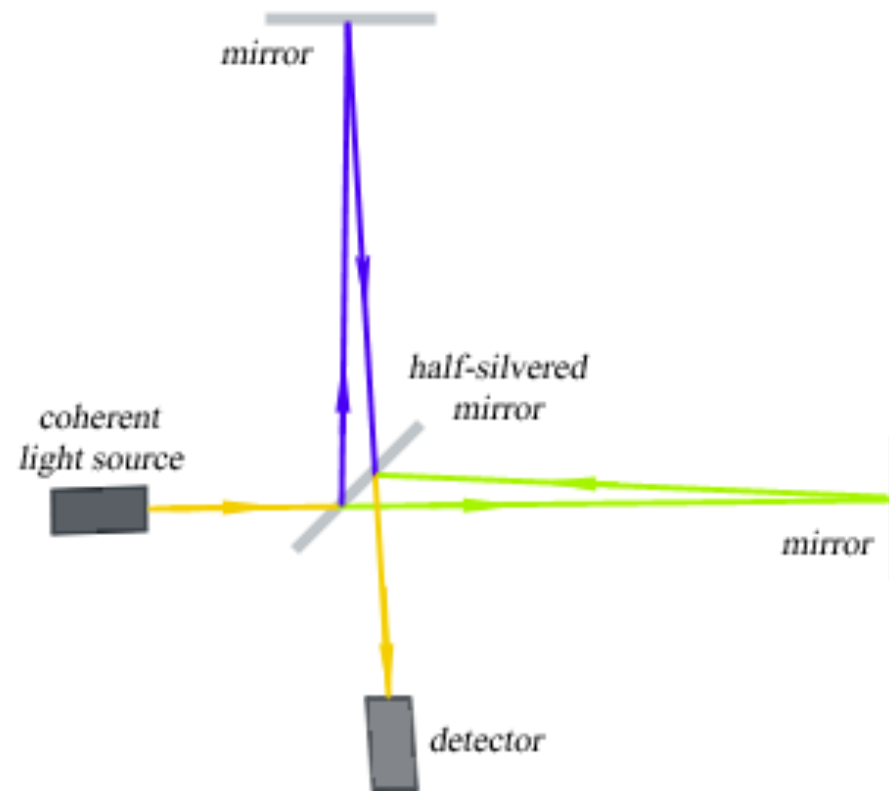


2 fenditure: onde d'acqua



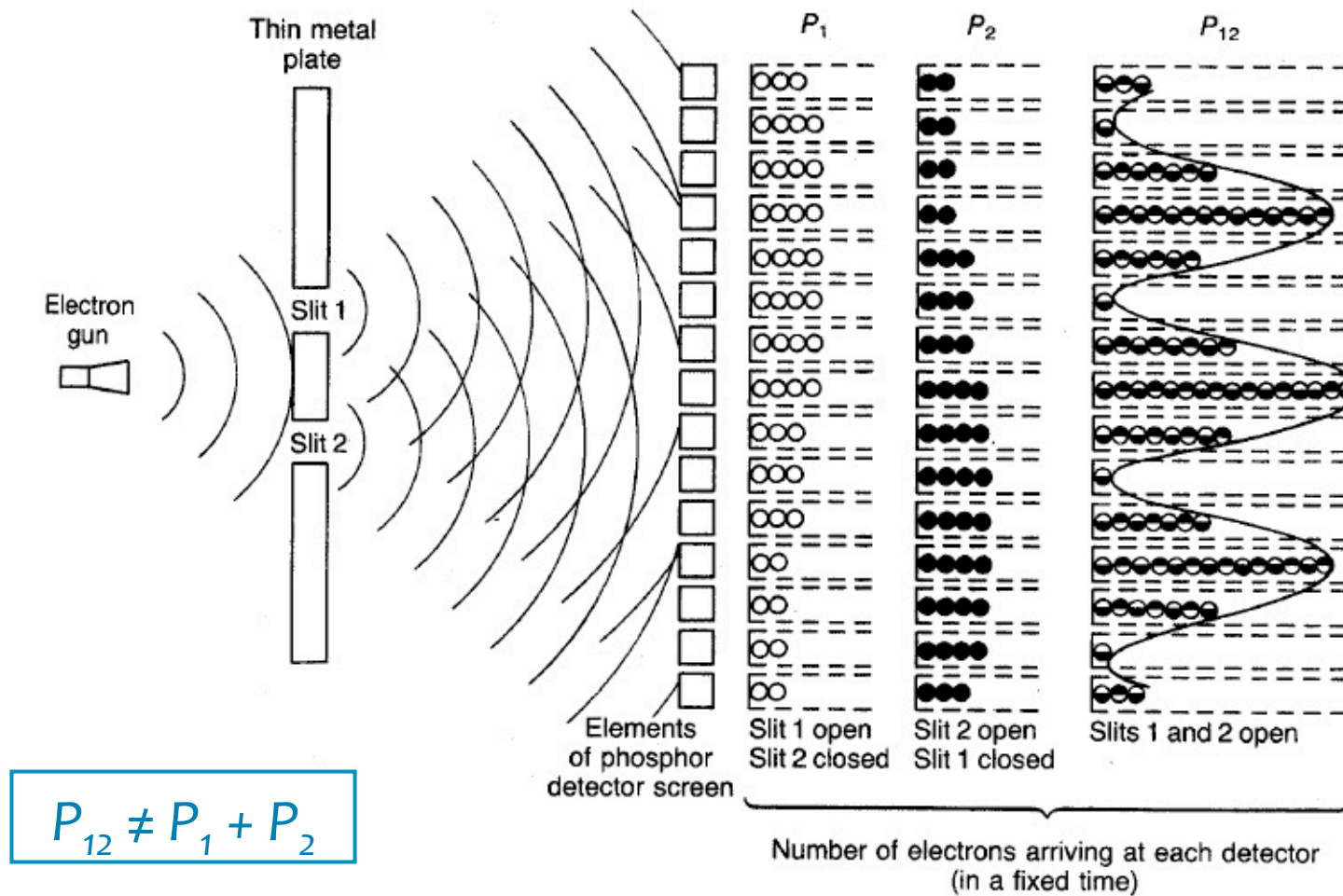
2 fenditure: luce

... anche la luce si comporta come un'onda



interferometro di **Michelson**

2 fenditure: elettroni



... 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)

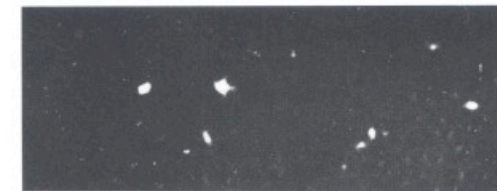
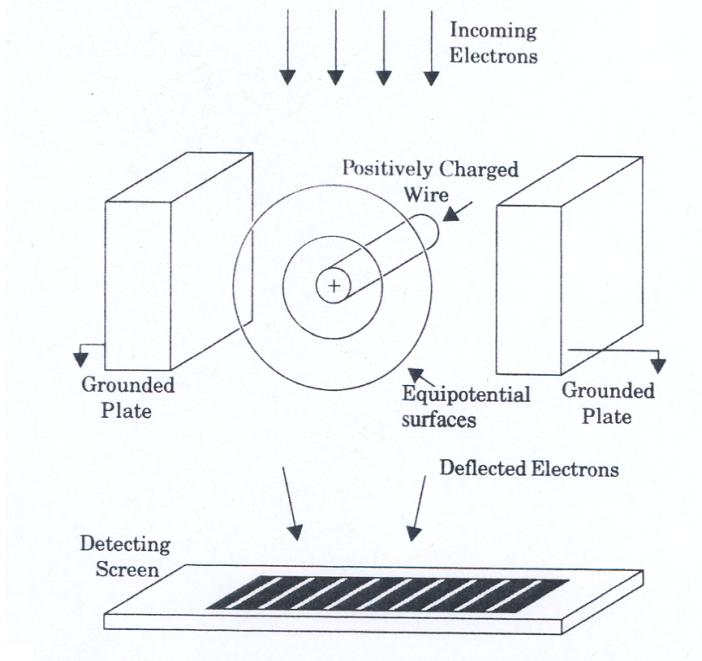
NO: gli elettroni arrivano interi sullo schermo
(lo si vede inviando un elettrone alla volta)

- 2) teoria “dell’ingorgo”: moltissimi elettroni in gioco → elettroni che attraversano una fenditura collidono con quelli che attraversano l’altra

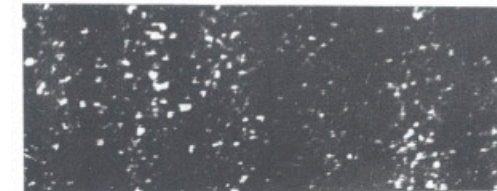
NO: la figura d’interferenza permane anche
con un solo elettrone nell’apparato

2 fenditure: elettroni

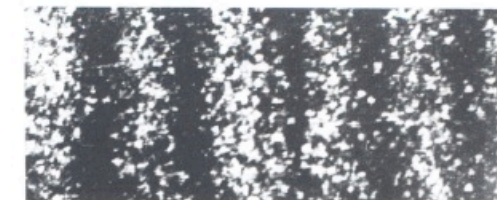
A. Tonomura et al. American Journal of Physics **57**, 117 (1989)



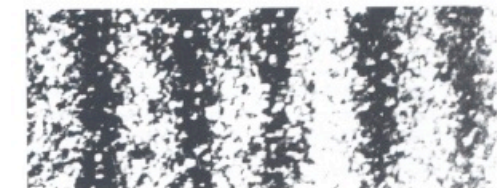
0.02 s



10 s



60 s



120 s

... 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)

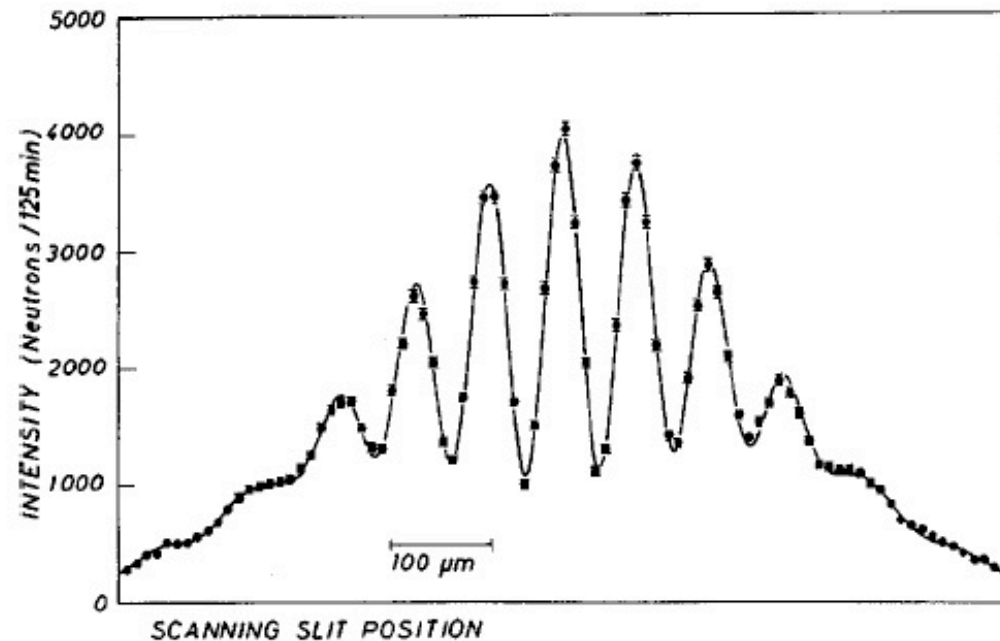


FIG. 1. A double-slit diffraction pattern measured with very cold neutrons with a wavelength of 2 nm corresponding to a velocity of 200 ms^{-1} . The two slits were 22 μm and 23 μm wide, respectively, separated by a distance of 104 μm . The resulting diffraction angles were only of the order of 10 μrad , 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)

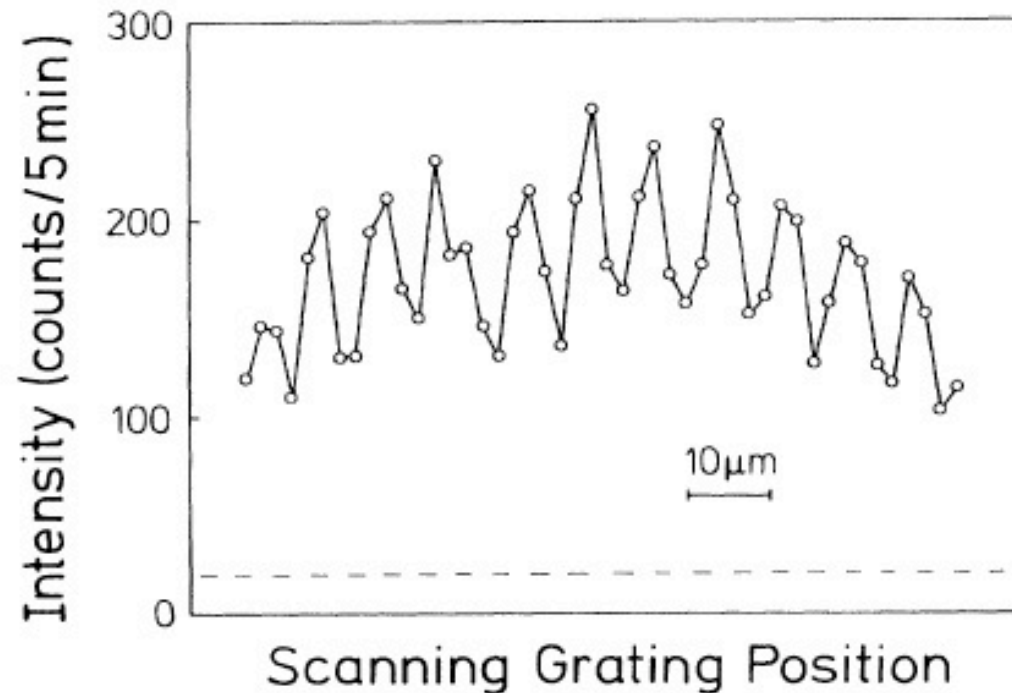


FIG. 5. Atomic density profile, monitored with the 8- μm grating in the detector plane, as a function of the lateral grating displacement. The dashed line is the detector background. The line connecting the experimental points is a guide to the eye.

2 fenditure: fullerene

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

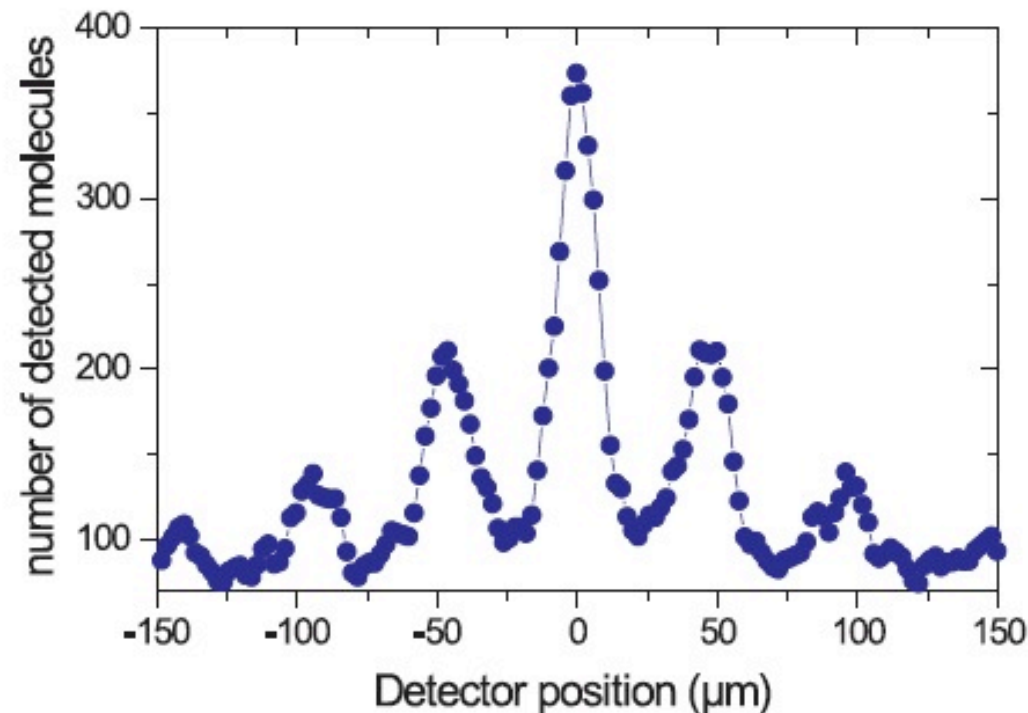
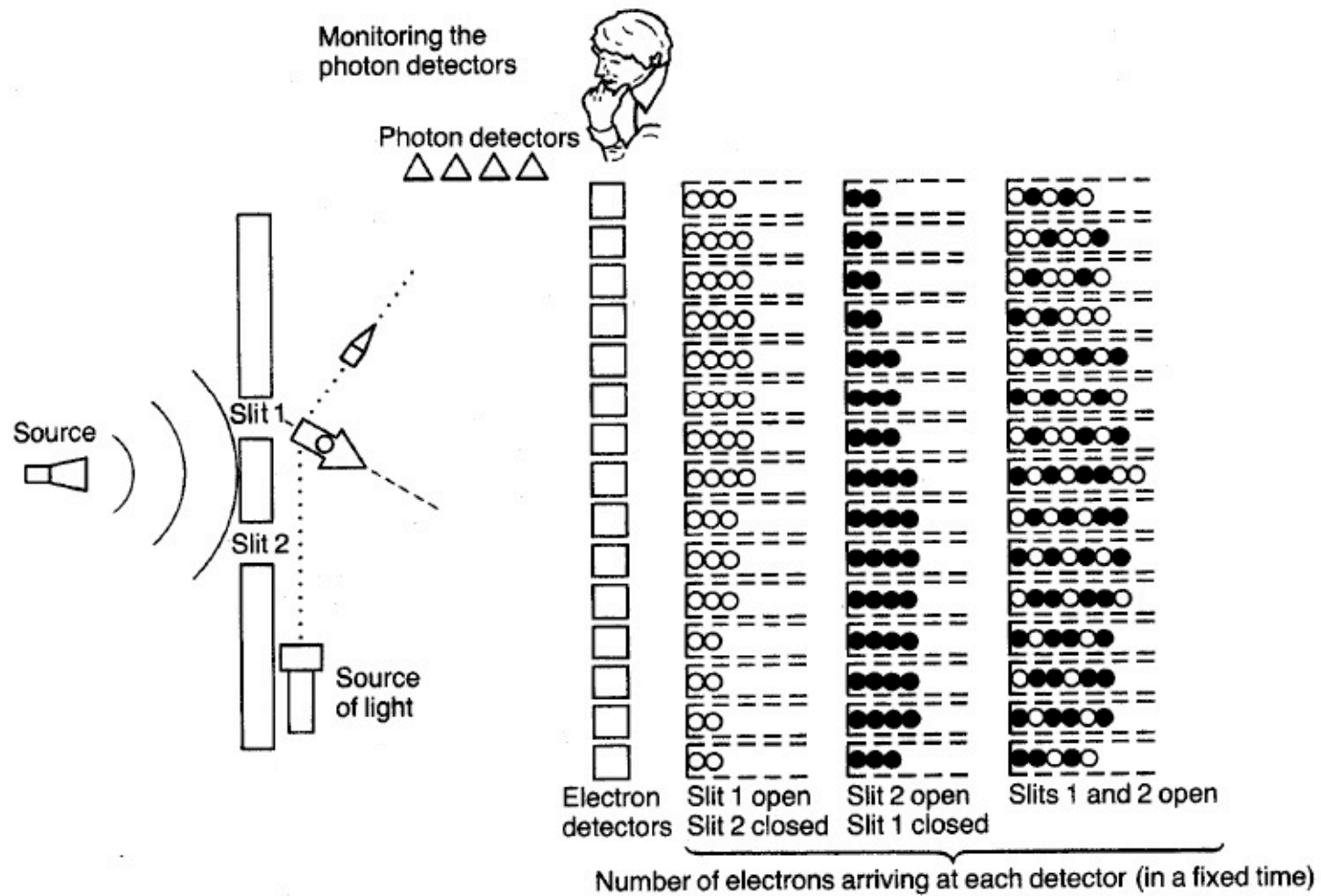


FIG. 2. Interference pattern of C-60 molecules behind a 100 nm grating, which proves the absence of thermal decoherence in the experiment [6], even for molecules with internal temperatures as high as 900 K (M. Arndt, O. Nairz, and A. Zeilinger, in preparation).

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

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \begin{array}{l} \rightarrow \text{costante di Planck} \\ \rightarrow \text{impulso particella (mv)} \end{array}$$

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

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, ovvero 84 kg che si muovono a 5 km/h

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

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

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**, $\ll$ della scala di distanze caratteristica dei processi che li coinvolgono

Onde di materia

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

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



$$\lambda \simeq 2.4 \times 10^{-10} \text{ m}$$

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



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)

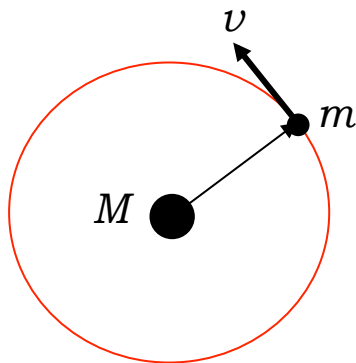
- ✓ costanza delle proprietà atomiche;
- ✓ cambiamento radicale delle proprietà tra atomi contigui nella tabella di Mendeleev

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

$$\begin{aligned}\text{N.B. } - [h] &= [E T] = [M L^2 T^{-2} T] \\ &= [M L^2 T^{-1}] = [M L T^{-1}] \times [L] \\ &= \text{impulso} \times \text{distanza}\end{aligned}$$



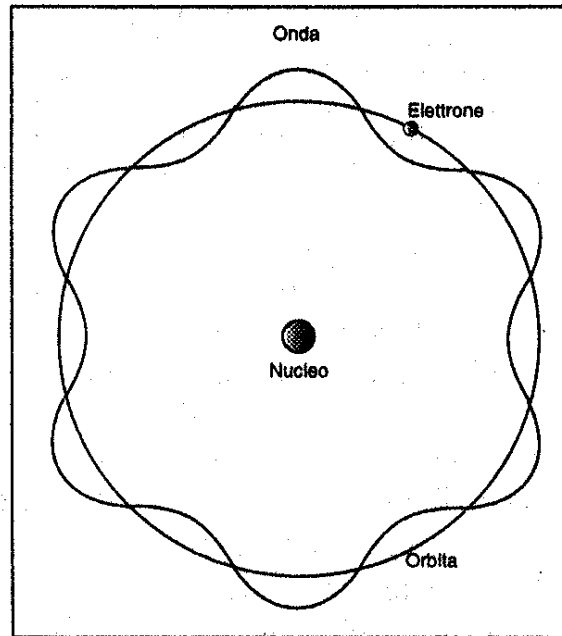
$$\boxed{m v_n r_n = n \hbar} \quad (n \in N) \quad (1)$$

$$\longrightarrow r_n = n \frac{h}{2\pi} \frac{1}{m v_n}$$

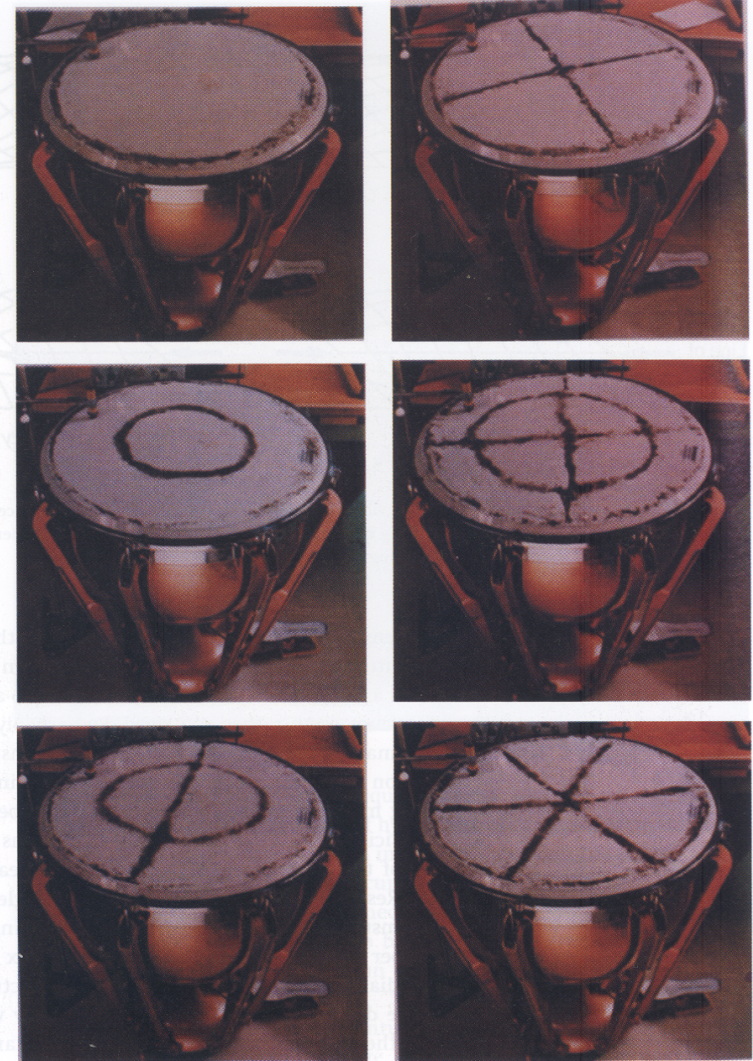
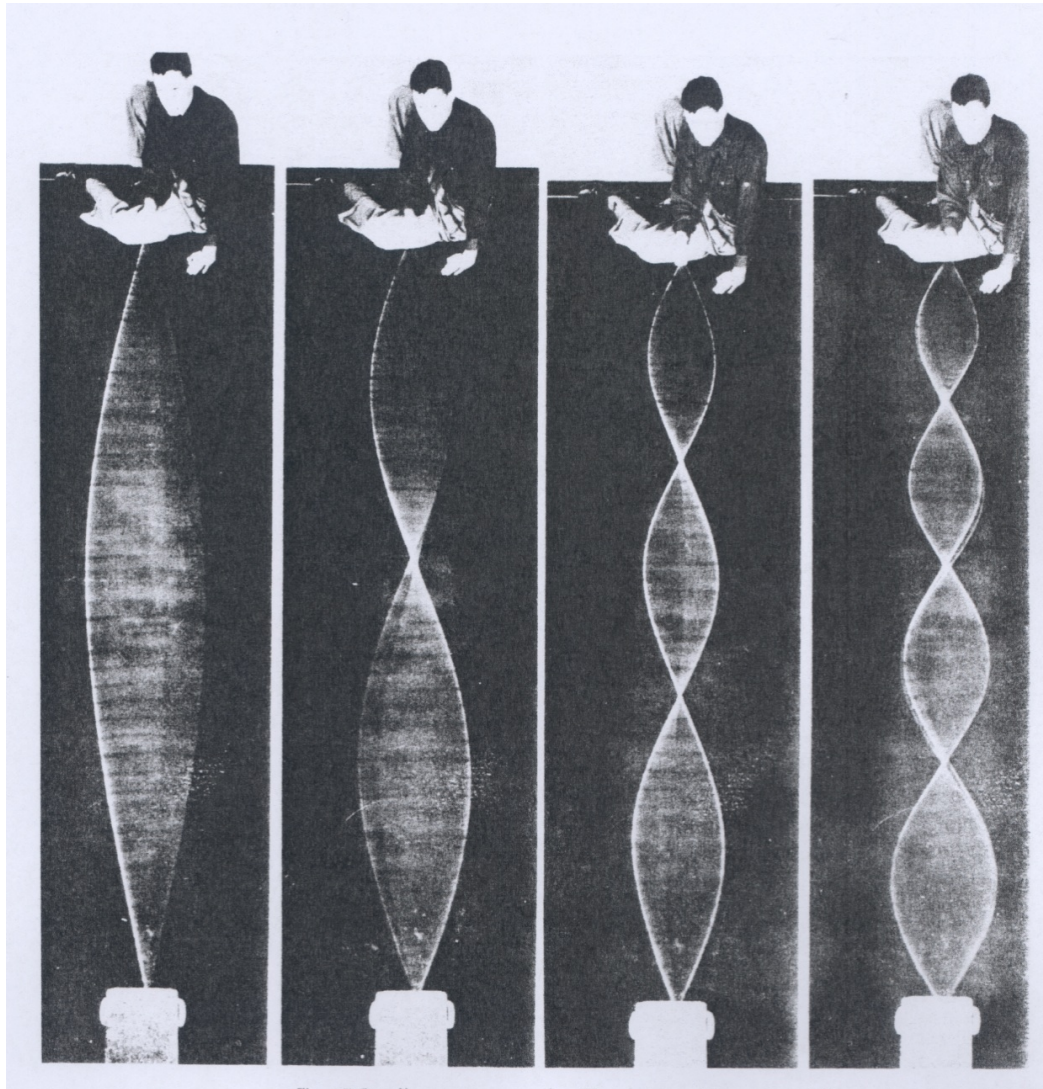
$$\text{de Broglie} \rightarrow r_n = \frac{n}{2\pi} \lambda \longrightarrow \boxed{2\pi r_n = n \lambda}$$

Atomo di Bohr

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

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

➡ $(m v_n)^2 = m k_e \frac{e^2}{r_n} \stackrel{(1)}{=} n^2 \frac{\hbar^2}{r_n^2}$

ovvero: $r_n = n^2 a_0 \quad (3) \quad a_0 = \frac{\hbar^2}{k_e e^2 m} = 0.53 \text{ \AA}$
(raggio di Bohr)

Atomo di Bohr

Energia dell'elettrone che percorre n -esima orbita

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

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

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



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)

$$P_1 = |\psi_1|^2$$

$$P_2 = |\psi_2|^2$$

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



$$P_{12} \neq P_1 + P_2$$

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

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

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 imprevedibile: 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

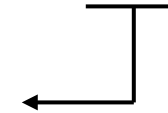
inspiegabili nell'ambito della fisica classica: l'energia di un'onda e.m. dipende dall'intensità, non dalla frequenza ν

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

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{la formula di de Broglie è di Einstein !!})$$



rafforzato lo status particellare della luce: **fotoni**

Atomo di Bohr

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

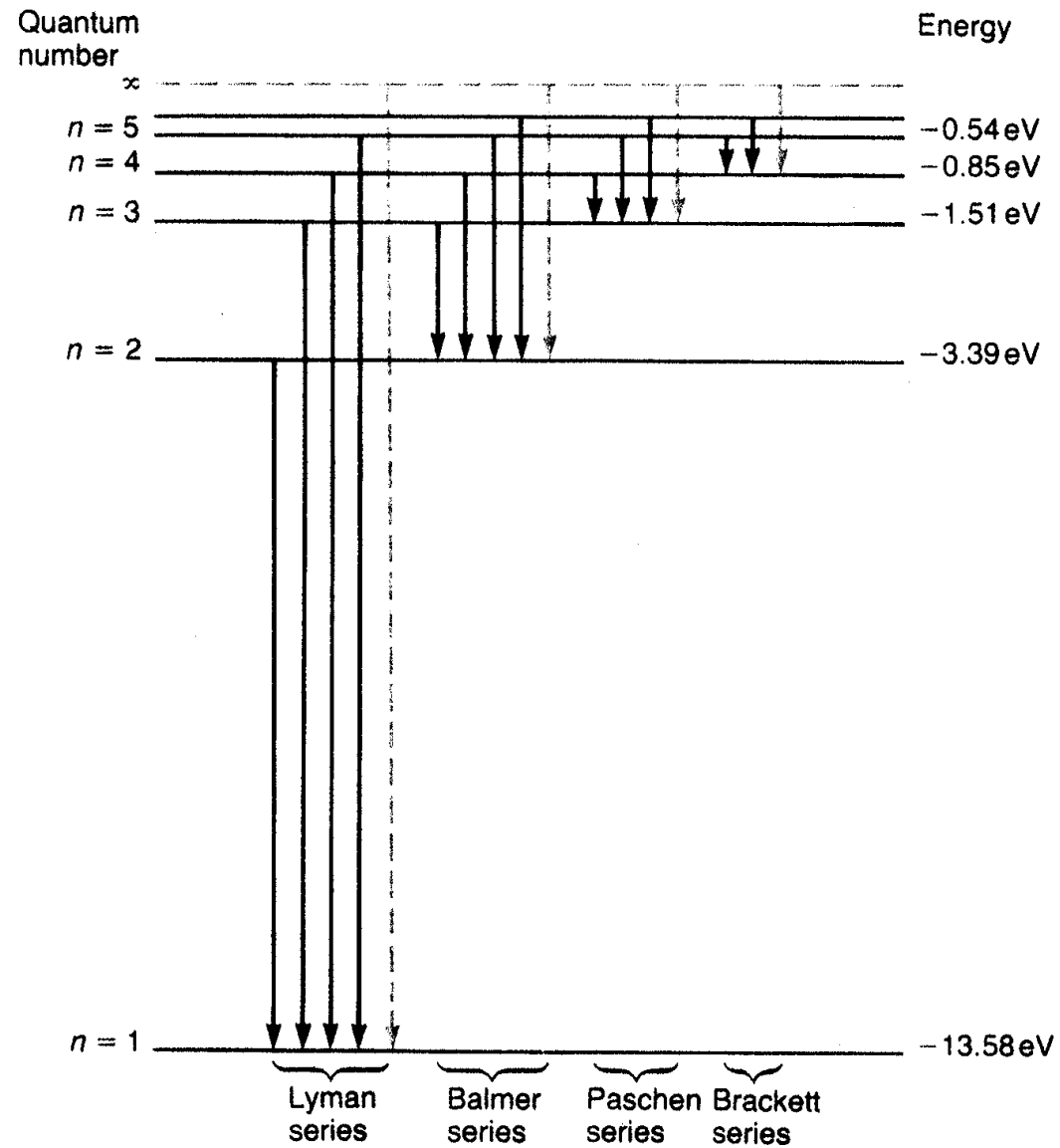
$$\begin{aligned} E_{nm} &= E_n - E_m \\ &= \left(-\frac{1}{2n^2} + \frac{1}{2m^2} \right) \frac{k_e e^2}{a_0} \end{aligned}$$

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

434.01 nm

486.074 nm

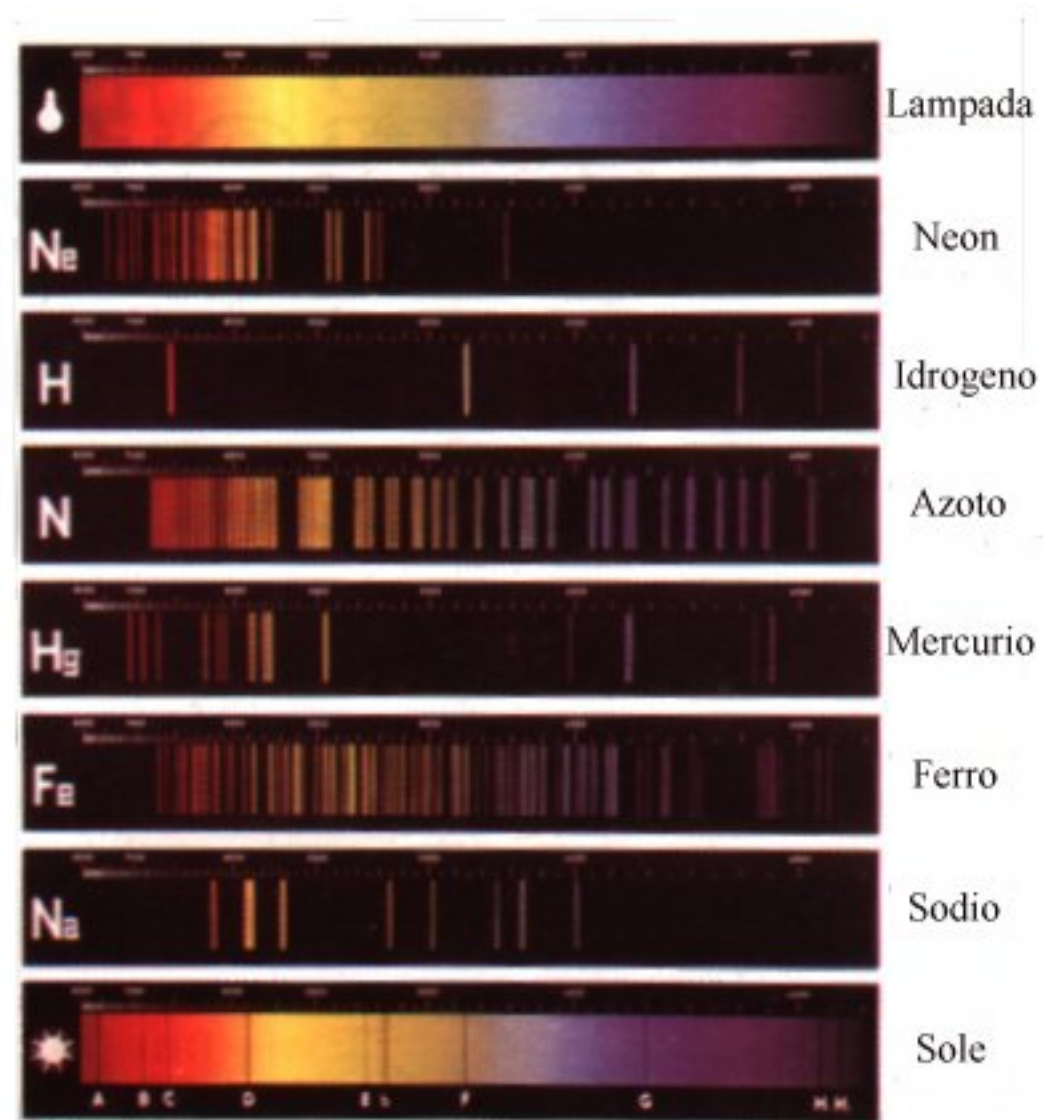
656.21 nm



410.12 nm

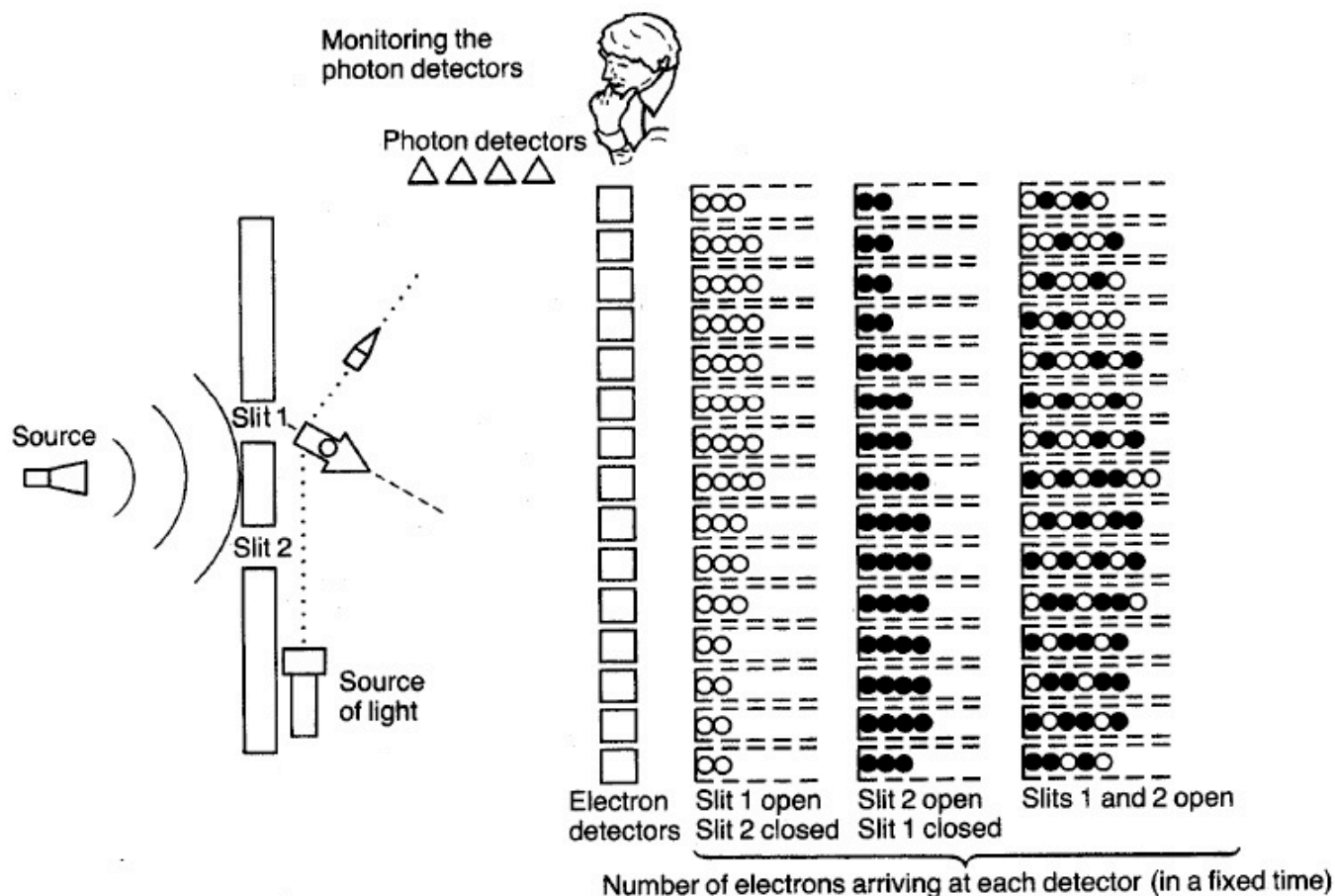


Spettri atomici



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 **ridurre l'impulso** $p \rightarrow$ diminuire (aumentare) $v(\lambda)$

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

per $\lambda \gg d$ la perturbazione introdotta dal fotone è trascurabile $\rightarrow$ 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

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 effetto introdotto da 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 dà il caso che non sappiamo qual è



casualità soggettiva



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



casualità oggettiva

dicotomia non astratta: figura d'interferenza

Principio d'Indeterminazione

- Concetto di traiettoria

Fisica classica → richiede conoscenza simultanea di posizione e velocità → impossibile da definire nella teoria quantistica

... risultati dell'esperimento delle 2 fenditure sono così stupefacenti perché pretendiamo di applicare concetto classico di traiettoria anche dove non è possibile.

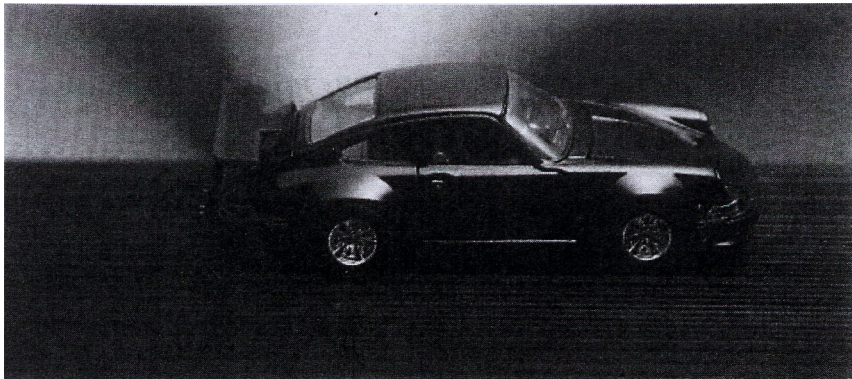
- Modello atomico di Rutherford

elettroni finiscono sul nucleo, ovvero confinati in regione spaziale di dimensioni $\approx 0 \rightarrow$ impulso $\rightarrow \infty$

Indeterminazione Energia-Tempo

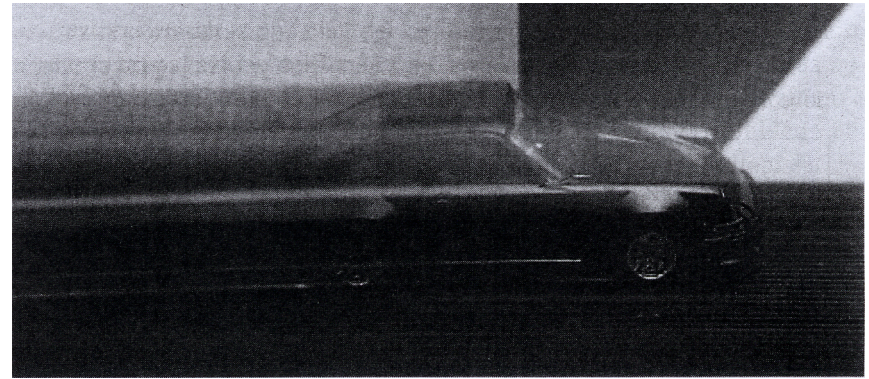
$$\Delta E \Delta t \geq h$$

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



piccolo tempo d'esposizione

forma **SI** - velocità **NO**



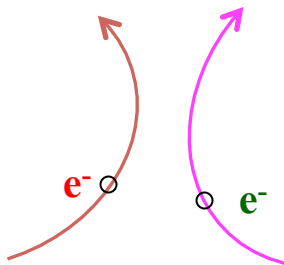
grande tempo d'esposizione

forma **NO** - velocità **SI**

Indeterminazione Energia-Tempo

Fondamentale per lo studio delle interazioni tra le particelle:
bosoni vettori $\rightarrow$ particelle virtuali $\rightarrow$ incredibili proprietà
del vuoto quantistico

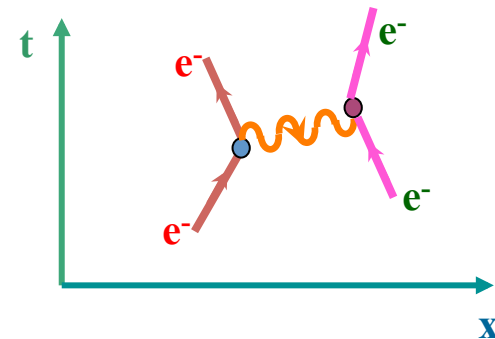
Fisica Classica



e^- si avvicinano $\rightarrow$ mutua repulsione
 $\rightarrow$ rallentati e deviati

azione a distanza

Fisica Quantistica



● e^- emette $\gamma \rightarrow$ cambia velocità

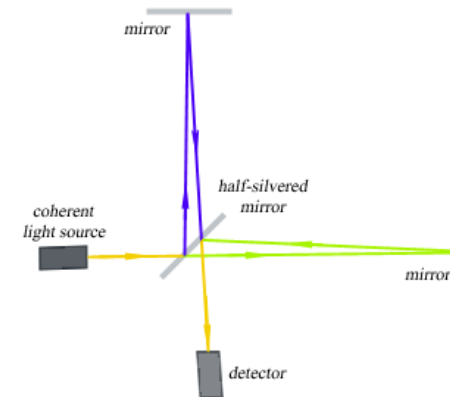
● e^- assorbe $\gamma \rightarrow$ cambia velocità

interazione = scambio del γ

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)

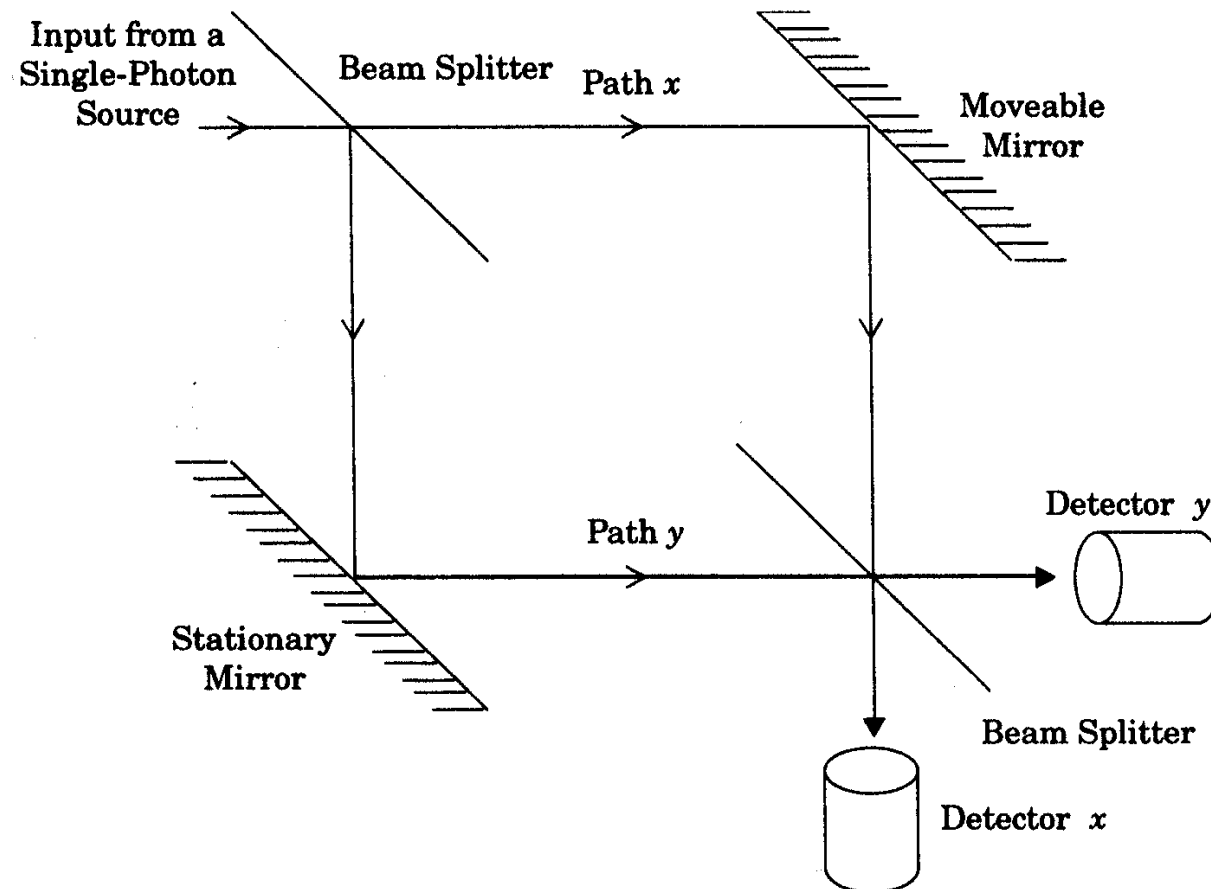
Cosa osserviamo? I rivelatori non producono mai segnale allo stesso istante: **il fotone o segue il ramo → o quello ↑**



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

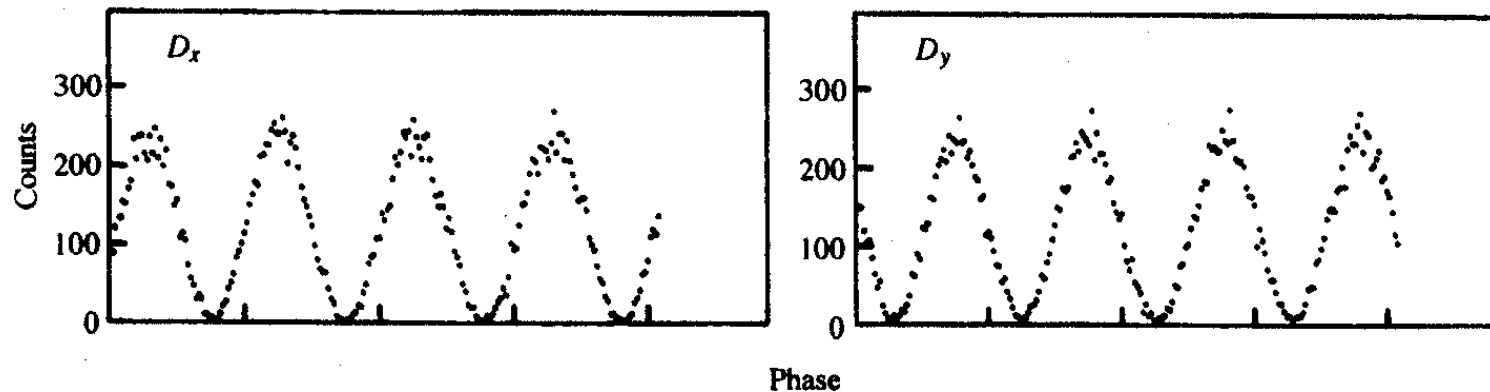
... ancora un esperimento con doppia fenditura:
l'interferometro **Mach-Zender**



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

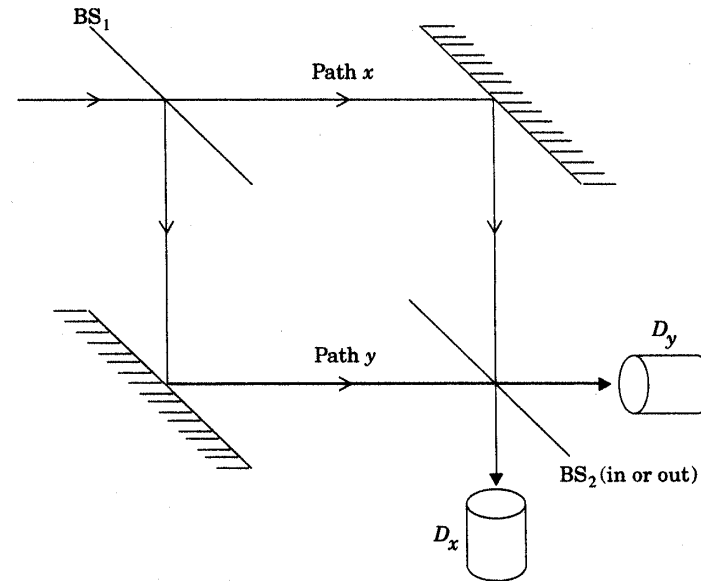
Teoria della cospirazione: il fotone (ma anche, l'elettrone, il neutrone, l'atomo ...) *riconosce il tipo di apparato sperimentale costruito e aggiusta di conseguenza la sua natura* → in un apparato pensato per stabilire per quale ramo (fenditura) è passato si comporta come particella; in uno realizzato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



- **BS₂ assente** → D_x e D_y registrano quale ramo è stato percorso dal fotone: $x \rightarrow D_x$, $y \rightarrow D_y$
- **BS₂ 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

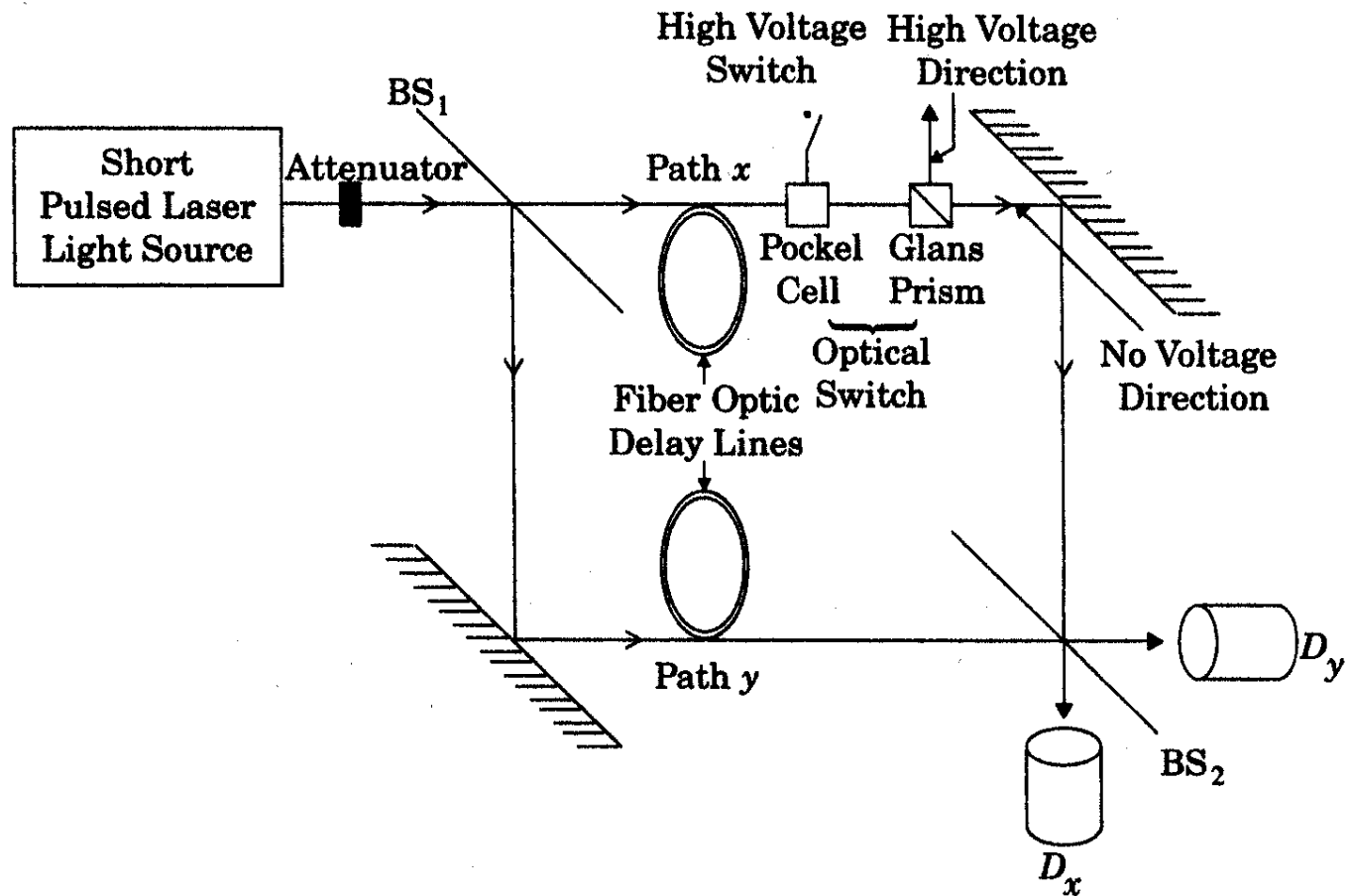
Secondo la teoria della cospirazione ciascun fotone si comporta come una particella (BS_2 è inizialmente disinserito) e sceglie uno dei 2 rami con probabilità $1/2$.

La successiva inserzione di BS_2 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

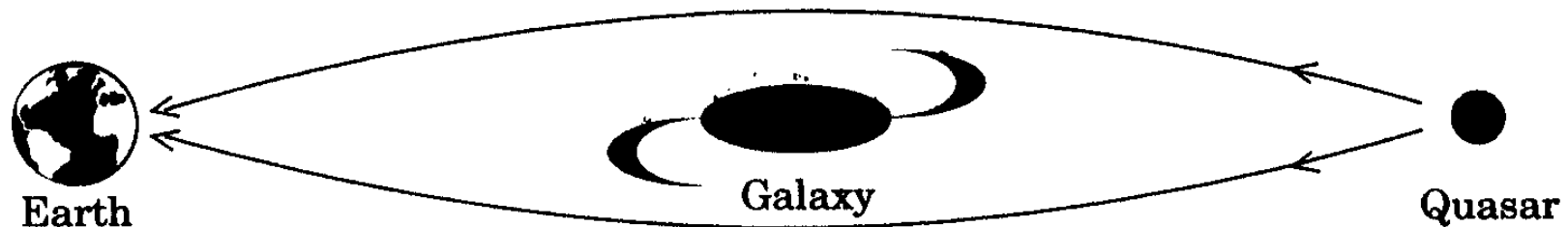
Risultato sperimentale:

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 aveva passato BS_1) lo si rimuove, l'interferenza non è mai visibile → incredibile!

... 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 e 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 ...*”

Copenhagen

Principio di Complementarità (Bohr) $\oplus$ Relazioni d'Incertezza (Heisenberg) $\rightarrow$ interpretazione di Copenhagen

1. Heisenberg: impossibile conoscere posizione e impulso di una particella a causa del disturbo dell'apparato misura
 2. Bohr: posizione e impulso di una particella sono proprietà complementari, ovvero non possono essere misurate dallo stesso apparato
- $\rightarrow$ proprietà dei sistemi quantistici non esistono indipendenti dall'apparato; piuttosto, i valori ottenuti in una misura sono creati dall'apparato con probabilità per i risultati possibili determinati dalla f. d' o. Ψ , che influenza e viene influenzata dall'apparato stesso (origine del salto quantico)

Paradosso della Misura

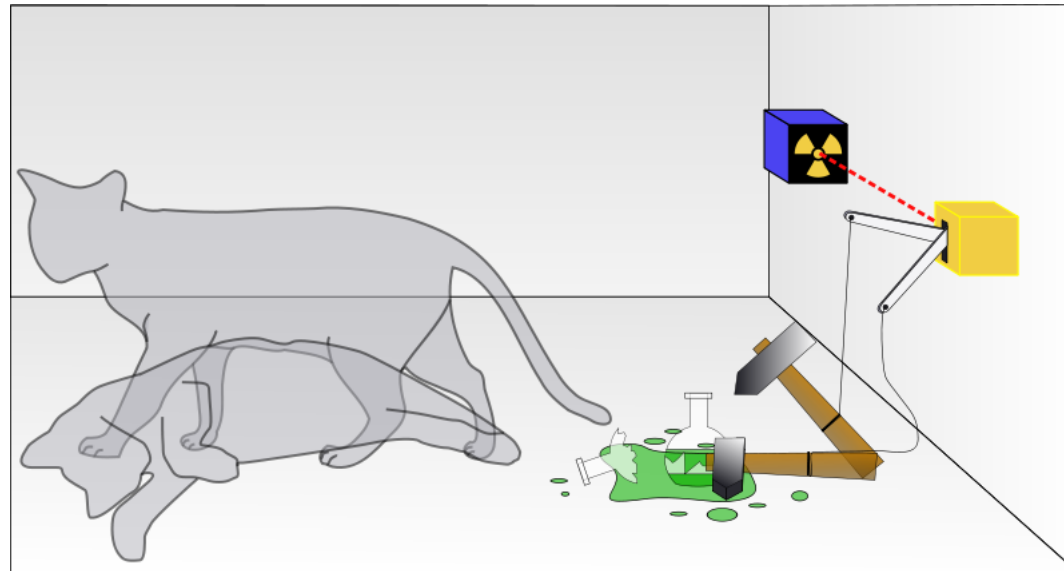
Sistema quantistico può esistere in una sovrapposizione di diversi stati quantistici → processo di misura fa collassare la sovrapposizione in uno **stato classico** (cioè che può essere definito per mezzo dello stato di un rivelatore classico) → soltanto dopo la misura possiamo parlare di sistema quantistico 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 impedisce alla irrealtà microscopica di infettare il mondo macroscopico → paradosso del gatto



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

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

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 ognuna 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?

Bell: è la memoria - un fenomeno del presente - a darci l'impressione di continuità → “... *qualora [questa teoria] fosse presa sul serio sarebbe difficile prendere sul serio qualsiasi altra cosa*”

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



17/29 hanno vinto il Nobel

Bohr vs Einstein

Bohr

campione dell'interpretazione di Copenhagen

Prima di misurarla, la particella non possiede una posizione definita (nel senso consueto del termine); tutto ciò che possiamo sperare di conoscere è la probabilità che essa si trovi in un certo punto.

Questo non significa che la particella ha una posizione che noi non riusciamo a conoscere se non dopo averla misurata: in realtà, prima (e dopo) che sia effettuata la misura, essa ha solo posizioni potenziali
→ atto di misura partecipa profondamente alla creazione della realtà osservata

Bohr vs Einstein

Bohr

ogni speranza di ottenere una rappresentazione unificata della realtà oggettiva deve essere abbandonata; la teoria quantistica fornisce predizioni circa i risultati di una misura, ma, contrariamente alle precedenti teorie, non fornisce descrizione di “come la natura determina” il risultato stesso.

La stessa volontà di ricercare una tale descrizione è sbagliata e ingenua. Tutta la comprensione umana si esplica in termini di concetti classici modellati sull'esperienza diretta, ma il mondo quantistico è non-classico e non può essere compreso nei vecchi termini, nemmeno in linea di principio.

Bohr vs Einstein

Einstein

(fin dall'inizio) a disagio con i salti quantici: violano la località imposta dalla Relatività Speciale: un evento non può essere influenzato da eventi con cui non ha relazione causale.

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

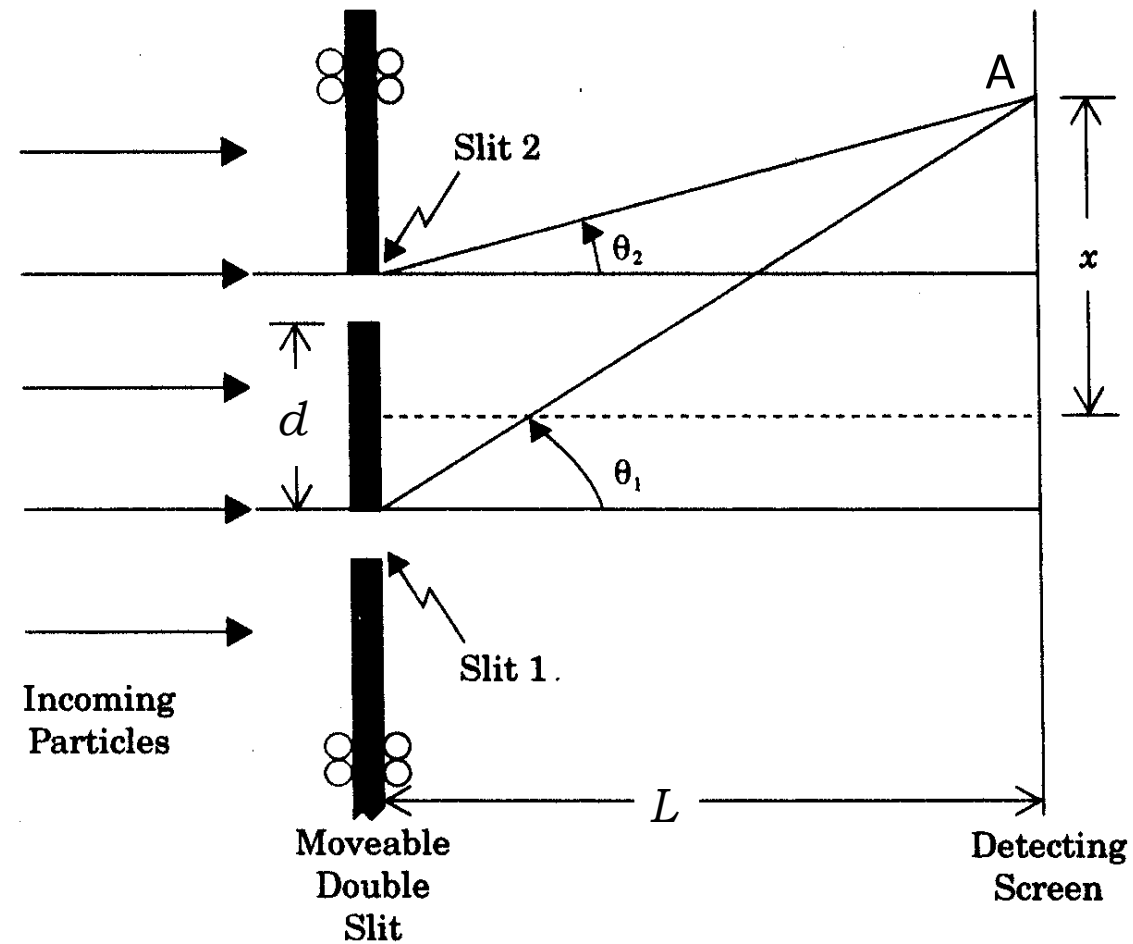
Einstein

in realtà, ogni volta che cerchiamo di stabilire dove si trova la particella la troviamo sempre in una posizione definita $\rightarrow$ f.d'o. è solo un surrogato temporaneo di una (ancora ignota) descrizione più precisa (che prevede 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? Una teoria fisica dovrebbe fornirci questa informazione senza far uso della probabilità, l'elemento veramente più difficile da accettare (*“credete veramente che la Luna non si trovi lassù se nessuno la guarda?”*)

Bohr vs Einstein

Einstein: ancora le 2 fenditure, ma mobili (1927)



Bohr vs Einstein

particella che arriva in A: nell'attraversare una delle fenditure riceve spinta verso l'alto → schermo rincula verso il basso, **più** o **meno** a seconda che la particella passi per il foro **1** o **2**

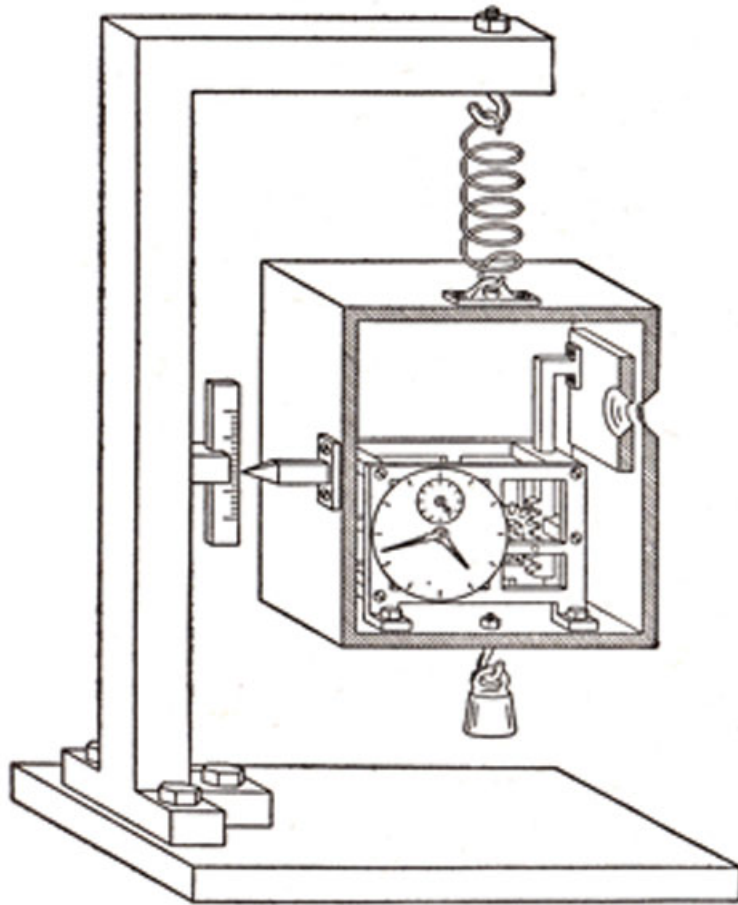
→ misura dell'entità del rinculo consente di stabilire per quale fenditura è passata la particella, mantenendo la figura d'interferenza

Bohr: dimostra che incertezza nella misura dell'impulso di rinculo dello schermo si traduce, tramite il **P.d'I.**, in una incertezza nella posizione della fenditura **sufficiente a cancellare l'interferenza**



... il primo round se lo aggiudica **Bohr**

Bohr vs Einstein



(disegno di Bohr)

Einstein: scatola di luce (1930)

scatola a pareti perfettamente riflettenti all'interno della quale è intrappolata una certa quantità di luce, che contribuisce al peso della scatola ($E = mc^2$); ad un dato istante, da un'apertura esce un solo fotone la cui energia è determinata misurando il peso della scatola → determinate con precisione arbitraria energia e istante d'emissione del fotone:

contraddizione con $\Delta E \Delta t > h$

come risponde Bohr? dimostra che Einstein nell'elaborare l'argomento ha dimenticato la Relatività Generale ...

EPR

... Einstein non demorde e nel 1935 ci riprova ...

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

nell'articolo viene proposto un *gedanken experiment* che dovrebbe dare sostegno all'idea che esiste una "realtà obiettiva", indipendente dalla misura.

EPR

EPR partono dalla definizione di **elemento della realtà fisica**:

“se, senza disturbare in alcun modo un sistema, possiamo predire con certezza ... il valore di una quantità fisica, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a tale quantità”

Processi fisici che generano due particelle dotate di proprietà correlate (ad esempio, $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$) $\rightarrow$ particelle prodotte si allontanano in direzioni opposte con velocità, in modulo, uguali; anche posizioni delle particelle sono strettamente correlate.

EPR dimostrano che ogni particella ha, in realtà, una posizione e una velocità definite in qualsiasi momento.

EPR

Misura posizione di una particella → conoscenza indiretta posizione dell'altra. Poiché non abbiamo interferito con la **seconda** particella, la sua posizione doveva essere quella anche prima della misura: noi l'abbiamo **determinata solo in modo indiretto**.

Avremmo potuto scegliere di misurare la velocità della **prima** particella → indirettamente nota la velocità della seconda, senza alterarla. Nessuna azione sulla seconda particella → la sua velocità era la stessa già prima.

Mettendo insieme le due misure - **quella effettuata e quella che avremmo potuto effettuare** - EPR concludono che la **seconda** particella ha posizione e velocità definite in qualsiasi momento.

EPR

NB - Nell'esperimento EPR, se misuriamo la posizione alteriamo la velocità e viceversa. Se non conosciamo entrambe le proprietà della prima particella, non conosciamo nemmeno quelle della seconda → **no conflitto con il Principio d'Indeterminazione.**

EPR ammettono di non poter misurare simultaneamente la posizione e la velocità di una particella. Ciò nonostante (punto fondamentale), anche senza stabilire posizione e velocità di entrambe le particelle, EPR dimostrano che ognuna ha posizione e velocità definite.

Per EPR una teoria non può dirsi completa se non è in grado di **descrivere tutti gli elementi di realtà**, che è qualcosa di più dei dati letti sui rivelatori, o della somma di tutte le osservazioni effettuate in un dato momento: quando nessuno “*guarda la Luna*”, questa è pur sempre un elemento della realtà.

EPR

L'argomentazione di EPR si basa su un presupposto importante: se in un certo momento possiamo determinare una proprietà di A conducendo una misura su B, spazialmente distante dal primo, allora A possiede proprietà in questione.

Fondamento logico semplice: la misura viene effettuata **qui** mentre l'altro oggetto si trova **là** → **Principio di Località**: possiamo influenzare in modo diretto solo le cose che ci sono vicine, ovvero **sono possibili solo azioni “locali”**.

Idea trae origine dalla constatazione che se la misurazione di A è in grado d'influenzare B, ciò non può che avvenire con un ritardo almeno uguale al tempo impiegato dalla luce a coprire la distanza tra A e B.

EPR

L'alternativa sarebbe di rendere la realtà della seconda particella dipendente dal processo di misura eseguito sulla prima. Anche se non la escludono logicamente, EPR disdegnano questa non-località e suggeriscono, invece, l'incompletezza della MQ.

Paradosso scompare se la MQ viene integrata con delle variabili nascoste (VN). In EPR, queste corrisponderebbero alle posizioni e agli impulsi delle particelle → correlazioni tra particelle come quelle esibite da sistemi classici (guanti, gemelli omozigoti, ...), derivanti da una comune origine → esistenza di variabili il cui valore è predeterminato.

EPR

qualora fosse possibile misurare il valore di queste variabili nascoste si riuscirebbe a predire il risultato di un certo esperimento con certezza.

Nella MQ tali variabili sono inaccessibili all'osservazione.

La conclusione dell'articolo EPR è all'insegna dell'ottimismo

quantities.

Returning now to the general case contemplated in Eqs. (7) and (8), we assume that ψ_k and φ_r are indeed eigenfunctions of some non-commuting operators P and Q , corresponding to the eigenvalues p_k and q_r , respectively. Thus, by measuring either A or B we are in a position to predict with certainty, and without in any way

the second system in any way. No reasonable definition of reality could be expected to permit this.

While we have thus shown that the wave function does not provide a complete description of the physical reality, we left open the question of whether or not such a description exists. We believe, however, that such a theory is possible.

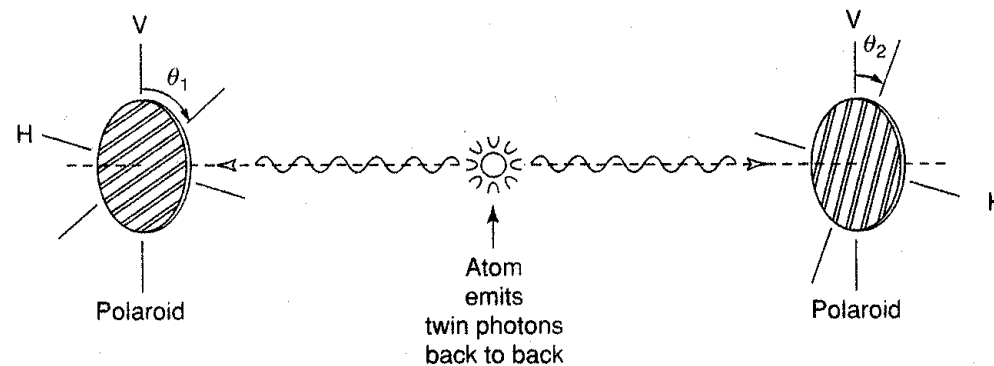
Bohr

Bohr risponde, ma la sua argomentazione è di difficile lettura. Semplicemente ignora la configurazione sperimentale proposta da **EPR** e reitera la sua difesa della consistenza della **MQ**, invocando il disturbo sul sistema da parte dell'apparato di misura. Argomenti adesso irrilevanti: l'apparato che misura la prima particella non può in alcun modo disturbare quello che misura la seconda.

Quando, alla fine, passa a considerare l'esperimento **EPR**, **Bohr** s'impegna a provare la consistenza della **MQ** utilizzando la complementarità, che impedisce l'esecuzione simultanea delle misure di posizione e impulso. Altro argomento irrilevante: **EPR** non pongono la questione della consistenza della **MQ**, ma della sua completezza.

EPR (Bohm)

versione di **Bohm** dell'esperimento **EPR**: sorgente che emette due fotoni in direzioni opposte



- i due polaroid in direzione **V** (**H**) $\rightarrow$ entrambi i fotoni passano
- un polaroid nella direzione **H** e l'altro nella direzione **V** $\rightarrow$ mai vediamo entrambi fotoni passare

si osservano solo coppie **VV** e **HH**, mai **VH** e **HV**

EPR (Bohm)

→ misura della polarizzazione di uno dei fotoni consente di misurare quella dell'altro; misure indipendenti → EPR: questo deve aver sempre avuto la polarizzazione appena rivelata.

NB - avremmo potuto scegliere di effettuare la misura lungo asse generico: **ciascun fotone ha una polarizzazione definita lungo qualsiasi asse**, anche se noi siamo in grado di determinarla per un solo asse alla volta.

MQ dimostra che le particelle acquisiscono in modo casuale una data proprietà quando eseguiamo una misura, ma **tale casualità può avere delle correlazioni spaziali**.

Coppie di particelle adeguatamente preparate (**entangled**) non acquisiscono le proprietà in modo indipendente: sono “dadi” **che, lanciati in due luoghi diversi, segnano punteggi casuali ma identici**.

Entanglement

Particelle **entangled**, anche se spazialmente distanti, non si comportano autonomamente l'una dall'altra: misura della polarizzazione di uno dei due fotoni “obbliga” l'altro ad assumere la stessa polarizzazione.

EPR (Bohm): ciascun fotone in sovrapposizione di **H** e **V**.
Misura polarizzazione del fotone di destra: **H** → collasso della sua f.d'o. nell'intero spazio con azzeramento istantaneo alternativa **V**. Collasso avviene ovunque, anche dove si trova il fotone in moto verso sinistra: si azzerava la componente **V** della sua f.d'o. → malgrado distanza tra i fotoni, la f.d'o. del fotone in moto verso sinistra risente **istantaneamente** di qualsiasi cambiamento nella f.d'o. di quello che si muove verso destra → influenza che si trasmette a **velocità > c**

Collasso quantistico

Ipotesi del collasso è molto utile per giustificare i risultati sperimentali, ma è **impossibile da dedurre dall'apparato matematico della MQ**: deve essere aggiunta “a mano”.

Non pochi dubbi: com'è possibile che quando eseguo misura su elettrone in DAFNE ne azzerò istantaneamente la f. d'o. sulla Luna? Certamente quando troviamo l'elettrone in DAFNE sappiamo che questo non può trovarsi sulla Luna, ma con quali meccanismi ciò avviene?

Com'è possibile che il collasso sia istantaneo? Conflitto con la **Relatività Speciale**? Sì, se le f. d'o. fossero come le onde d'acqua. Ma - obiettano da Copenhagen - **le f. d'o. non sono onde d'acqua**.

Collasso quantistico

La f.d'o. descrive la materia, ma non è un'entità materiale → limite della velocità della luce non agisce. Se la f.d'o. collassa in DAFNE, osservatore sulla Luna non riuscirà (con probabilità 1) a rivelare l'elettrone. Niente sulla Luna indica la variazione improvvisa della f. d'o. associata con la rivelazione elettrone in DAFNE. Fintanto che l'elettrone non si sposterà con $v > c$, non si avrà alcun conflitto con la RS.

No scambio d'informazione nella misura della polarizzazione dei fotoni: per ogni fotone che giunge al polaroid c'è uguale probabilità che esso lo passi o meno → due sequenze casuali di 0/1, ma identiche e di ciò ce ne accorgiamo solo confrontandole, cosa che può essere fatto solo con mezzi convenzionali (telefono, fax, e-mail, ...), più lenti della luce.

EPR vs RS

Quindi, (in apparenza) la misura della polarizzazione di un fotone influenza istantaneamente quella dell'altro, ma nessuna informazione viene scambiata tra i due: **la Relatività Speciale è salva.**

Soddisfatti? Molti, sì. Altri, invece, hanno la sensazione che ci sia ben altro sotto.

Resta il fatto che due particelle distinte, soggette alla casualità della **MQ**, si mantengono in un certo qual modo legate tra loro, tanto che qualsiasi cosa faccia la prima, la seconda la imita. Ciò sembra la prova lampante che qualcosa più veloce della luce è in grado di agire tra loro.

Chi ha ragione? No consenso sulla risposta.

Bell

1965 - Bell studia le correlazioni originate da condizioni classiche predeterminate (come per i guanti o i gemelli omozigoti) e stabilisce una disuguaglianza che è violata dalla MQ

Ancora esperimento EPR (Bohm), ma con polaroid con asse principale inclinato rispetto alla verticale → risultato dipende dagli angoli θ_1 e θ_2 d'inclinazione degli assi dei due polaroid

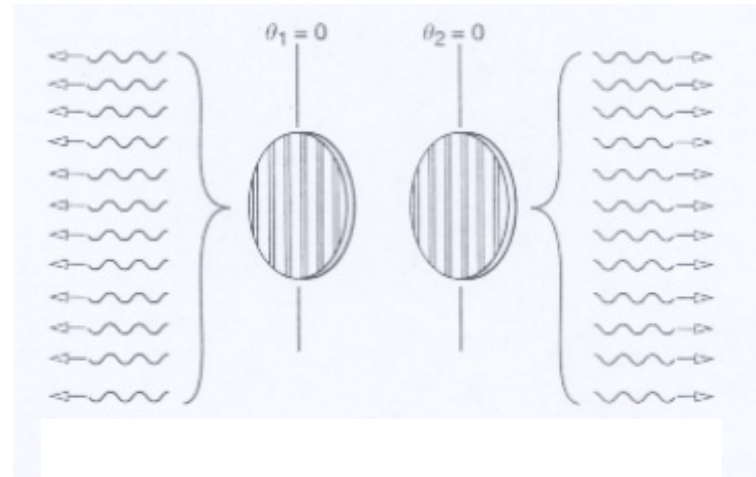
Variabile caratteristica dell'esperimento: numero di coppie di fotoni in disaccordo (un fotone passa e uno no), che studiamo come funzione di θ_1 e θ_2

$$N(\theta_1, \theta_2)$$

Bell

✓ $\theta_1 = \theta_2 = 0$

→ $N(0,0) = 0$



✓ ruotiamo uno o entrambi i polaroid → ipotesi:

- eventi in un polaroid non influenzano eventi nell'altro;
- esiste **correlazione classica**: fotoni emessi dalla sorgente con **polarizzazioni parallele** (ipotesi delle **VN** di **Einstein**);
- il fotone segue la **MQ**, cioè passa o viene assorbito da un generico polaroid con una certa probabilità.

Bell

12 coppie di fotoni con polarizzazione VV ; $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 30$

- numero di fotoni che passano polaroid 2 (P_2):

$$(\cos 30)^2 \times 12 = \frac{3}{4} \times 12 = 9$$

- tutti i fotoni che giungono su polaroid 1 (P_1) lo passano

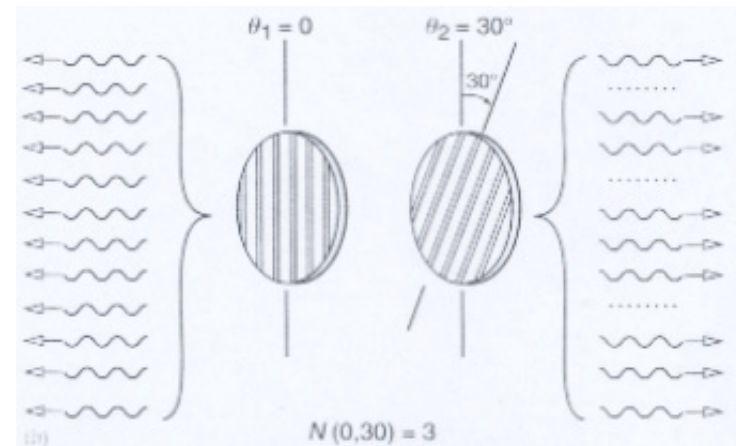
→ numero dei disaccordi = 3

ovvero:

$$N(0, 30) = (\sin 30)^2 \times 12$$

NB – situazione identica se $\theta_1 = -30$ e $\theta_2 = 0$

→ $N(-30, 0) = 3$



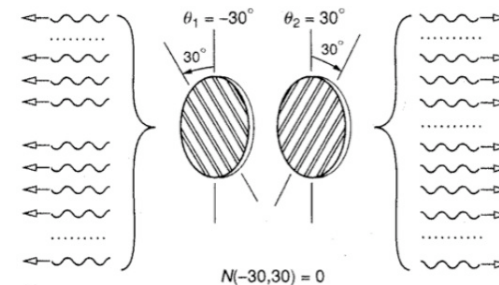
Bell

P_1 e P_2 ruotati: $\theta_1 = -30^\circ$ e $\theta_2 = 30^\circ \rightarrow$ P_2 ferma ancora 3 fotoni e lo stesso fa P_1 ; assorbimento statistico $\rightarrow$ fotoni possono appartenere alla stessa coppia oppure a coppie diverse

- ✓ fotoni appartengono alla stessa coppia

$\rightarrow$

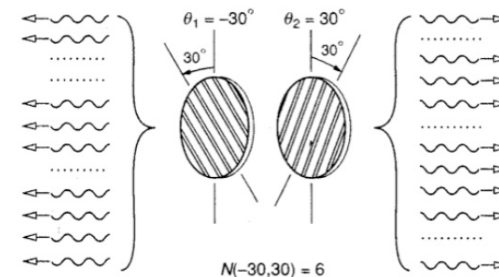
$$N = 0$$



- ✓ fotoni appartengono a coppia diversa

$\rightarrow$

$$N = 6$$



Bell

Esistenza di situazioni intermedie (alcuni fotoni assorbiti appartengono alla stessa coppia, altri no) → **numero disaccordi** compreso tra gli estremi **0** e **6**, ovvero, risulta:

$$N(-30, 30) \leq N(-30, 0) + N(0, 30)$$

disuguaglianza di Bell

Domanda: qual è la predizione della **MQ**?

Nel caso considerato, la **MQ** non predetermina la direzione di polarizzazione → ciò che conta è l'angolo di un polaroid rispetto all'altro, ovvero, $\theta = 60$ → quindi:

$$N(-30, 30) = (\sin 60)^2 \times 12 = \frac{3}{4} \times 12 = 9$$

Bell

Con argomenti analoghi, abbiamo:

$$N(-30, 0) = N(0, 30) = (\sin 30)^2 \times 12 = \frac{1}{4} \times 12 = 3$$

$$\rightarrow N(-30, 0) + N(0, 30) = 6$$

$$\rightarrow N(-30, 0) + N(0, 30) < N(-30, 30)$$

MQ viola disuguaglianza di Bell

Osservazioni sperimentali, eseguite tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 dal gruppo di **Aspect**, in accordo con la **MQ** → conferma della violazione della disuguaglianza di **Bell**

Bell

Anche se questi esperimenti non riproducevano perfettamente tutte le condizioni dell'esperimento EPR (i polaroid hanno efficienza di rivelazione < 1), tutti concordano nel ritenere che la MQ abbia superato la prova dei fatti

nessuna teoria a “variabili nascoste” (senza esplicita o implicita “azione a distanza”) può riprodurre i risultati sperimentali

Einstein avrebbe certamente preferito una teoria a variabili nascoste per il mondo microscopico, ma si sarebbe certamente rifiutato di accettare l'esistenza di una “spettrale” azione a distanza

... la realtà è ben strana cosa

Conclusioni

Gli esperimenti di **Aspect** dimostrano che un'azione svolta in un certo luogo può, in certe condizioni, essere correlata a un evento che si svolge a distanza, senza che ci sia contatto tra questi due luoghi. Sebbene sconcertante (sovrannaturale, per **Einstein**), il fenomeno è coerente con le leggi della **MQ** e, infatti, fu previsto teoricamente ben prima dell'avvento delle tecnologie necessarie per verificarlo sperimentalmente.

*teoria ed esperimento corroborano la conclusione che
l'universo ammette l'esistenza di interconnessioni non-locali:
qualcosa che accade qui può essere correlato con qualcosa che
accade laggiù, anche se non c'è nulla che si sposti da qui a lì,
anche se non c'è abbastanza tempo perché la luce si propaghi
tra i due punti.*

Conclusioni

→ **spazio non può più essere concepito come in passato:**

qualunque sia la distanza interposta, essa non garantisce che i due corpi siano distinti, dato che per la **MQ** tra i due potrebbe esserci una sorta di legame.

Secondo la **MQ**, la connessione può permanere anche se le due particelle si trovano agli estremi opposti dell'universo. Dal punto di vista della loro correlazione è come se fossero l'una accanto all'altra: **lo spazio tra loro non conta.**

Correlazioni di natura diversa da quelle classiche → **“guanti quantistici”** = guanti che scelgono casualmente se essere destro o sinistro e, nonostante ciò, lavorano in coppia: se uno sceglie di essere destro, l'altro è immancabilmente sinistro.

Bibliografia

molti mondi
approccio storico

1. A. Zeilinger, *Il velo di Einstein* (Einaudi, 2005)
2. R. Newton, *La Fisica dei Quanti sfida la Realtà* (Dedalo 2009)
3. M. Kumar, *Quantum* (Mondadori - 2011)
4. G. Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio* (Saggiatore, 1997)
5. D. Deutsch, *La trama della realtà* (Einaudi, 1997)
6. A. Aczel, *Entanglement* (Cortina Raffaello, 2004)
7. C. Bruce, *I conigli di Schrödinger* (Cortina Raffaello, 2006)

... e, dulcis in fundo

L. Susskind – *Meccanica Quantistica* (Cortina Raffaello, 2015)