

La Realtà Quantistica

Danilo Babusci

INFN - Laboratori Nazionali di Frascati

Incontri di Fisica 2016

A year or so ago, while Philip Candelas and I were waiting for an elevator, our conversation turned to a young theorist who had been quite promising as a graduate student and who had then dropped out of sight. I asked Phil what had interfered with the ex-student's research. Phil shook his head sadly and said, "He tried to understand quantum mechanics".

S. Weinberg

non c'è da preoccuparsi ...

(... siamo in buona compagnia)

I think I can safely say that
nobody understands
quantum mechanics

R. P. Feynman



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

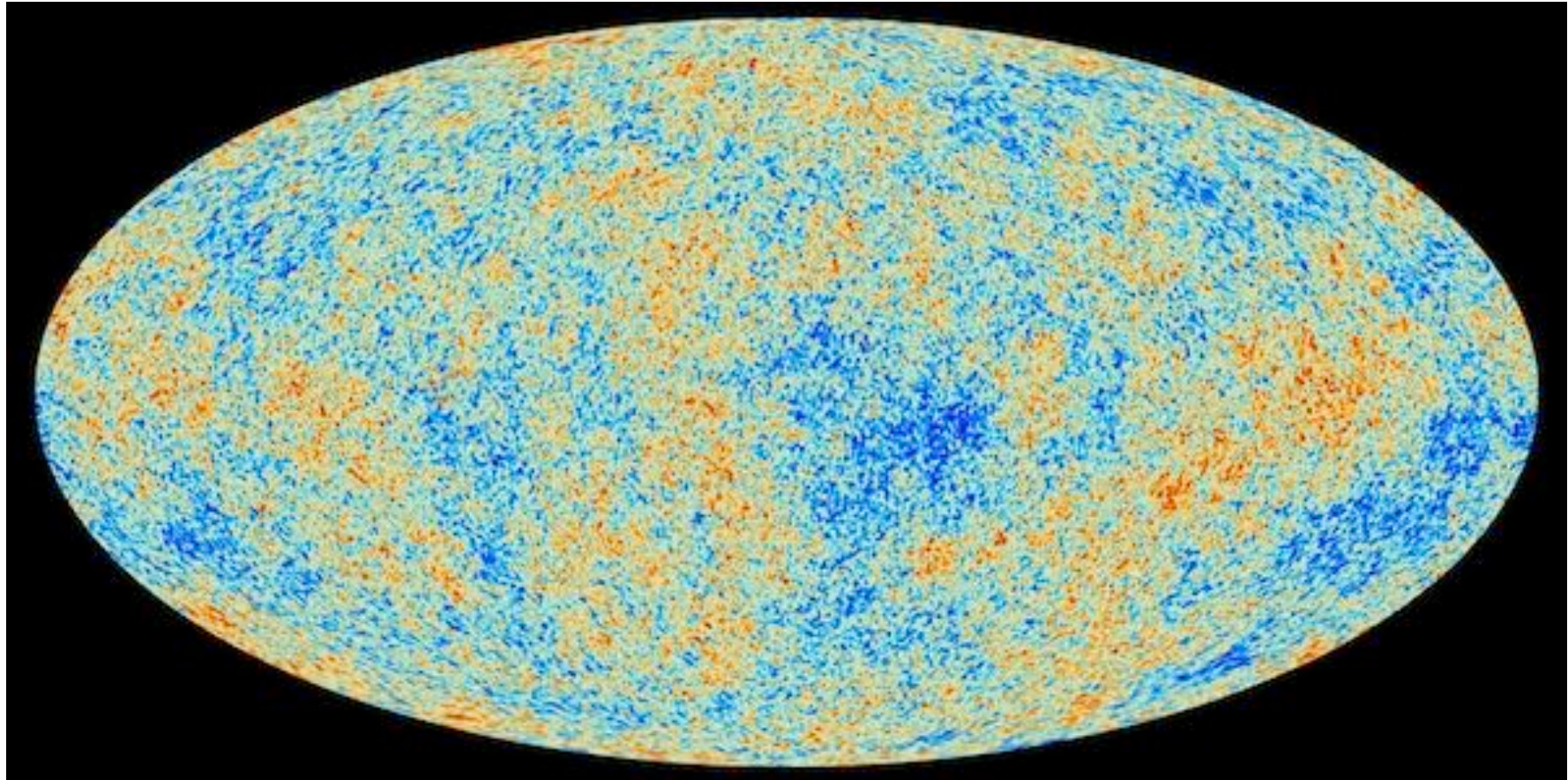
Esempio: momento magnetico anomalo del muone

| | |
|------|-----------------------------------------|
| 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 ...

mappa di temperatura del CMB misurata dal satellite PLANCK (2013)



L'esperimento delle 2 fenditure

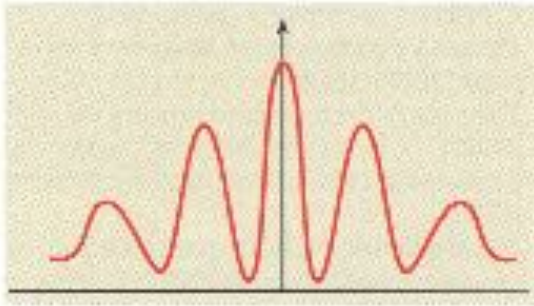
COMMENT: **CRITICAL POINT**

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

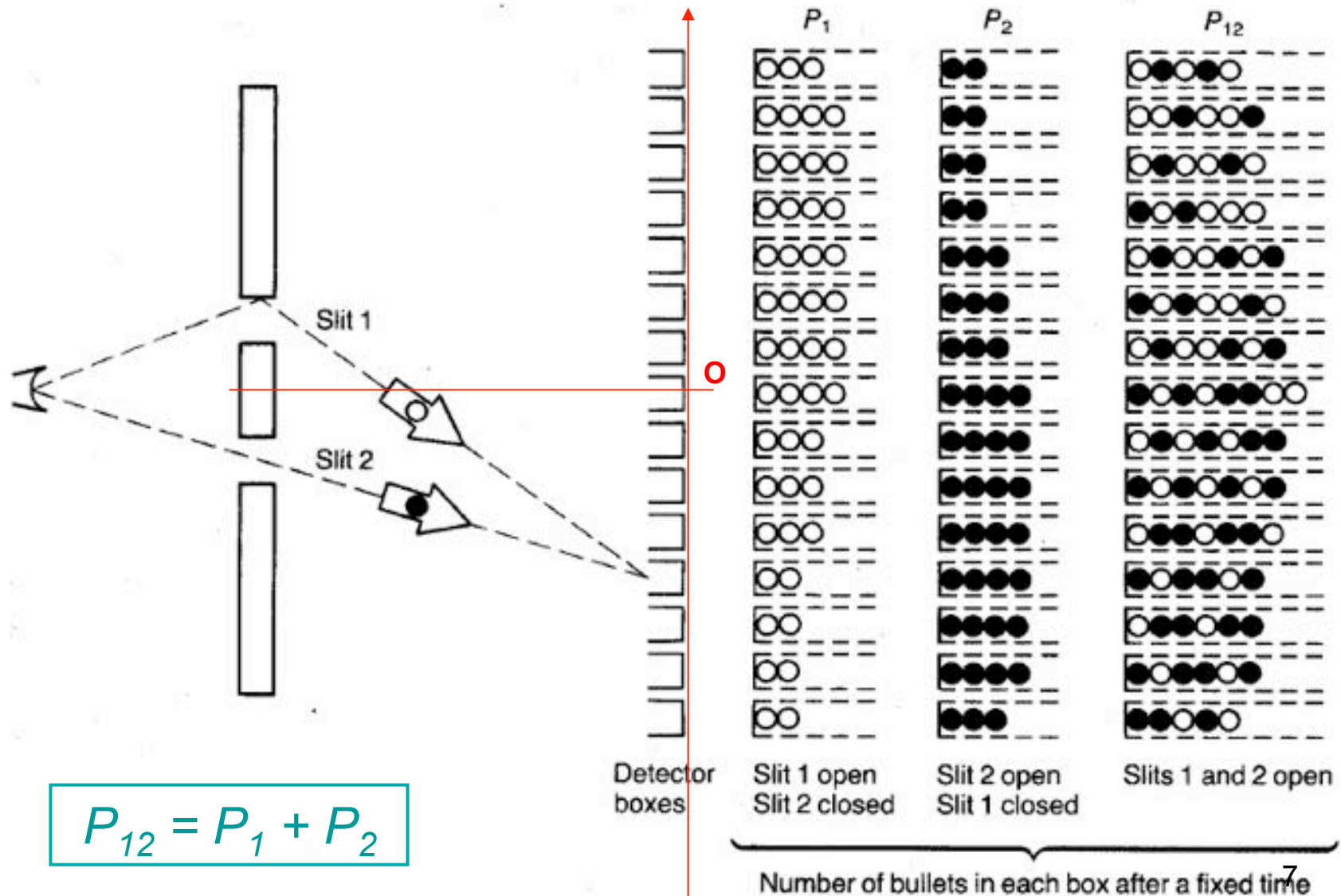


Simply beautiful – the spatial intensity distribution of electrons that have interfered in a Young's double-slit experiment.

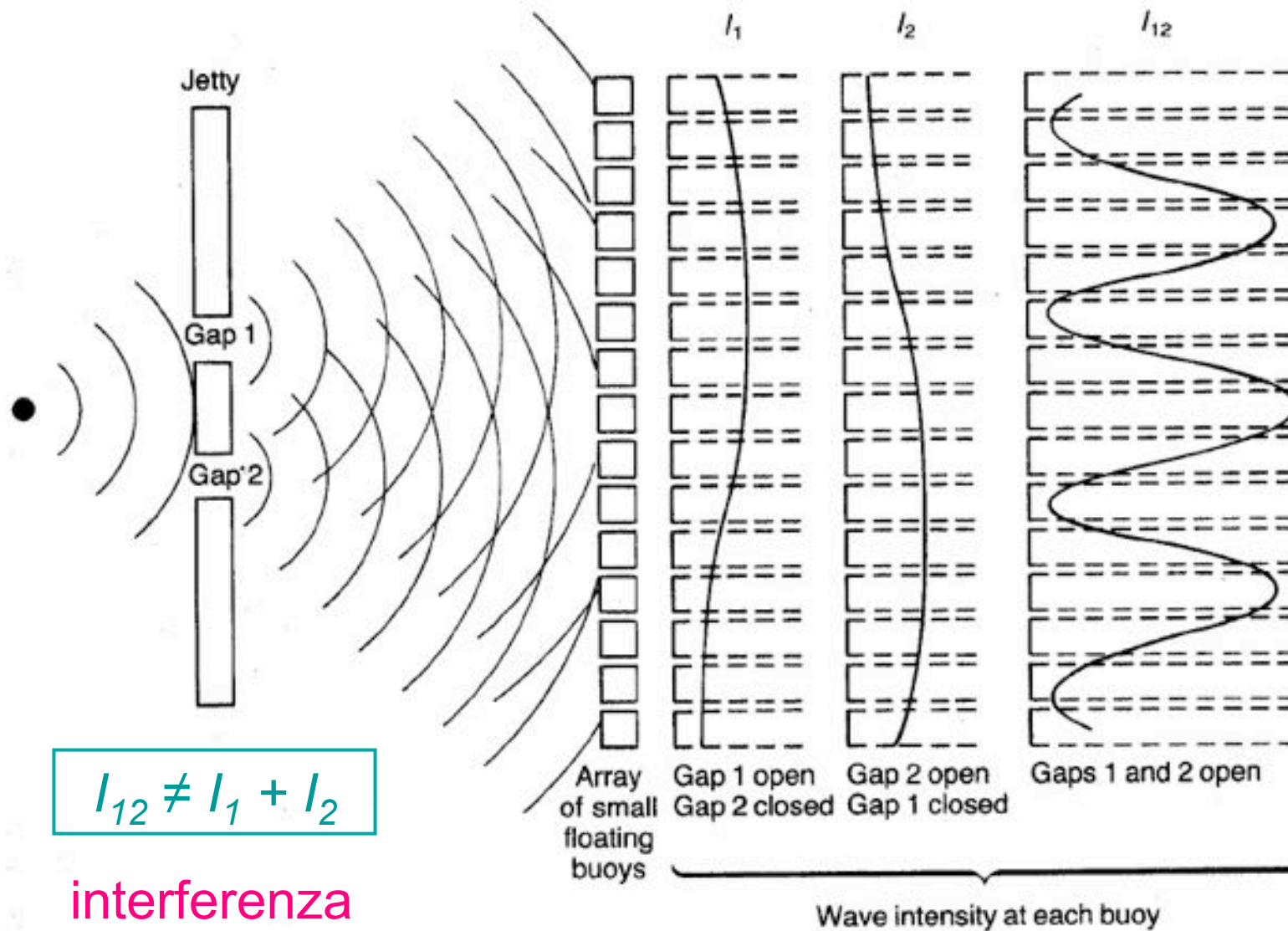
out. Economy might refer to either the nature from a detached distance. Readers found beauty in small-scale play with simple things like balls, waves, sounds and coins – allowing order in apparently random and contradictory events to show itself. Other readers found beauty in much larger play – such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

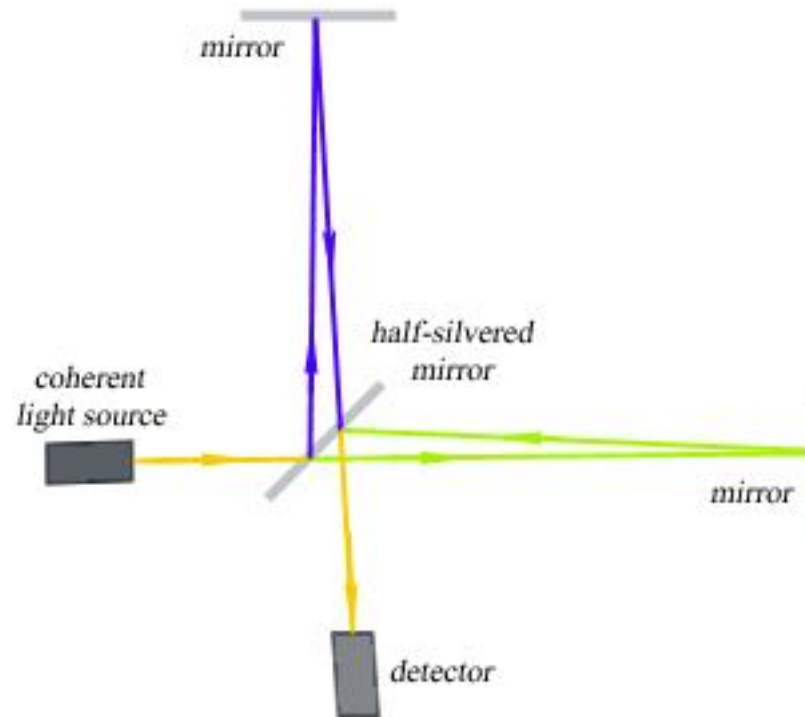


2 fenditure: onde d'acqua



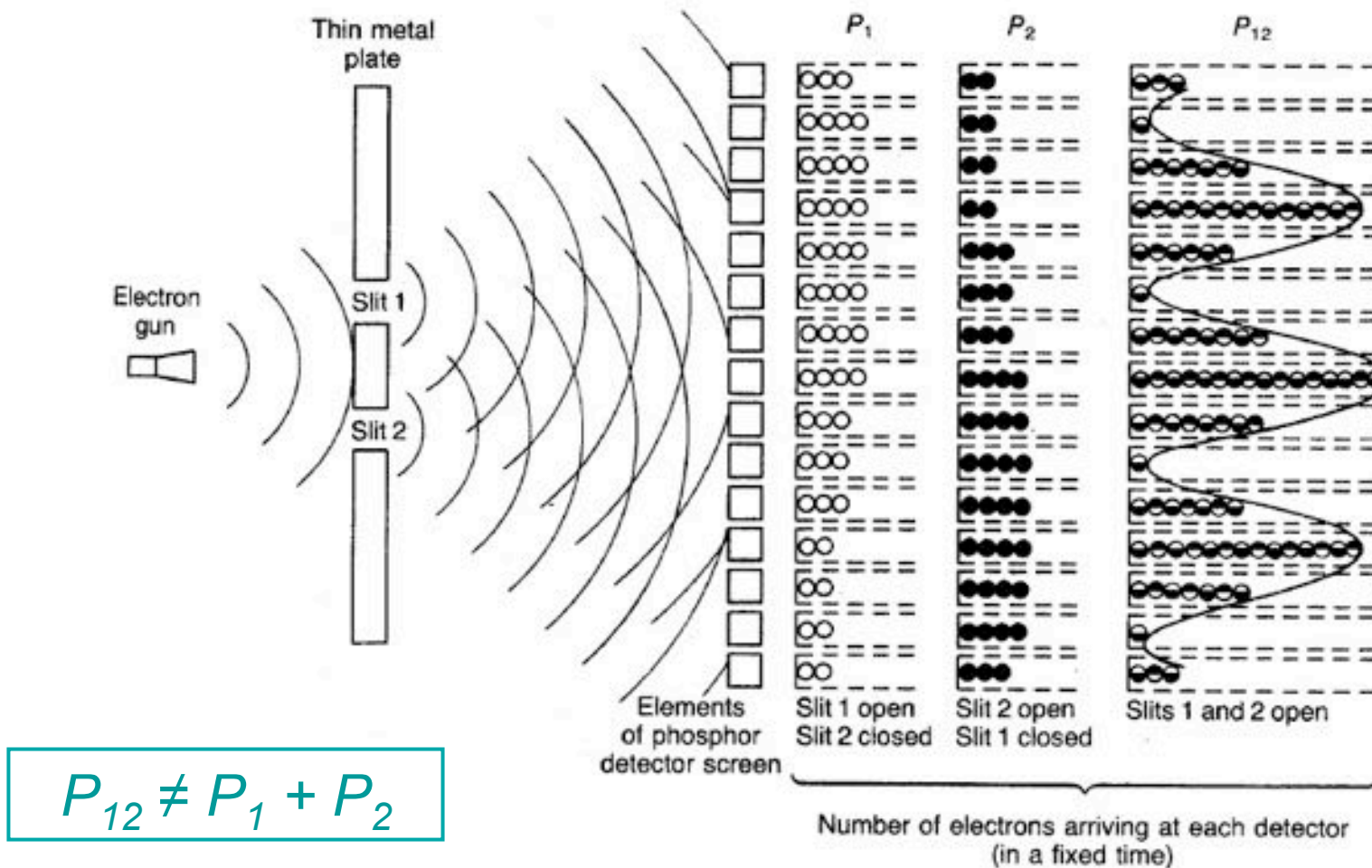
2 fenditure:luce

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



interferometro di Michelson

2 fenditure: elettroni



... anche gli elettroni producono una figura d'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)

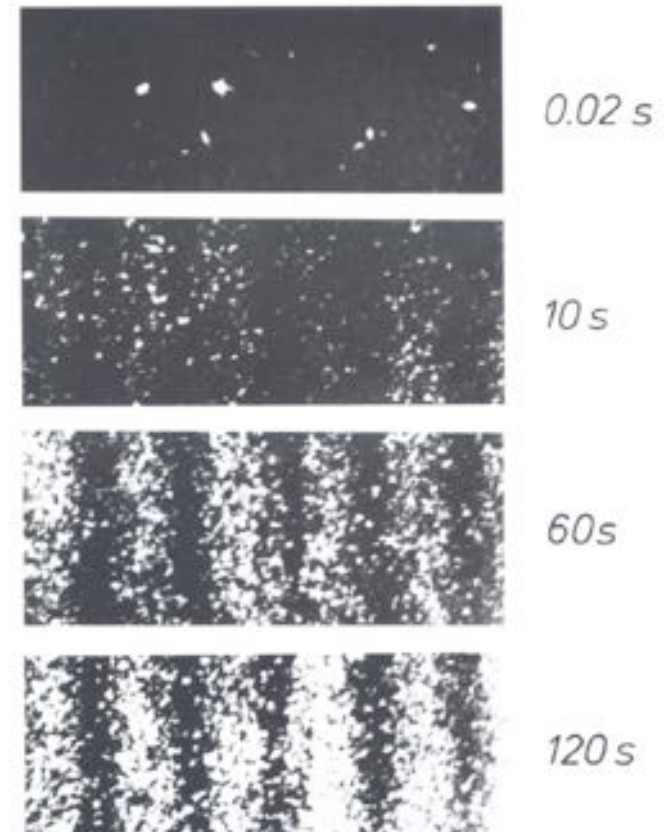
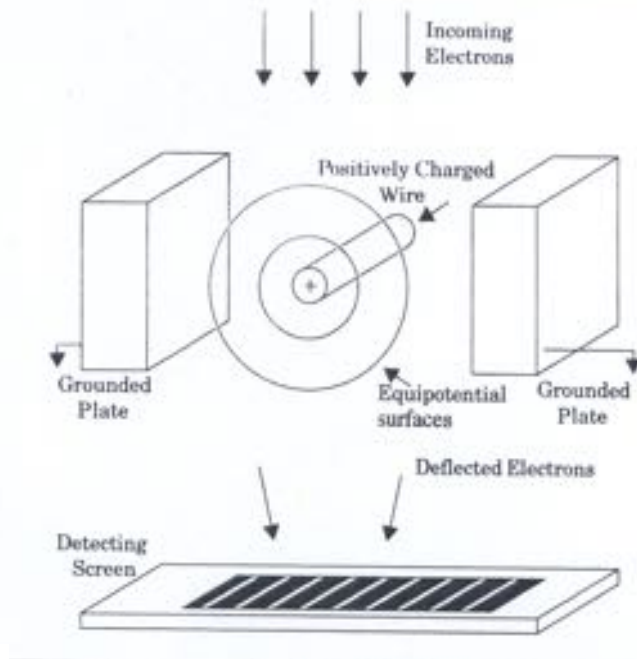
NO: gli elettroni arrivano interi sullo schermo (lo si vede inviando un elettrone alla volta)

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)

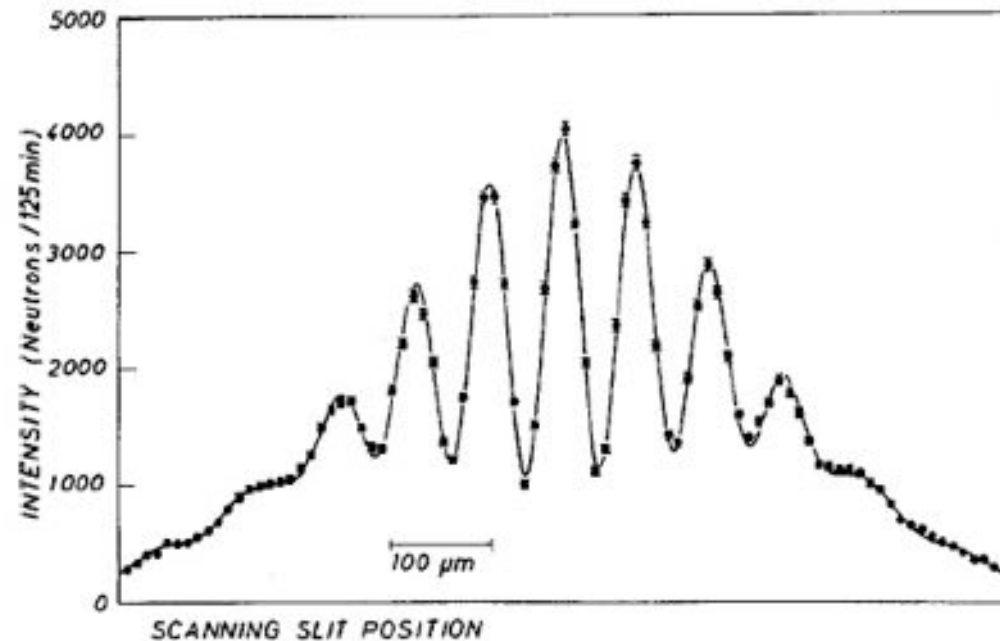


FIG. 1. A double-slit diffraction pattern measured with very cold neutrons with a wavelength of 2 nm corresponding to a velocity of 200 ms^{-1} . The two slits were 22 μm and 23 μm wide, respectively, separated by a distance of 104 μm . The resulting diffraction angles were only of the order of 10 μrad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

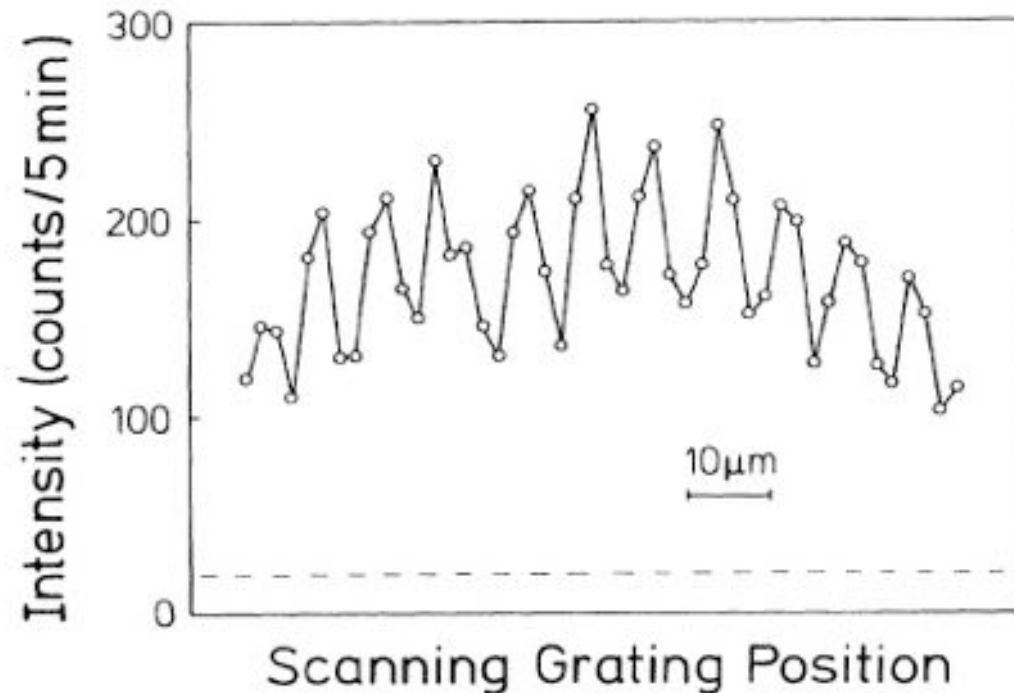


FIG. 5. Atomic density profile, monitored with the 8- μm grating in the detector plane, as a function of the lateral grating displacement. The dashed line is the detector background. The line connecting the experimental points is a guide to the eye.

2 fenditure:fullerenes

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

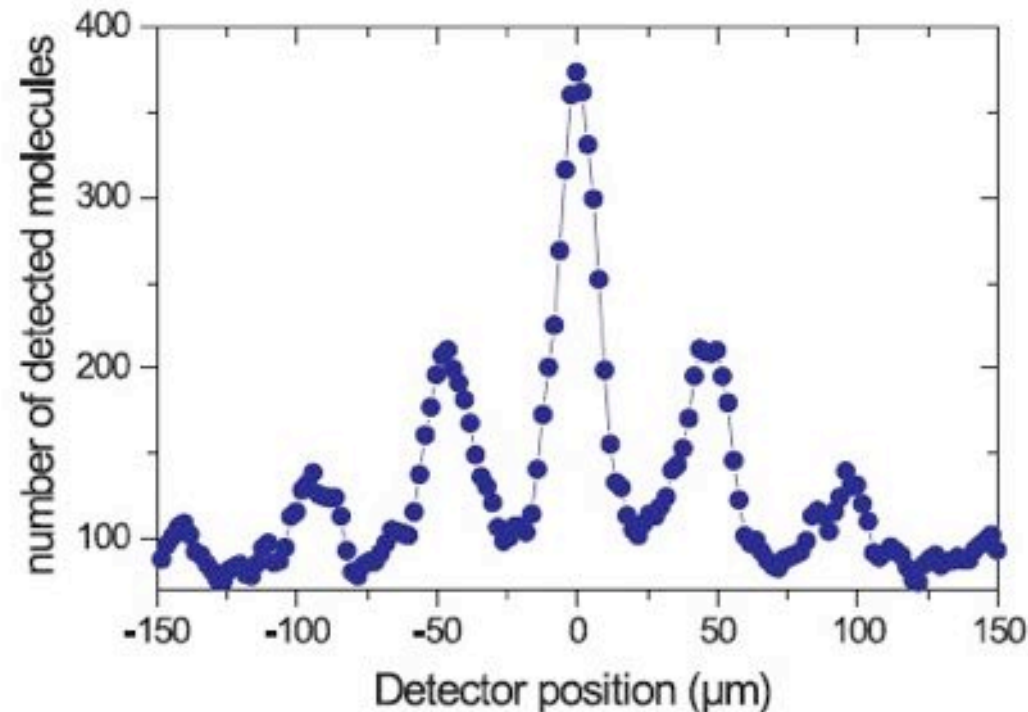
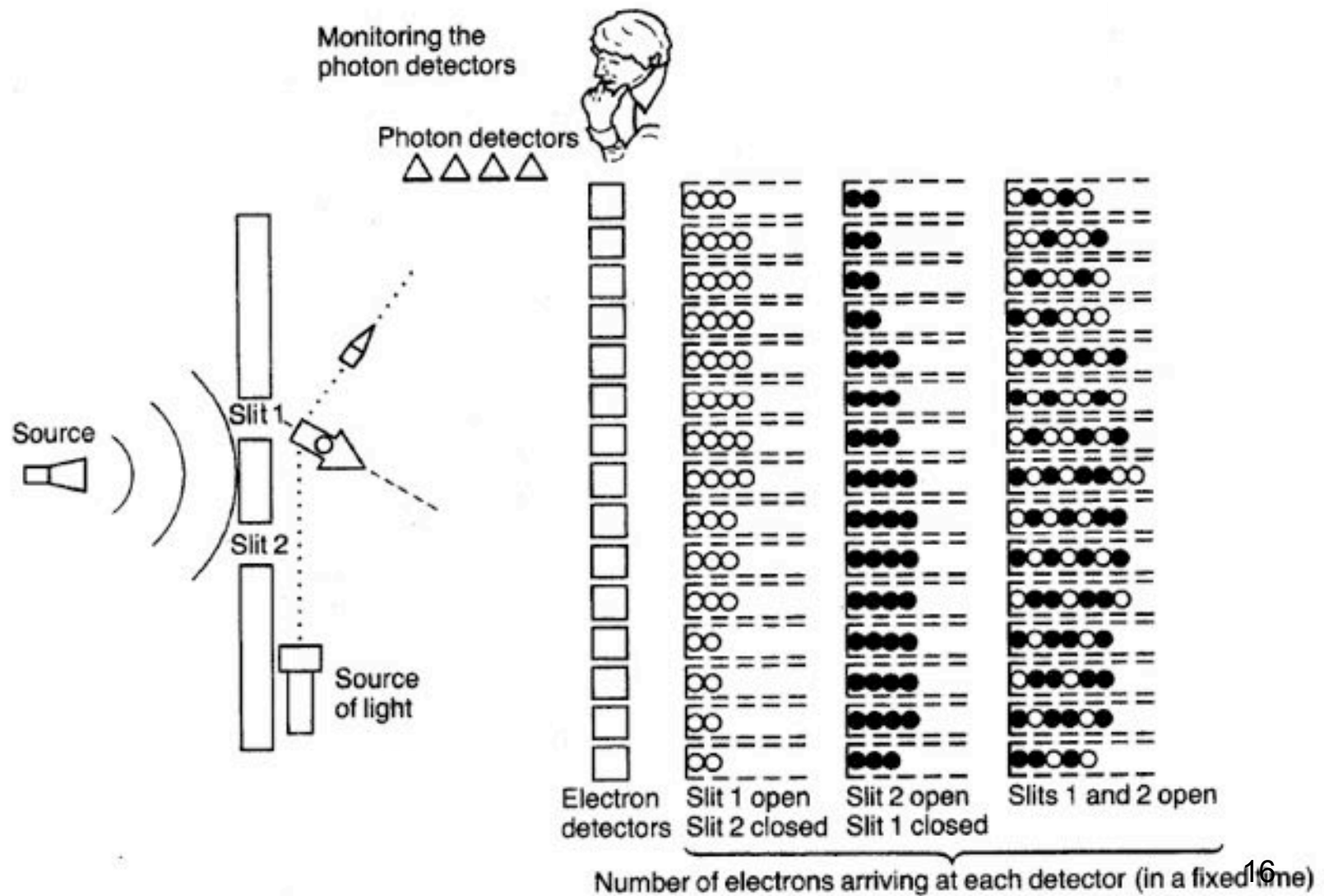


FIG. 2. Interference pattern of C-60 molecules behind a 100 nm grating, which proves the absence of thermal decoherence in the experiment [6], even for molecules with internal temperatures as high as 900 K (M. Arndt, O. Nairz, and A. Zeilinger, in preparation).

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

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

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

* 3 anni prima dell’osservazione sperimentale di Davisson & Germer e G. P. Thomson ¹⁹

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

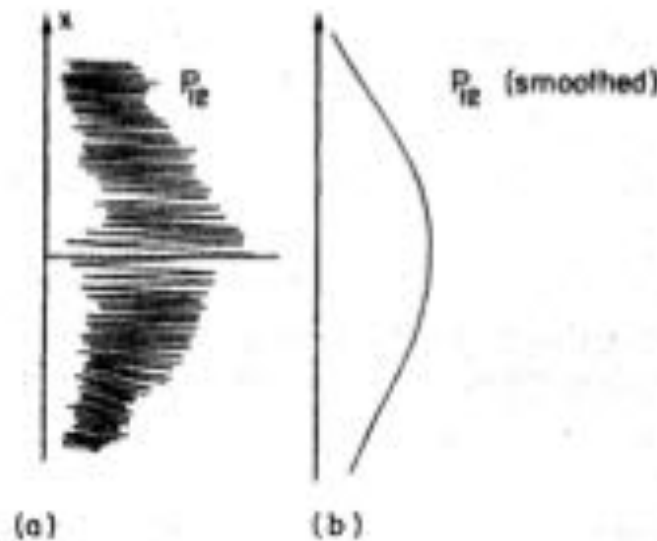
$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \longrightarrow \quad \lambda \simeq 5.7 \times 10^{-36} \text{ m}$$

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

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

→ $d \gg \lambda$ frange d'interferenza sono molto sottili e fitte → sorta di media che corrisponde alla figura “classica”



Onde di materia

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

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



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

i.e. 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 dell'inizio del '900)

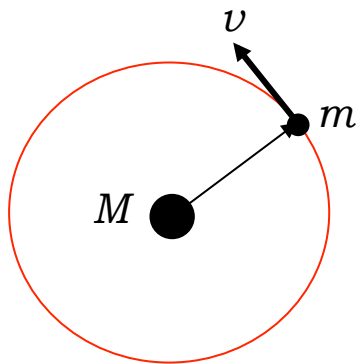
- ✓ costanza delle proprietà;
- ✓ cambiamento radicale delle proprietà tra atomi contigui nella tabella di Mendeleev

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

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



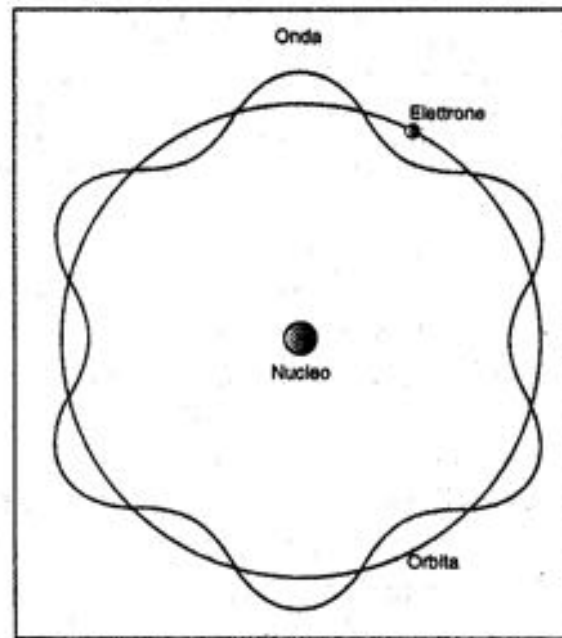
$$\boxed{m v_n r_n = n \hbar} \quad (n \in N) \quad (1)$$

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

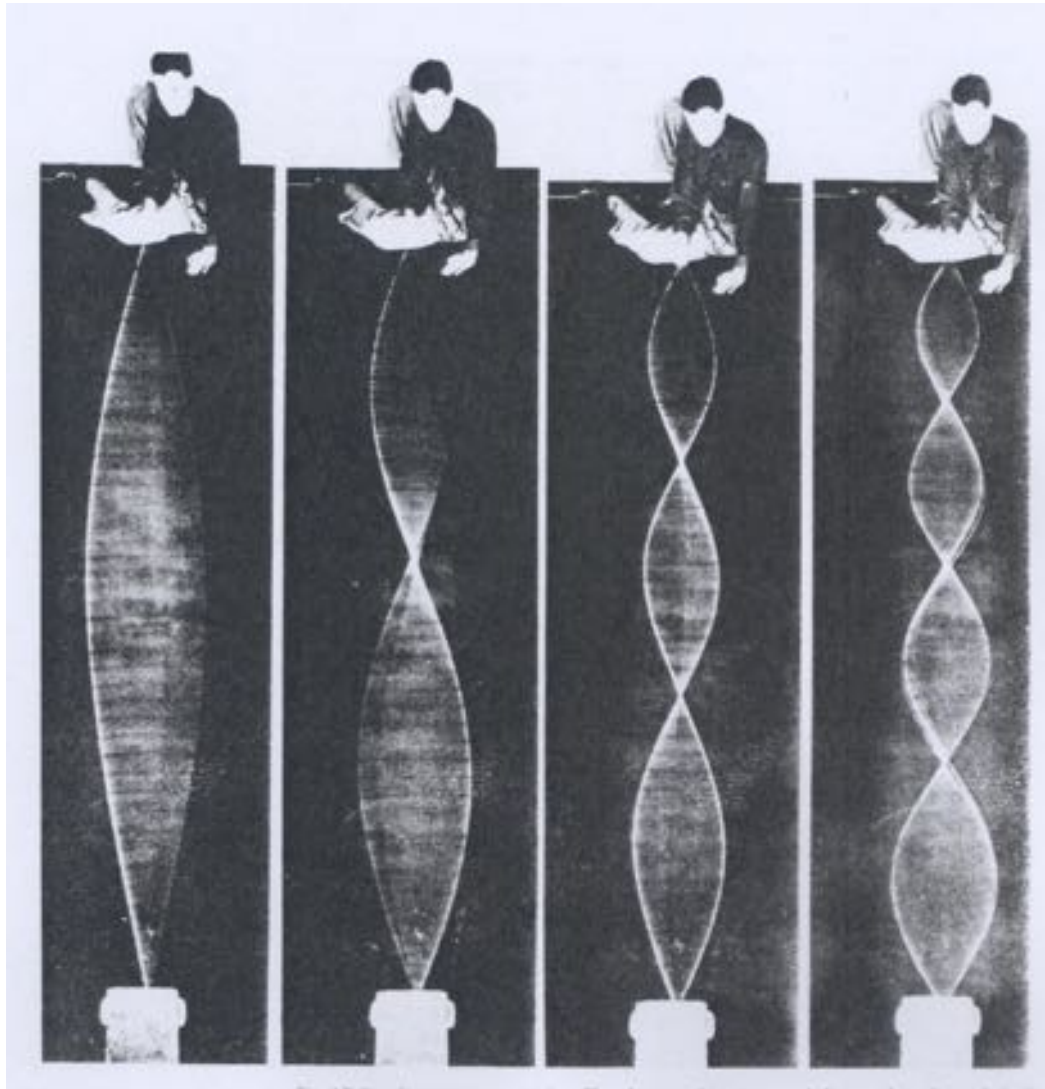
$$\text{de Broglie} \rightarrow r_n = \frac{n}{2\pi} \lambda \quad \Rightarrow \quad \boxed{2\pi r_n = n \lambda}$$

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

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

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

$$\text{i.e.} \quad r_n = n^2 a_0 \quad (3) \quad a_0 = \frac{\hbar^2}{k_e e^2 m} = 0.53 \text{ \AA}$$

(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 $E_1 = -13.6 \text{ eV}$
(potenziale di ionizzazione dell'idrogeno) 28

Onde di probabilità

Elettroni come onde, ma che tipo di onde? Come la luce ?
La luce è una vibrazione del campo e.m. Cosa vibra nel caso dell'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 un'**ampiezza di probabilità quantistica ψ** (funzione d'onda)

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



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

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

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

3. Esperimento in grado di determinare se una o l'altra delle 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 (fisica classica) come mera limitazione “pratica”

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

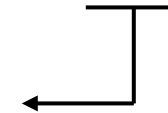
inspiegabili nell'ambito della fisica classica: l'energia di un'onda e.m. dipende dall'intensità, non da frequenza ν

Einstein (1905): l'energia del fascio di luce è distribuita in pacchetti (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 \rightarrow maggior n. di quanti \rightarrow
maggior n. 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**

Fotone

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

$$E = h \nu \quad \text{e. fotoelettrico}$$

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



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

il fotone ha massa = 0 !!

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

Atomo di Bohr (II)

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

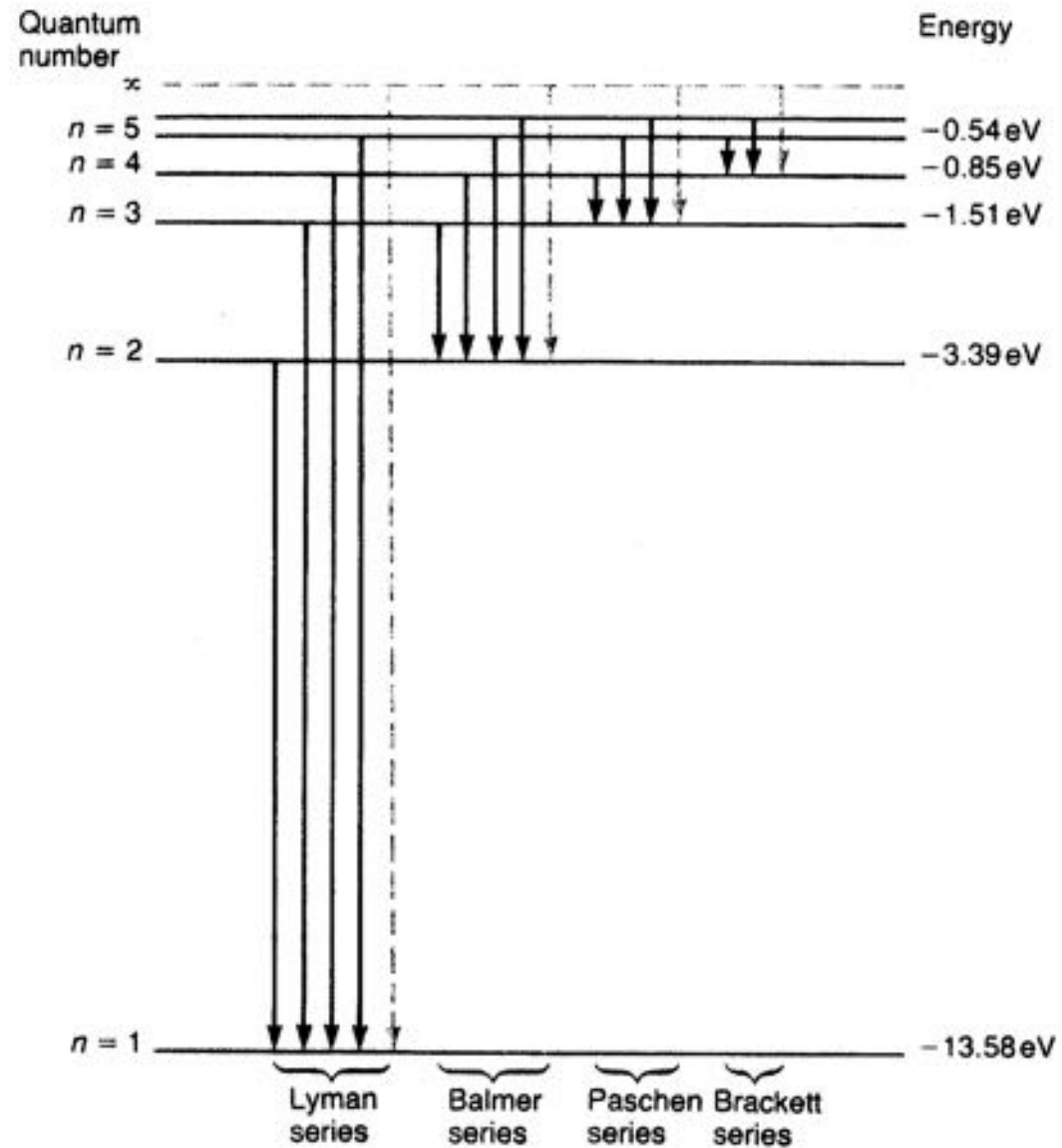
$$\begin{aligned} E_{nm} &= E_n - E_m \\ &= \left(-\frac{1}{2n^2} + \frac{1}{2m^2} \right) \frac{k_e e^2}{a_0} \end{aligned}$$

e, quindi (formula di Einstein), di frequenza

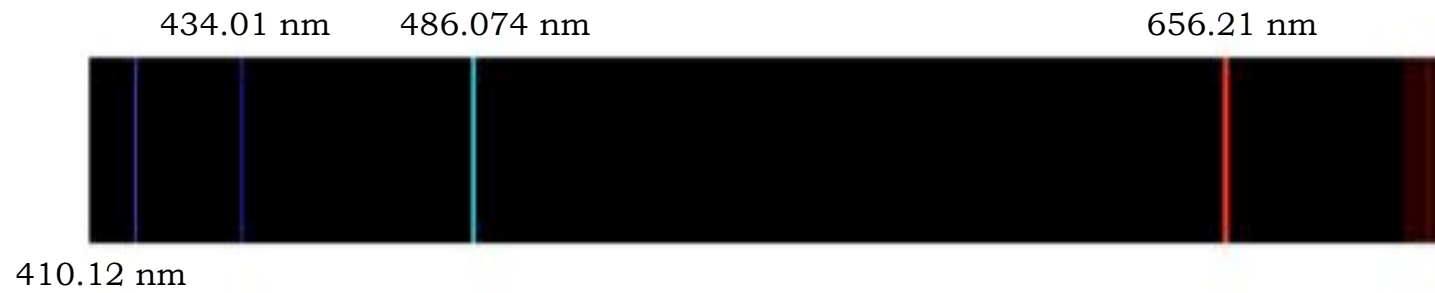
$$\nu = \frac{E_{nm}}{h} = \frac{k_e e^2}{4\pi \hbar a_0} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

(formula di Rydberg)

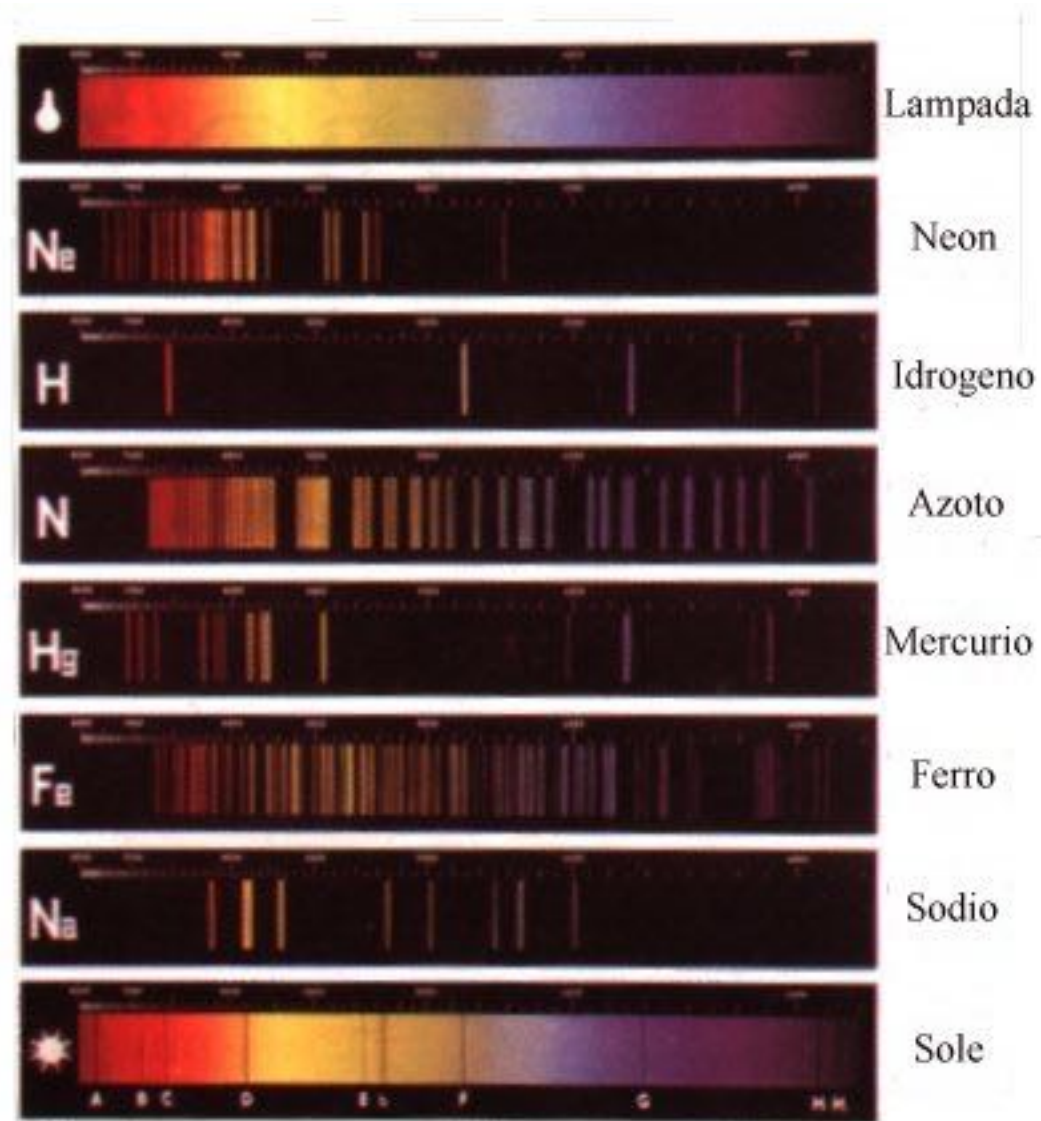
Atomo di Bohr (II)



Atomo di Bohr (II)

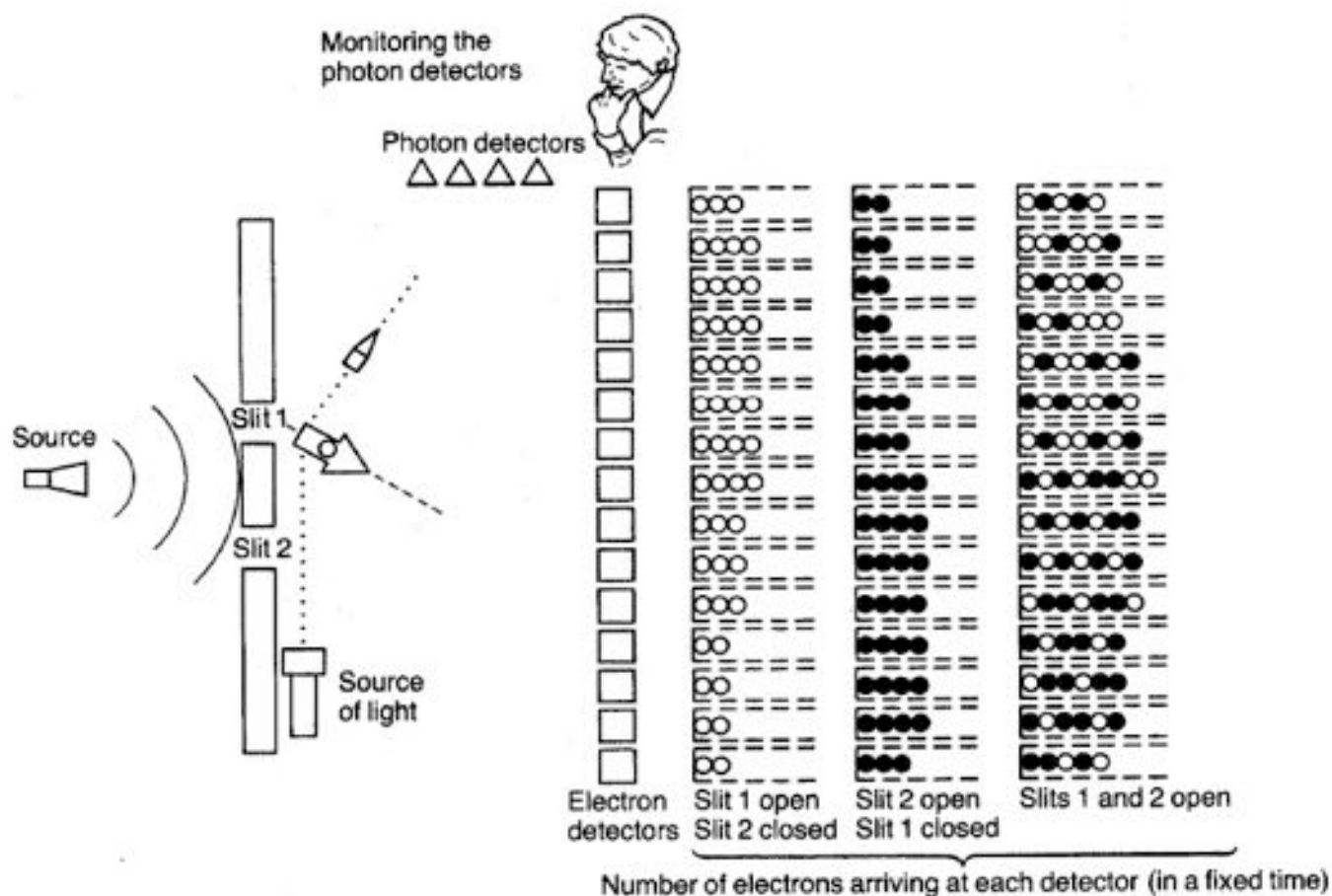


Atomo di Bohr (II)



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 n. dei fotoni, **bisogna ridurre l'impulso p** → diminuire (aumentare) ν (λ)

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 $\lambda \gg d$ 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:

$$\Delta x \Delta p \geq h$$

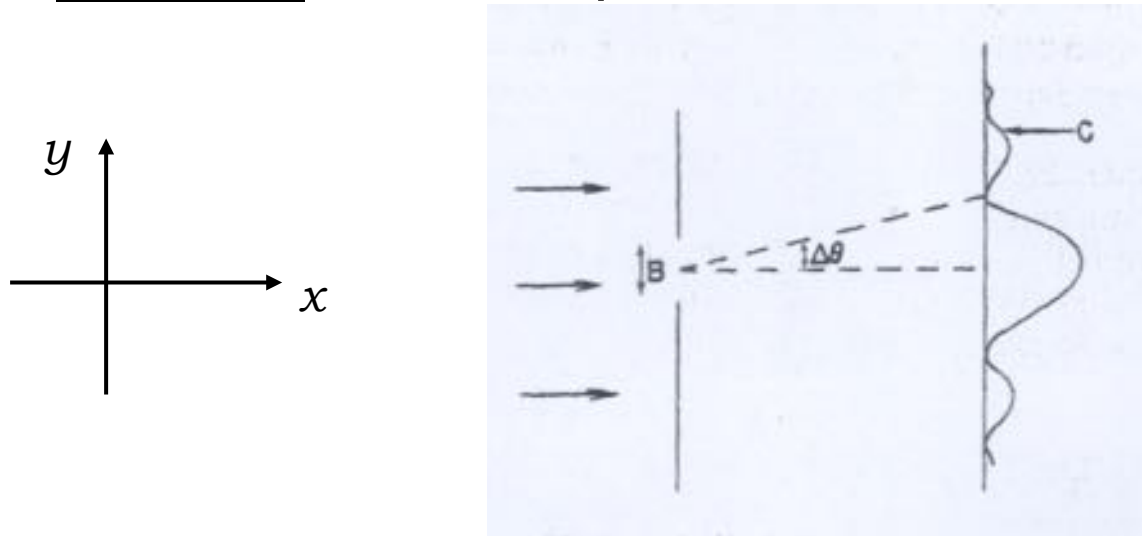
incertezza
nella posizione

incertezza
nell' impulso

Principio d'Indeterminazione

L'indeterminazione è diretta conseguenza del carattere ondulatorio delle particelle

Esempio: fascio di particelle che incide su fenditura



particelle hanno tutte $p_x = p_0$ e $p_y = 0$, i.e. componente dell'impulso \perp alla fenditura è perfettamente nota

Principio d'Indeterminazione

Passaggio attraverso fenditura \rightarrow conoscenza della coordinata y con incertezza $\Delta y \sim l$; diffrazione oltre la fenditura \rightarrow 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

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

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



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

i.e. 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 dà il caso che non sappiamo qual'è



casualità soggettiva



particelle in uno stato ben definito sono perfettamente 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 \rightarrow richiede conoscenza simultanea di posizione e velocità \rightarrow 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, i.e. confinati in regione spaziale di dimensioni $\approx 0 \rightarrow$ impulso $\rightarrow \infty$

Principio d'Indeterminazione

... possibile stimare le dimensioni dell'atomo di H
raggio atomico $a \sim$ indeterminazione nella posizione
dell'elettrone \rightarrow indeterminazione nell'impulso $\sim h/a$

$$\Rightarrow \frac{p^2}{2m} \sim \frac{h^2}{2ma^2} \Rightarrow E \sim \frac{h^2}{2ma^2} - k_e \frac{e^2}{a}$$

Lo stato fondamentale è di energia minima:

$$\frac{dE}{da} = 0 \quad \rightarrow \quad a \sim \frac{h^2}{k_e m e^2} \sim a_0$$

Indeterminazione Energia-Tempo

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

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

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

Indeterminazione Energia-Tempo

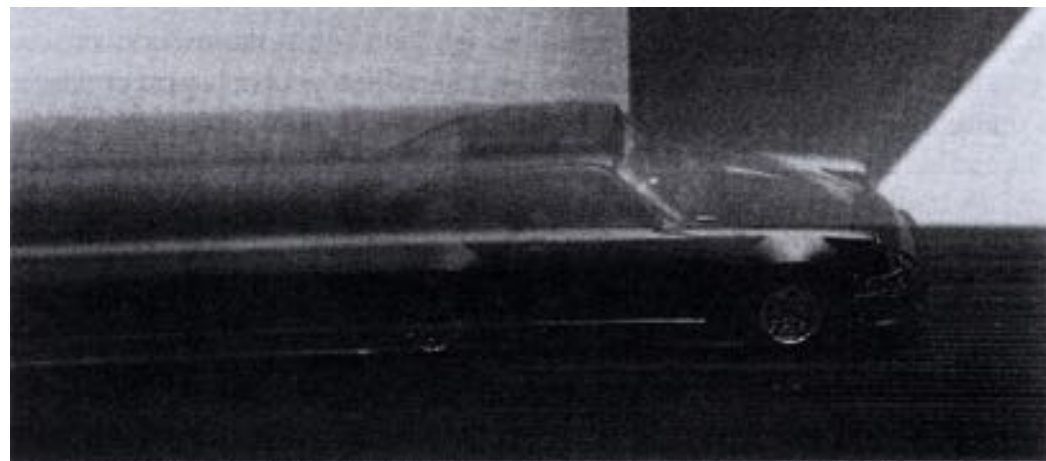


piccolo tempo
d'esposizione

forma **SI** - velocità **NO**

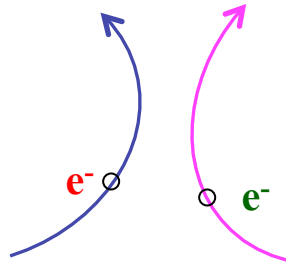
grande tempo
d'esposizione

forma **NO** - velocità **SI**



Interazioni tra Campi

Fisica Classica

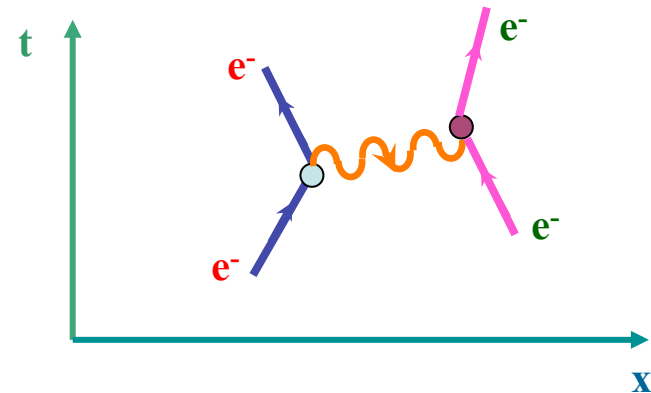


e^- si avvicinano \rightarrow mutua
repulsione \rightarrow rallentati e deviati



azione a distanza

Fisica Quantistica



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

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



interazione = scambio del γ

Fotoni

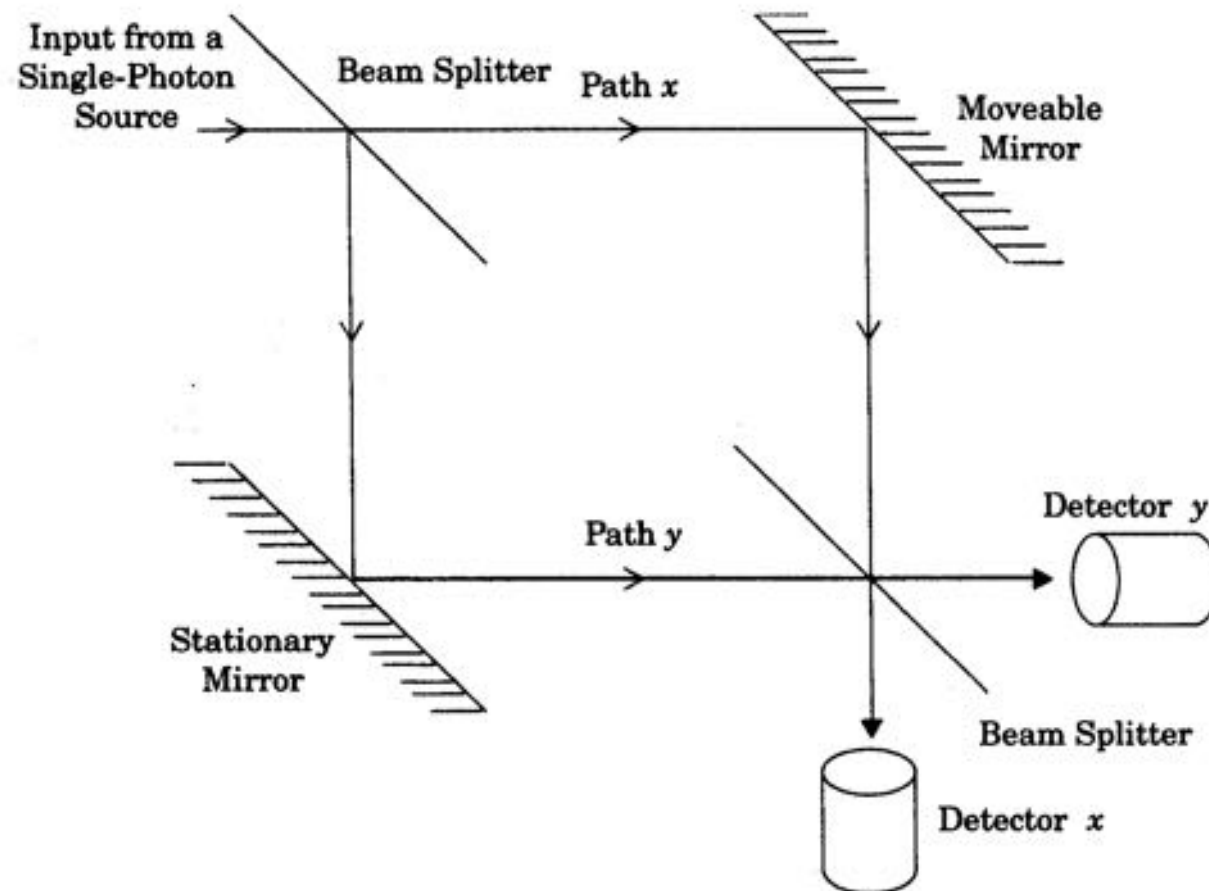
Fotone come particella? → attenuiamo intensità della sorgente di luce nell'interferometro di Michelson in modo da avere un solo fotone nell'apparato e inseriamo un rivelatore di fotoni in ciascun ramo (dopo il beam-splitter e prima dello specchio)

Cosa osserviamo? rivelatori non producono mai segnale simultaneamente: **il fotone o segue il ramo → o quello ↑**

N.B: - 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

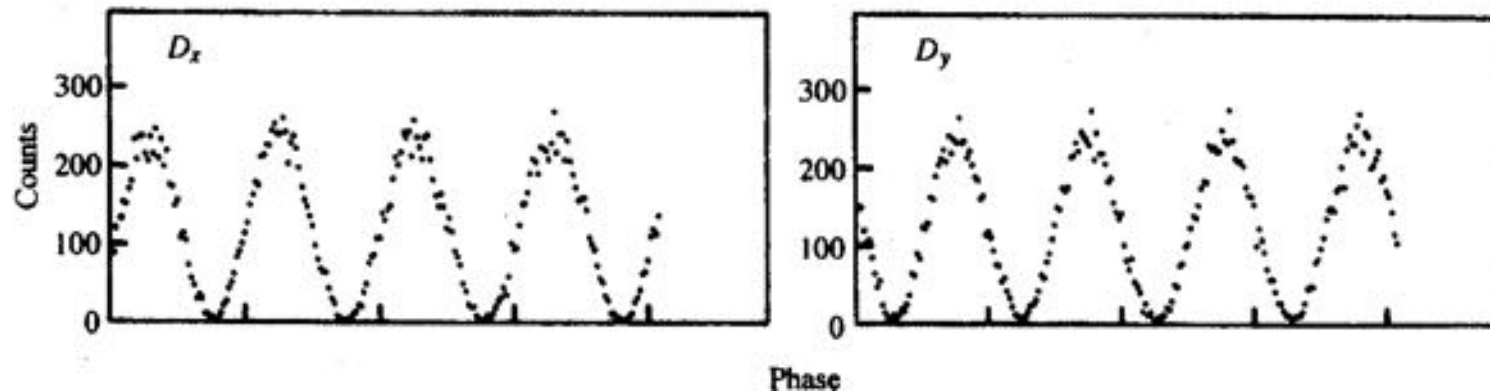
... ancora un esperimento con doppia fenditura:
l'interferometro Mach-Zender



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* 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**

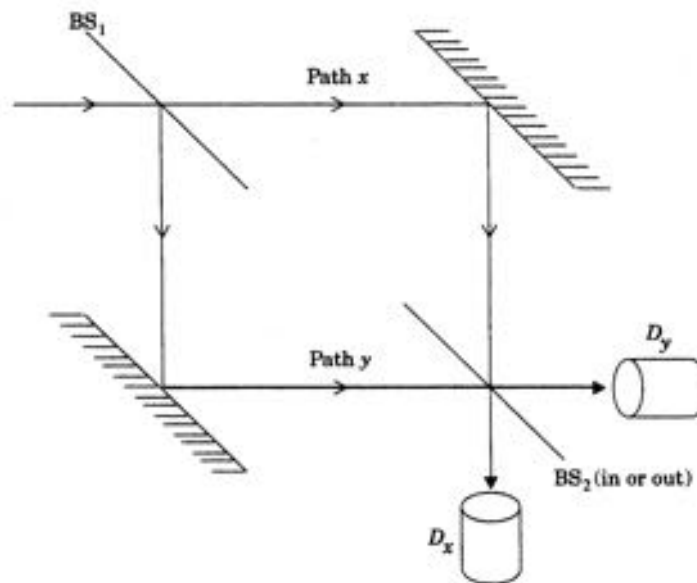
possibile che sia così perverso?

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

* l'elettrone, il neutrone, l'atomo,

Fotoni

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



- BS_2 assente $\rightarrow D_x$ e D_y registrano quale ramo è stato percorso dal fotone: $x \rightarrow D_x$, $y \rightarrow D_y$
- BS_2 inserito \rightarrow 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

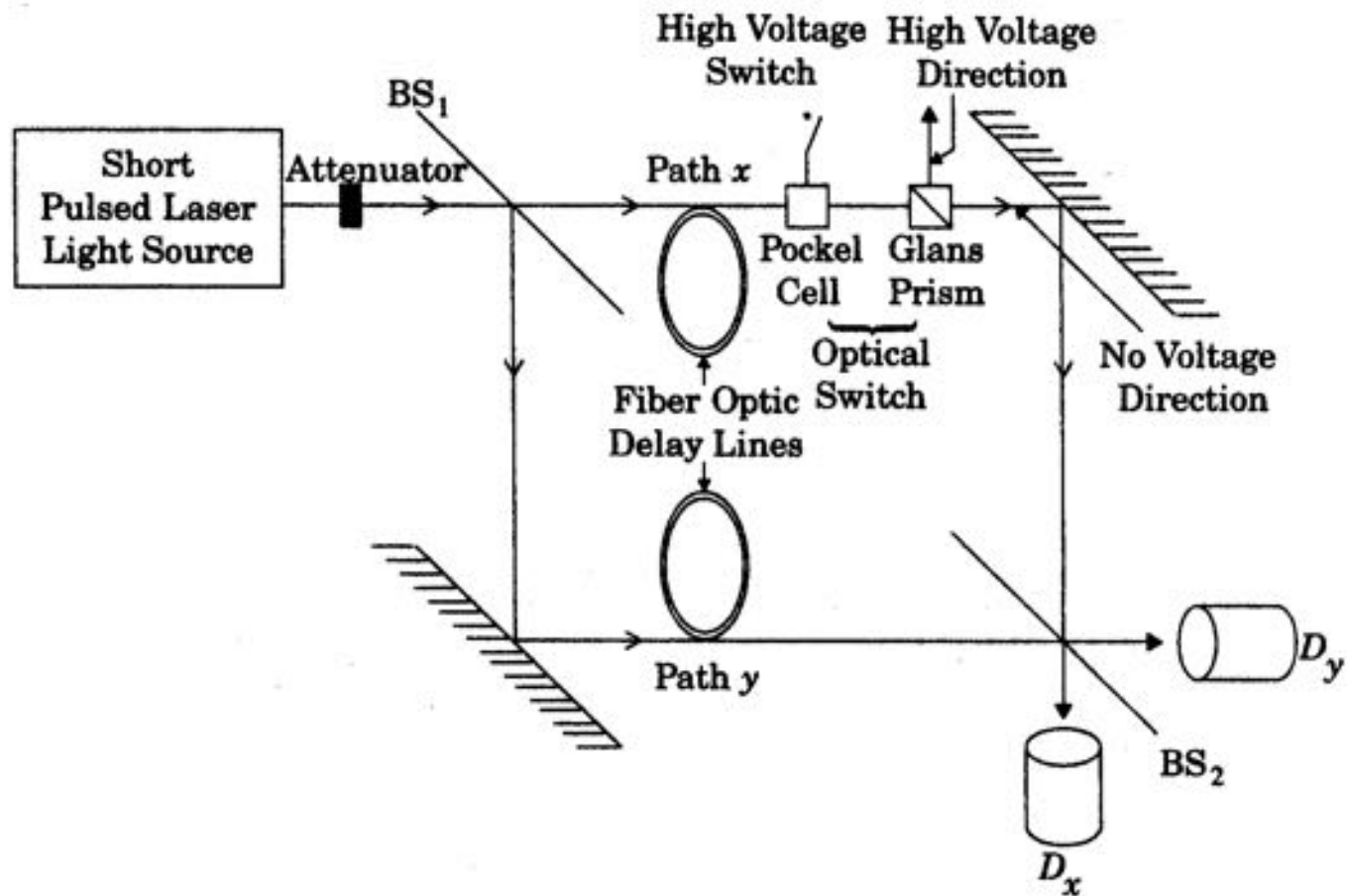
Secondo la teoria della cospirazione ciascun fotone si comporta come una particella (BS_2 è inizialmente disinserito) e sceglie uno dei 2 rami con probabilità $1/2$.

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

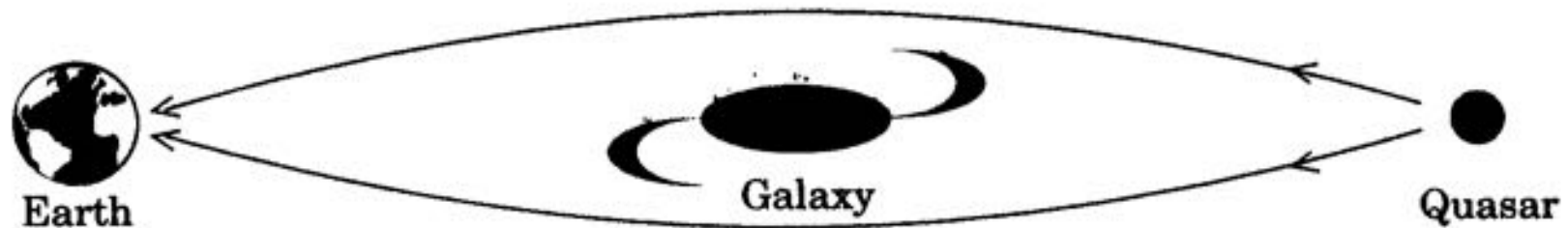
Risultato sperimentale:

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!

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 2 traiettorie posso mettere o meno un beam-splitter → **senza** vedo **2 immagini**; **con** vedo l'**interferenza**

Ma 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 ...*”

Principio di Complementarità

(Bohr)

Diversi aspetti:

- ✓ rappresentazione mentale di una certa situazione fisica
esperimento delle 2 fenditure: uso descrizioni
mutuamente inconsistenti: **particella e onda → concetti
complementari tra loro**

- ✓ cosa la M.Q. ci consente di conoscere

P.d'I. → o conosco la posizione o l'impulso; o l'energia o
il tempo → due approcci possibili:

- variabili la cui conoscenza può essere solo parziale
- variabili che non esistono simultaneamente

→ **x complementare a p ; E complementare a t**

Principio di Complementarità

✓ cosa può essere rivelato in un esperimento

2 fenditure → complementarità tra conoscenza del percorso e figura d'interferenza → nessuna versione dell'esperimento ha accesso a entrambi gli aspetti

Bohr: sempre utilizzare il linguaggio mutuato dal mondo che percepiamo direttamente, i.e. il mondo classico. Un livello al di là della nostra esperienza sensoriale richiede fusione degli opposti, tra loro **esclusivi**: se un esperimento mostra uno dei due, l'altro è assente

N.B. - Bohr ritiene l'idea applicabile in altri ambiti: ogni procedimento volto a evidenziare che una cellula è viva, inevitabilmente la uccide!

Principio di Complementarità

Commenti:

Schrödinger - quando non si capisce una cosa s'inventa un nuovo termine e si pensa di averla capita

Bell - complementarità è una di quelle “visioni romantiche” del mondo ispirate dalla teoria quantistica

Oggi è opinione condivisa che Bohr non sia mai stato in grado di formulare in modo chiaro e convincente il suo principio di complementarità