

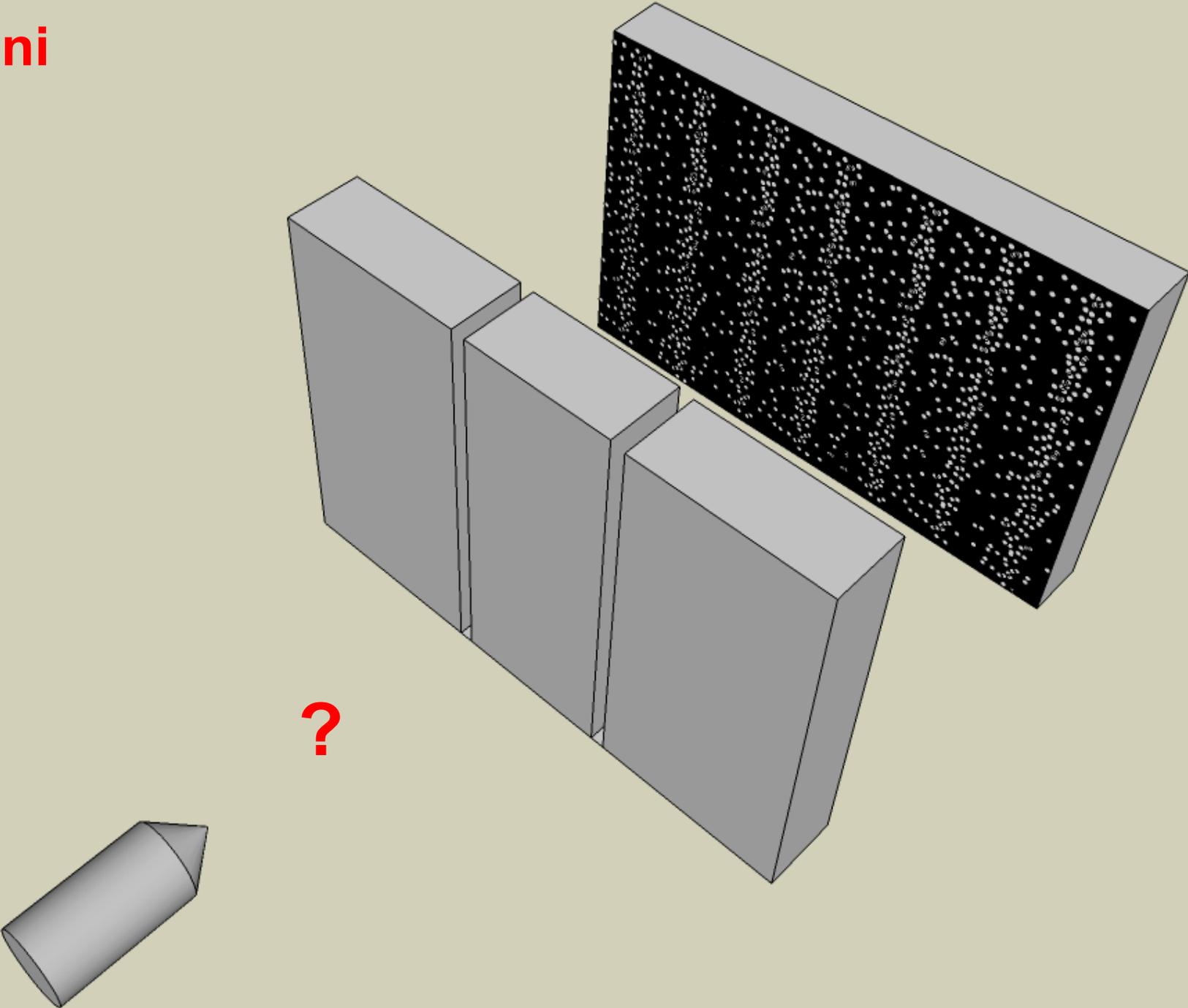
17.03.2012

# Indeterminazione, complementarità e altro in meccanica quantistica

*Olivia Levrini*

**Riassunto della volta  
precedente...**

# Elettroni



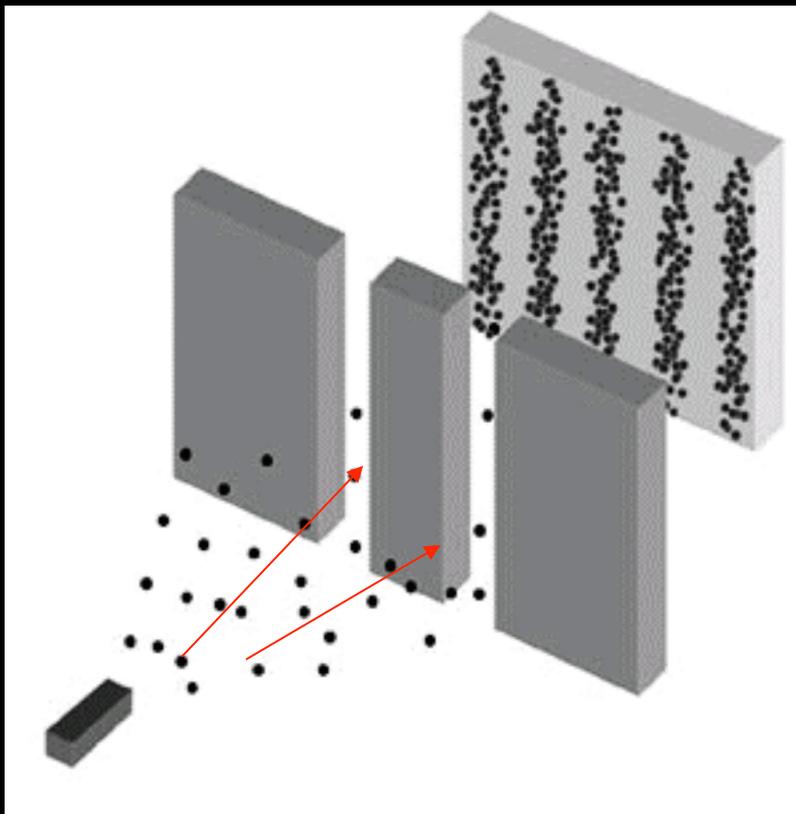
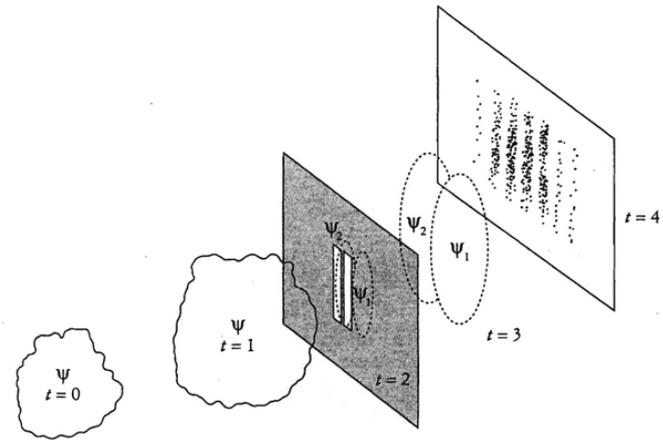


Figura 35.

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

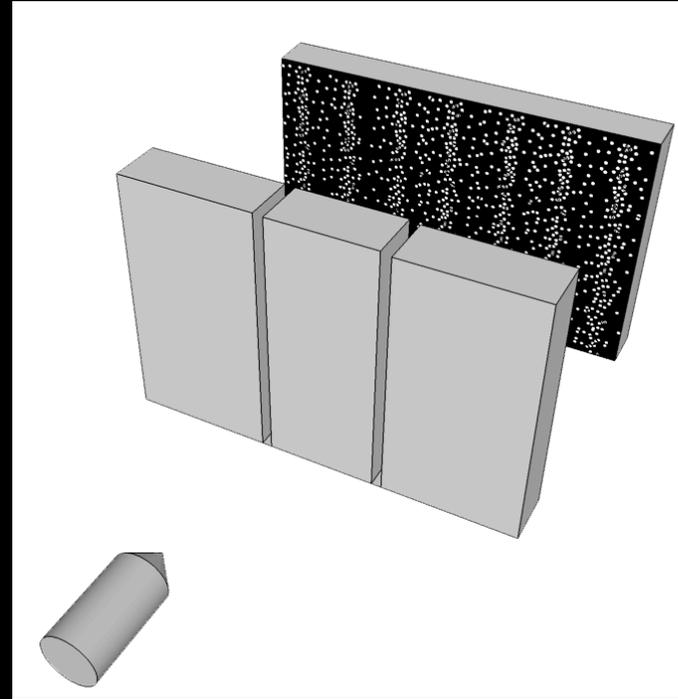


Ognuna di queste due immagini (corpuscolo o onda) permette di dare significato soltanto ad alcuni fatti.

Nessuna delle due abbraccia tutti i fenomeni noti

**SI TRATTA DI IMMAGINI PARZIALI**

**E COMPLEMENTARI**



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

# La meccanica quantistica

- **teoria formulata negli anni 30 (intorno al 1927), grazie al contributo di molti fisici, Planck, Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Jordan, Born, Dirac e altri... e anche grazie allo “speciale” contributo dato da Einstein (e le sue critiche acute);**
- **oggi è accettata: esistono un formalismo ed assiomi che lo regolano e lo conciliano con la realtà;**
- **questo formalismo spiega la realtà microscopica ma la spiega “a modo suo”...**

**“a modo suo”**

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

***ma***

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

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

## **Nell'incontro di oggi:**

- **Entrare nel merito dei concetti di indeterminazione e complementarità\*;**
- **Mostrare alcuni esempi di dibattiti per dare un'idea di quanto non sia stato semplice accettare una teoria come la meccanica quantistica.**

## Il principio di indeterminazione

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

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

Apparentemente...

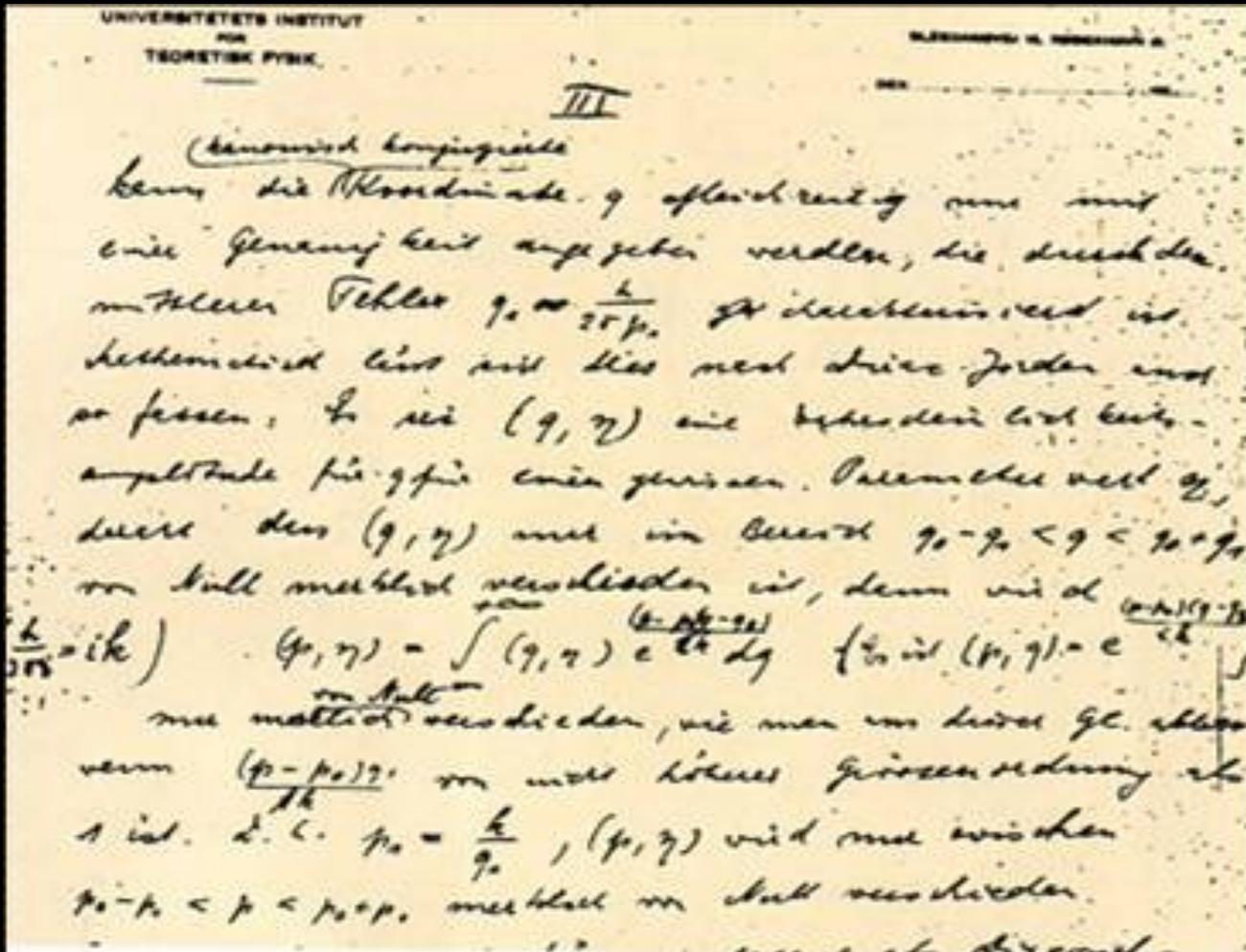
“[...] una formuletta - in sé piuttosto arida e arcana - che abbiamo imparato a recitare sui libri di Liceo, dal nome fastidiosamente indimenticabile: il principio di indeterminazione di Heisenberg.”

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

**Il principio di indeterminazione  
Werner Heisenberg (1901, 1976)**



# Marzo 1927: "Sul contenuto osservabile della cinematica e della meccanica quantistiche"



**1. Può il formalismo matematico tener conto che posizione e velocità di una particella sono determinabili, *simultaneamente*, solo con una precisione limitata?**

**2. Se la precisione limitata è ammessa dalla teoria, può essere compatibile con la massima accuratezza che si può ottenere in una misura?**

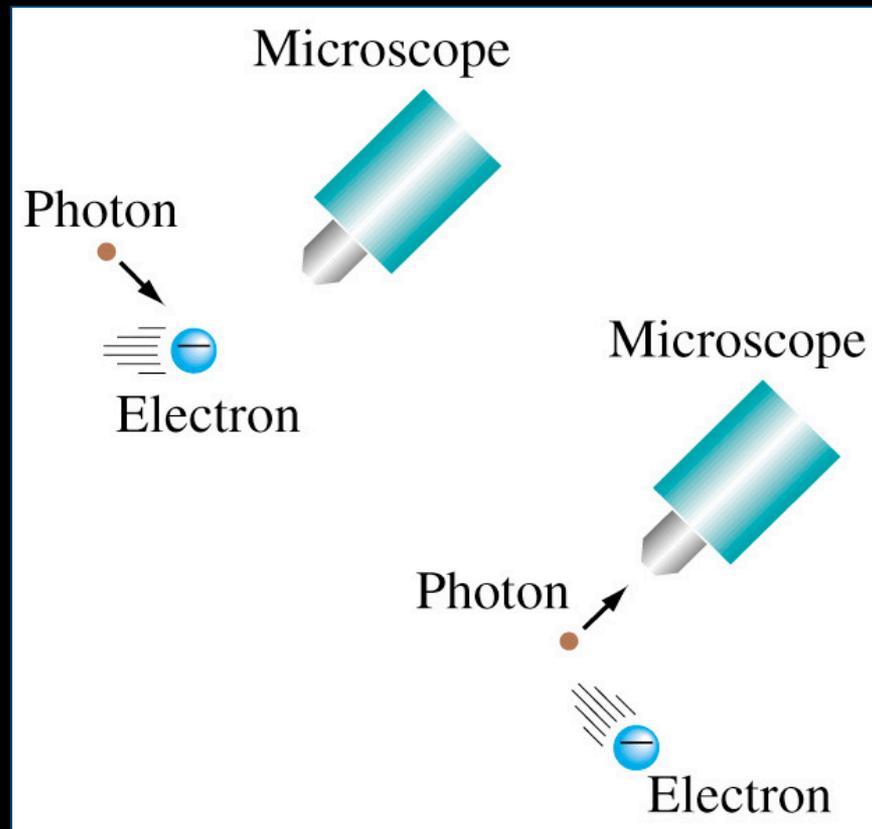
## **Approccio operazionista**

**“Se si vuole chiarire il significato della locuzione ‘posizione di un oggetto’, per esempio di un elettrone, occorre descrivere un esperimento mediante il quale la ‘posizione dell’elettrone’ possa essere misurata: altrimenti tale locuzione non ha alcun significato”.**

## **Esperimento mentale: microscopio a raggi gamma**

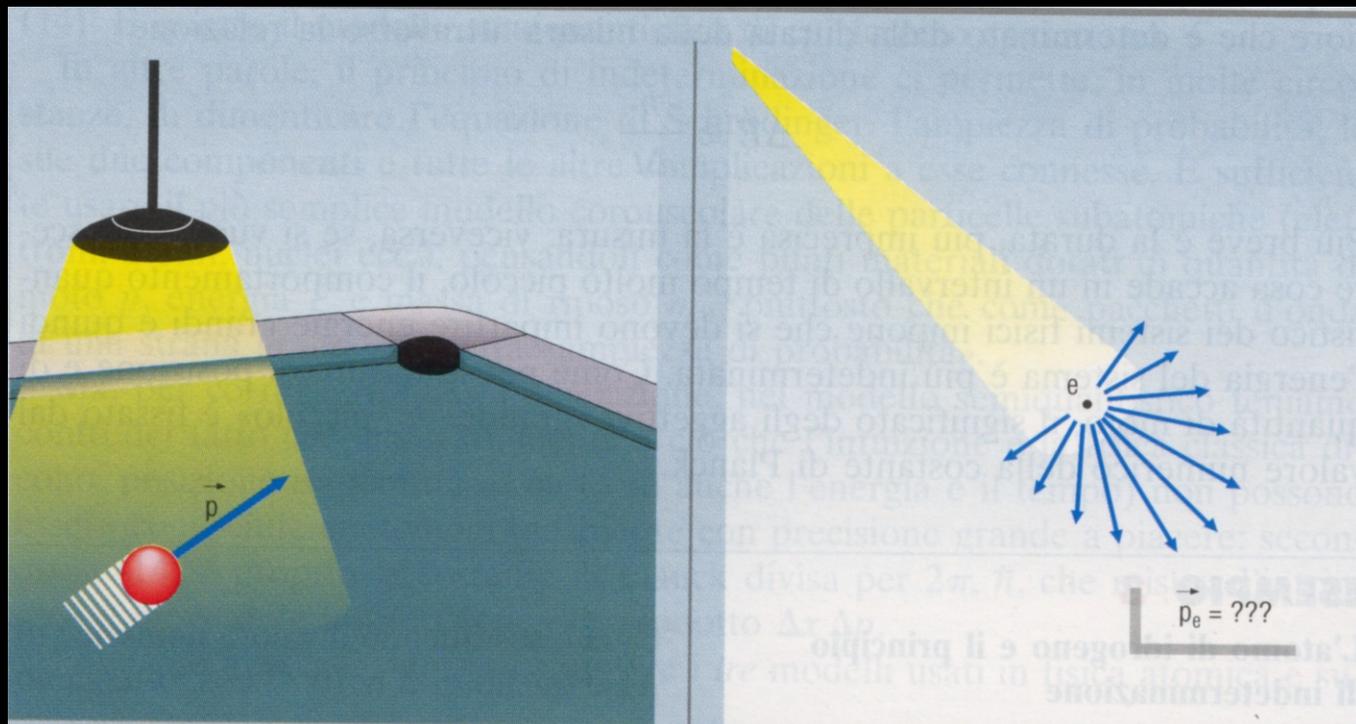
**Microscopio ad altissima risoluzione che utilizza, per “illuminare” l’oggetto, radiazione di lunghezza d’onda molto piccola**

# L'interpretazione "a disturbo" di Heisenberg



## Dal libro di testo “U.Amaldi”

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



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

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

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

**(U. Amaldi)**

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

**(Heisenberg, 1927)**

## **Dall'esperimento ideale di Heisenberg ...**

- **Indeterminazione come “disturbo” o “perturbazione”**
- **L'esperimento è interpretato considerando la natura discreta del mondo microscopico**

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

**“Nella formulazione rigorosa della legge causale - se *conosciamo il presente possiamo calcolare il futuro* - non è la conclusione ad essere sbagliata bensì la premessa. Non si possono conoscere con certezza la posizione e la velocità iniziali per cui si può calcolare solo un intervallo di possibilità, per posizione e velocità, in ogni istante futuro.**

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

**Heisenberg, 1927**

**Niels Bohr**  
**(1889, 1962)**



## L'obiezione di Bohr

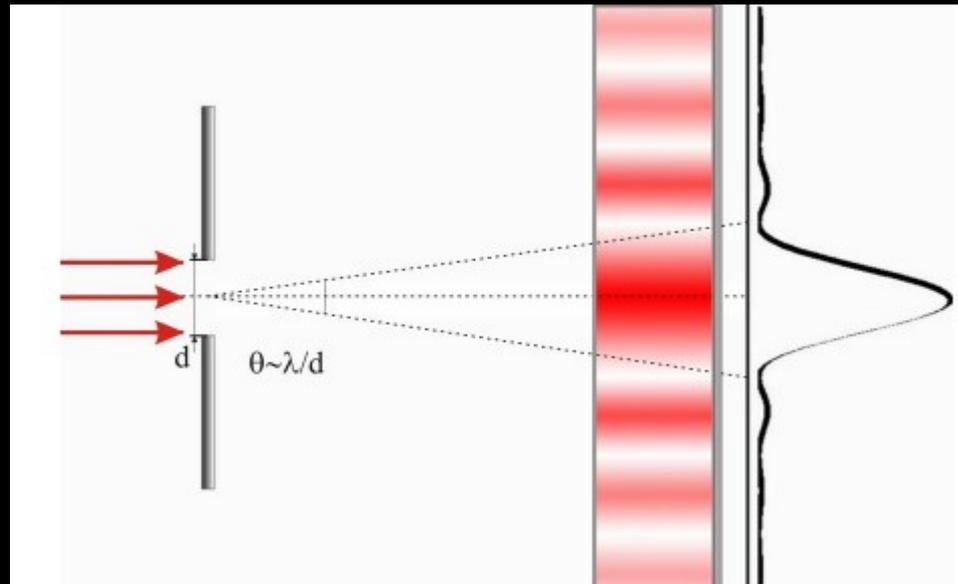
Occorre considerare anche

- la *natura ondulatoria* del raggio diffuso
- il ruolo dello *strumento di misura*

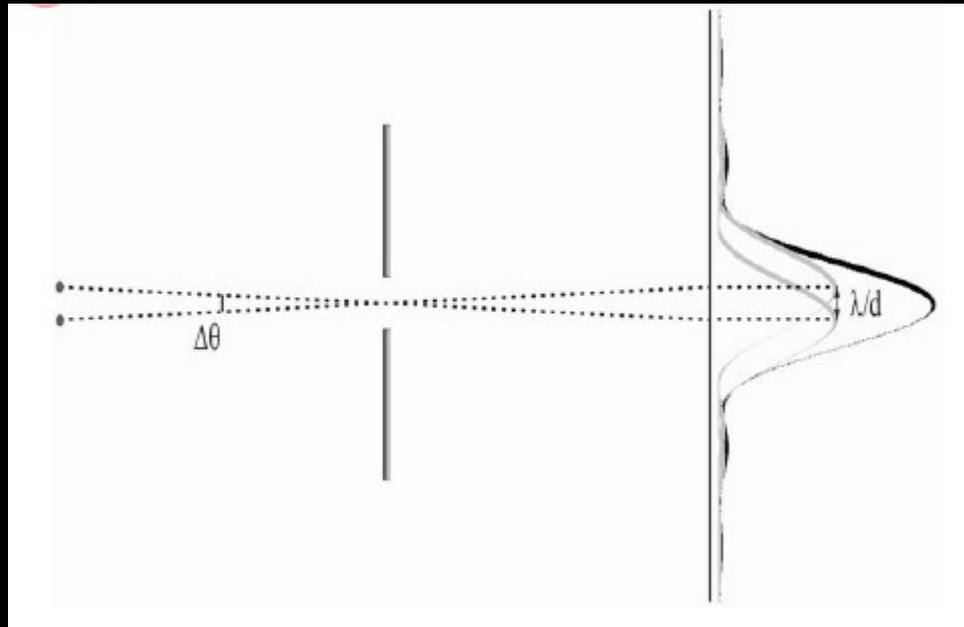
L'impossibilità di misurare simultaneamente posizione e velocità *non dipende soltanto* dal rinculo dell'elettrone per l'urto con il fotone gamma, *ma anche* dalla diffrazione della radiazione gamma nell'apertura dell'obiettivo del microscopio

# L'obiezione di Bohr

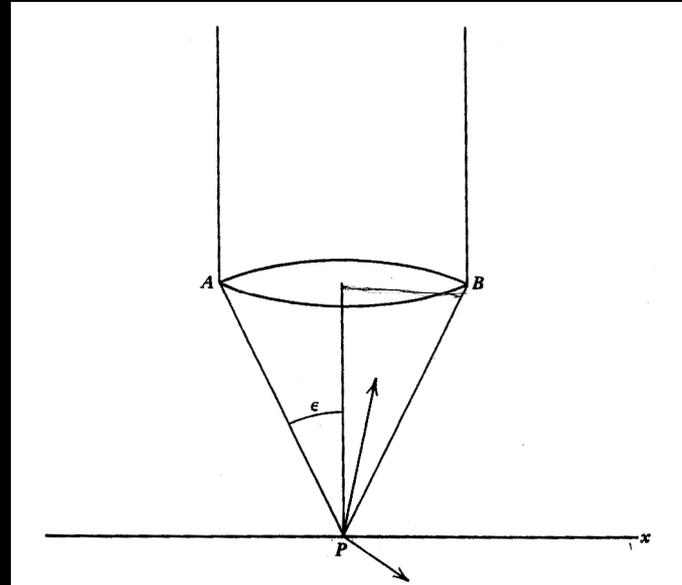
Quando un fascio di luce monocromatica passa attraverso una fenditura di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d'onda, il fascio si allarga per in fenomeno di diffrazione



***Potere risolutivo di un microscopio:*** due sorgenti sono risolte quando le loro figure di diffrazione sono chiaramente separate l'una dall'altra, ovvero (*criterio di Rayleigh*) quando il massimo centrale di una figura di diffrazione coincide con il primo minimo dell'altra.



# Il microscopio di Heisenberg



$$\Delta p_x = \frac{2h \sin \epsilon}{\lambda}$$

**Incertezza sulla quantità di moto dell'elettrone (effetto Compton)**

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\epsilon}$$

**Incertezza sulla posizione dell'elettrone (potere risolutivo)**

## C'è un errore fondamentale



“Copenhagen”, 1998, M. Frayn

**Copenaghen è un atomo...**



**“Copenhagen”, 1998, M. Frayn**

## Dal dibattito Heisenberg-Bohr

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

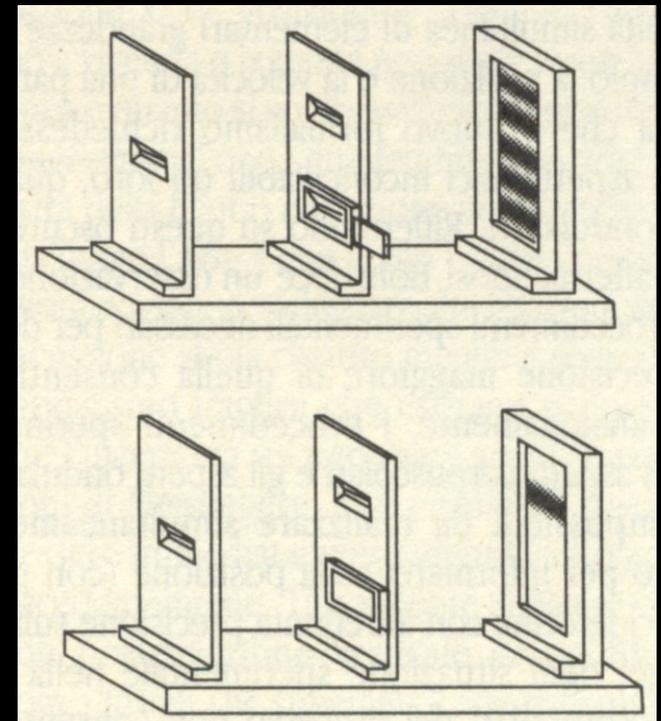
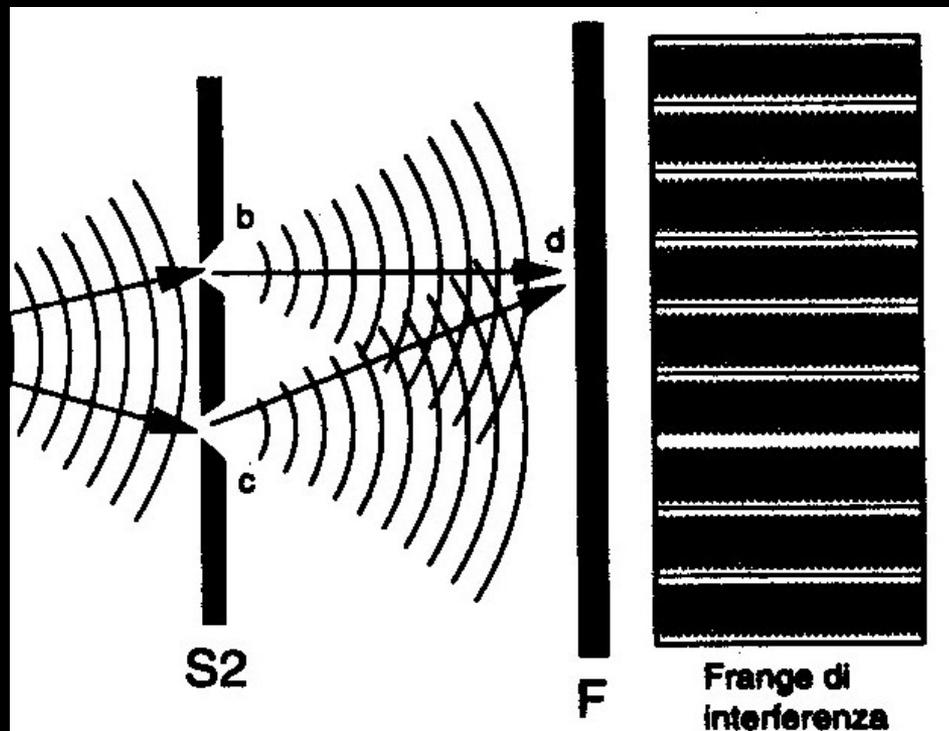
**Dal Congresso di Solvay, 1927:**

**Il dialogo Bohr-Einstein**

**L'obiezione di Einstein  
al principio di complementarità e gli  
esperimenti “which way”**

# La complementarità come “dualismo onda-corpuscolo”: Secondo significato

## Lo storico “esperimento mentale” di Bohr-Einstein della doppia fenditura

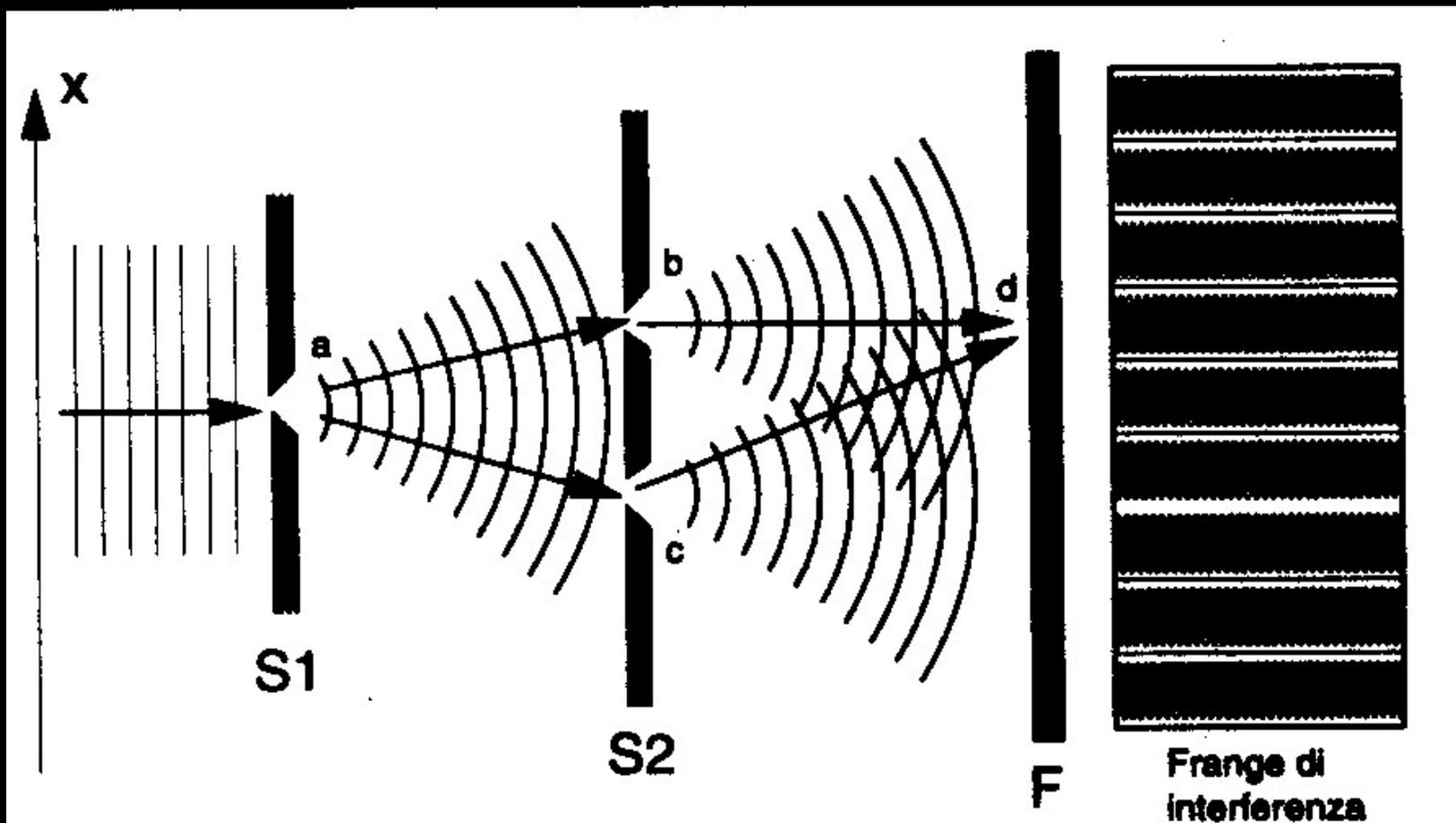


## **Presupposti (significato) degli esperimenti “which way”:**

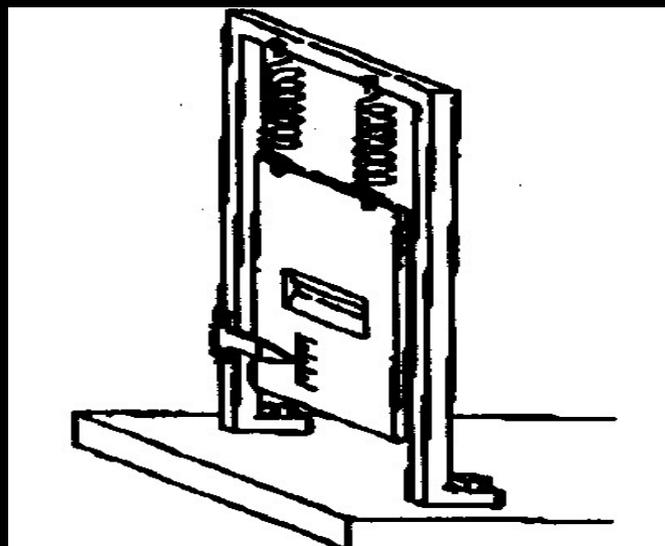
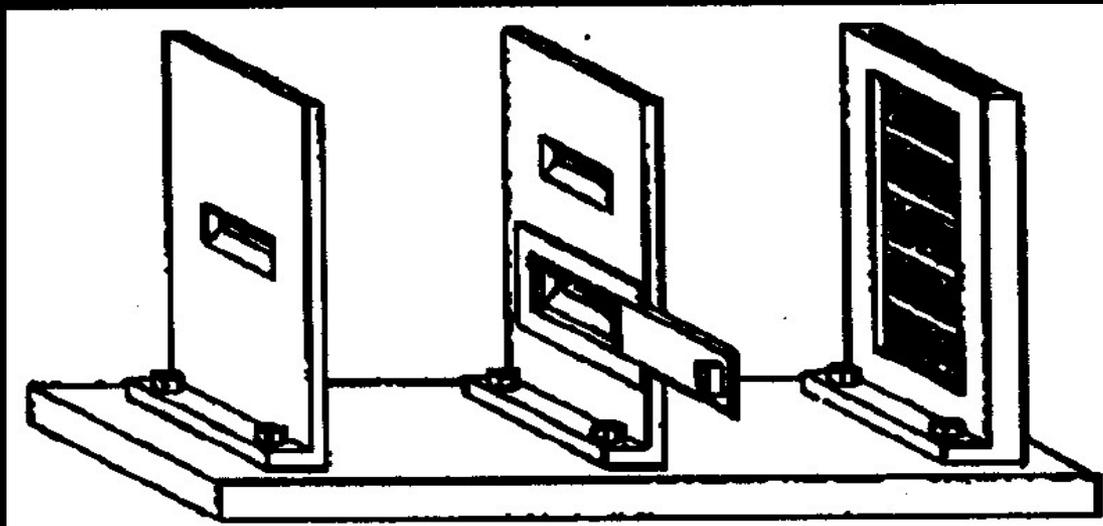
**Non è possibile ottenere contestualmente l'informazione sul cammino percorso dal fascio (pensiamolo di ELETTRONI) e una figura d'interferenza: si tratta di “aspetti complementari”, riconducibili al dualismo onda-corpuscolo, qualora si associ:**

- il formarsi di una figura d'interferenza alla natura ondulatoria del fascio;**
- l'informazione del cammino percorso alla natura corpuscolare del fascio.**

# Esperimento mentale di Einstein



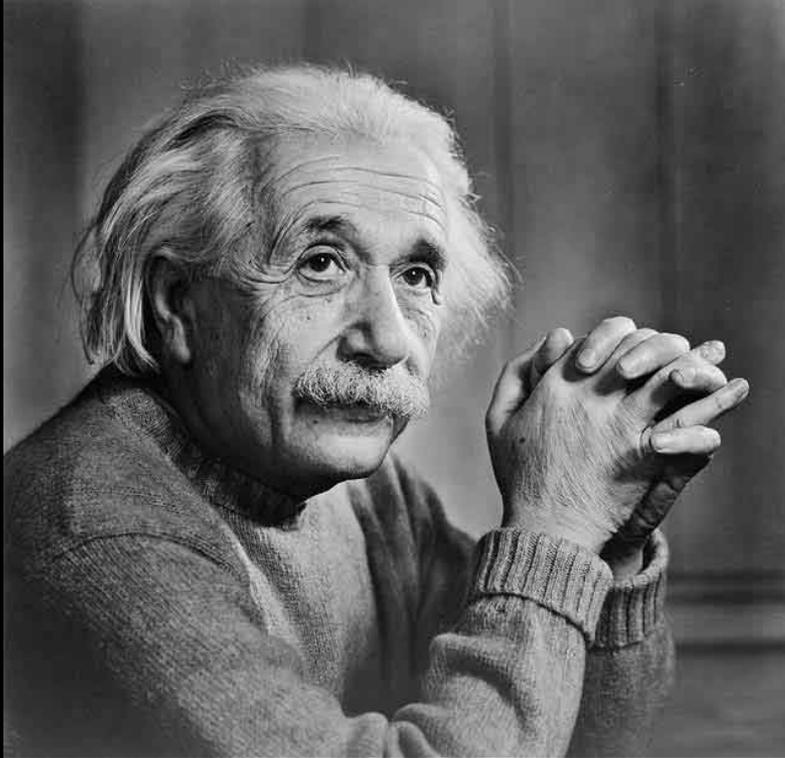
# Risposta di Bohr... E la sua "vittoria": la MQ diventa teoria



## **La posizione di Einstein**

**dalla ricerca di argomenti per mostrare l'inconsistenza della teoria...**

**...alla ricerca di argomenti per mostrare che la teoria non dice l'ultima parola sui meccanismi profondi che regolano l'universo (non è completa).**



**Albert Einstein**

***Alcuni fisici, tra cui ci sono anch'io, non possono credere che si debba abbandonare, ora e per sempre, l'idea che la realtà sia direttamente rappresentabile nello spazio e nel tempo; o che si debba accettare l'idea che gli eventi in natura siano analoghi a giochi del caso. Probabilmente mai prima d'ora una teoria era in grado di fornirci una chiave per interpretare e calcolare un gruppo così eterogeneo di fenomeni come la teoria quantistica. Nonostante questo, io credo che questa teoria ci induca in errore, perché, secondo me, è una rappresentazione incompleta delle cose reali.[...] L'incompletezza della rappresentazione porta necessariamente alla natura statistica (incompleta) delle leggi.***

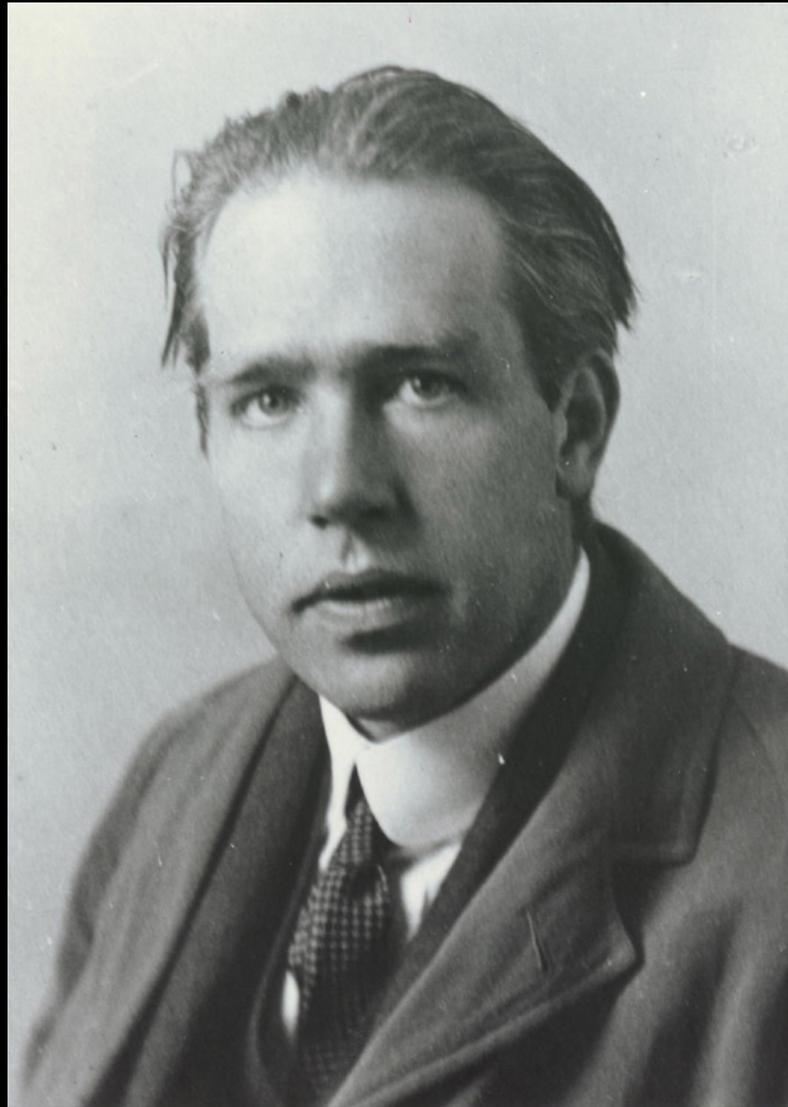
**Oggi:**

- 1. L'interpretazione "a disturbo" del PI non più accettabile: "Esperimenti "which way" senza disturbi meccanici" (Giorgio)**
- 2. La descrizione fornita dalla MQ (basata sul principio di indeterminazione e su quello di complementarità) è completa (Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio*, Il Saggiatore, 2001)**

# **La difficile accettazione della meccanica quantistica**

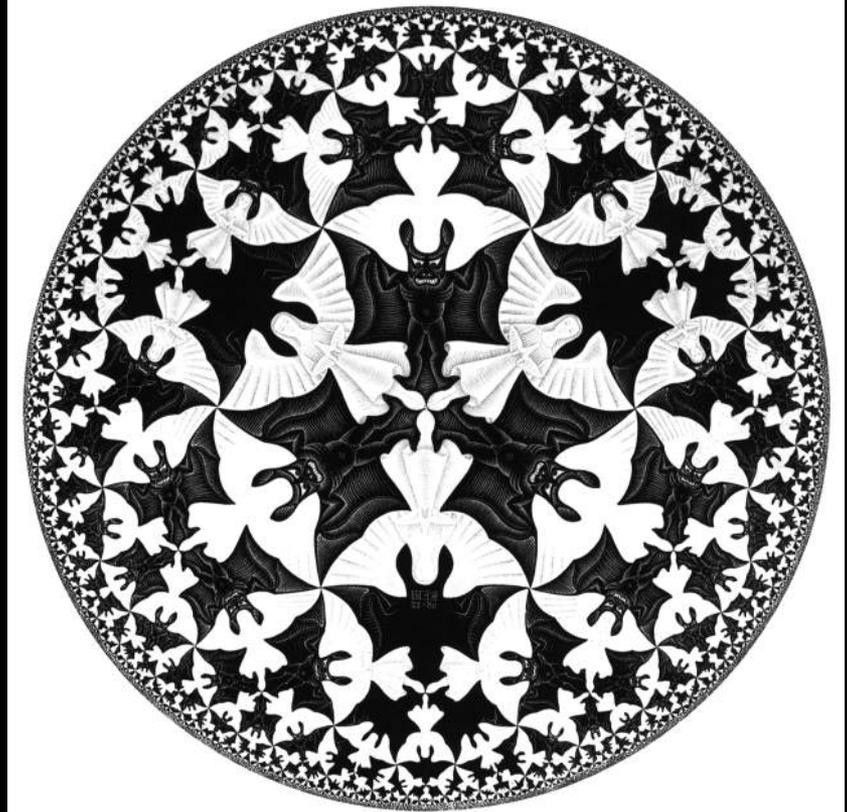
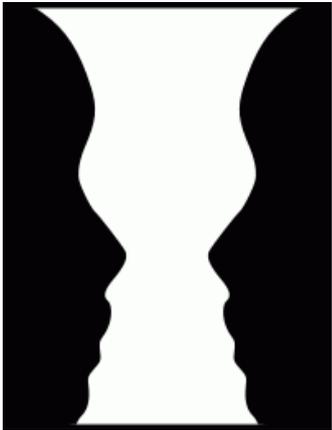
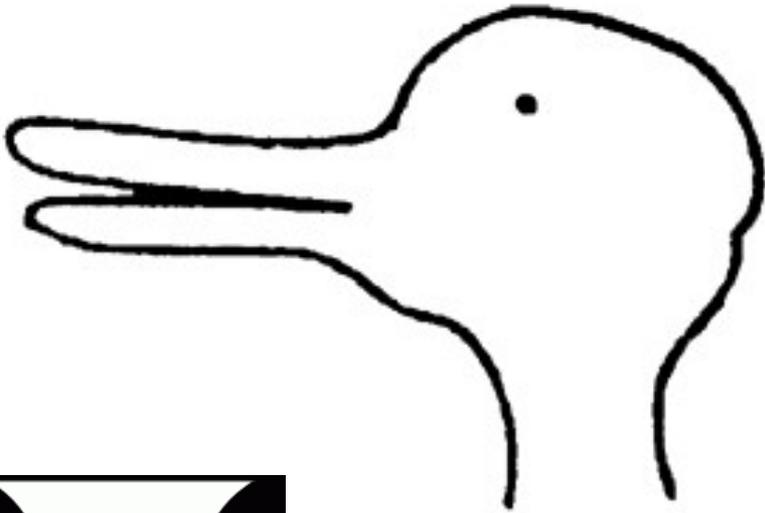
# **Alcuni dibattiti che hanno coinvolto i padri della meccanica quantistica:**

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



**Niels Bohr**  
**(1885-1962)**

**ambiguità**





**Niels Bohr**

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

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



***Contraria sunt complementa.***



**Erwin Schrödinger**  
**(1887-1961)**

***[Qui sembra che] l'ultima parola della scienza sia questa: né la teoria corpuscolare, né quella ondulatoria, prese singolarmente, sono capaci di rendere conto dei fatti, esse rivelano due aspetti del tutto diversi dei fenomeni, due aspetti che non abbiamo ancora imparato a mettere in armonia tra loro in modo soddisfacente.  
(1932)***



**Erwin Schrödinger**

***“La complementarità... c’è questo concetto – la complementarità – che Niels Bohr e i suoi discepoli diffondono e di cui tutti fanno uso. Devo confessare che non lo comprendo. Per me si tratta d'un'evasione. Non d'un'evasione volontaria. Infatti si finisce per ammettere il fatto che abbiamo due teorie, due immagini della materia che non si accordano, di modo che qualche volta dobbiamo far uso dell'una, qualche volta dell'altra. Una volta, settanta o più anni fa, quando si verificava un tale fatto, si concludeva che la ricerca non era ancora finita, perché si riteneva assolutamente impossibile far uso di due concetti differenti a proposito d'un fenomeno o della costituzione d'un corpo. Si è inventata ora la parola "complementarità", e ciò mi sembra voler giustificare quest'uso di due concetti differenti, come se non fosse necessario trovare finalmente un concetto unico, un'immagine completa che si possa comprendere. La parola "complementarità" mi fa sempre pensare alla frase di Goethe: "Perché proprio dove mancano i concetti, si presenta al momento giusto una parola.”***



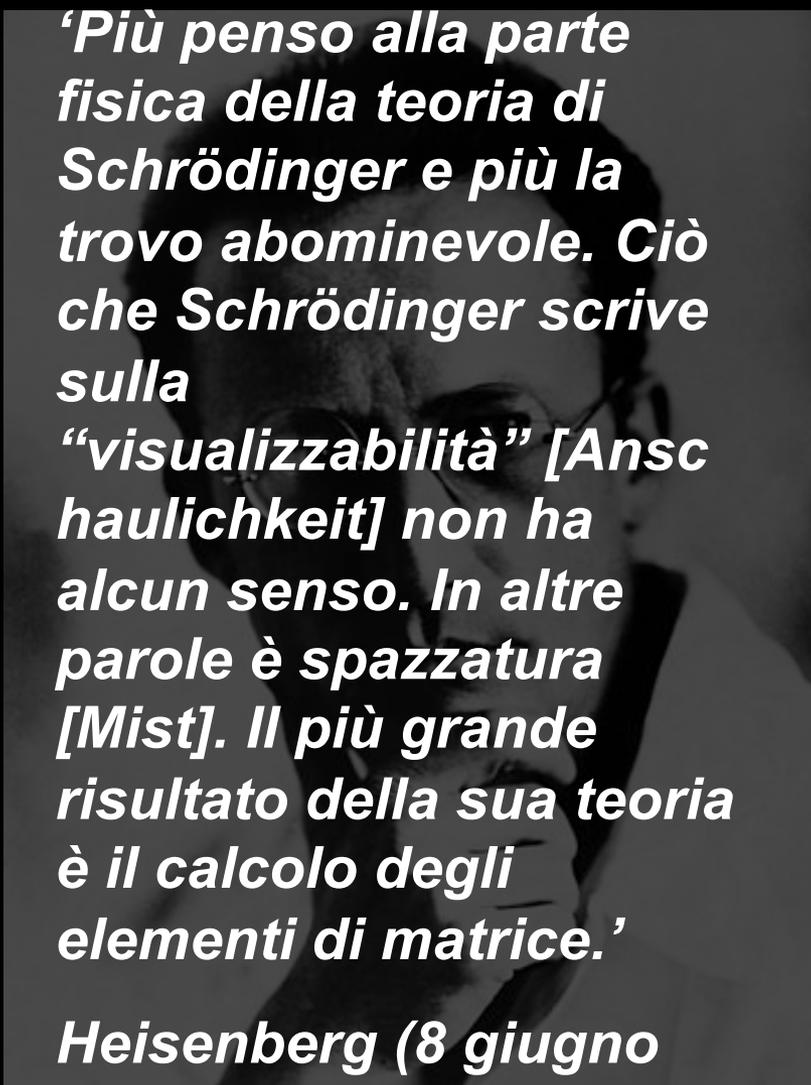
**Werner Heisenberg  
(1901-1976)**

***“Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana e queste RIGUARDANO OGGETTI DI GRANDI DIMENSIONI. Per di più, è molto difficile modificare il nostro linguaggio in modo tale da renderlo adatto a descrivere i processi atomici, visto che le parole possono solo descrivere cose di cui possiamo formarci immagini mentali; e anche questa è una capacità che ci viene dall’esperienza quotidiana. Per fortuna la matematica non ha queste limitazioni ed è possibile inventare uno schema matematico – la teoria quantistica – che sembra del tutto adatta alla trattazione dei processi atomici; per quel che riguarda la visualizzazione, quindi, ci dobbiamo accontentare di due analogie incomplete – l’immagine ondulatoria e quella corpuscolare.”***

**(W. Heisenberg)**

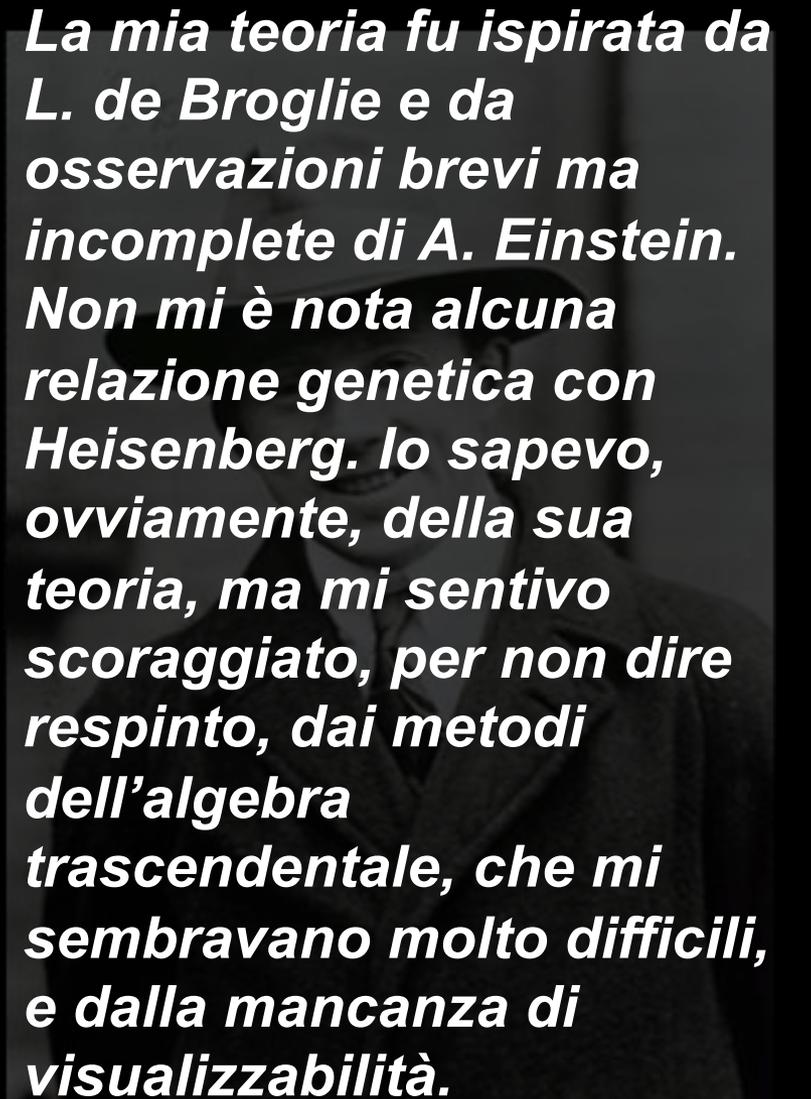


**(1933, stazione di Stoccolma)**

A black and white portrait of Werner Heisenberg, wearing glasses and a suit, looking slightly to the right. The text is overlaid on the left side of the image.

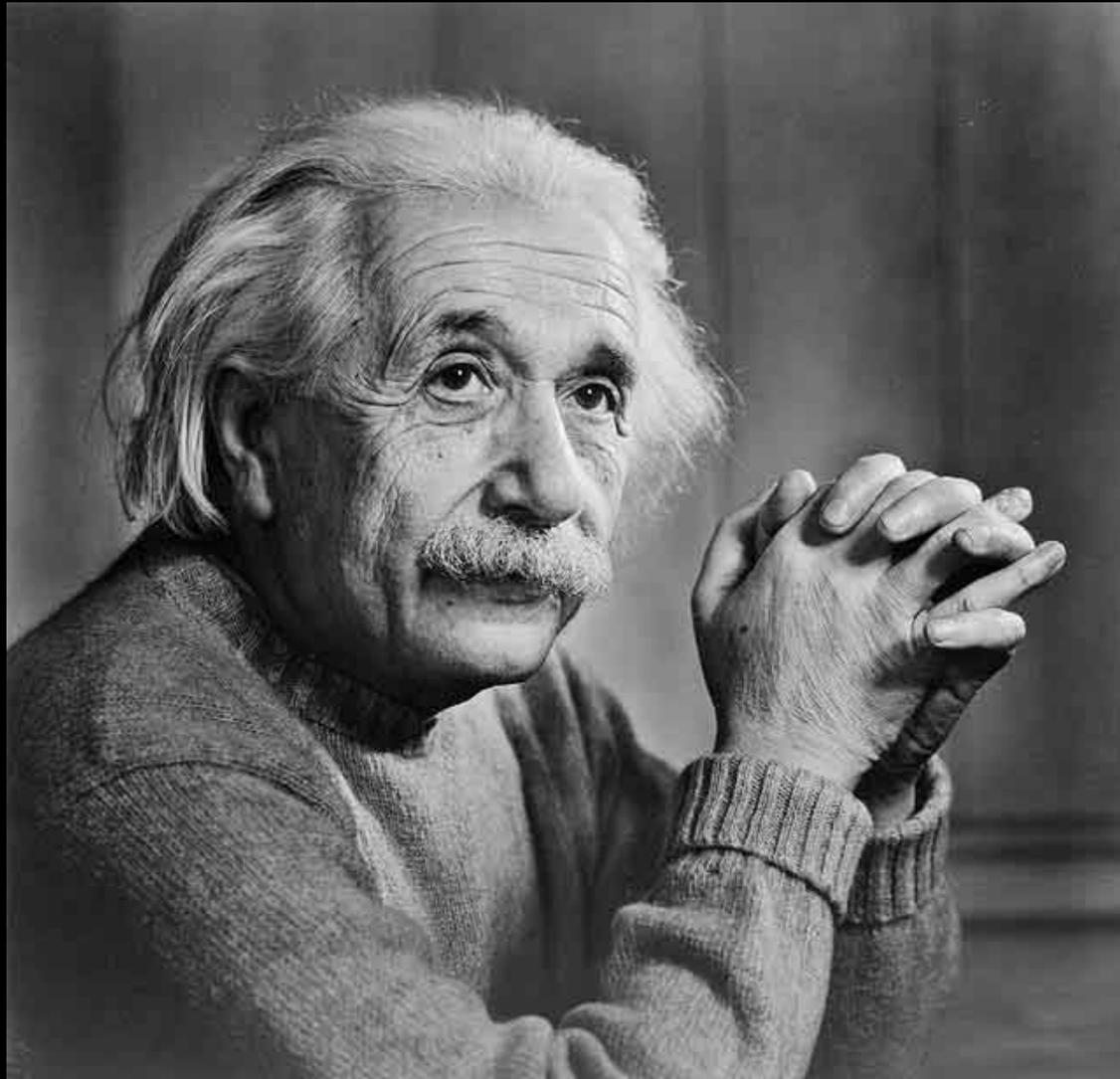
***‘Più penso alla parte fisica della teoria di Schrödinger e più la trovo abominevole. Ciò che Schrödinger scrive sulla “visualizzabilità” [Anschaulichkeit] non ha alcun senso. In altre parole è spazzatura [Mist]. Il più grande risultato della sua teoria è il calcolo degli elementi di matrice.’***

***Heisenberg (8 giugno 1926).***

A black and white portrait of Erwin Schrödinger, wearing glasses and a suit, looking slightly to the left. The text is overlaid on the right side of the image.

***La mia teoria fu ispirata da L. de Broglie e da osservazioni brevi ma incomplete di A. Einstein. Non mi è nota alcuna relazione genetica con Heisenberg. Io sapevo, ovviamente, della sua teoria, ma mi sentivo scoraggiato, per non dire respinto, dai metodi dell’algebra trascendentale, che mi sembravano molto difficili, e dalla mancanza di visualizzabilità.***

***Schrödinger (primavera 1926)***



**Albert Einstein  
(1879-1955)**

## **BOHR**

**“Non esiste un mondo quantistico. C'è solo una descrizione fisica astratta quantistica. E' sbagliato pensare che lo scopo della fisica sia scoprire come è fatta la natura. La fisica riguarda solo quello che possiamo dire della natura”**

## **EINSTEIN**

**Credo ancora nella possibilità di un modello di realtà – cioè una teoria – che rappresenti le cose di per sé, e non solamente la probabilità che esse accadano.**

**La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Gran Vecchio. In ogni caso sono convinto che Dio non gioca a dadi con il mondo.**



***“Decidemmo di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico, e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene l’unico mistero.”***

**Richard Feynman**

## In sintesi

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

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

Il paradosso del “which way?”:  
onda o particella ?  
Lo decido io!

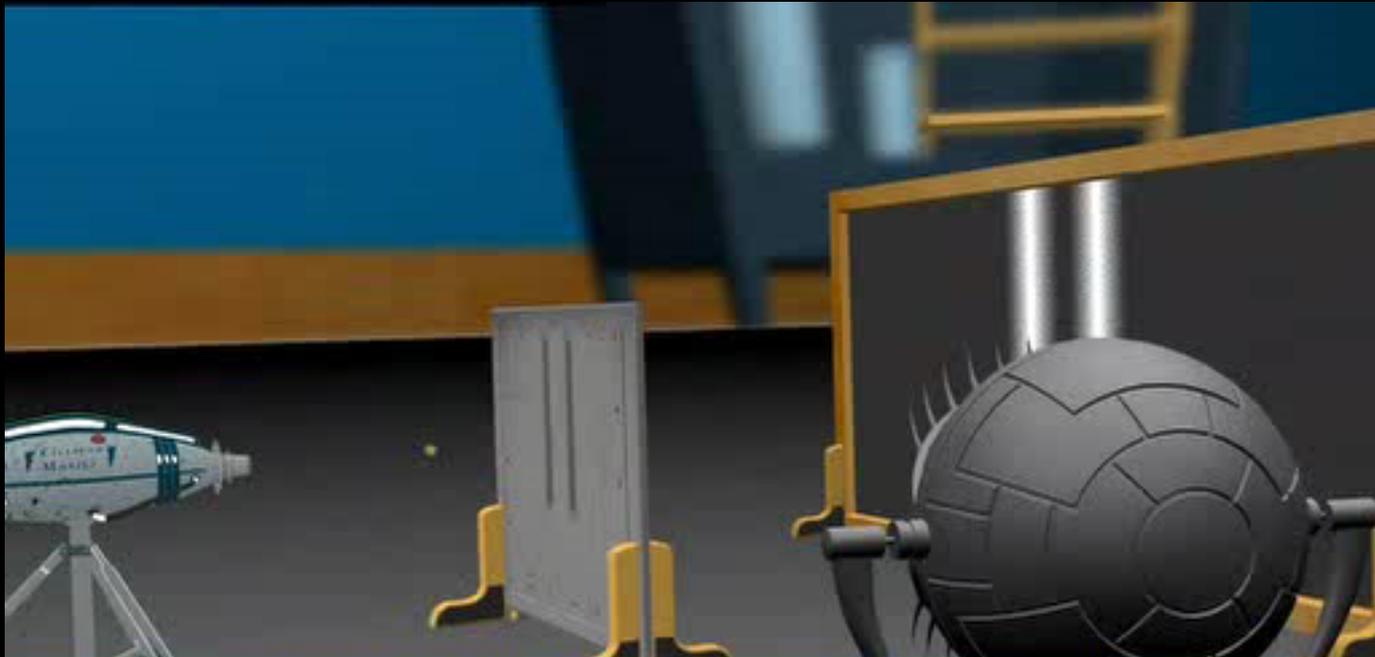
*Giorgio Lulli*

## Un passo avanti rispetto al “dualismo” onda-particella

La domanda è:

cosa accade se nell' esperimento più bello cerchiamo di “vedere” di più, ovvero cerchiamo di scoprire da quale fenditura (*which way?*) passa ciascun elettrone?

Ricordate cosa ci ha detto il Dr. Quantum in proposito?



tutte queste possibilità si trovano in sovrapposizione l'una con l'altra

“vedere” di più: esperimento *which way?*



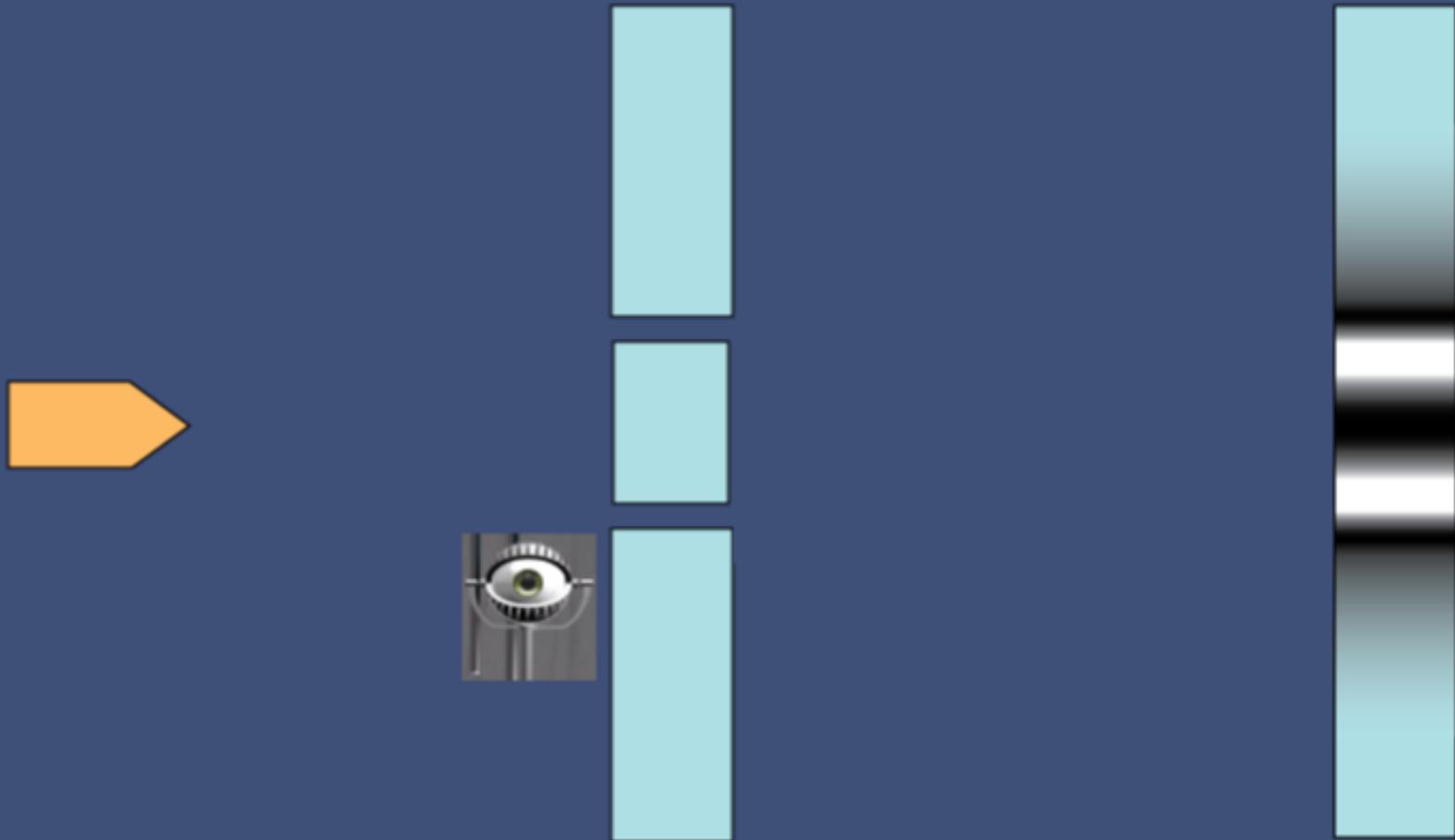
“vedere” di più: esperimento *which way?*



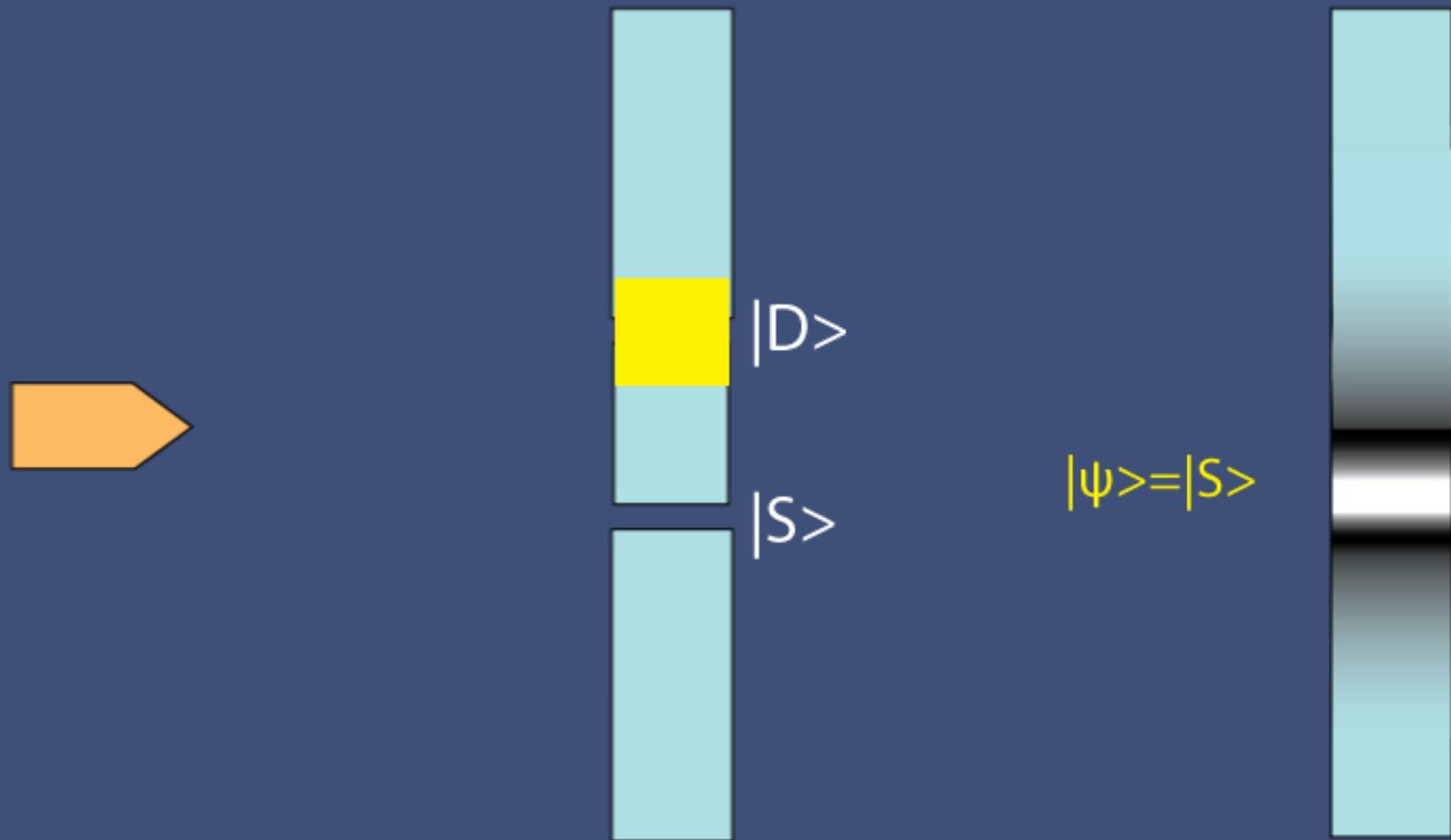
?



“vedere” di più: esperimento *which way?*

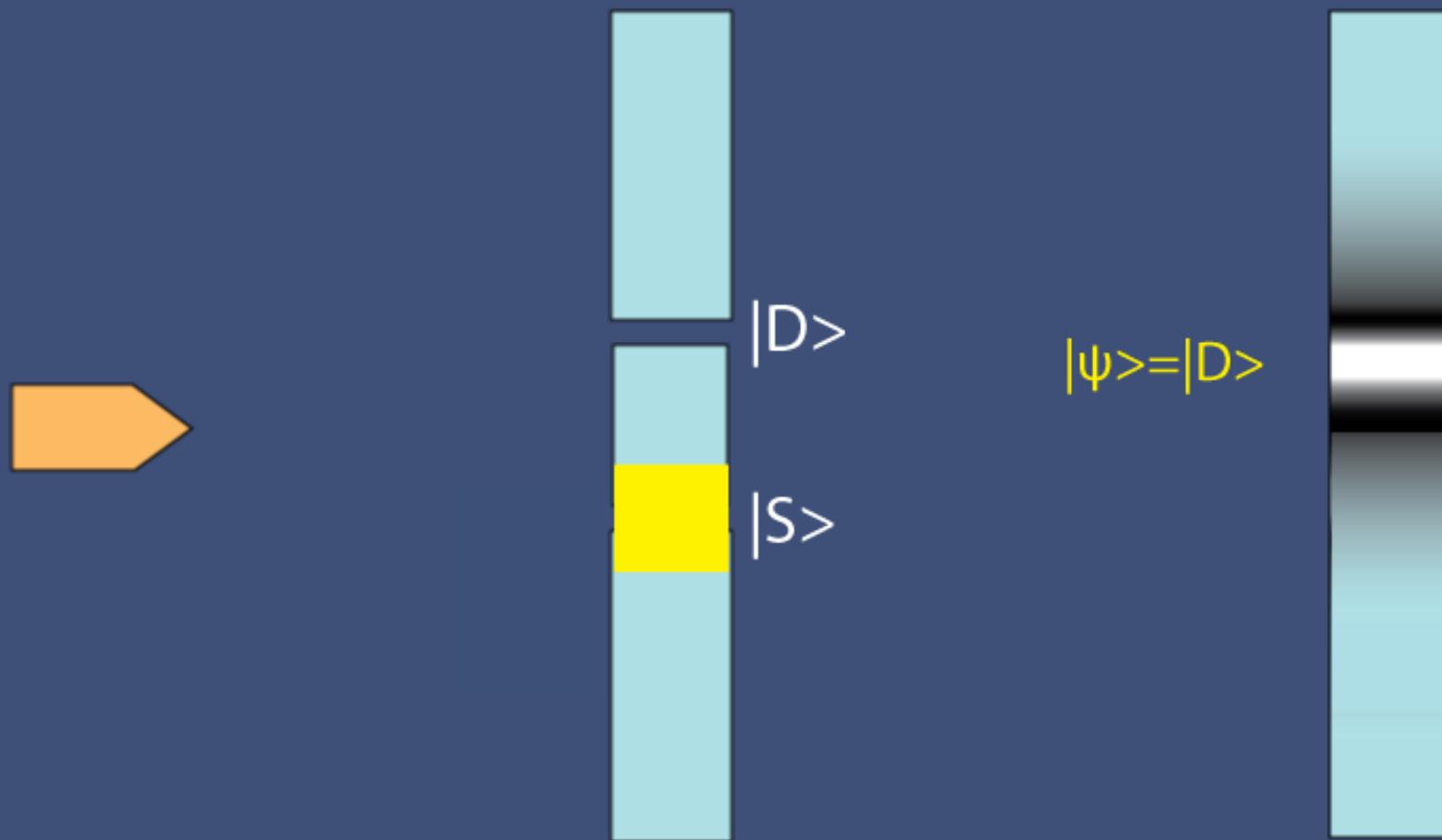


con informazione "which way?"



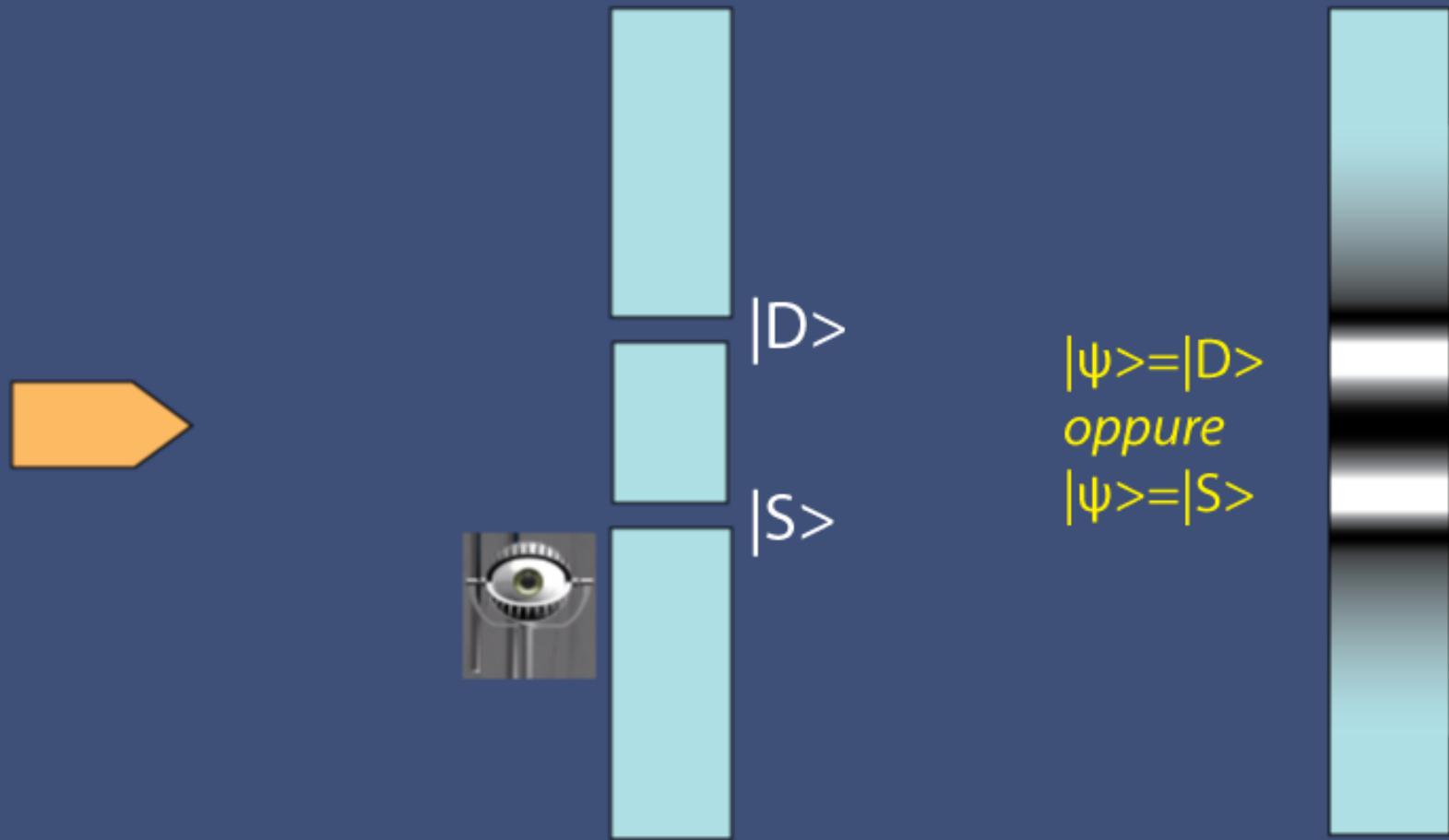
$$||\psi\rangle|^2 = (|S\rangle)^2 \quad (\text{intensità})$$

con informazione "which way?"



$$||\psi\rangle|^2 = (|D\rangle)^2$$

con informazione "which way?"

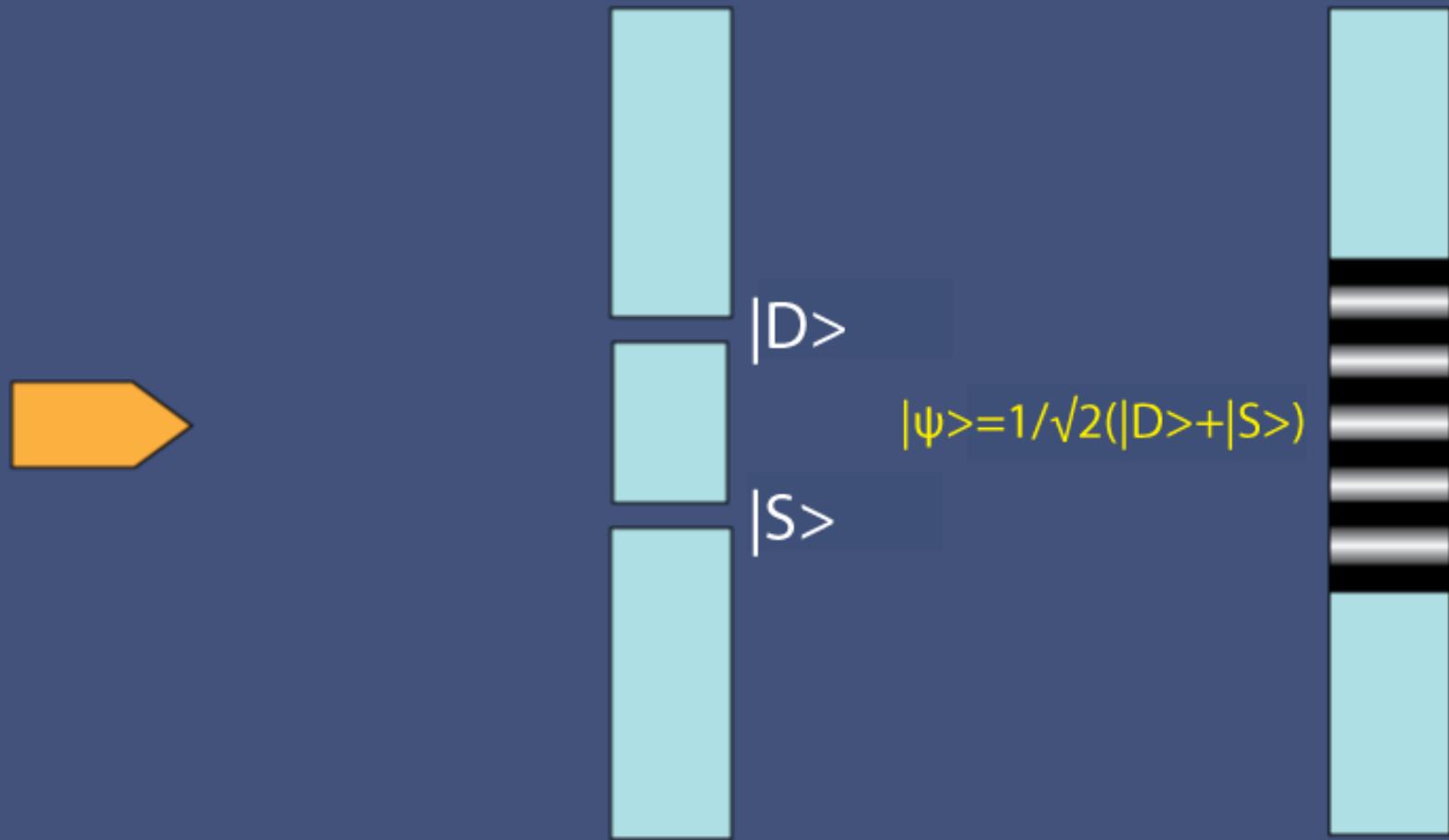


$|\psi\rangle = |D\rangle$   
oppure  
 $|\psi\rangle = |S\rangle$

$$||\psi\rangle|^2 = 1/2[(|D\rangle)^2 + (|S\rangle)^2]$$

**no interferenza**

senza informazione "which way?"



$$||\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2}(|D\rangle + |S\rangle)^2$$

**interferenza**

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

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

Abbiamo visto che anche la luce si può comportare come onda o corpuscolo (*fotone*) in modo del tutto simile agli elettroni.

Anche con i *fotoni* si può fare l' esperimento “*which way?*”

Perchè farlo con i fotoni?

- si possono superare alcune difficoltà del sistema a doppia fenditura (reale o virtuale - biprisma)
- L'apparato sperimentale necessario è più semplice e ... economico !
- è più facile ricavare l'informazione sul percorso del fotone *senza esercitare alcun disturbo apprezzabile su esso.*

Entriamo qui nel campo della cosiddetta “*ottica quantistica*”

# Elementi tipici di un interferometro ottico di tipo *Mach-Zehnder*



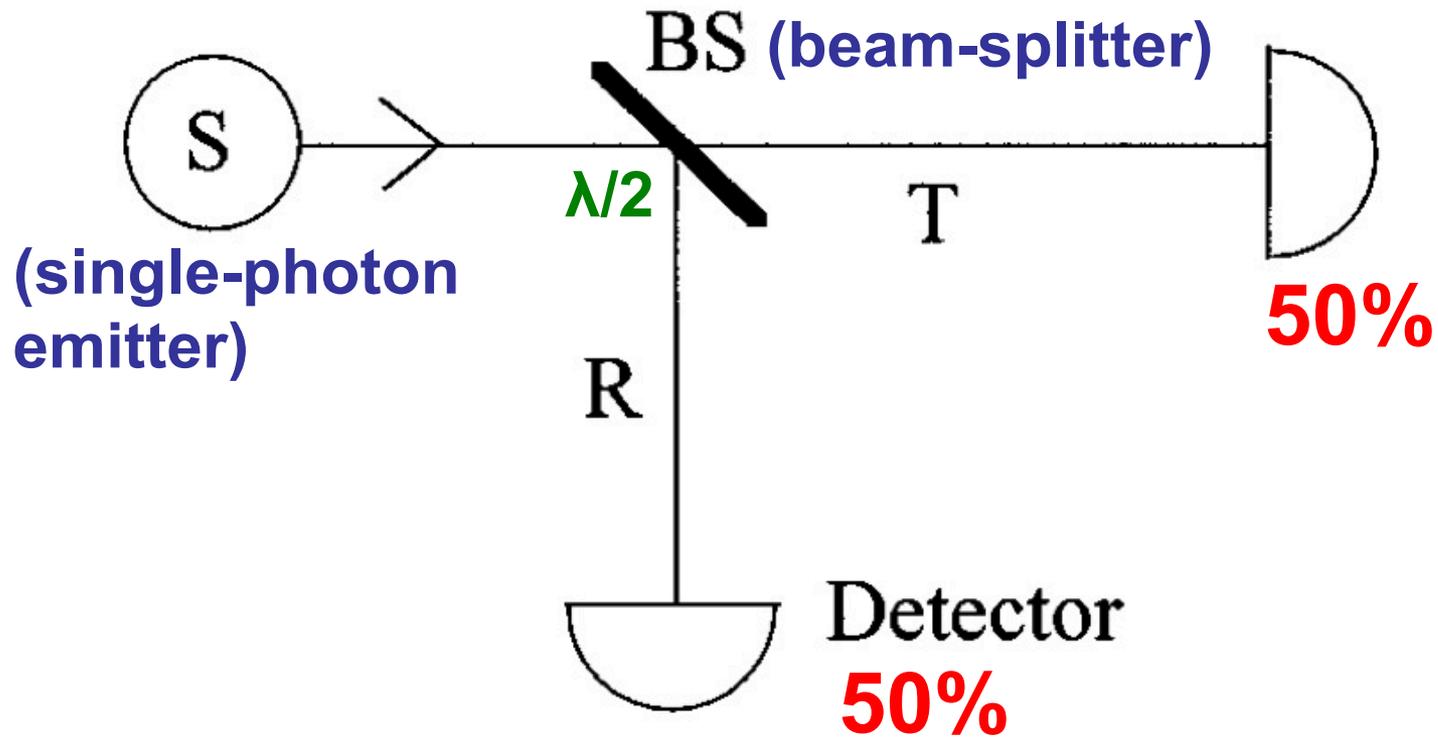
- emettitori e rivelatori di fotoni singoli
- specchi riflettenti e semi-riflettenti
- rivelatori non perturbativi

## Avvertenza

I componenti con le proprietà adatte a realizzare esperimenti quantistici “*which way?*” con singolo fotone sono stati disponibili solo a partire dall’inizio degli anni ’90.

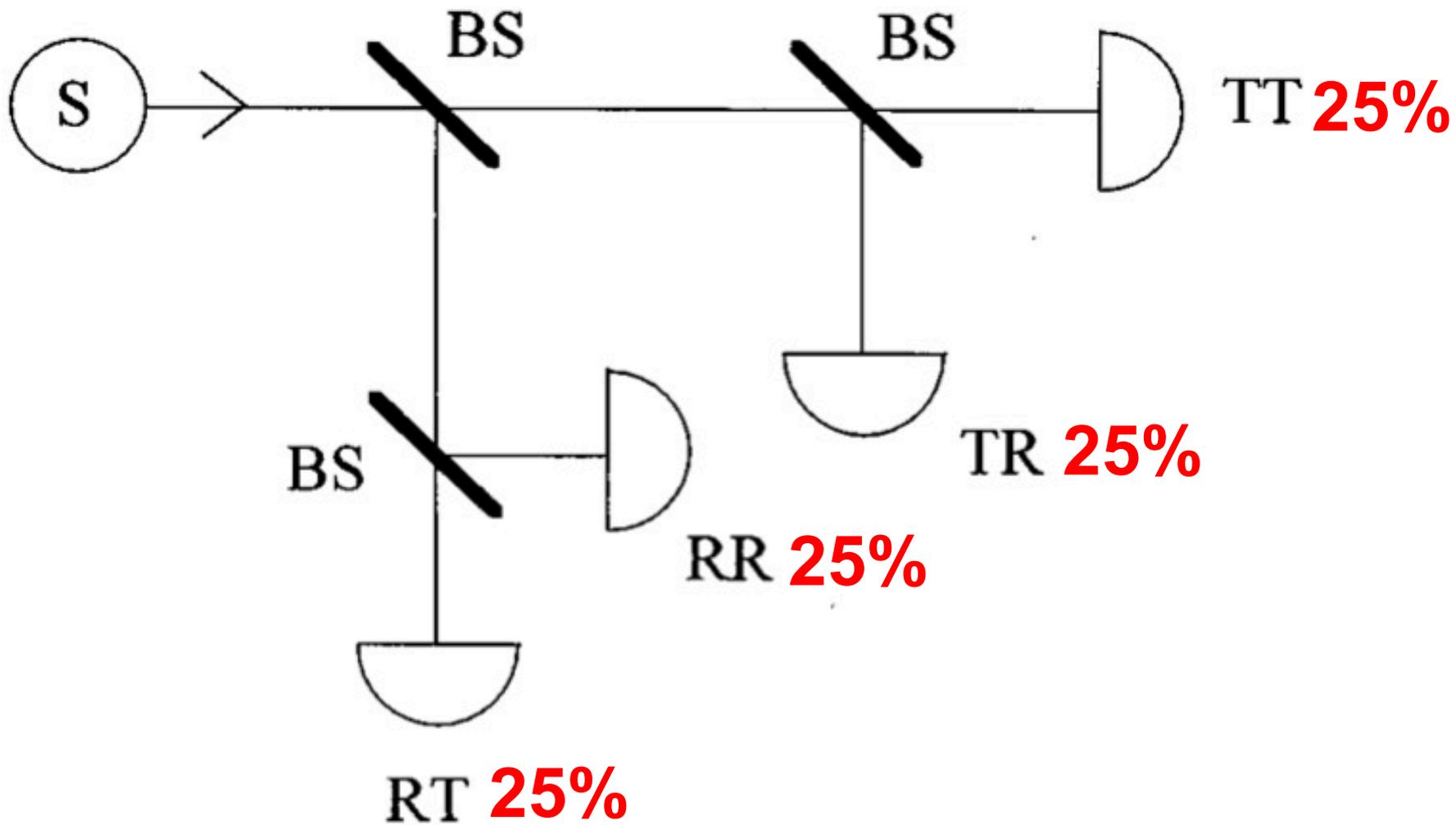
Benchè semplici concettualmente, gli esperimenti che esamineremo sono di complessa realizzazione, noi ne mostreremo solo degli schemi concettuali semplificati, non preoccupandoci delle problematiche della realizzazione pratica e concentrandoci sui risultati.

## proprietà di uno specchio semiriflettente (beam splitter)

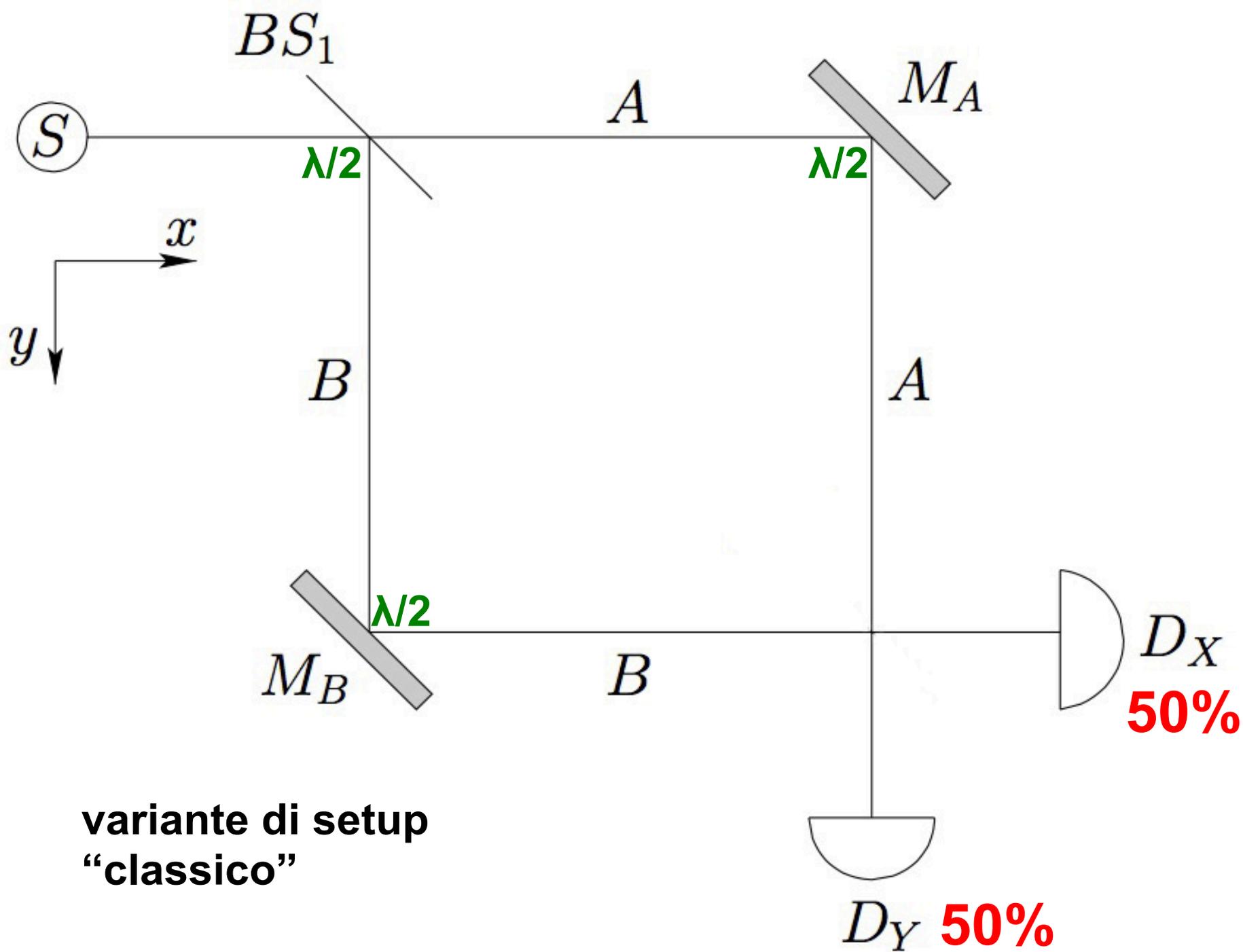


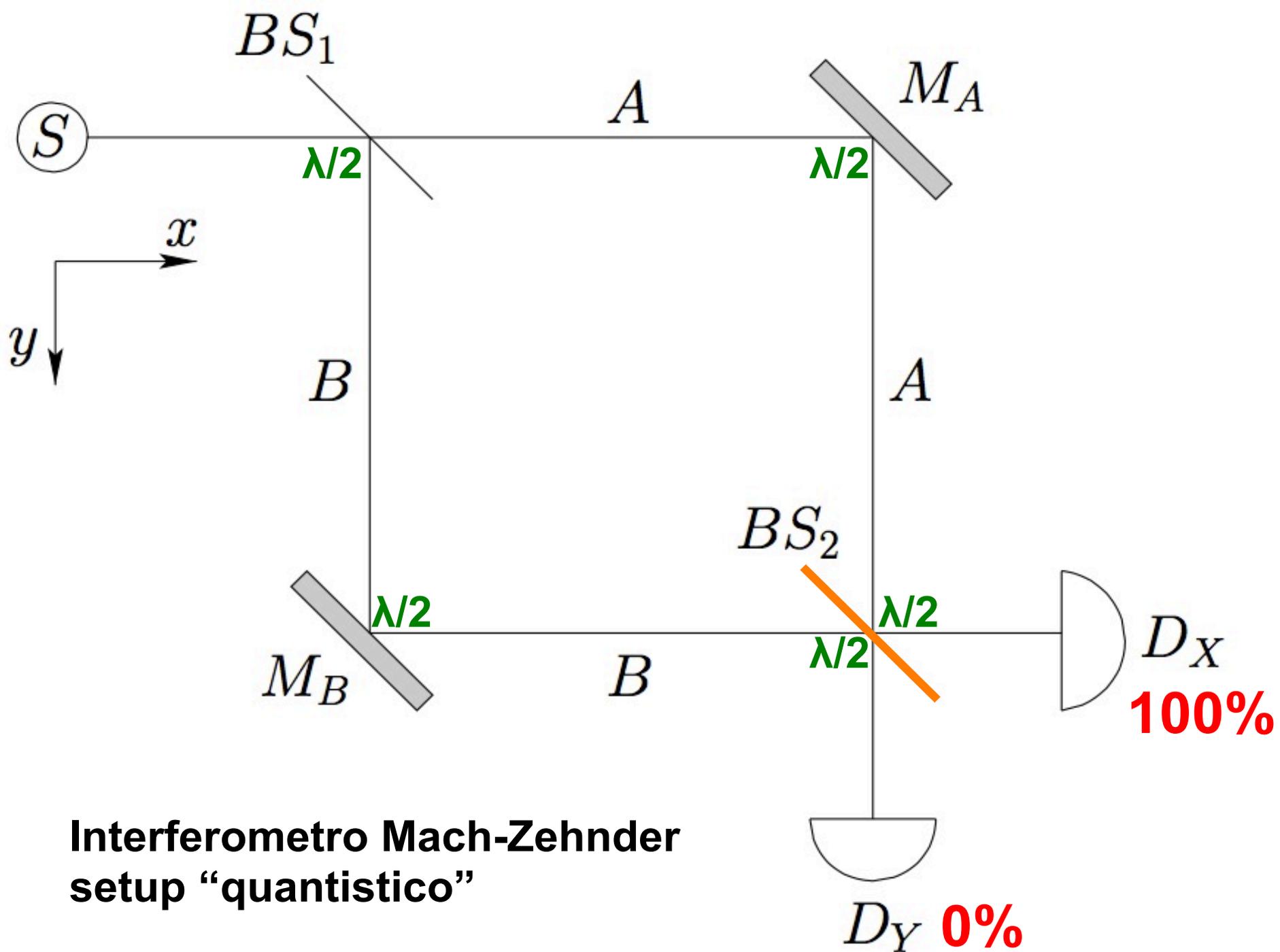
(la parte riflessa del fotone risulta sfasata di  $\lambda/2$ )

- ogni singolo fotone viene rivelato in *un solo* rivelatore
- la probabilità di arrivo nei 2 rivelatori è del **50%**



setup "classico": risultato facilmente prevedibile

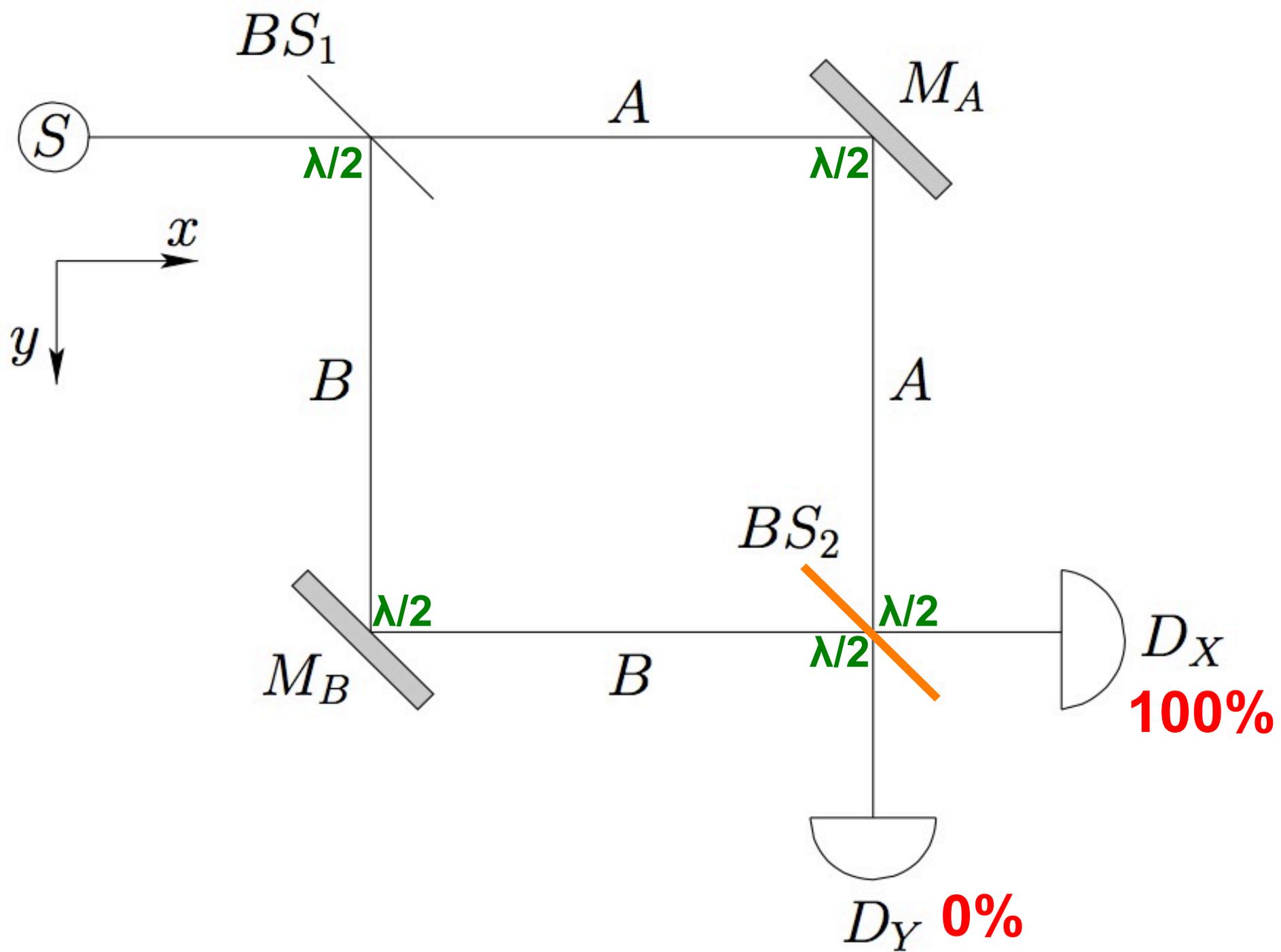


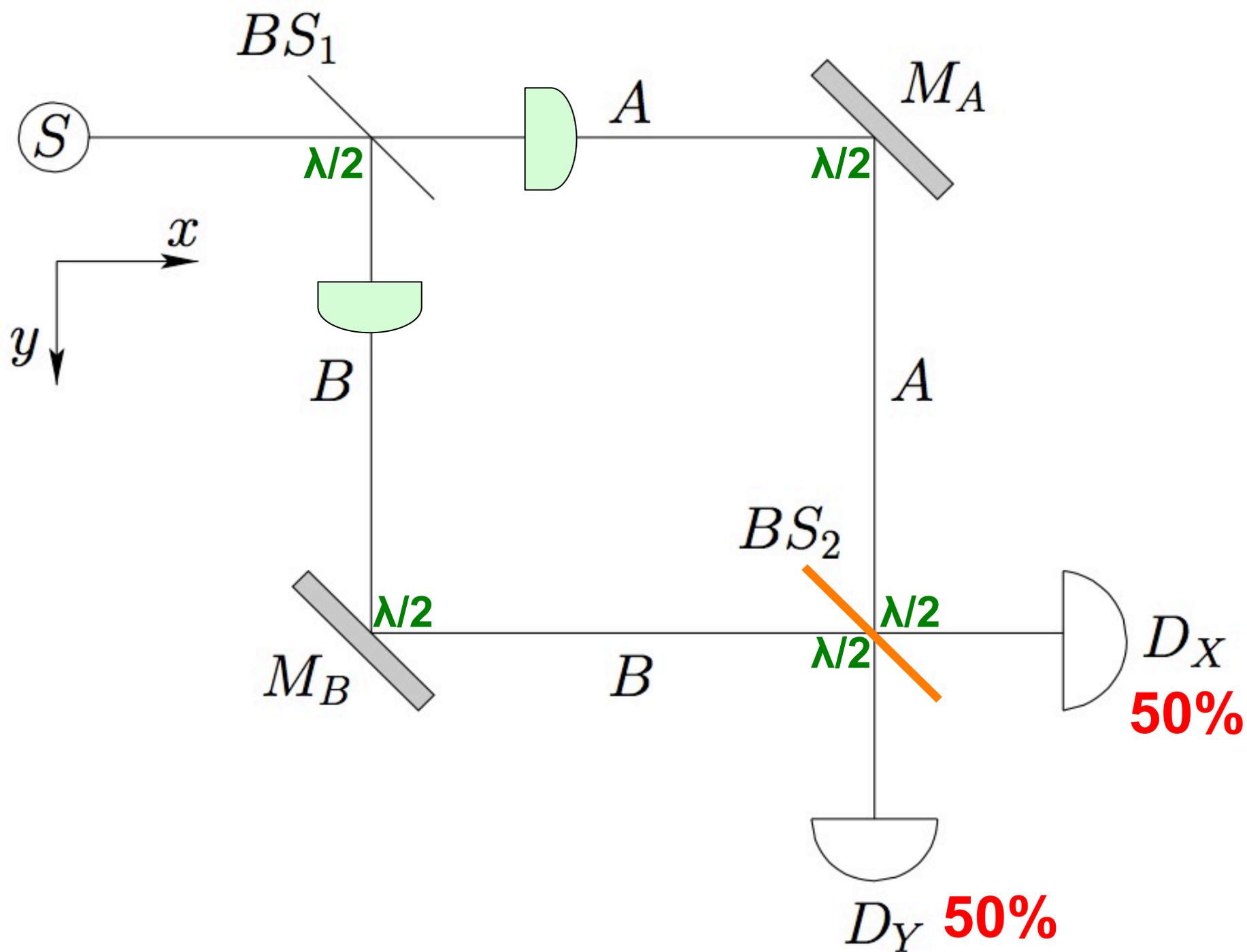


Cosa è cambiato con l'inserimento di  $BS_2$  ? Che un fotone ha ora a disposizione *più cammini* (A e B) per arrivare allo stesso rivelatore.

In termini quantistici si dice che la particella si *delocalizza* nei due cammini A e B: potenzialmente è come se essa li esplorasse entrambi. I due cammini “potenziali” si sovrappongono come sorgenti ondulatorie coerenti, dando origine a interferenza. Ma attenzione questo *non* vuol dire che l'oggetto quantistico (elettrone, fotone) *si divide in due !!*

Ora inseriamo nei due rami due apparati non perturbativi che ci danno la possibilità di sapere da che parte è passato il fotone.





Se l'apparato consente di sapere da dove passa la particella si distruggono (collassano) le possibilità e questo distrugge anche l'interferenza. **Nota bene**: questo accade anche se la misura "*which way?*" non viene effettivamente registrata ....

Da un punto di vista matematico formale cambia il modo in cui si somma l'effetto dei singoli eventi

somma **coerente** → *interferenza*

somma **incoerente** → *no interferenza*

percorsi indistinguibili:  $|A\rangle$  “e”  $|B\rangle$

- stato

$$|\psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|A\rangle + |B\rangle)$$

- probabilità:

$$||\psi\rangle|^2 = 1/2 (||A\rangle + |B\rangle|^2) \quad \text{coerente} \rightarrow \text{interferenza}$$

percorsi distinguibili:  $|A\rangle$  o  $|B\rangle$

- stato

$$|\psi\rangle = |A\rangle \quad \text{oppure} \quad |\psi\rangle = |B\rangle$$

- probabilità

$$||\psi\rangle|^2 = 1/2 (||A\rangle|^2) + (||B\rangle|^2) \quad \text{incoerente} \rightarrow \text{no interferenza}$$

Si può pensare questo risultato come una manifestazione del *principio di complementarità di Bohr* : la conoscenza del cammino e gli effetti di interferenza sono due aspetti *complementari*, che non possono manifestarsi contemporaneamente.

Le interferenze a una particella appaiono quando questa può utilizzare più cammini per arrivare allo stesso rivelatore *e nello stesso tempo questi cammini sono indistinguibili.*

In generale vale  $D^2 + V^2 \leq 1$

dove  $D$  = *distinguibilità* dei percorsi

$V$  = *visibilità* delle frange (legata al *contrasto*)

## In definitiva:

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

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

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

**... stiamo forse insinuando che il fatto di comportarsi come onda o come particella dipende dalla nostra *soggettiva* decisione di come allestire l'apparato sperimentale?**

Estremizzazioni a parte, resta l'idea che il *soggetto* cosciente possa esercitare, con l'atto della osservazione sperimentale, un'influenza sulla natura dell'*oggetto* dell'indagine

Influenza che, è importante sottolinearlo, *non* avviene per effetto di una interazione basata sulle forze conosciute

La messa in crisi del concetto di realtà oggettiva e la natura probabilistica della MQ sono i motivi per cui Einstein era convinto che questa fosse una teoria incompleta. Sono famose a questo proposito le sue frasi: *“Dio non gioca a dadi con il mondo”* e *“Mi piace pensare che la luna stia lassù nel cielo anche quando non la guardo....”*

Non è qui il luogo di discutere se le varie interpretazioni alternative a quella ortodossa di Bohr e Heisenberg siano più o meno convincenti.

**Resta il fatto incontrovertibile che la meccanica quantistica suggerisce un livello di interazione tra gli elementi della realtà molto più profondo e complesso di quanto non ci sia possibile immaginare sulla base dell'intuizione e dell'esperienza quotidiana.**

## Forthcoming

La meccanica quantistica non è interessante solo dal punto di vista della fisica fondamentale.

Su di essa si basa infatti il funzionamento di tantissimi dispositivi contenuti negli oggetti di uso comune (computer, telefoni cellulari, tablet, ecc).

Ma la frontiera della ricerca in questo settore sta avanzando molto rapidamente.

Venerdì Eugenio Bertozzi vi mostrerà in particolare come le “stranezze” quantistiche - quelle che abbiamo visto fin qui e altre ancora - possono essere sfruttate per applicazioni tecnologiche innovative.