

Una (breve) paradossale lezione sulla meccanica quantistica

Cristiano Sebastiani



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Introduzione

Basi fondamentali di meccanica quantistica

Fenomeno dell'entanglement: gatto di Schrödinger

Paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)

Diseguaglianza di Bell

Proprietà fondamentali della meccanica quantistica



"I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics." —Richard Feynman, The Character of Physical Law

Quantizzazione

Classico

L'energia in un fascio di luce può assumere un valore continuo



es. una lampadina da 100W

Quantizzazione

Classico

L'energia in un fascio di luce può assumere un valore continuo



es. una lampadina da 100W

Quantistico

L'energia in un fascio di luce è discreta

$$E = nh\nu$$

n è un intero

h è la costante di Plank

v è la frequenza

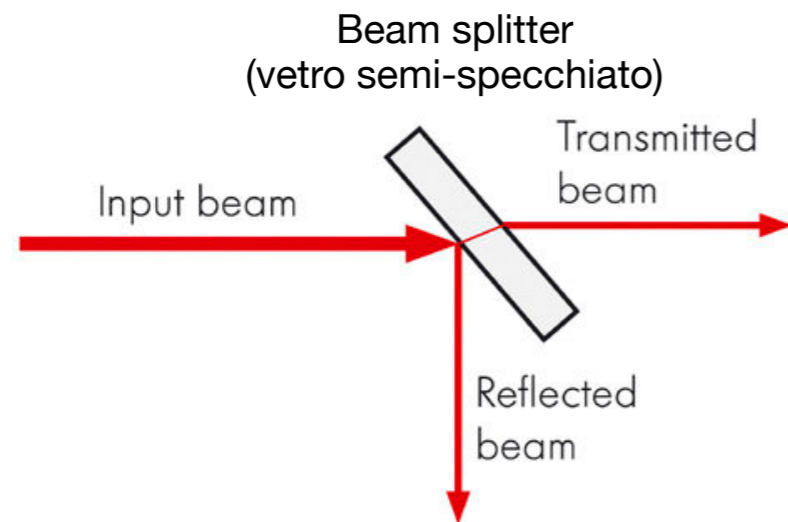
I singoli elementi di luce sono chiamati fotoni

*La stessa lampadina emette
~10²⁰ fotoni al secondo!*

Indeterminazione

Classico

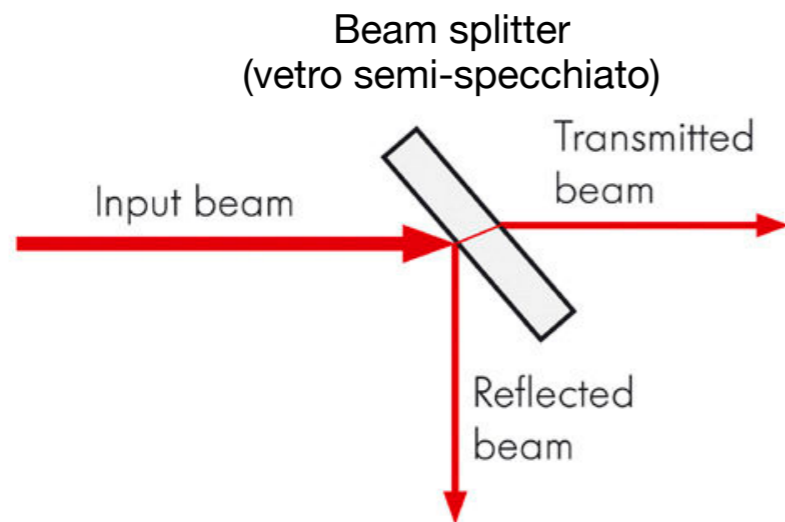
Si può predire con esattezza l'esito di un esperimento



Indeterminazione

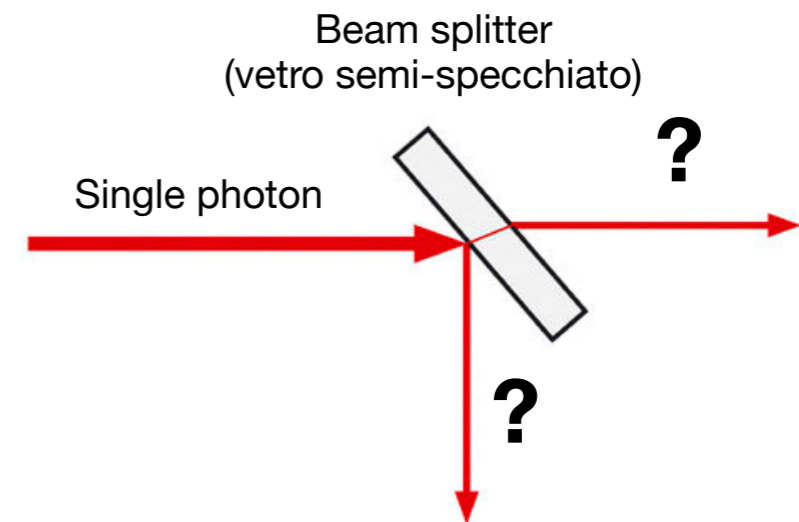
Classico

Si può predire con esattezza l'esito di un esperimento



Quantistico

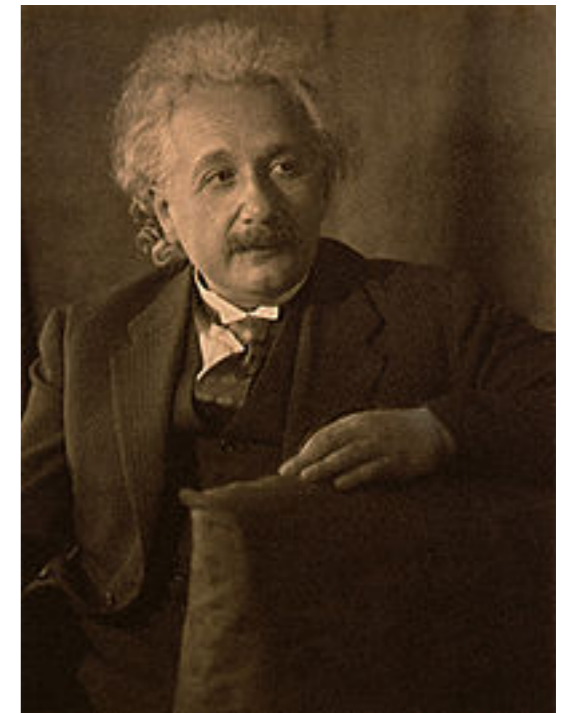
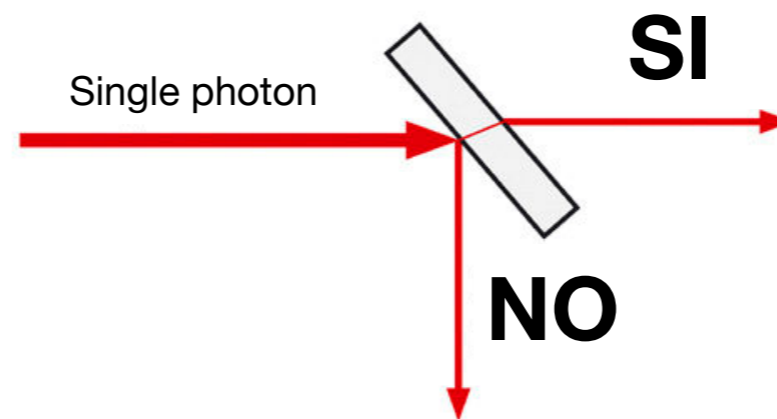
Non si può predire con esattezza l'esito di un esperimento. Il mondo è intrinsecamente probabilistico



“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 Grande Vecchio. In ogni caso, sono convinto che *questi* non gioca a dadi col mondo” A. Einstein (4 dicembre 1926)

Variabili nascoste

Einstein pensavo ad una teoria più completa in grado di predire con esattezza l'esito di tutti gli esperimenti. Semplicemente non conosciamo ancora questa teoria



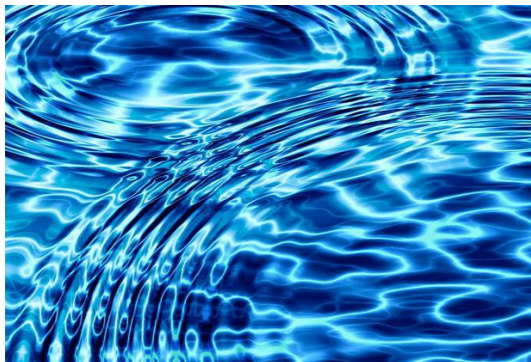
In questa teoria 'completa' il fotone porta con se anche l'informazione che ci permette di determinare il percorso.

Queste teorie a variabili nascoste mirano ad includere il principio di realtà alla M.Q.

Onda e particella

Classico

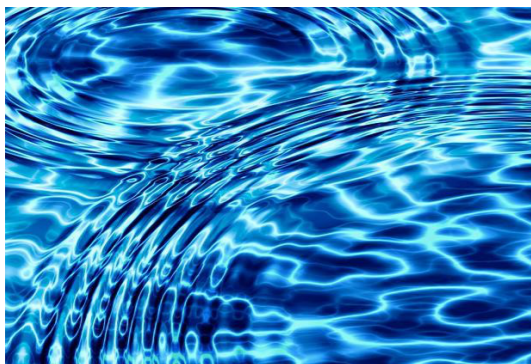
Le onde meccaniche hanno proprietà estremamente diverse dalle particelle



Onda e particella

Classico

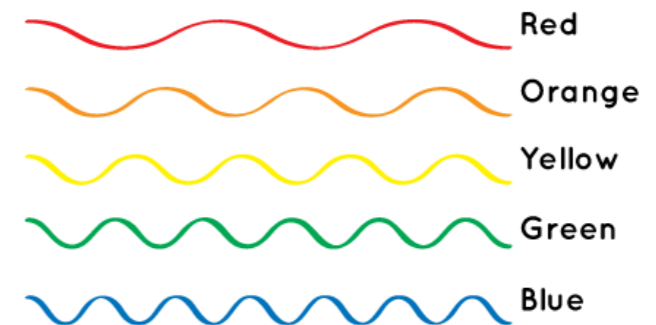
Le onde meccaniche hanno proprietà estremamente diverse dalle particelle



Quantistico

Intrinsecamente legate: le particelle assumono proprietà caratteristiche delle onde.

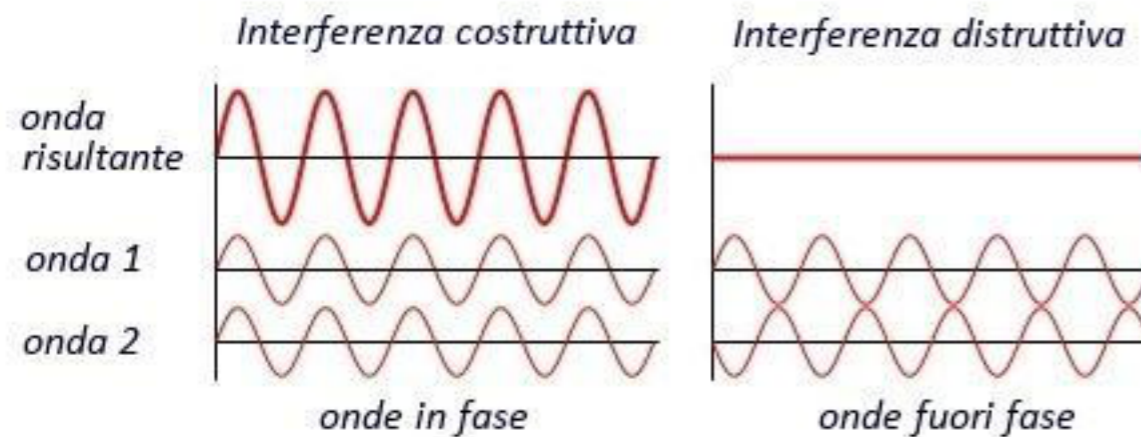
Visible Light



Interferenza

Classico

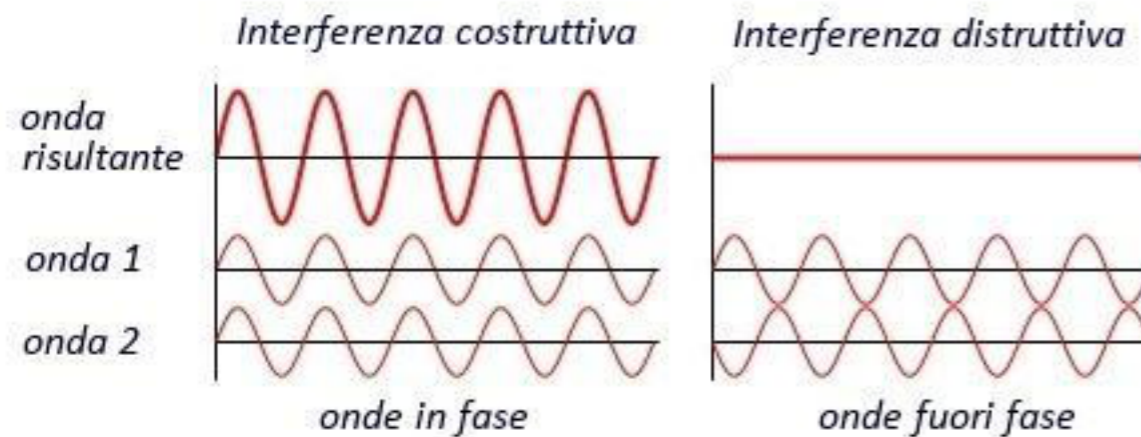
Due onde possono fare interferenza: si possono sommare e diventare più forti, o sottrarre e diventare deboli.



Proprietà delle onde

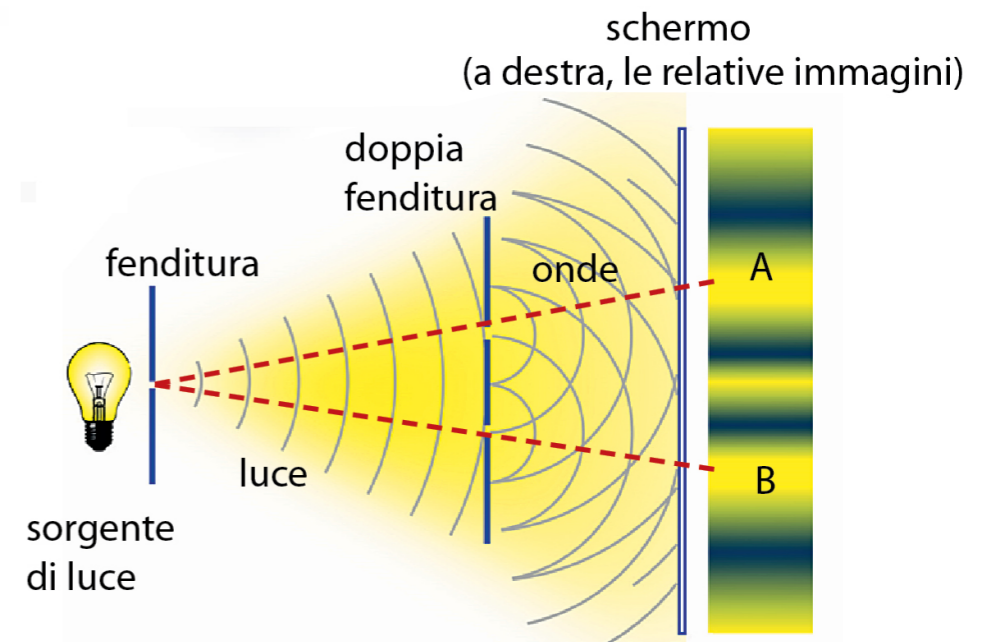
Classico

Due onde possono fare interferenza: si possono sommare e diventare più forti, o sottrarre e diventare deboli.



Quantistico

Anche i fotoni, che sono particelle, si comportano come onde e possono fare interferenza



Particella quantistica

Come possiamo descrivere una particella sia come corpuscolo che come onda?

Serve un nuovo formalismo matematico ed un cambio di paradigma!

Una particella è descritta da una funzione d'onda:

$$\Psi(x)$$

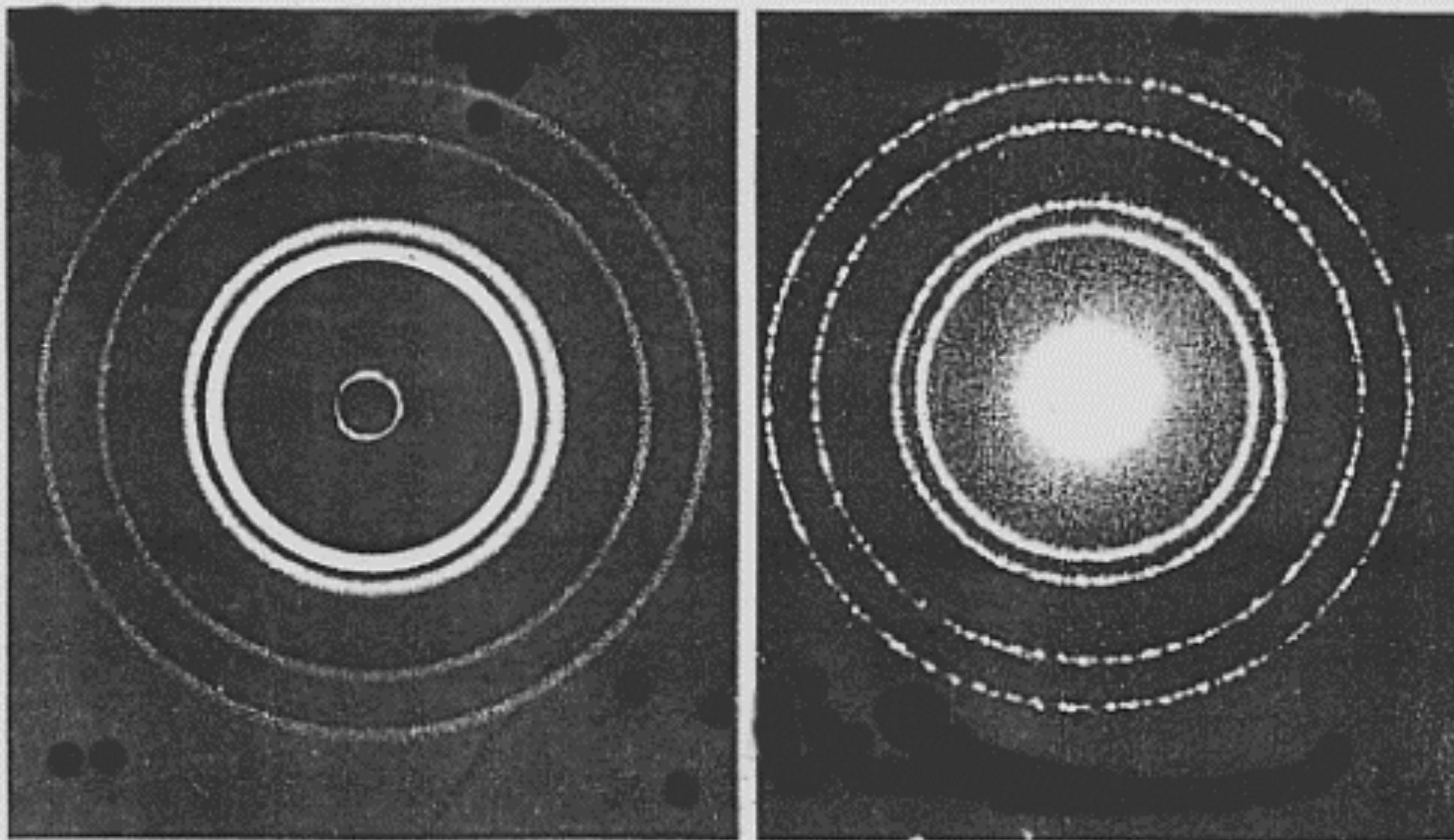
La probabilità di trovare una particella nella posizione x è data da:

$$P = |\Psi(x)|^2$$

Possiamo ora ritrovare tutte le proprietà delle onde in un fascio di particelle

Particella quantistica

La figura di diffrazione a sinistra è stata prodotta da un fascio di raggi X che attraversa un sottile foglio di alluminio. La figura di diffrazione a destra è stata ottenuta per mezzo di un fascio di elettroni che attraversa lo stesso foglio di alluminio.



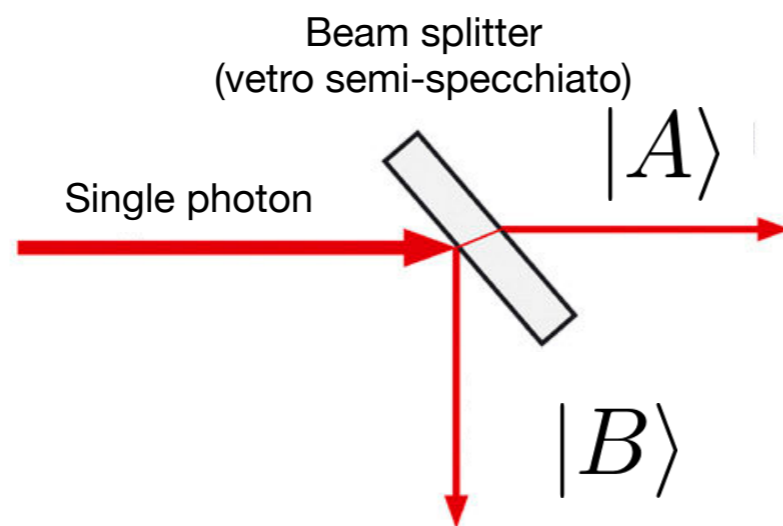
Fine introduzione



Espressioni come "la natura corpuscolare della luce" o "la natura ondulatoria degli elettroni" sono ambigue, perché i concetti di corpuscolo e di onda sono ben definiti solamente in fisica classica, nel cui ambito ovviamente luce ed elettroni sono, rispettivamente, onde elettromagnetiche e corpuscoli materiali. N. Bhor

Sovrapposizione di stati

In meccanica quantistica esistono stati 'sovrapposti' di due stati ortogonali (non compatibili tra loro)



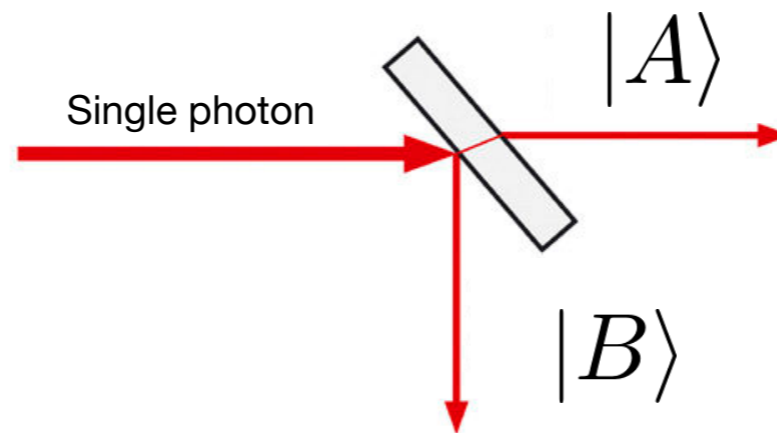
Il fotone si troverà in uno stato che è in combinazione dei due singoli stati:

$$|\Psi\rangle = |A\rangle + |B\rangle$$

Il fotone si trova simultaneamente in entrambi gli stati

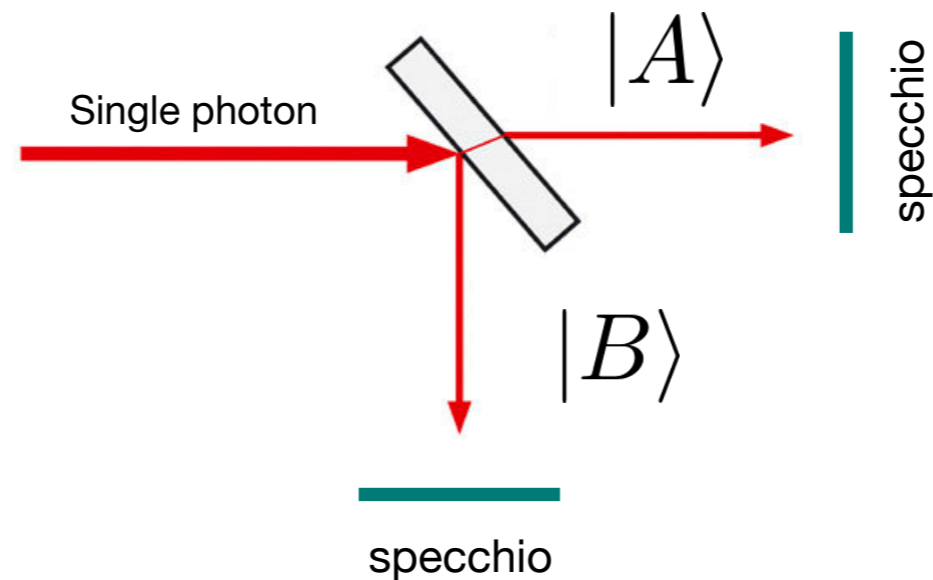
Piccolo esperimento

Come possiamo testare se il fotone è davvero in combinazione di entrambi gli stati A e B?



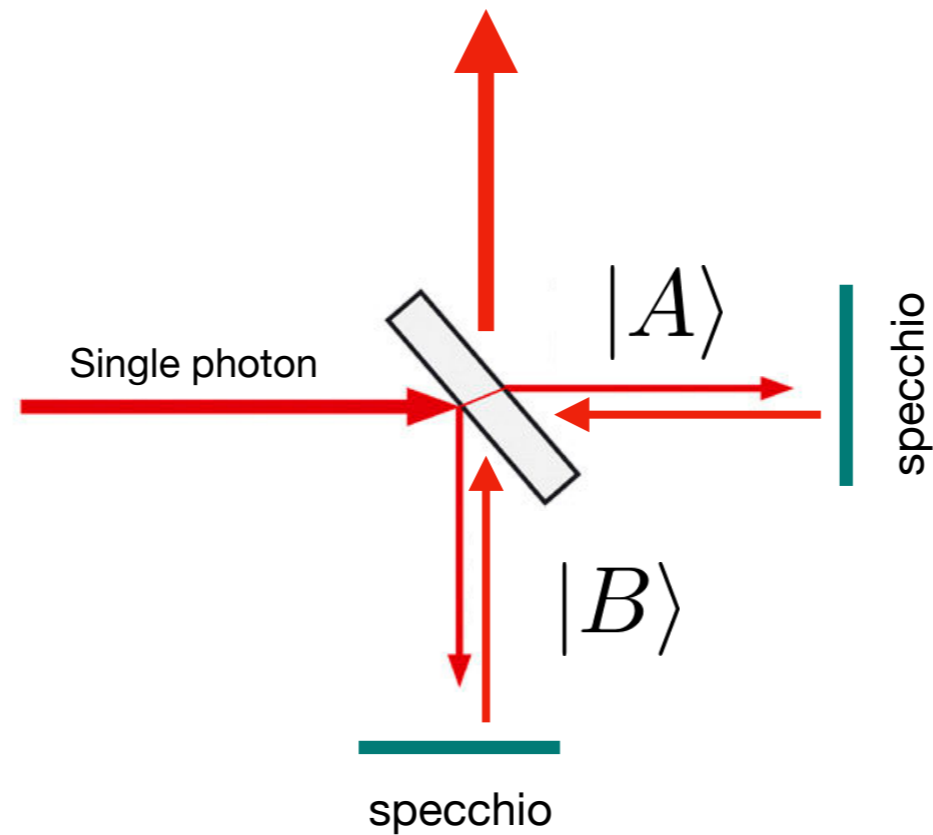
Piccolo esperimento

Come possiamo testare se il fotone è davvero in combinazione di entrambi gli stati A e B?



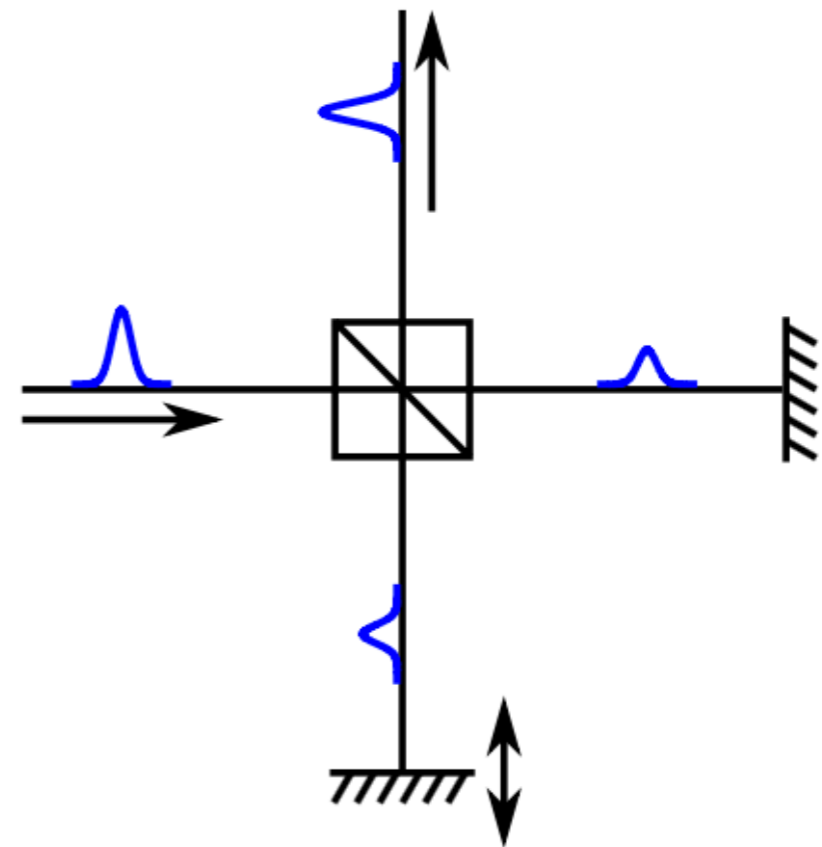
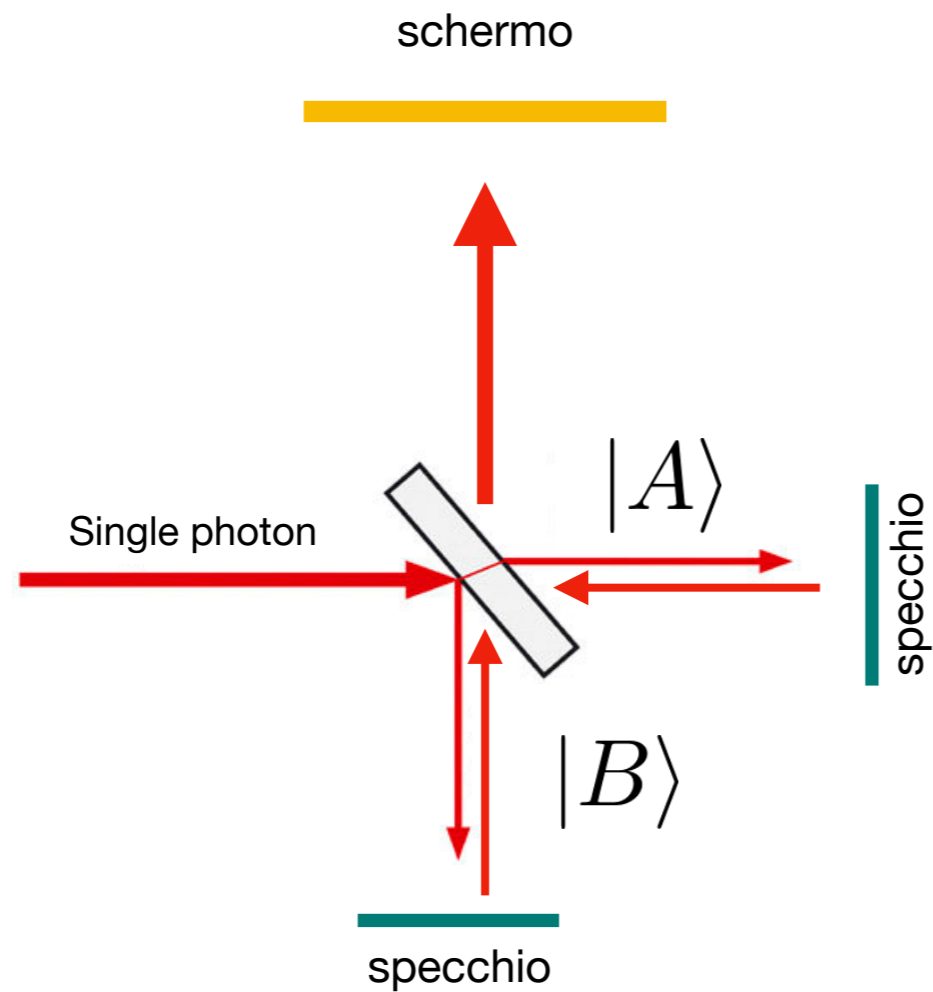
Piccolo esperimento

Come possiamo testare se il fotone è davvero in combinazione di entrambi gli stati A e B?



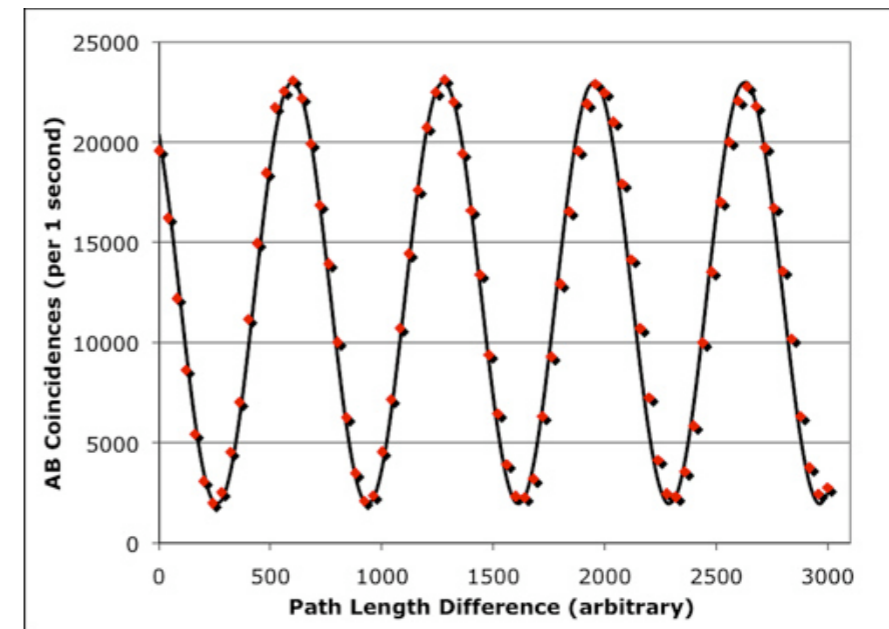
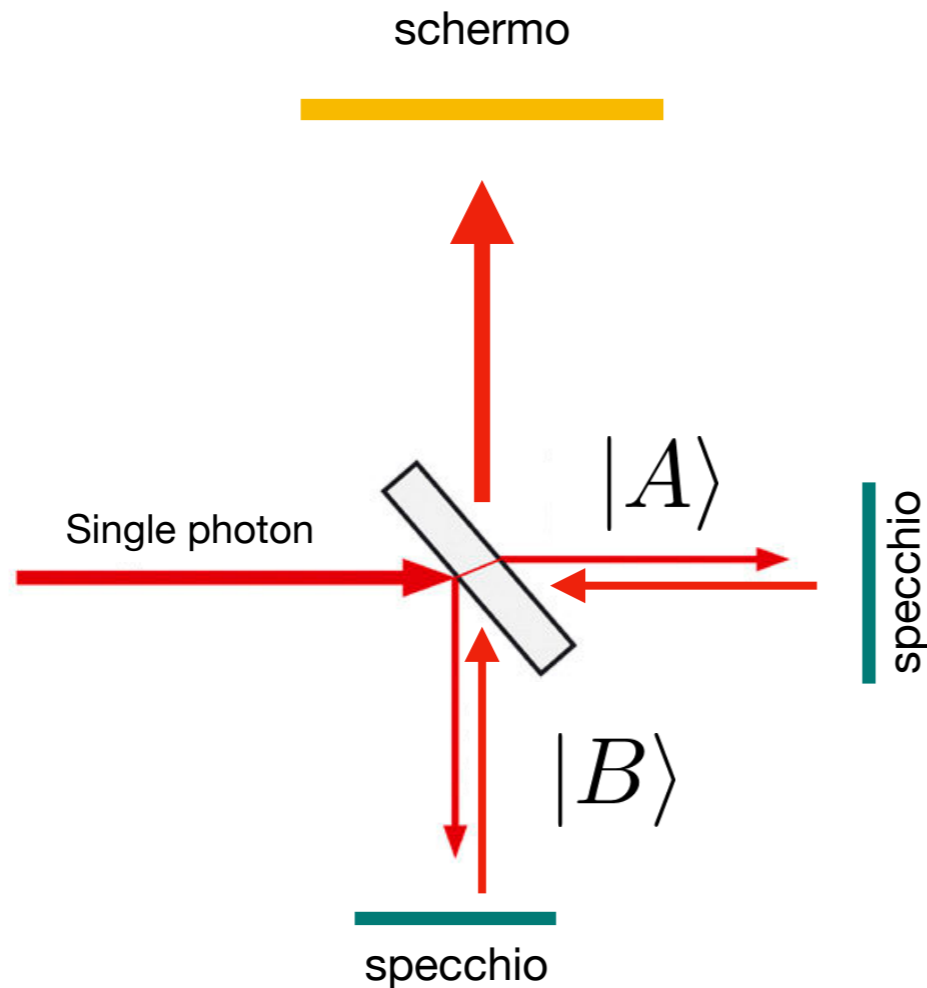
Piccolo esperimento

Come possiamo testare se il fotone è davvero in combinazione di entrambi gli stati A e B?



Piccolo esperimento

Come possiamo testare se il fotone è davvero in combinazione di entrambi gli stati A e B?



Il fotone non è né onda né particella, ma qualcosa di completamente diverso!

Shrödinger



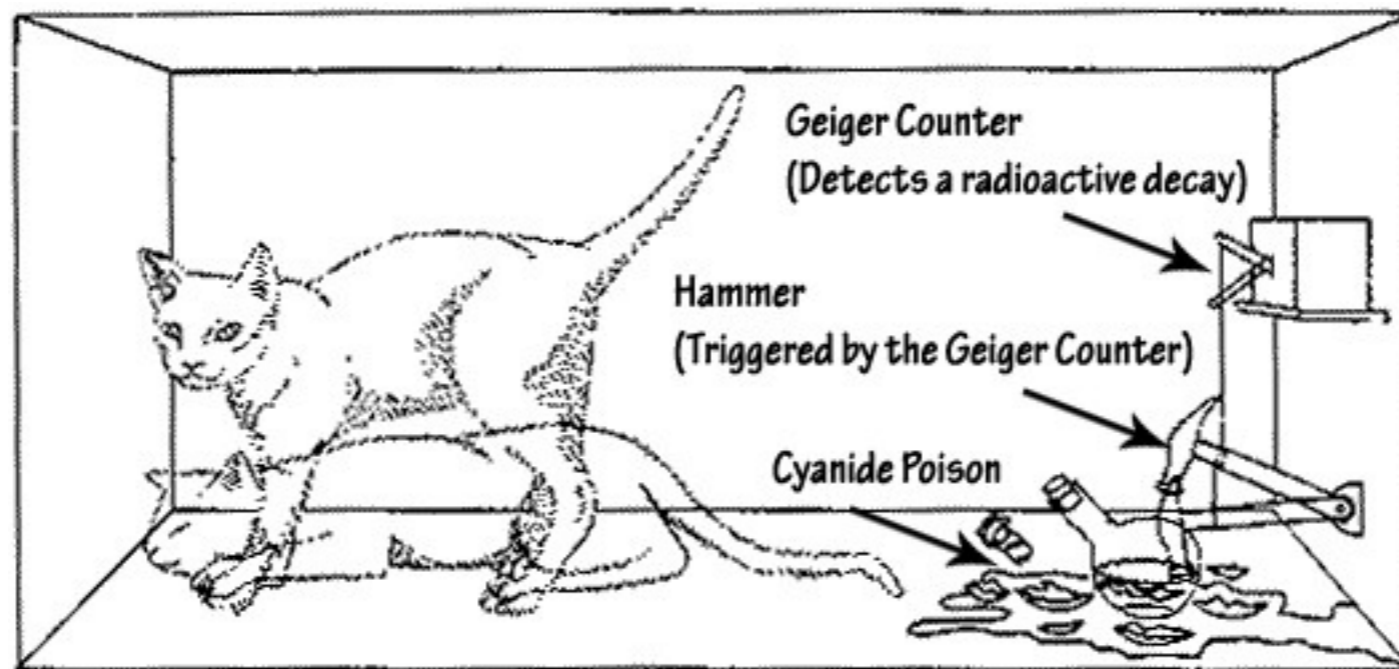
“Si possono anche inventare casi piuttosto ridicoli. Un gatto è rinchiuso in una scatola d'acciaio, insieme al seguente dispositivo (che deve essere protetto dall'interferenza diretta dell'animale): in un contatore Geiger c'è una minuscola quantità di sostanza radioattiva, *così* piccola che *forse* nel giro di un'ora uno degli atomi decade, ma forse, con uguale probabilità, non ne decade nessuno; se ciò avviene, il tubo contatore si scarica e mediante un relè libera un martello che spezza una fialetta di acido cianidrico. Se si lascia indisturbato l'intero sistema per un'ora, si può dire che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo è decaduto. La funzione ψ dell'intero sistema esprimerebbe ciò comprendendo in sé il gatto vivo e il gatto morto (mi si perdoni l'espressione) mescolati o confusi insieme.”

E. Schrödinger

Il gatto

La chiave sta nel prendere un processo casuale, come il decadimento radioattivo di una particella.

Ad un dato tempo t possiamo descrivere lo stato come un sistema quantistico in sovrapposizione:



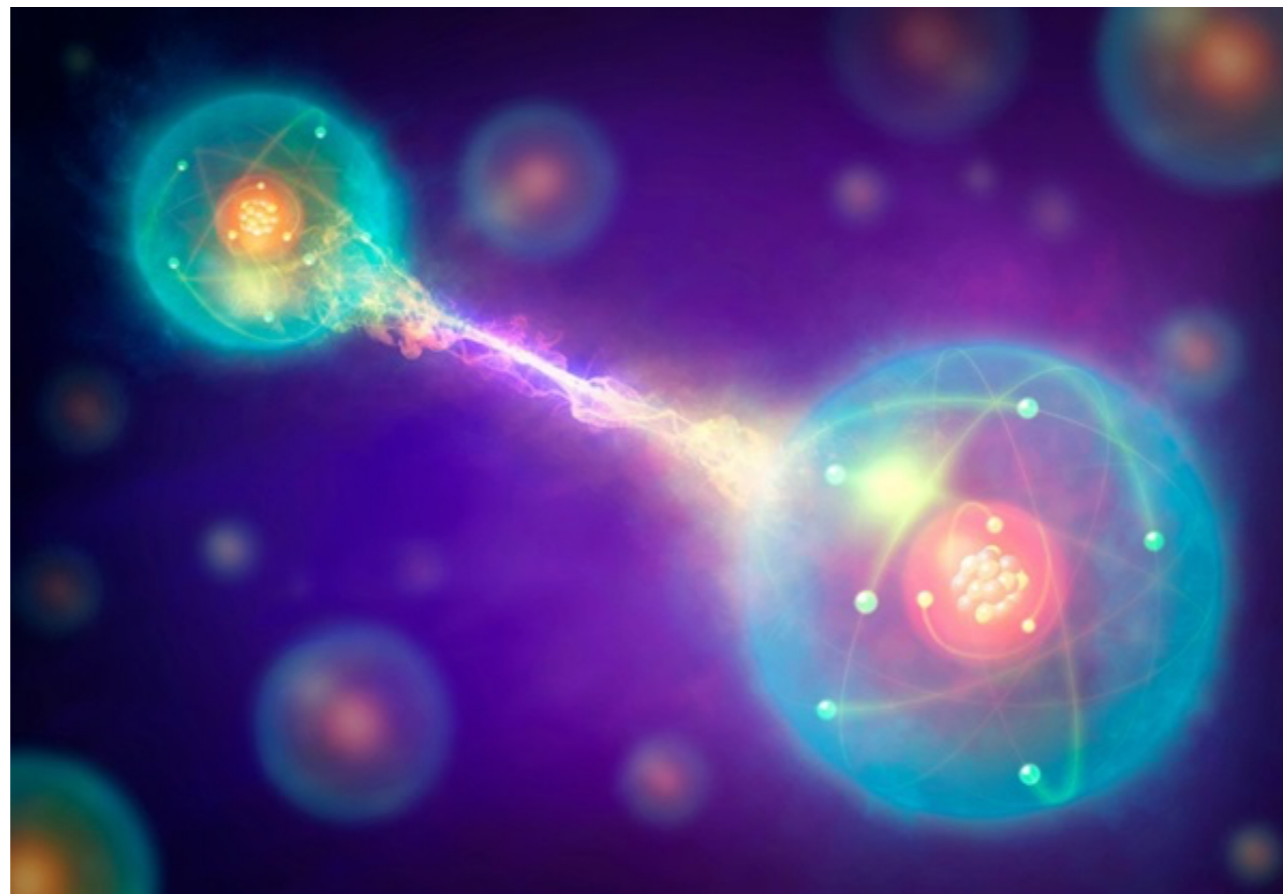
$$|\Psi\rangle = |vivo\rangle + |morto\rangle$$

SCHRÖDINGER PLATES



**THEY'RE BOTH BROKEN AND NOT BROKEN
UNTIL YOU OPEN THE DOOR**

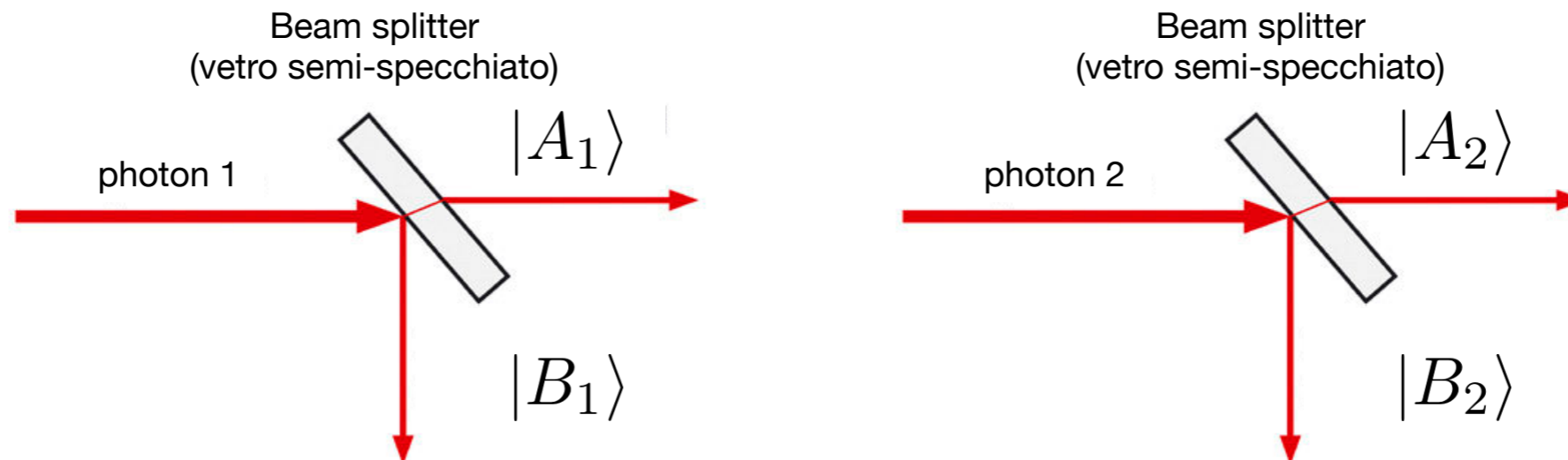
Correlazione quantistica: Entanglement



“When two systems, of which we know the states by their respective representation, enter into a temporary physical interaction due to known forces between them and when after a time of mutual influence the systems separate again, then they can no longer be described as before, viz., by endowing each of them with a representative of its own. I would not call that one but rather *the* characteristic trait of quantum mechanics.”
E. Schrödinger

Entanglement

Prendiamo ora in considerazione due sistemi a distanza correlati tra di loro

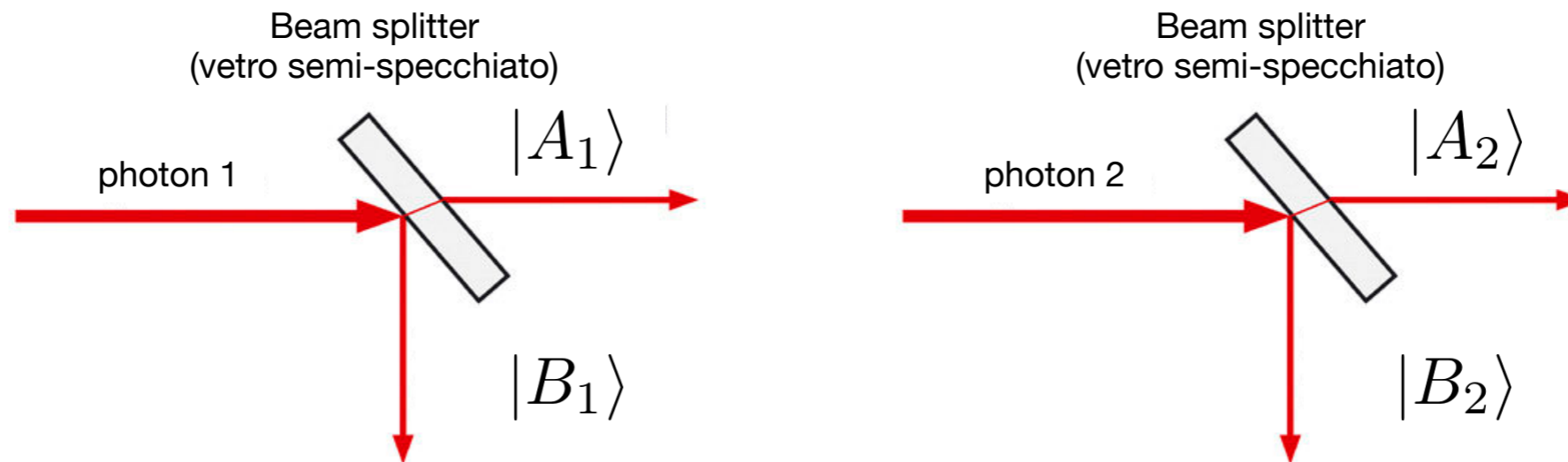


in modo di avere:

$$|\Psi\rangle = |A_1\rangle|A_2\rangle + |B_1\rangle|B_2\rangle$$

I due percorsi sono completamente correlati

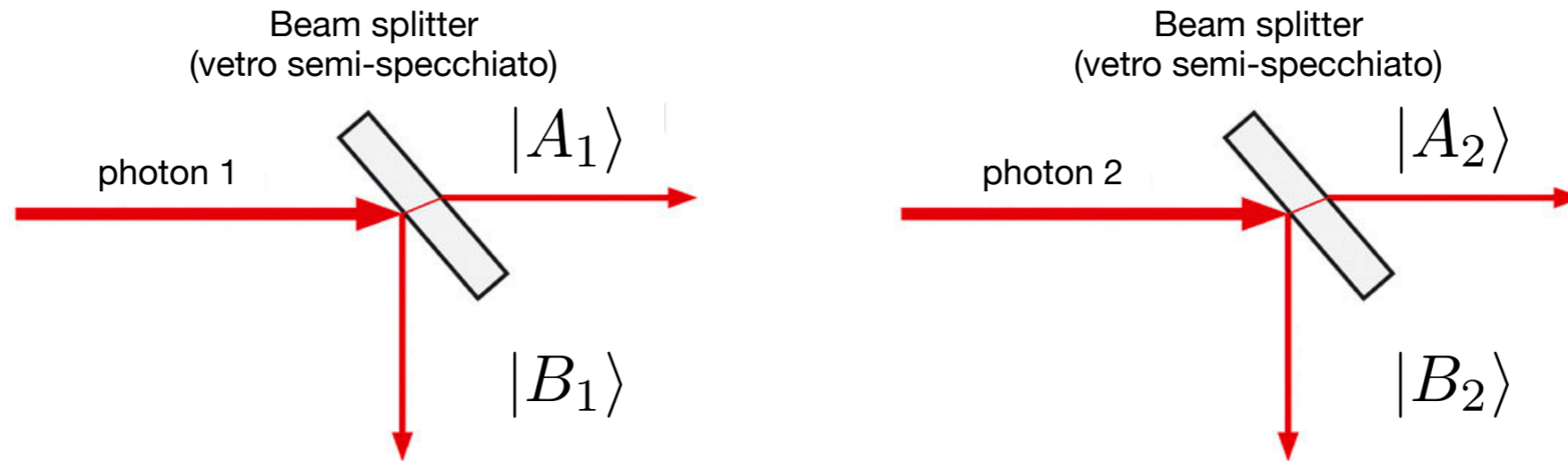
Collasso della funzione d'onda



$$|\Psi\rangle = |A_1\rangle|A_2\rangle + |B_1\rangle|B_2\rangle$$

**Supponiamo ora di ‘guardare’ in quale delle due strade (A o B) si trova il fotone 1.
Lo troviamo nello stato: $|A_1\rangle$**

Collasso della funzione d'onda



$$|\Psi\rangle = |A_1\rangle|A_2\rangle + |B_1\rangle|B_2\rangle$$

**Supponiamo ora di ‘guardare’ in quale delle due strade (A o B) si trova il fotone 1.
Lo troviamo nello stato: $|A_1\rangle$**

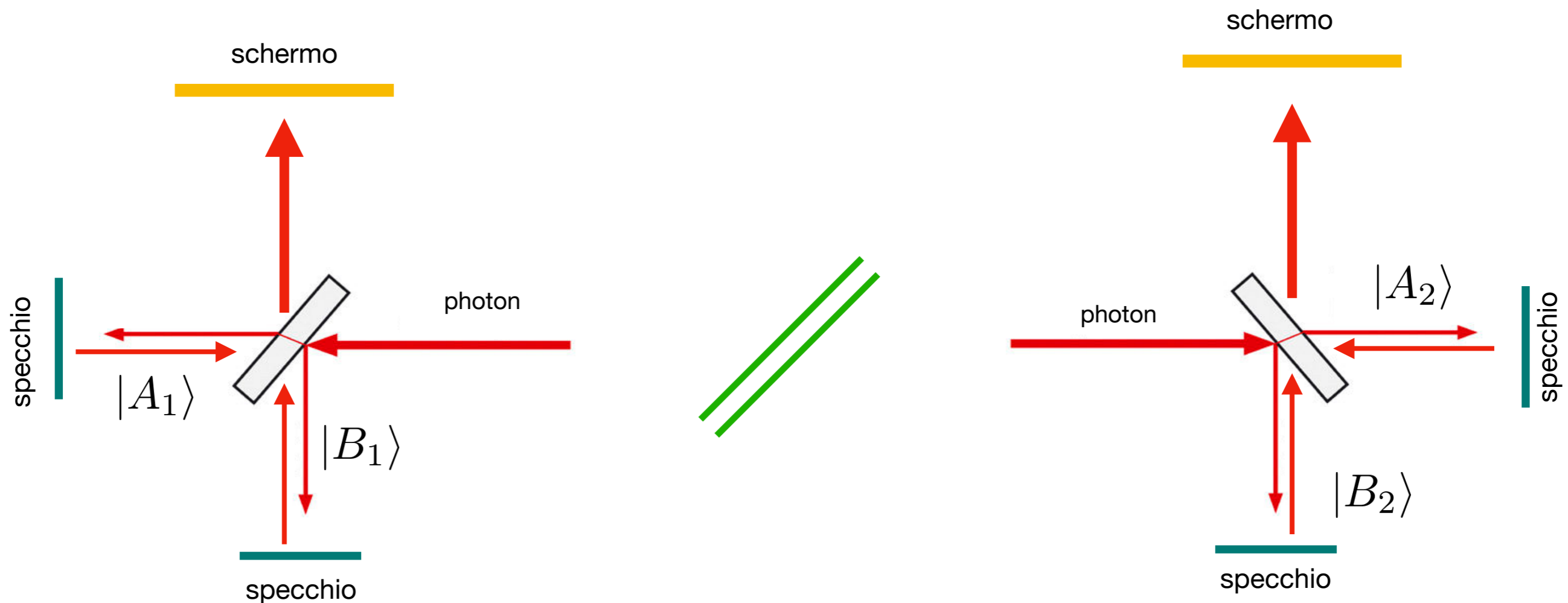
Il fotone 2 sarà per forza nello stato: $|A_2\rangle$

Lo stato ‘collassa’ istantaneamente nello stato: $|\Psi\rangle = |A_1\rangle|A_2\rangle$

La misura dello stato del fotone 1, ha determinato lo stato del fotone 2!

Interferenza a lungo raggio

Come possiamo stabilire se i due fotoni sono effettivamente in correlazione?



Una qualunque spiegazione classica richiederebbe di trasmettere informazioni più veloce della luce!

Esperimento mentale: EPR

Einstein ed i suoi colleghi non volevano abbandonare i principi di realismo e completezza che la meccanica quantistica stava rivoluzionando



Si può usare questo sistema per mandare messaggi super luminari?

Einstein-Podolsky-Rosen

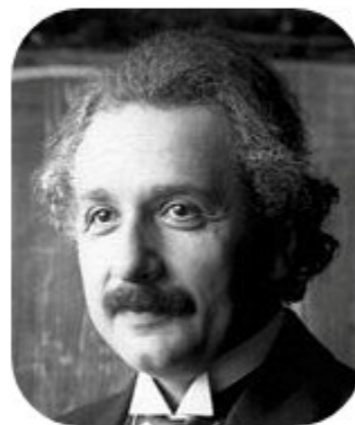
Einstein ed i suoi colleghi non volevano abbandonare i principi di realismo e completezza che la meccanica quantistica stava rivoluzionando

Realismo:

il valore di ogni quantità fisica può essere predetto con assoluta certezza prima di fare una misura (*“Does the moon really exist if no one is looking at it?” A. Einstein*)

Completezza:

una teoria deve prendere in considerazione tutti gli elementi fisici



A. Einstein



B. Podolsky



N. Rosen

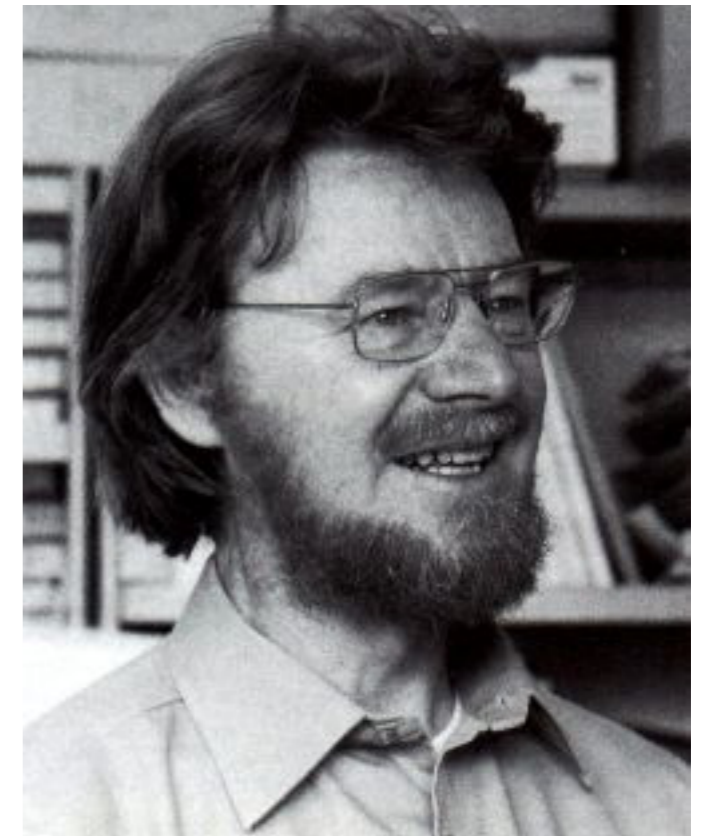
Si può predire lo stato del fotone 2, misurando lo stato del fotone 1

Diseguaglianza di Bell

Bell ha formulato un teorema nel 1964 che permette di testare le teorie a variabili nascoste:

Non esiste teorie a variabili nascoste che può riprodurre le predizione della meccanica quantistica

Molti esperimenti sono stati fatti per verificare sperimentalmente le ripercussioni di questo teorema. Pur non soddisfacendo pienamente le condizioni teoriche di Bell hanno verificato con successo la validità della meccanica quantistica



Conclusioni

La meccanica quantistica non sostituisce integralmente la precedente teoria, ma la estende. Viene applicata per spiegare quella parte dei fenomeni naturali che avvengono a livelli microscopici (es. particelle subatomiche). I fenomeni macroscopici continuano ad essere interpretati con modelli classici.

