

Il dualismo onda-corpuscolo

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \{ | \text{hand} \text{ cat} \rangle + | \text{cat} \text{ hand} \rangle \}$$

Contenuto e Riassunto

Il dualismo onda-corpuscolo

Marco Mazzeo

Il tentativo di risolvere il dualismo onda-corpuscolo in un unico quadro coerente con i fenomeni osservati, tentativo che va sotto il nome di «meccanica quantistica», ha spinto i fisici a dover immaginare un mondo basato in larga parte su elementi di realtà definibili solo in base al contesto sperimentale nonché soggetti a regole misteriose come il principio di complementarità e di indeterminazione e ad una misteriosa «sovrapposizione di stati». Dopo aver illustrato lo sviluppo storico, sperimentale e teorico del dualismo si proverà a tracciare le difficoltà ancora in essere che sfidano la comunità dei fisici da più di un secolo.



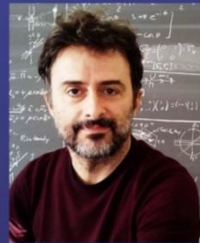
14 novembre 2022



Aula Anni (F8)



Ore 14:30-16:30



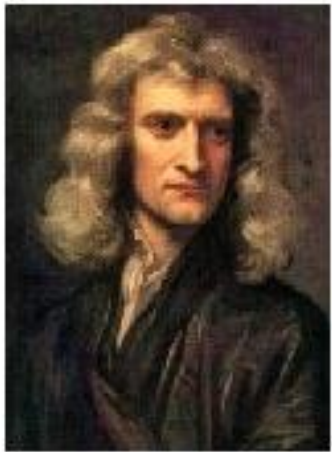
marco.mazzeo@unisalento.it

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \{ | \text{gatto a sinistra} \rangle + | \text{gatto a destra} \rangle \}$$

- ❑ Storia del dualismo dal XVII al XIX secolo
- ❑ Il dualismo nel XX secolo
- ❑ Il formalismo quantistico
- ❑ Interpretazioni e Problemi aperti

Teorie sulla luce

La luce come un
fascio di particelle



Sir Isaac Newton (1642-1726)



Pierre de Fermat (1607-1665)

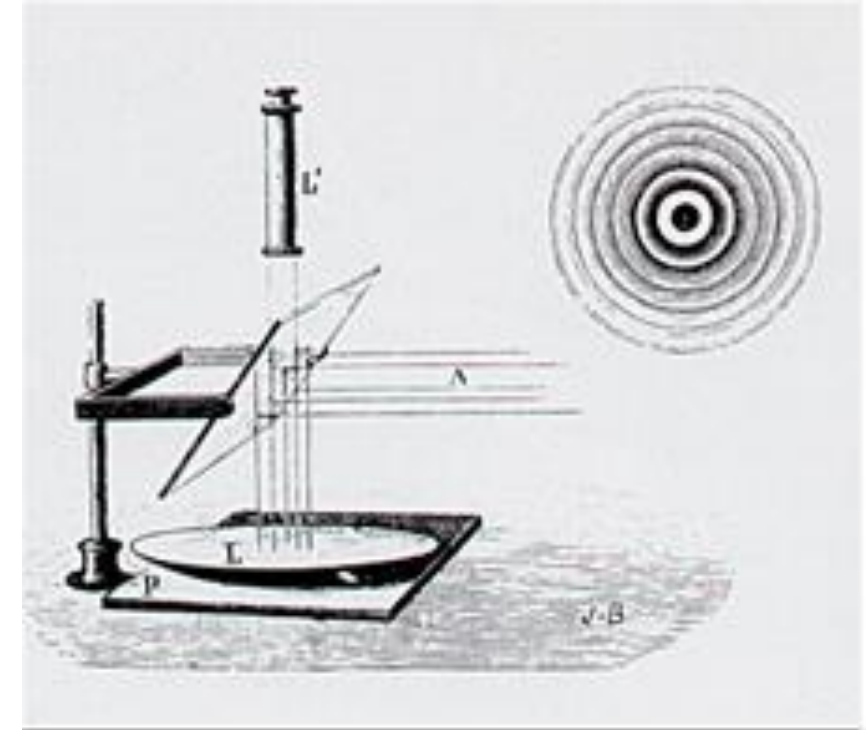
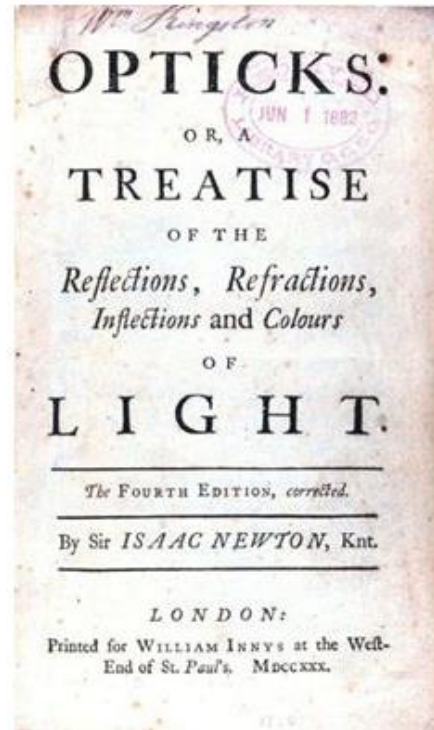
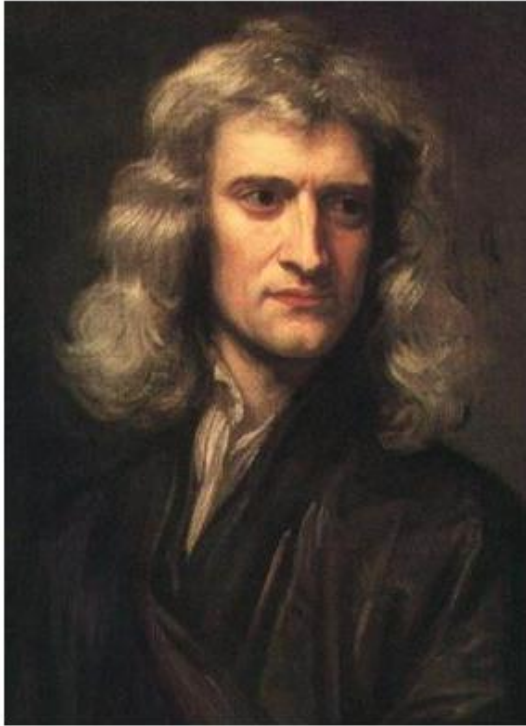


Christiaan Huygens (1629-1695)



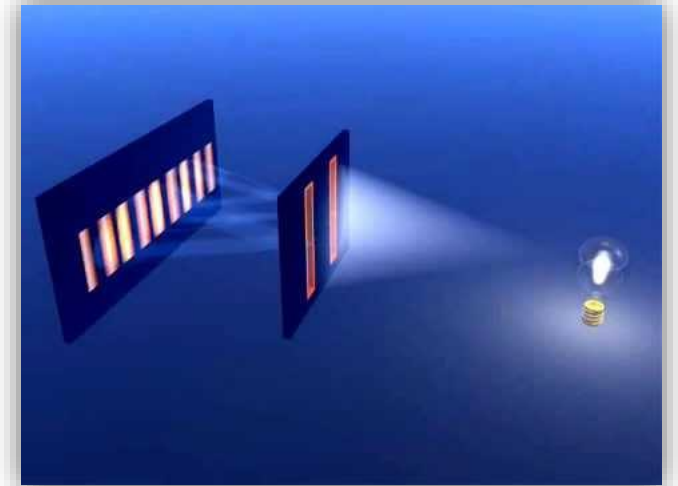
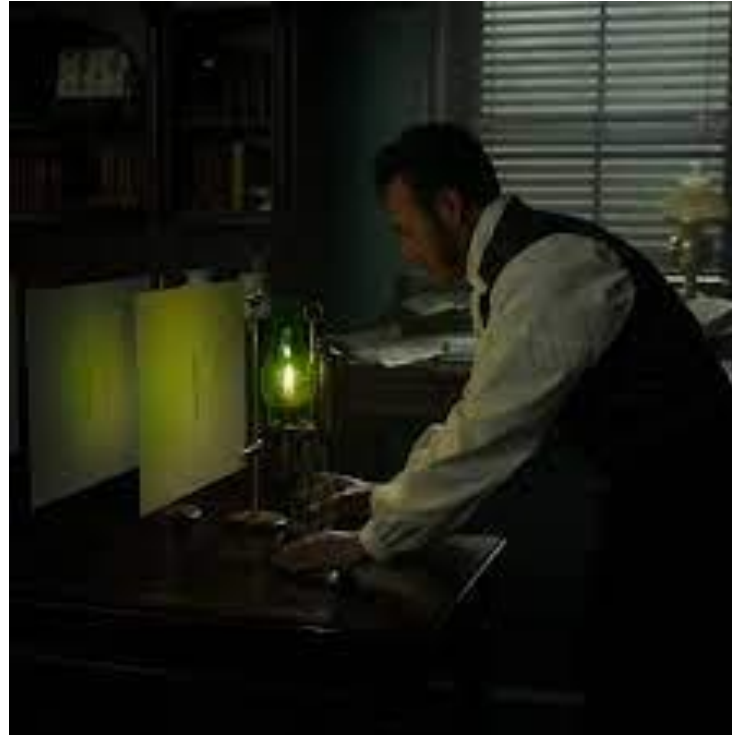
Thomas Young
(1773-1829)

1670: Newton e il primo dualismo



- La luce è fatta di leggeri corpuscoli che mettono in vibrazione l'etere (spiega la propagazione rettilinea dei raggi ed è compatibile con il principio di Fermat)
- Le zone di etere di maggiore intensità facilitano l'ingresso delle particelle di luce

1800: L'esperimento di Thomas Young



l'esperimento di Young non dimostra che la luce non sia fatta «anche» di corpuscoli ma rende i corpuscoli non necessari

Il Principio di Fermà

$$time = \int_A^B dt = \int_A^B \frac{dl}{v} = \frac{1}{c} \int_A^B n(\mathbf{r}) dl$$

Lungo un cammino γ qualsiasi
che connette A a B.

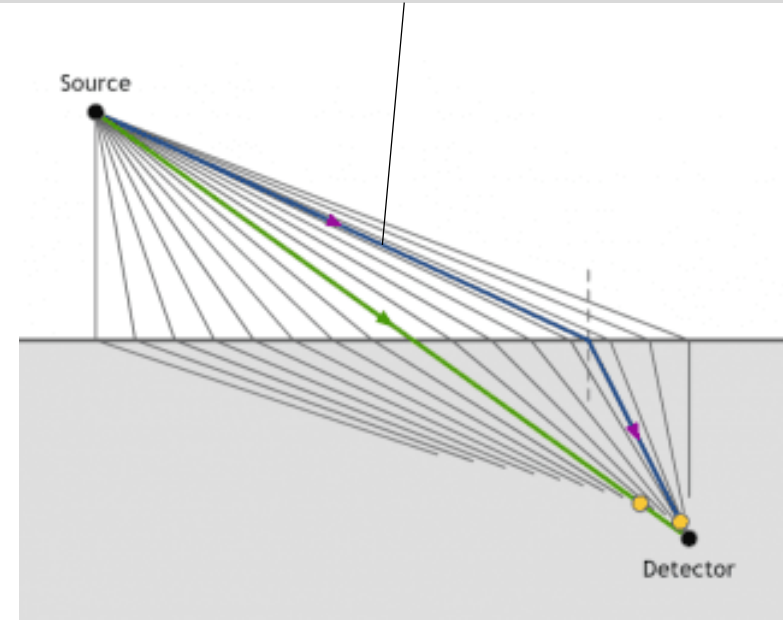
$$\delta \int_A^B n(\mathbf{r}) dl = 0$$

$$dl^2 = d\mathbf{r} \cdot d\mathbf{r}$$

$$\delta n = \nabla n \cdot \delta \mathbf{r}$$

$$\delta dl = \frac{d\mathbf{r}}{dl} \cdot d\delta \mathbf{r} = \frac{d\mathbf{r}}{dl} \frac{d\delta \mathbf{r}}{dl} dl$$

Il cammino intrapreso dal raggio è quello
di minimo tempo



$$\delta \int_A^B n dl = \int_A^B (\delta n dl + n \delta dl) = \int_A^B \left(\nabla n \cdot \delta \mathbf{r} + n \frac{d\mathbf{r}}{dl} \cdot \frac{d\delta \mathbf{r}}{dl} \right) dl = \int_A^B \left[\nabla n - \frac{d}{dl} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{dl} \right) \right] \cdot \delta \mathbf{r} dl = 0$$

$$\nabla n = \frac{d}{dl} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{dl} \right)$$

Cammino di minimo tempo o
equazione dei raggi

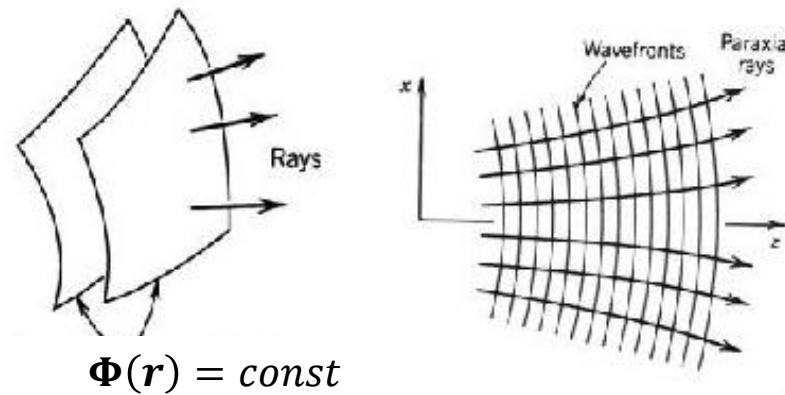
Ottica geometrica come caso particolare dell'ottica ondulatoria

$$\nabla^2 U(\mathbf{r}, t) - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 U(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$

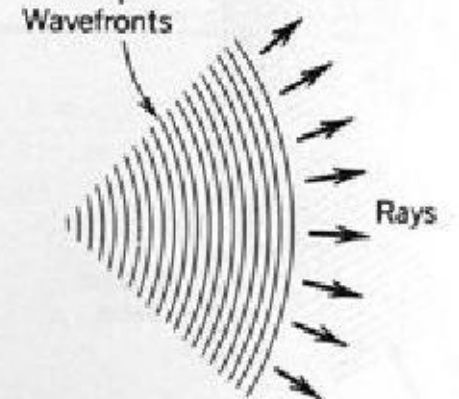
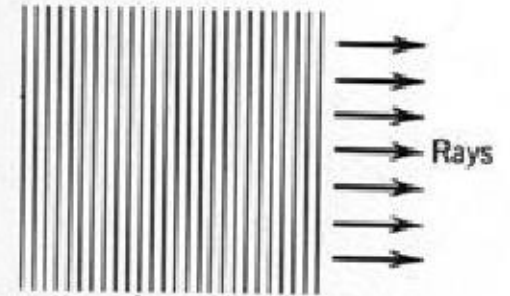
$$U(\mathbf{r}, t) = R e^{-i\omega t} e^{ik\Phi(\mathbf{r})}$$

$$\omega = kc$$

□ How do I associate rays to waves?



Plane waves



Spherical waves

$$[\nabla^2 R - k^2 R |\nabla \Phi|^2 + R n^2 k^2 + ik(2\nabla R \cdot \nabla \Phi + R \nabla^2 \Phi)] e^{ik\Phi(\mathbf{r})} = 0$$

$$|\nabla \Phi|^2 = n^2 + \frac{1}{k^2} \frac{\nabla^2 R(\mathbf{r})}{R(\mathbf{r})}$$

$$2\nabla R \cdot \nabla \Phi + R \nabla^2 \Phi = 0$$

Se $k \gg 1$
si ha l'ottica geometrica

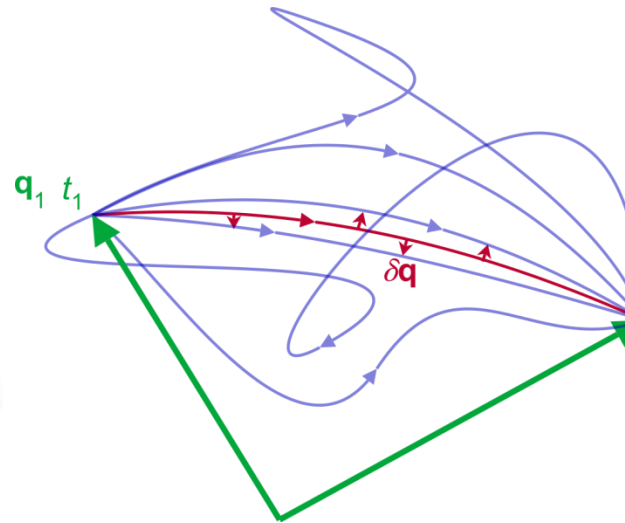
$$|\nabla \Phi| = n$$

Principio della minima Azione della Natura di Maupertuis



- ❑ Maupertuis voleva estendere il principio di Fermat anche ai corpi materiali
- ❑ La traiettoria seguita realmente è quella che estremizza l'azione S

«L'azione è proporzionale al prodotto della massa per la velocità e lo spazio. Ecco dunque il principio così saggio, così degno dell'Essere Supremo: appena si verifica un qualche cambiamento nella Natura, la quantità d'azione impiegata per questo cambiamento è sempre la minore possibile»



$$S = \int_A^B \mathbf{p} \cdot d\mathbf{r} = \int_A^B \sqrt{2m(E - V)} dl$$

$$\mathbf{p} = m \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad v = \frac{dl}{dt} \quad E = \frac{1}{2}mv^2 + V$$

L'azione oggi $S = \int_A^B L(q, \dot{q}, t) dt$

Principio di minimo e leggi causali

Ottica geometrica

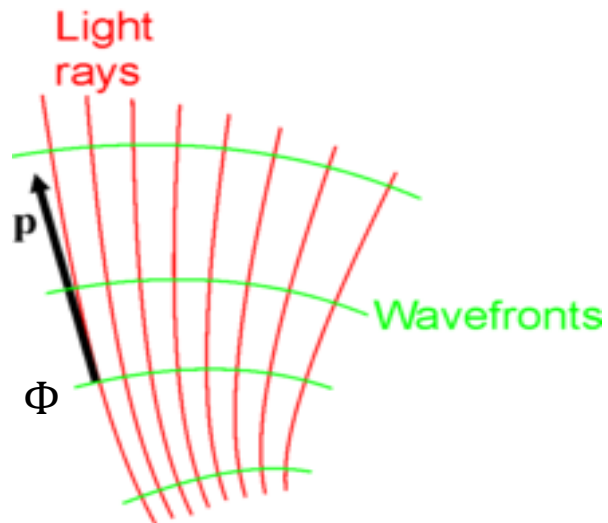
$$Time = \int_A^B \frac{ndl}{c}$$

$$\nabla n = \frac{d}{dl} \left(n \frac{dr}{dl} \right)$$

$$\nabla \Phi = n(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{t}}$$

Ottica ondulatoria

$$|\nabla \Phi|^2 = n^2 + \frac{1}{k^2} \frac{\nabla^2 R(\mathbf{r})}{R(\mathbf{r})}$$



Meccanica geometrica

$$S = \int_A^B \sqrt{2m(E - V)} dl$$

$$\nabla V = -m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}$$

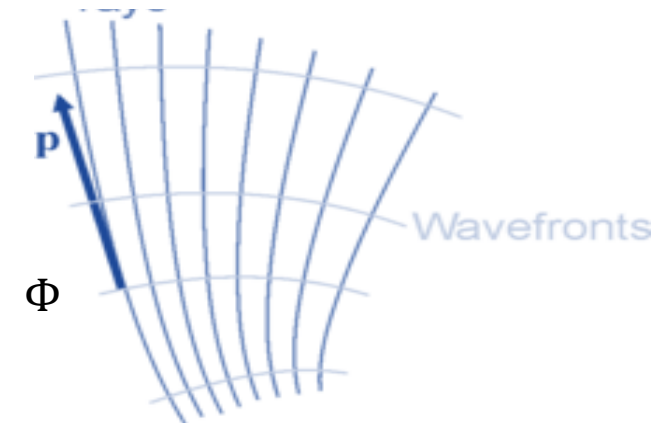
$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{|\nabla S|^2}{2m} + V = 0$$

Teoria di Hamilton Jacobi

Meccanica ondulatoria

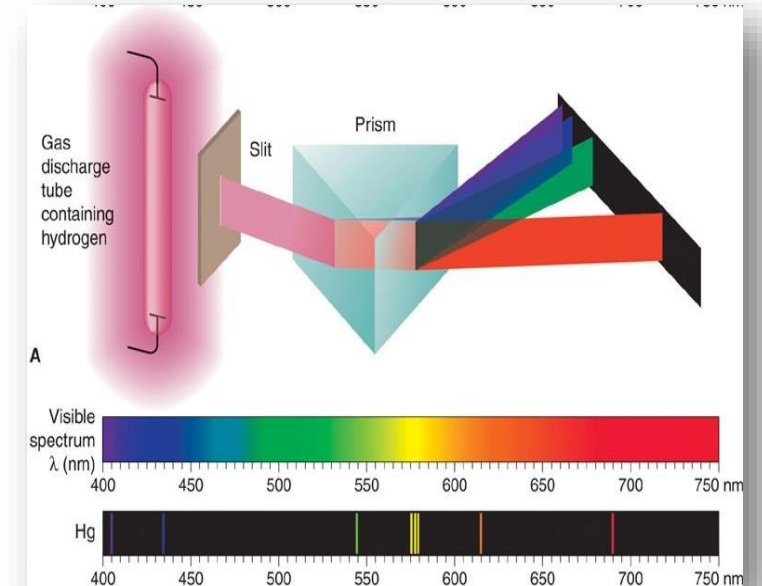
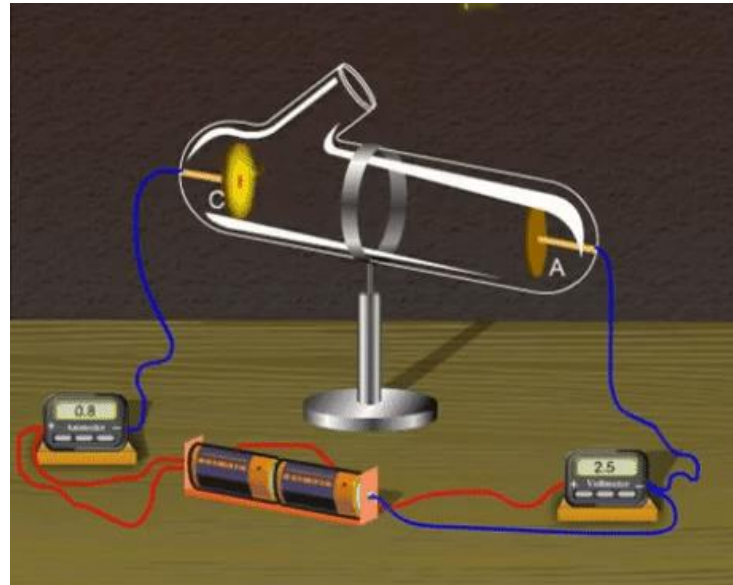
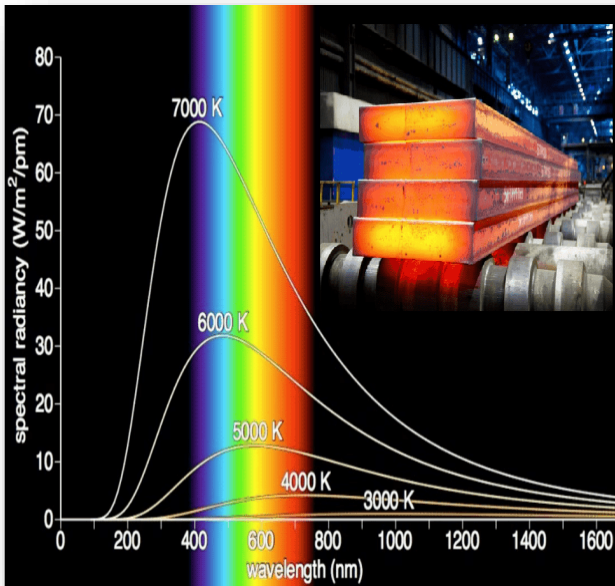
?

Particle trajectories

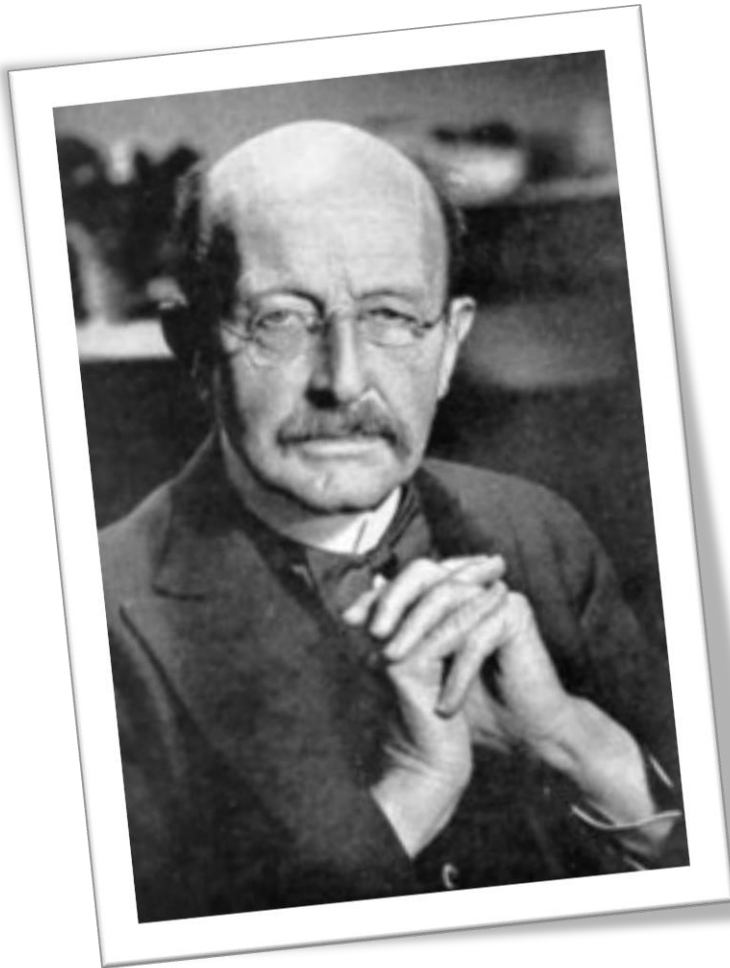


1900: Problemi di confine

Non si capivano gli scambi energetici tra luce e materia



Planck



Dicembre 1900

$$\rho(\nu, T) = \frac{\partial(U/V)}{\partial \nu}$$

$$\rho_W(\nu, T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T}$$

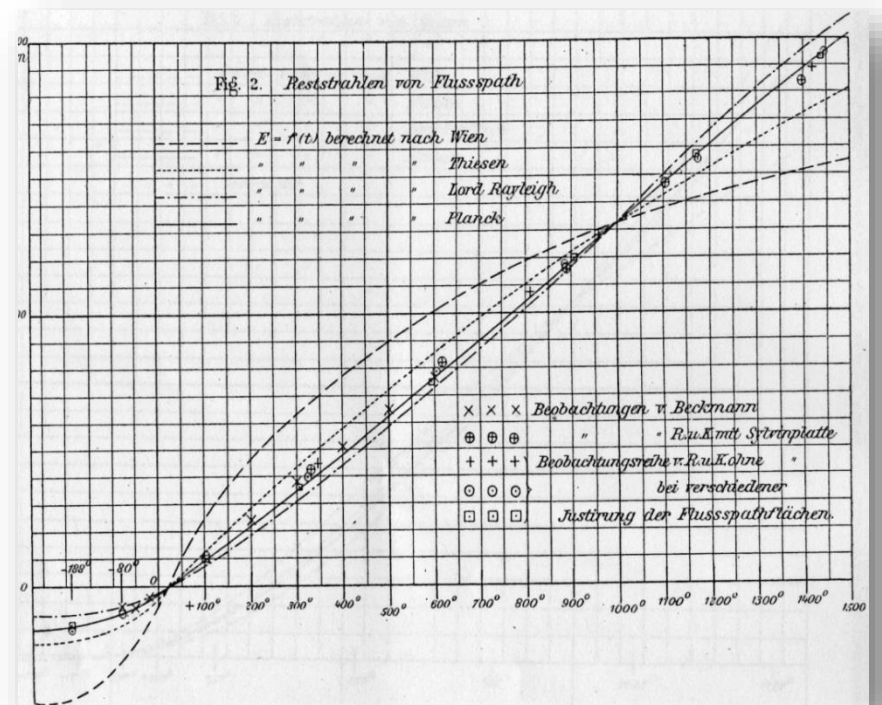
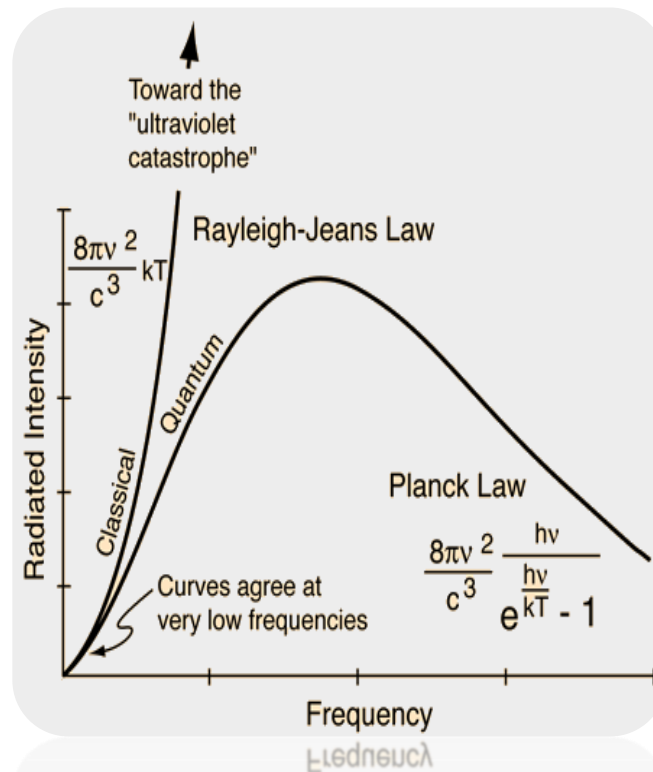
$$\rho_{RJ}(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$$

$$\rho_P(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

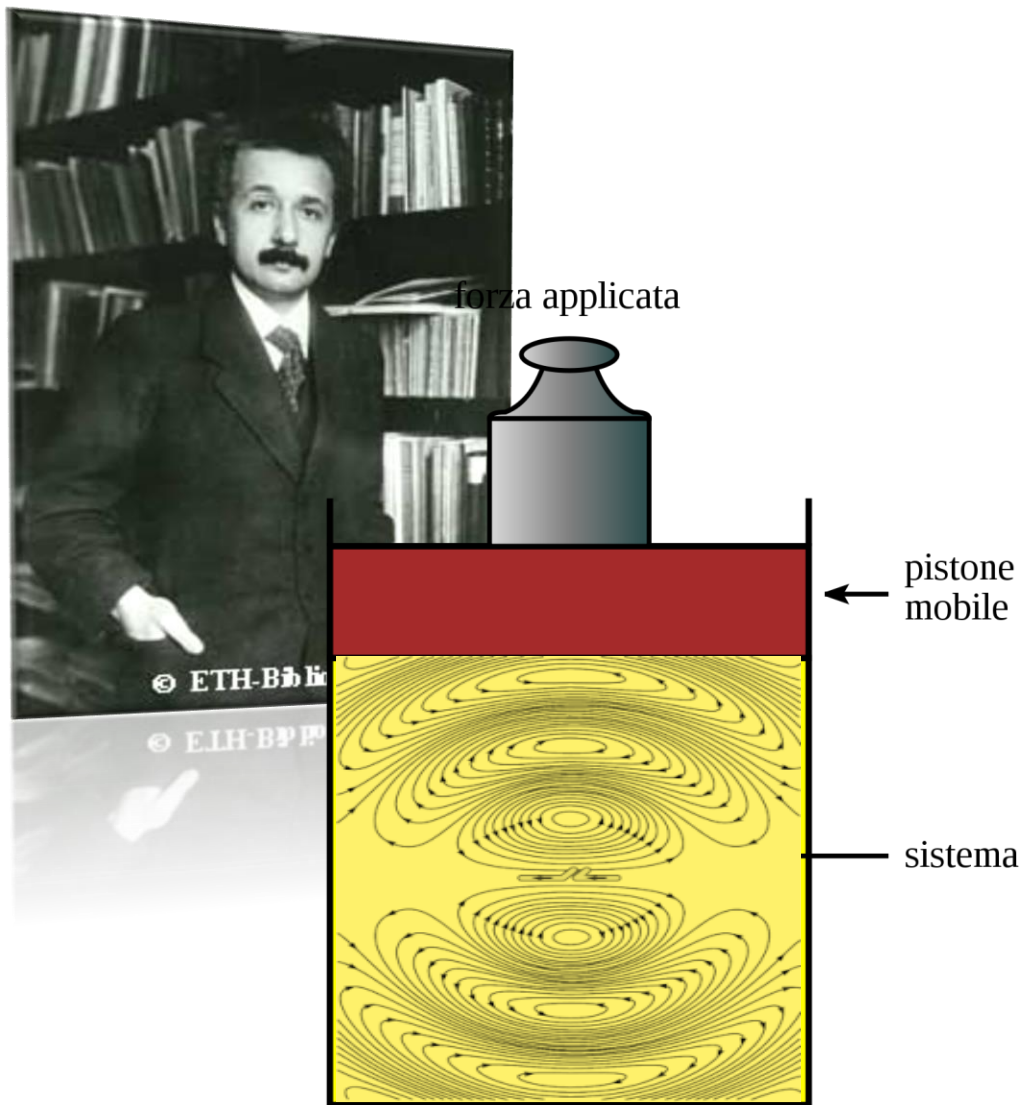
→ Fallisce a basse frequenze

→ Fallisce ad alte frequenze

→ Completa



Einstein e l'entropia di radiazione



Trasformazione isoterma

$$\Phi = \frac{\rho}{T} \quad \rho = \rho_W(\nu, T) \cong \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T} \quad \beta \frac{\nu}{T} \gg 1$$

$$\Phi = -\frac{\rho}{\beta \nu} \left[\ln \left(\frac{\rho}{\alpha \nu^3} \right) - 1 \right]$$

$$\Delta S = \frac{kU}{h\nu} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) = k \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{U}{h\nu}}$$

Per un gas

$$S - S_0 = k \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

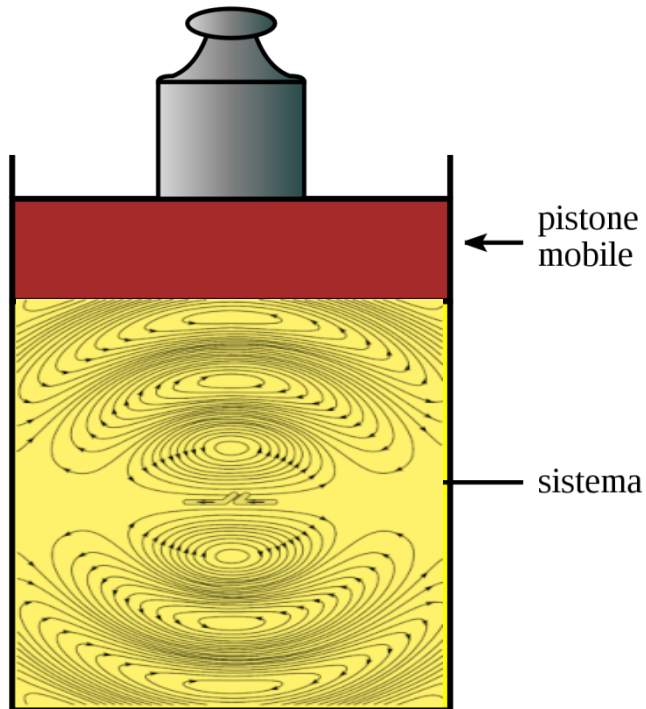
$$\frac{U}{h\nu} = n$$

La radiazione si comporta come un gas atomico costituito da n pacchetti di energia localizzati

Einstein e l'entropia di radiazione

$$\frac{h\nu}{kT} \ll 1$$

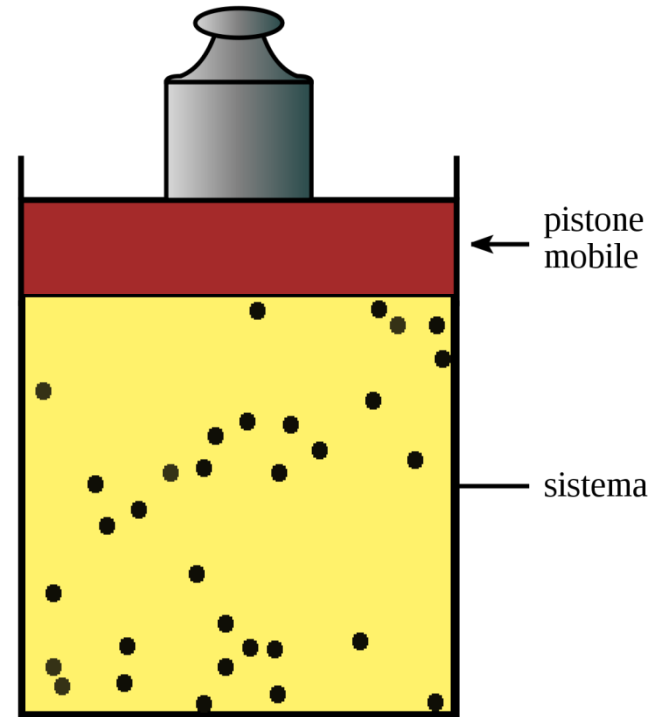
forza applicata



A basse frequenze e/o alte temperature la radiazione si comporta, dal punto di vista entropico come un continuum

$$\frac{h\nu}{kT} \gg 1$$

forza applicata



Ad alte frequenze e/o basse temperature la radiazione si comporta, dal punto di vista entropico come un discretum

Fluttuazioni di radiazione

$$F = \frac{d\langle \epsilon^2 \rangle / V}{d\nu} = kT^2 \frac{\delta \rho}{\delta T}$$

$$\rho = \rho_W(\nu, T) \cong \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T}$$

$$F \cong h\nu \rho \sim \rho \nu$$

$$\frac{h\nu}{kT} \gg 1 \quad F_{Wien} \cong h\rho \nu$$

$$\rho = \rho_{RJE}(\nu, T) \cong \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$$

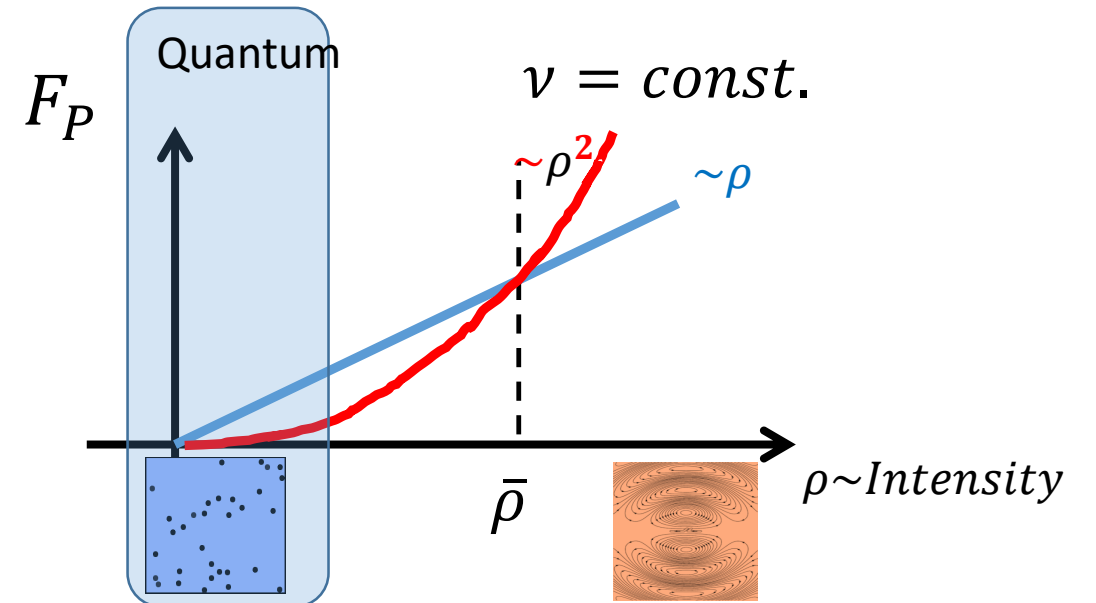
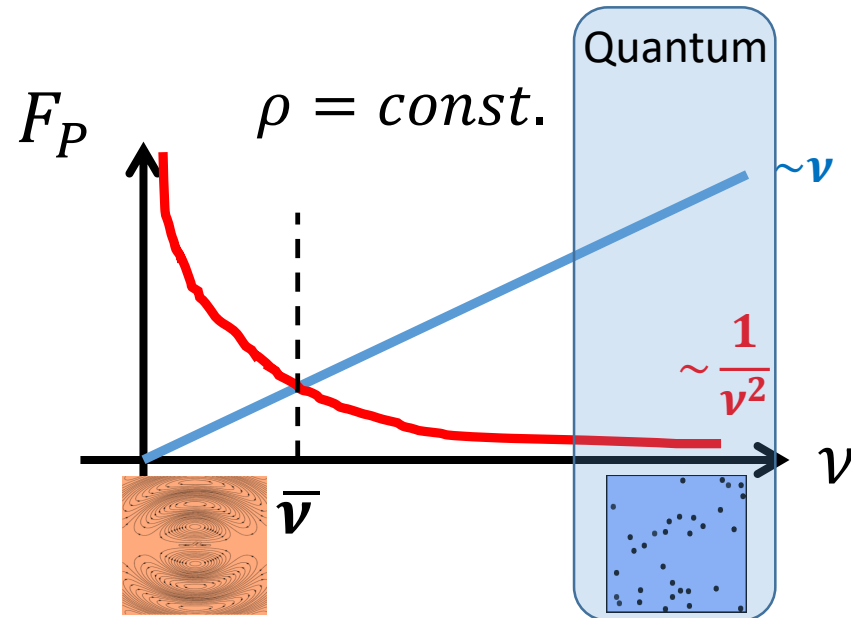
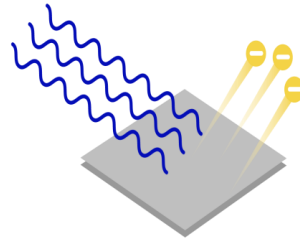
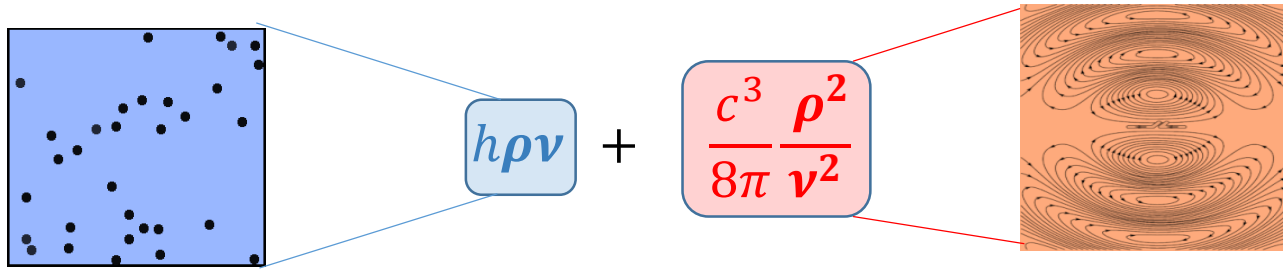
$$F \cong k^2 T^2 \frac{8\pi \nu^2}{c^3} = \frac{c^3}{8\pi \nu^2} \rho^2 \sim \frac{\rho^2}{\nu^2}$$

$$\frac{h\nu}{kT} \ll 1 \quad F_{RJE} \cong \frac{c^3}{8\pi} \frac{\rho^2}{\nu^2}$$

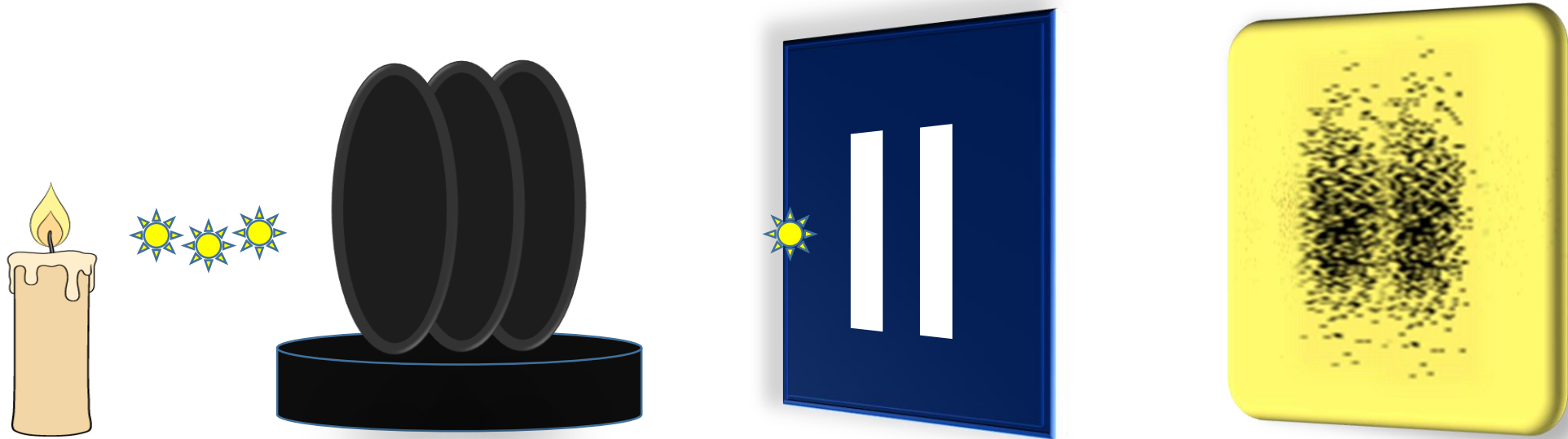
$$\rho = \rho_P(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^x - 1} \quad x = \frac{h\nu}{kT}$$

$$F_P \cong \underbrace{h\rho \nu}_{\text{Particle-like}} + \frac{c^3}{8\pi} \underbrace{\frac{\rho^2}{\nu^2}}_{\text{Wave-like}}$$

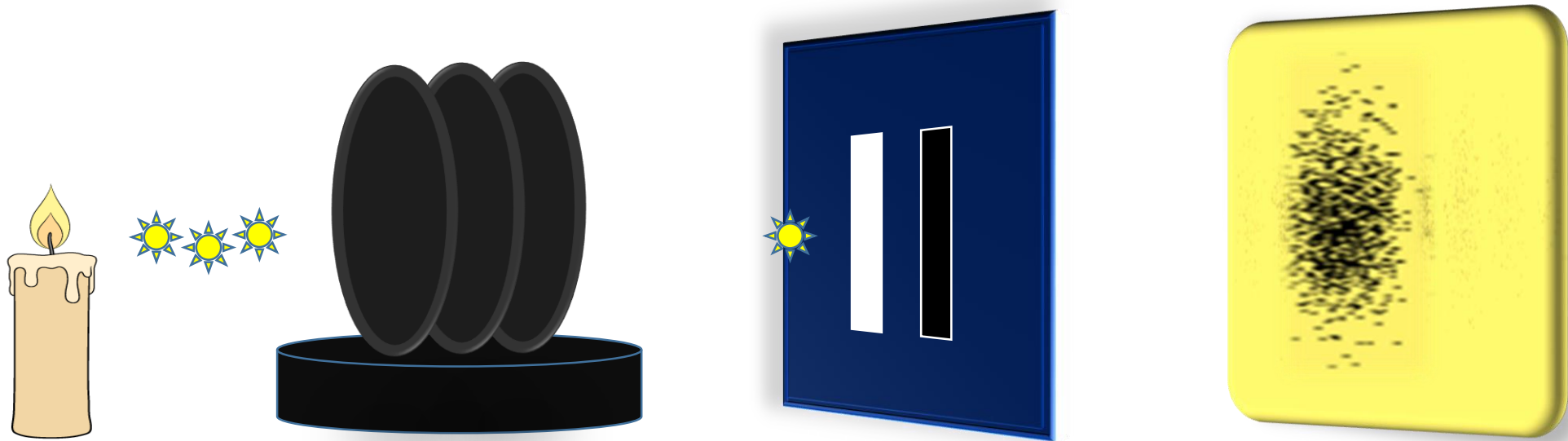
Fluttuazioni di radiazione



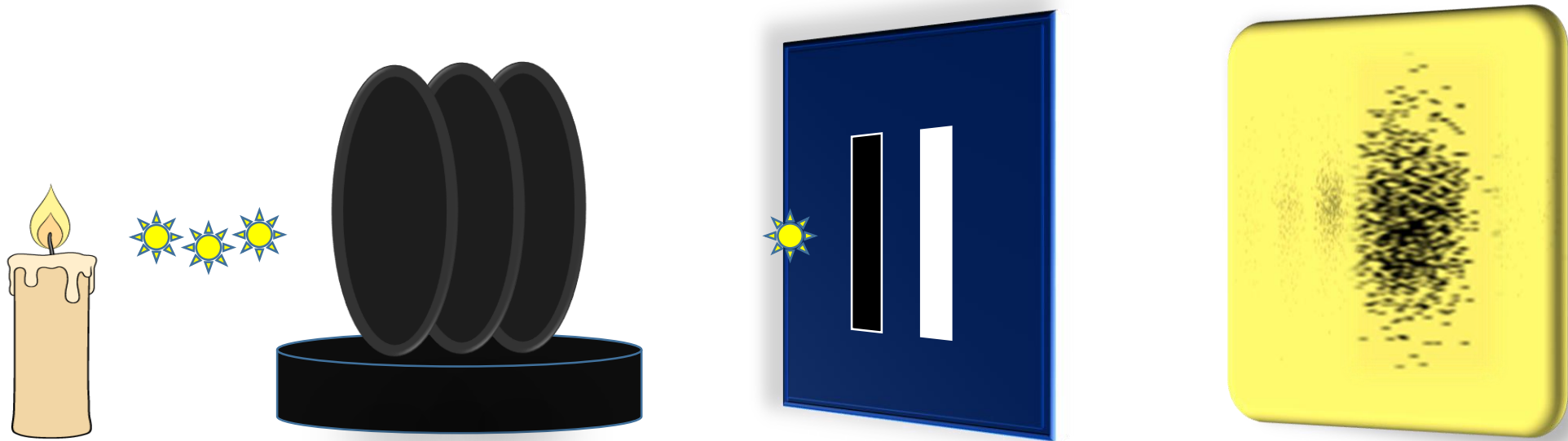
La luce se fosse fatta di proiettili classici



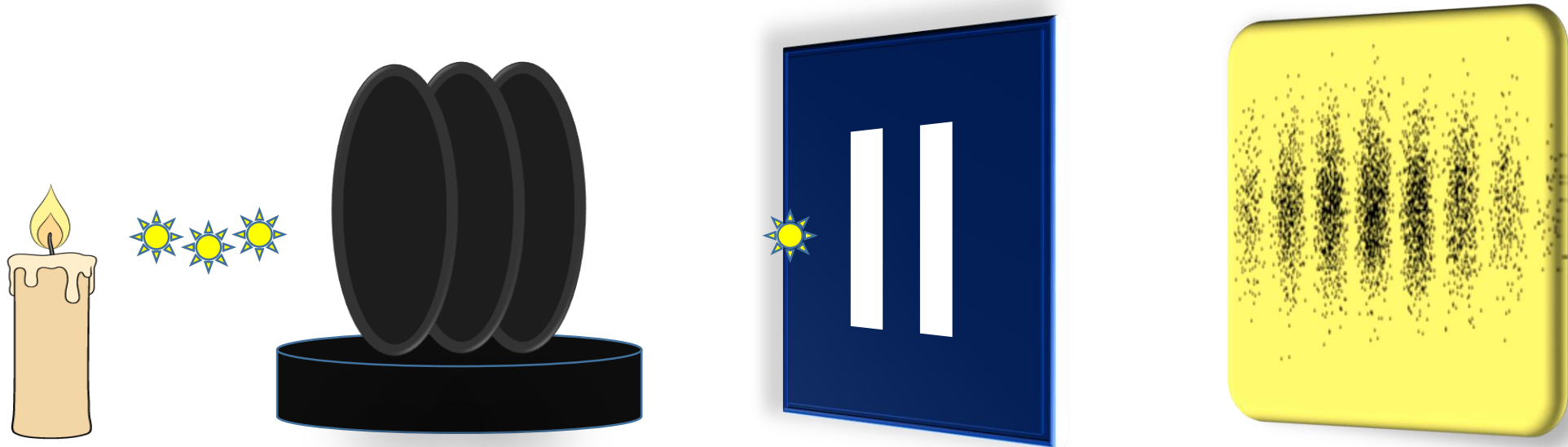
Singoli proiettili quantistici



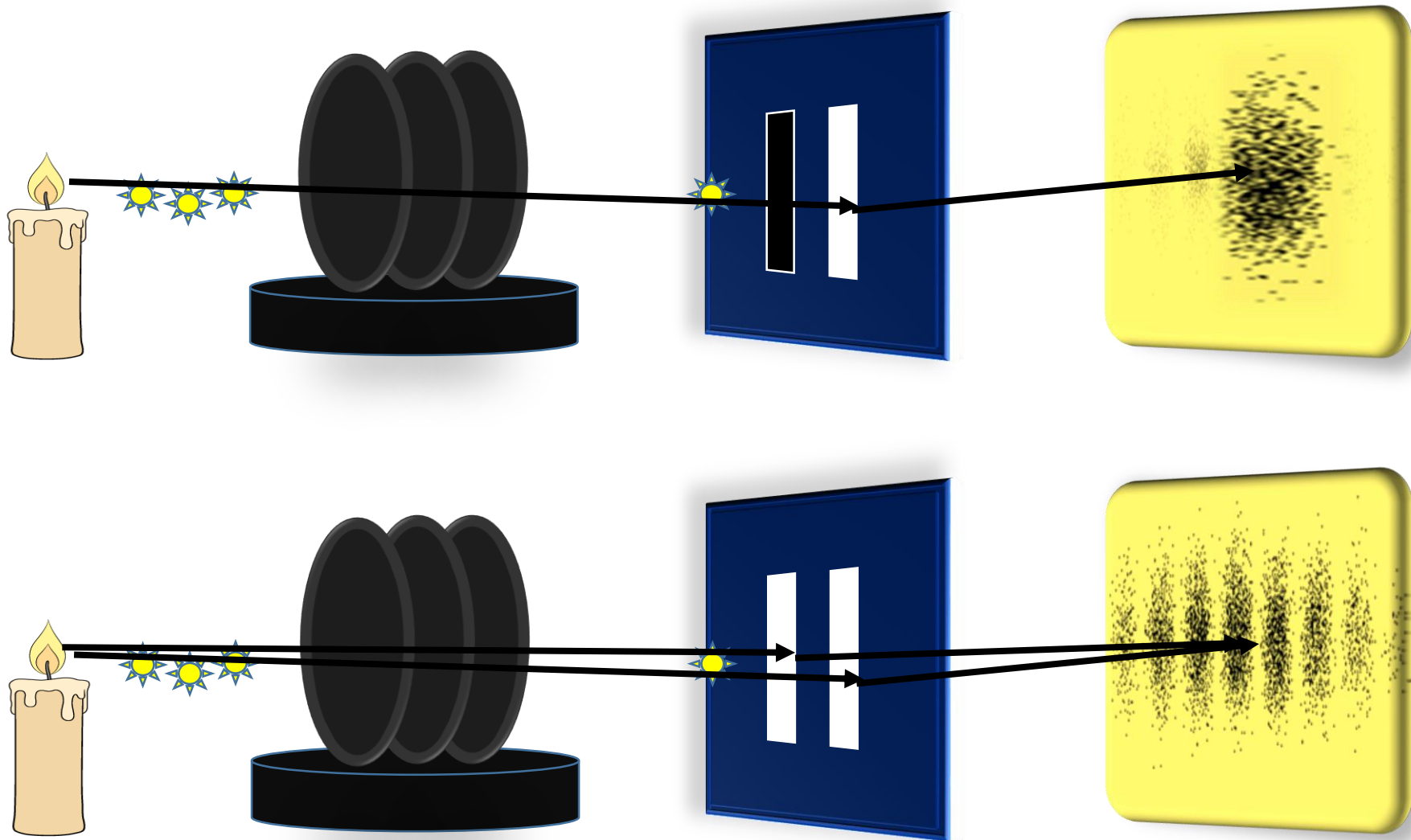
Singoli proiettili classici



Singoli proiettili quantistici

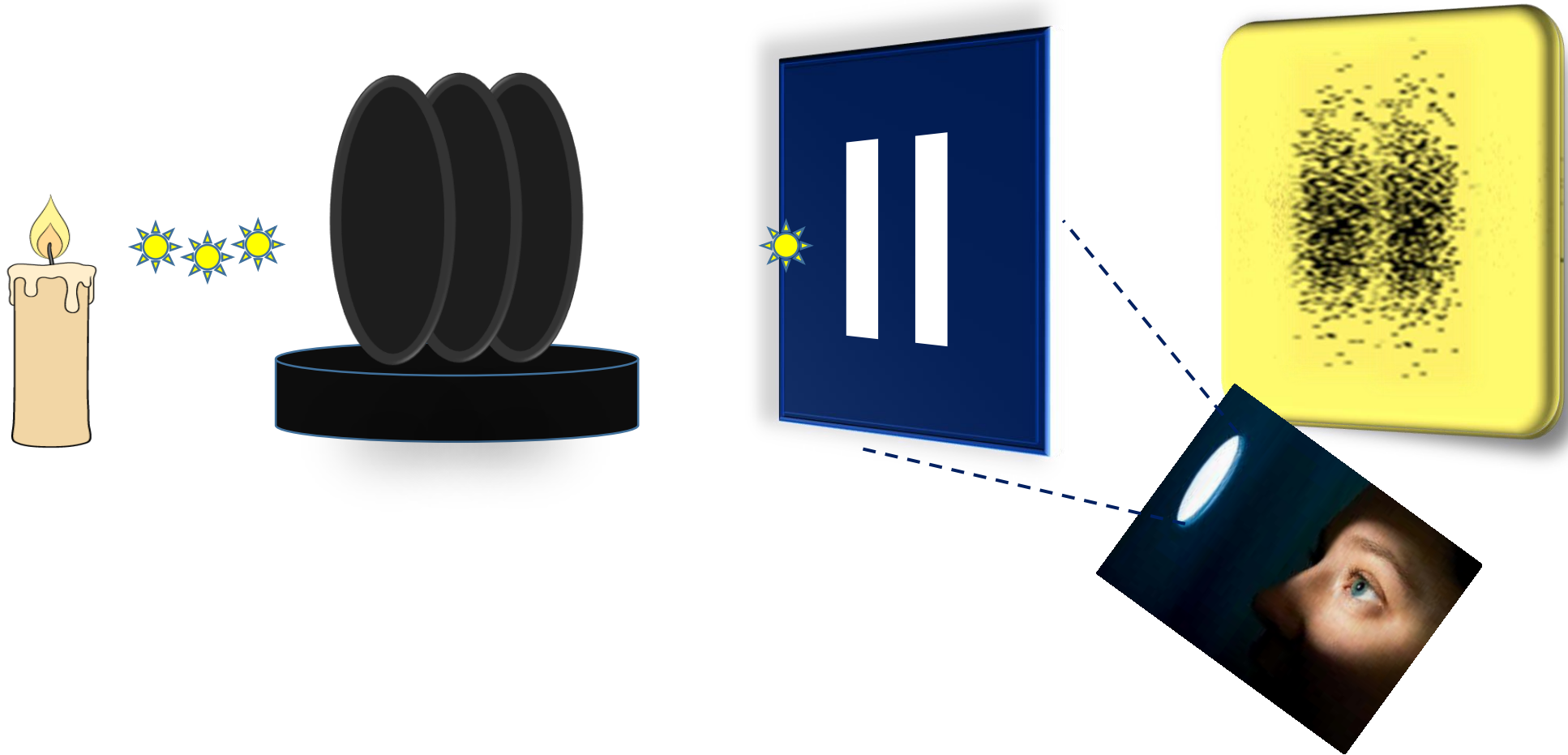


Paradossi

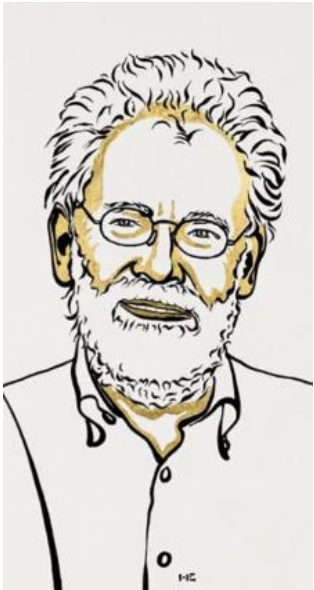
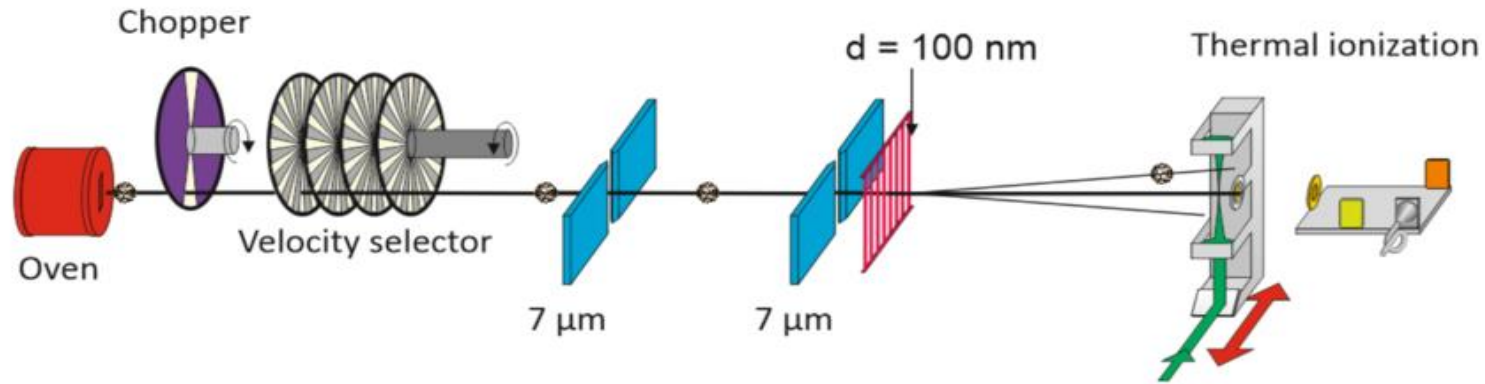


Aprire una alternativa in più riduce la possibilità di (o addirittura rende impossibile) arrivare in alcuni punti!!!
Solo le onde si comportano così interferendo distruttivamente.

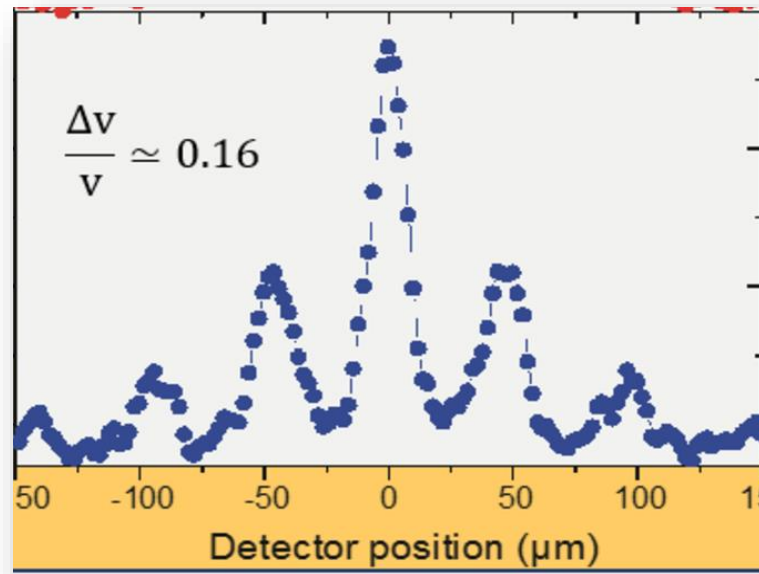
Misurare da dove è passato il fotone



Anche la materia si comporta così



A. Zelig



<https://physics.aps.org/articles/v7/122>



Wave particle duality with molecules

Single-, double-, and triple-slit diffraction of molecular matter waves

Christian Brand^{a)}

Faculty of Physics, University of Vienna, Boltzmannngasse 5, A-1090 Vienna, Austria and German Aerospace Center (DLR), Institute of Quantum Technologies, Söflinger Straße 100, 89077 Ulm, Germany

Stephan Troyer

Faculty of Physics, University of Vienna, Boltzmannngasse 5, A-1090 Vienna, Austria

Christian Knobloch

Faculty of Physics, University of Vienna, Boltzmannngasse 5, A-1090 Vienna, Austria

Ori Cheshnovsky

Tel Aviv University, The Center for Nanosciences and Nanotechnology, Tel Aviv 69978, Israel and School of Chemistry, The Raymond and Beverly Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv 69978, Israel

Markus Arndt

Faculty of Physics, University of Vienna, Boltzmannngasse 5, A-1090 Vienna, Austria

(Received 2 June 2021; accepted 13 August 2021)

Even 100 years after its introduction by Louis de Broglie, the wave-nature of matter is often regarded as a mind-boggling phenomenon. To give an intuitive introduction to this field, we here discuss the diffraction of massive molecules through a single, a double, and a triple slit, as well as a nanomechanical grating. While the experiments are in good agreement with undergraduate textbook predictions, we also observe pronounced differences resulting from the molecules' mass and internal complexity. The molecules' polarizability causes an attractive van der Waals interaction with the slit walls, which can be modified by rotating the nanomechanical mask with respect to the molecular beam. The text is meant to introduce students and teachers to the concepts of molecule diffraction, supported by problems and solutions that can be discussed in class.

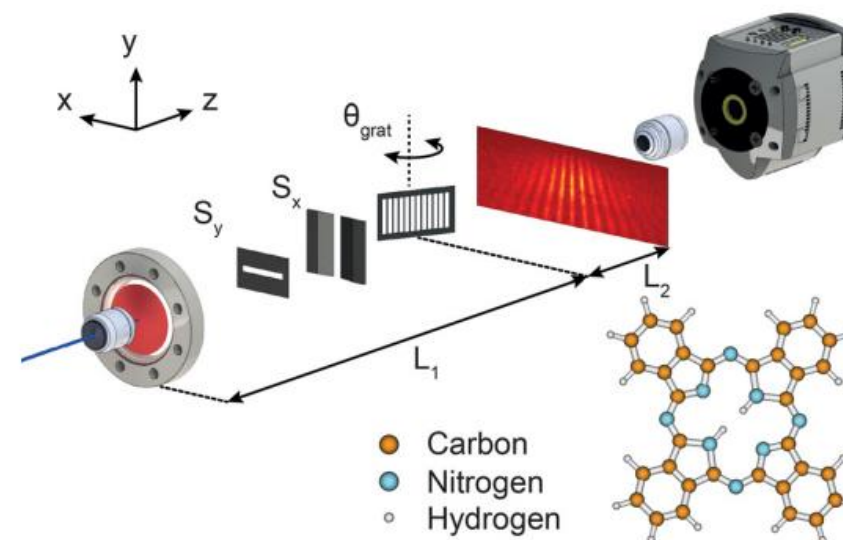


Fig. 1. Laser-evaporation of molecules leads to a beam, which is collimated along x and y . After 1.55 m of free flight, the matter wave is diffracted at a nanomechanical grating, which can be rotated by θ_{grat} . The resulting pattern is collected 0.59 m further downstream on a quartz plate and visualized via laser-induced fluorescence microscopy. We use the organic fluorophore phthalocyanine.

Principio di Complementarità

LIGHT IS A
WAVE!

Principio di Complementarità



Principio di Complementarità

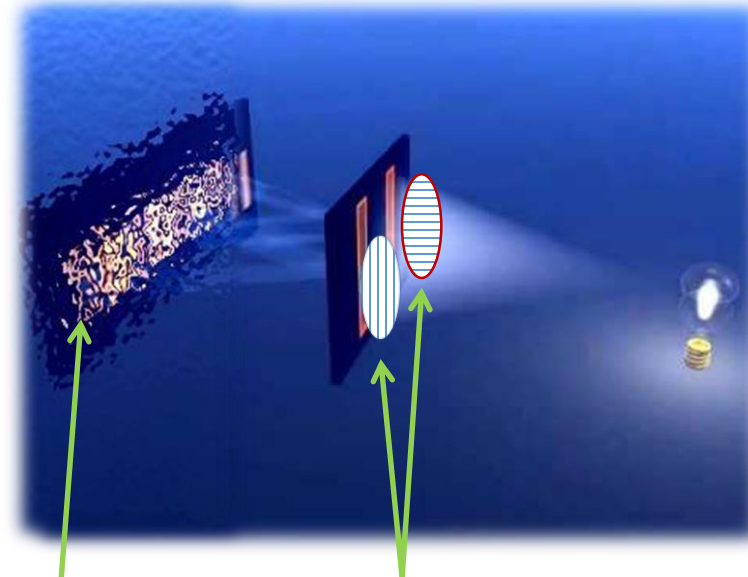
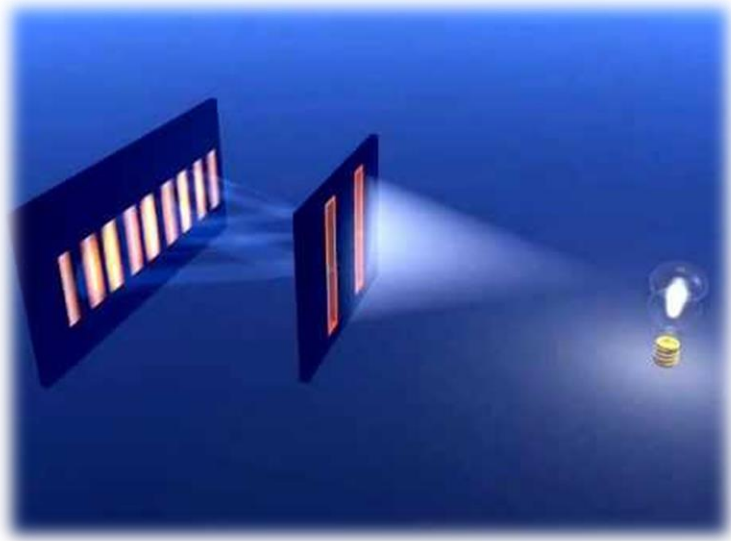


Prima enunciazione: Le **proprietà ondulatorie** e **corpuscolari** di un sistema quantistico sono complementari: un esperimento volto a tracciare una traiettoria (*which path?*) distrugge l'interferenza, un esperimento volto a osservare l'interferenza (*which phase?*) avviene a condizione di non conoscere nulla della traiettoria.

Seconda enunciazione: Il **determinismo** (coordinazione spazio-temporale) e la **causalità** (conservazione energia-impulso) in un sistema quantistico sono complementari: un esperimento volto a verificare il primo principio impedisce di osservare il secondo e viceversa.

Prima enunciazione

Un esperimento volto a tracciare una traiettoria (*which path?*) distrugge l'interferenza, un esperimento volto a osservare l'interferenza (*which phase?*) avviene a condizione di non conoscere nulla della traiettoria.

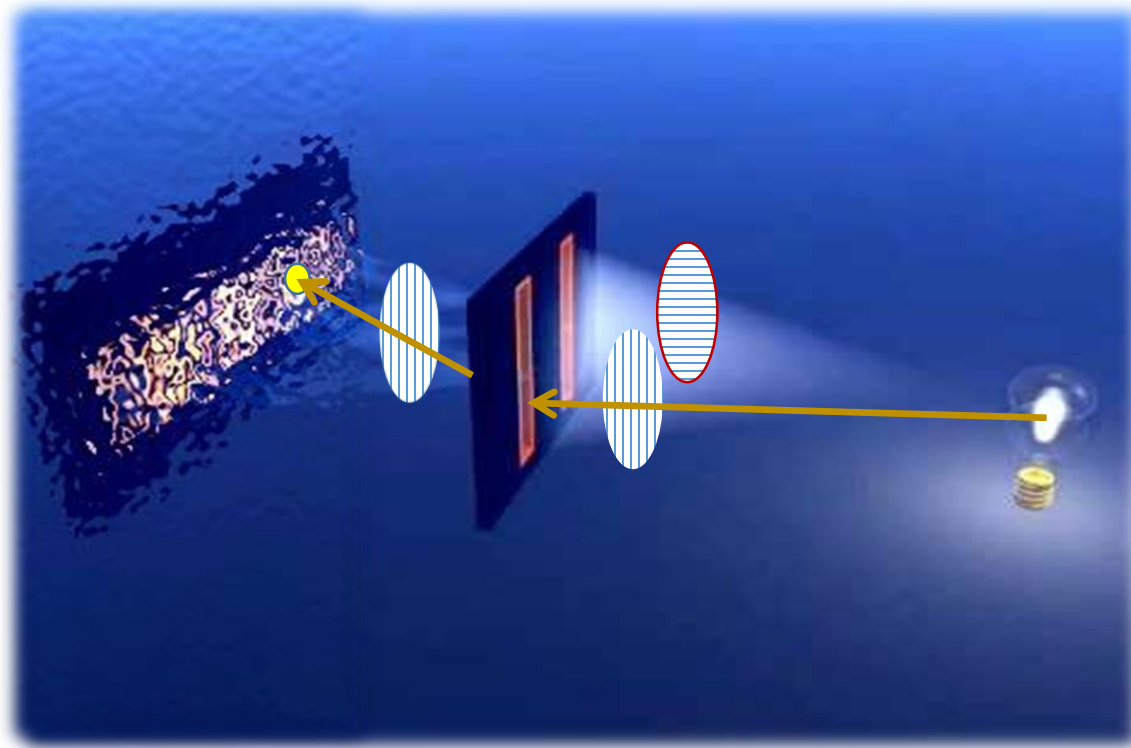


Interferenza
distrutta

Polarizzatori
perpendicolari

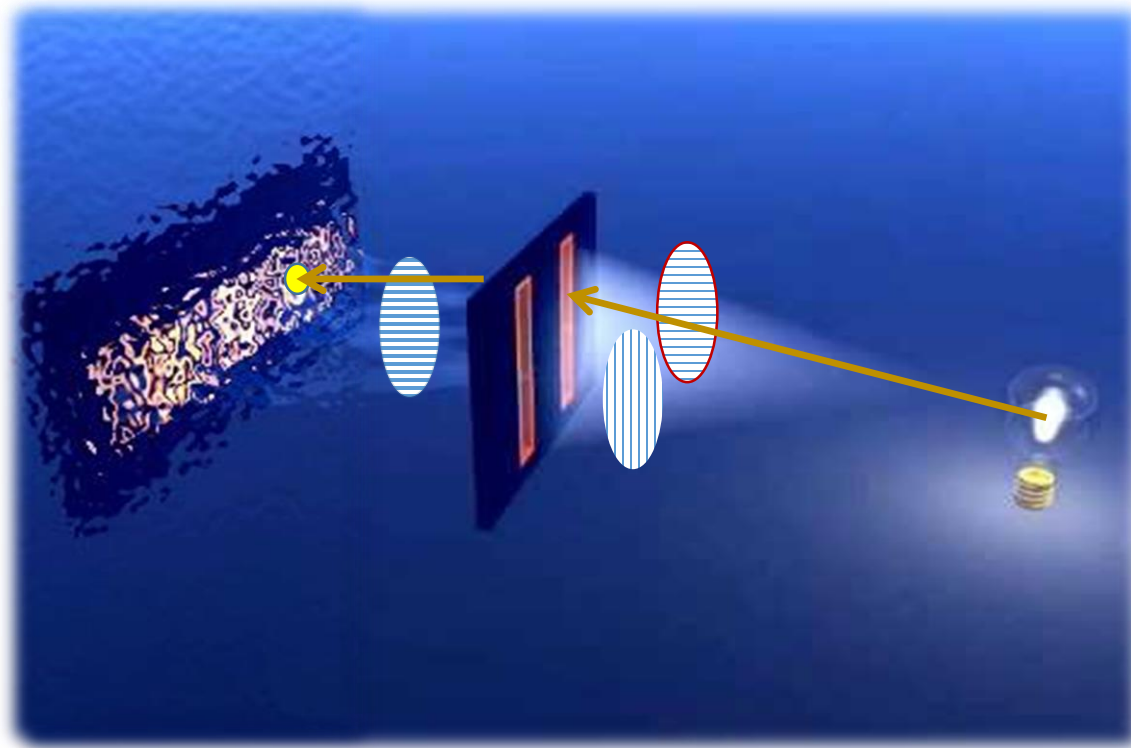
Prima enunciazione

In linea di principio posso inserire un analizzatore verticale od orizzontale sullo schermo e sapere così da dove è passato il fotone in base al suo stato di polarizzazione, ovvero se passa o meno.



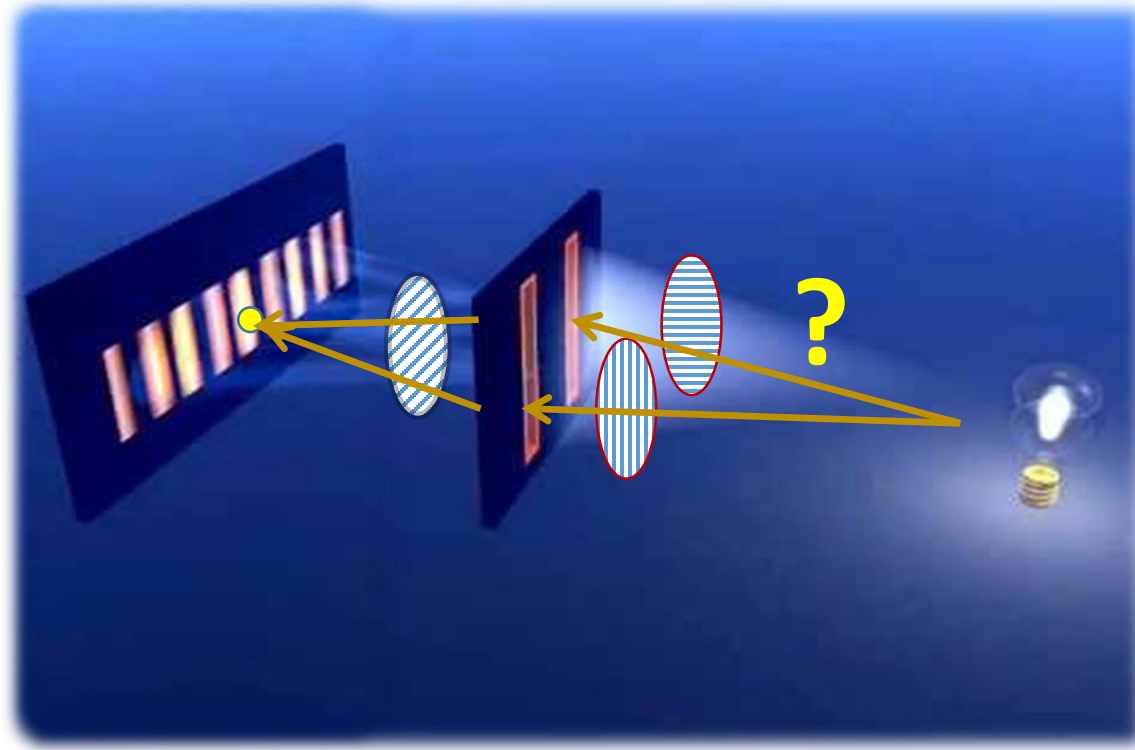
Prima enunciazione

In linea di principio posso inserire un analizzatore verticale od orizzontale sullo schermo e sapere così da dove è passato il fotone in base al suo stato di polarizzazione, ovvero se passa o meno.



Prima enunciazione

Quantum eraser experiment:
Aggiungere un analizzatore a 45° o 135° prima dello schermo



Non possiamo sapere da dove è passato il fotone perché sia un fotone V che O ha una chance del 50% di passare un filtro a 45°

Dualismo onda-particella: monete classiche



$|T\rangle$



$|C\rangle$

$$P(T) = |\langle T|T\rangle|^2 = 1$$

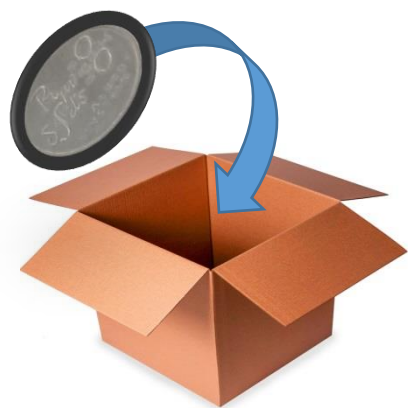
$$P(C) = |\langle C|T\rangle|^2 = 0$$

$$\langle C|T\rangle = \langle T|C\rangle = 0$$

$$P(T) = |\langle T|C\rangle|^2 = 0$$

$$P(C) = |\langle C|C\rangle|^2 = 1$$

$$\langle C|C\rangle = \langle T|T\rangle = 1$$



$|\psi\rangle$



$$P(T) = |\langle T|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

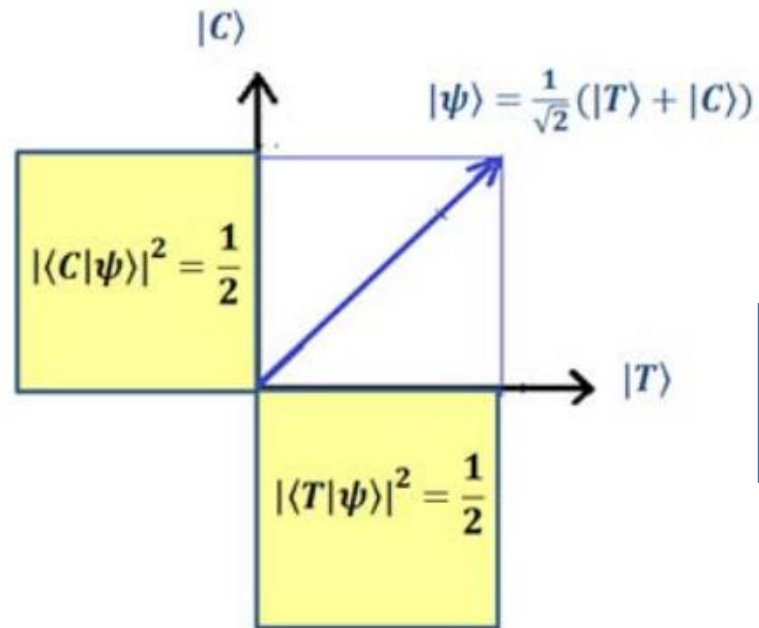


$$P(C) = |\langle C|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

Dualismo onda-particella: monete classiche

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|C\rangle + |T\rangle)$$

$|\psi\rangle$



$$P(C) = |\langle C|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

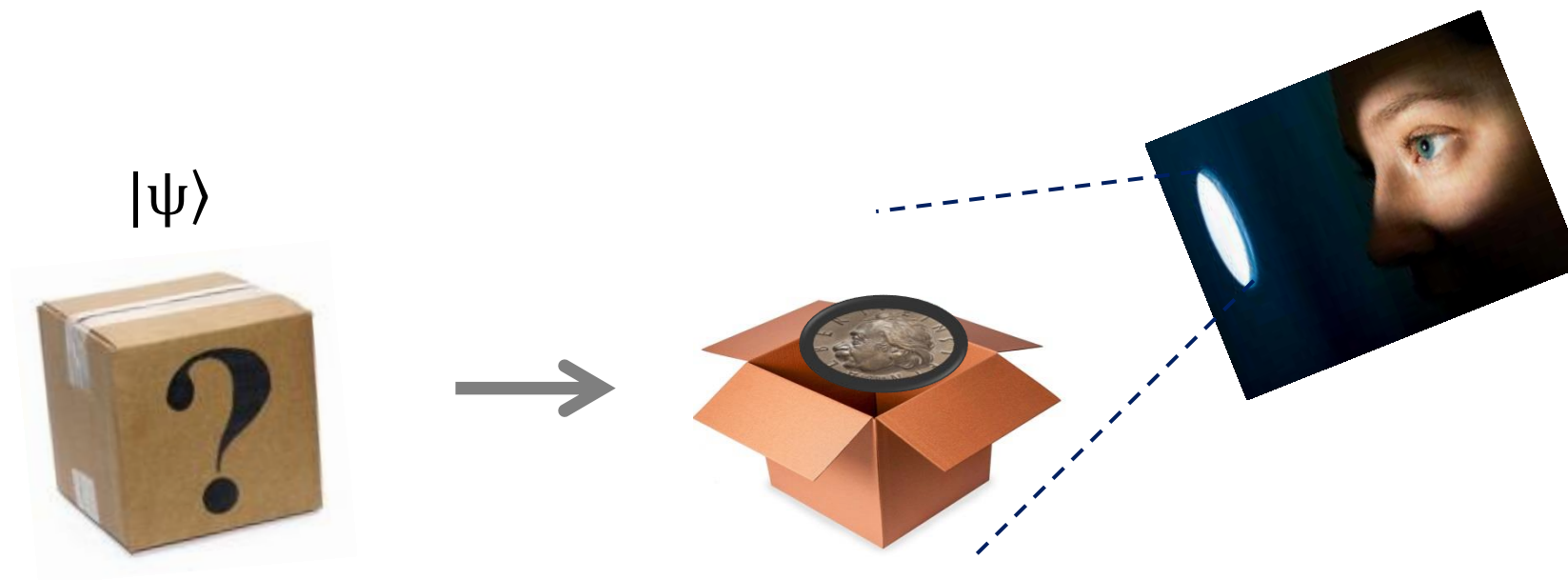
$$P(T) = |\langle T|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

Che significato ha $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|C\rangle + |T\rangle)$

Non corrisponde ad alcun elemento di realtà. E' Stato della conoscenza non oggettiva dell'osservatore

Elementi di realtà oggettiva della moneta

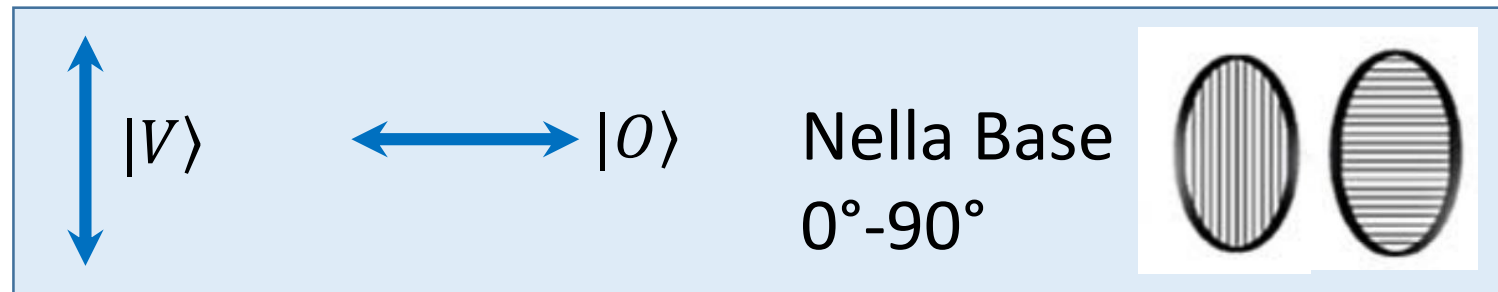
Dualismo onda-particella: monete classiche



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|C\rangle + |T\rangle) \xrightarrow{\text{Collasso}} |T\rangle$$

Il collasso è istantaneo perché non è fisico ma riguarda lo stato della nostra conoscenza. La moneta era T anche prima

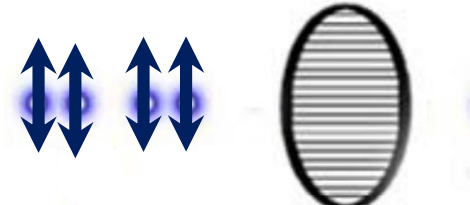
Dualismo onda-particella: polarizzazione V-O dei fotoni



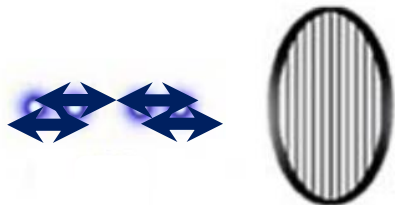
$$P(V) = |\langle V|\mathbf{v}\rangle|^2 = 1$$



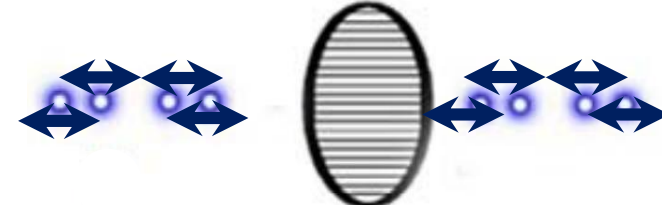
$$P(O) = |\langle O|\mathbf{v}\rangle|^2 = 0$$



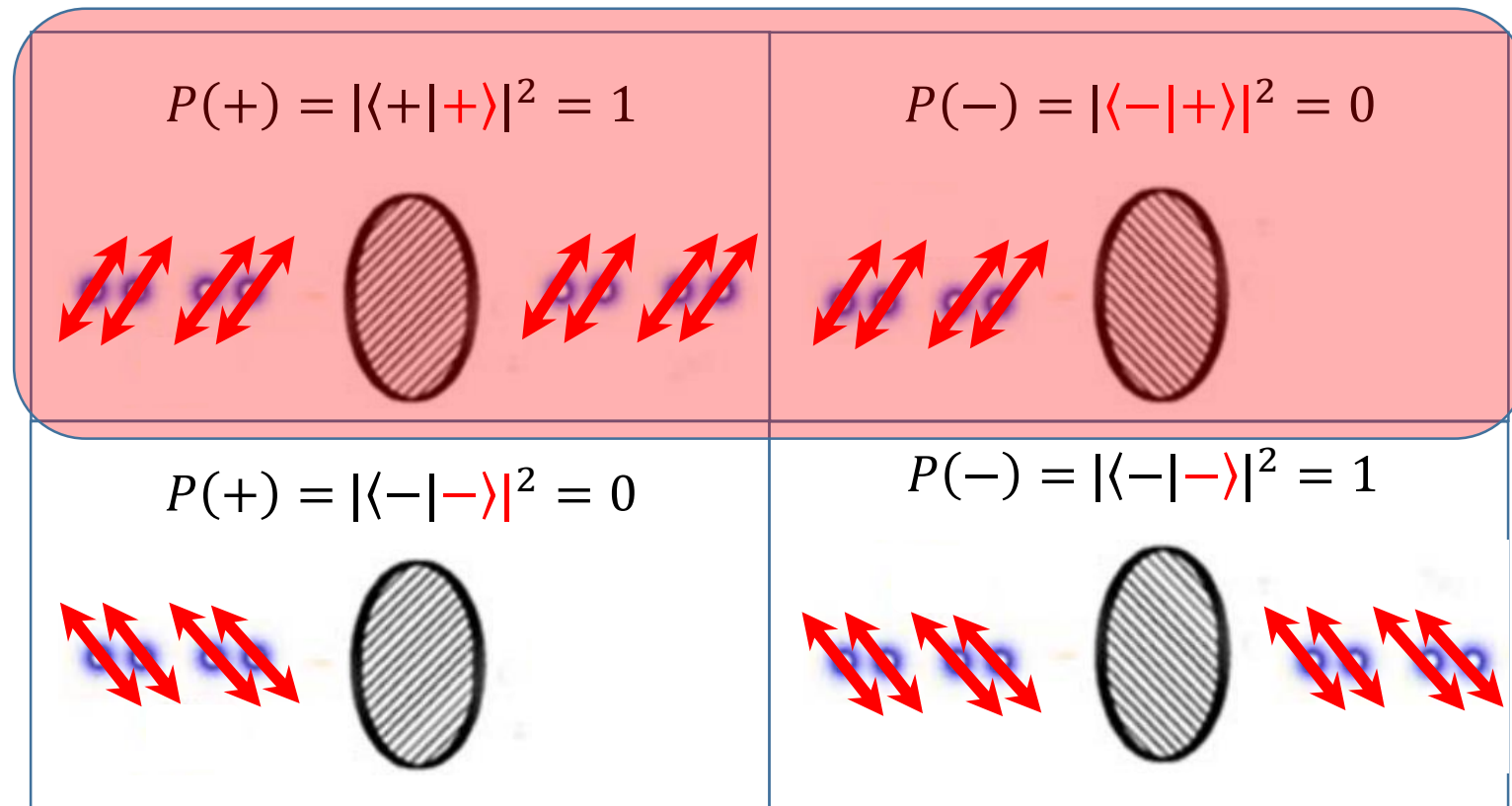
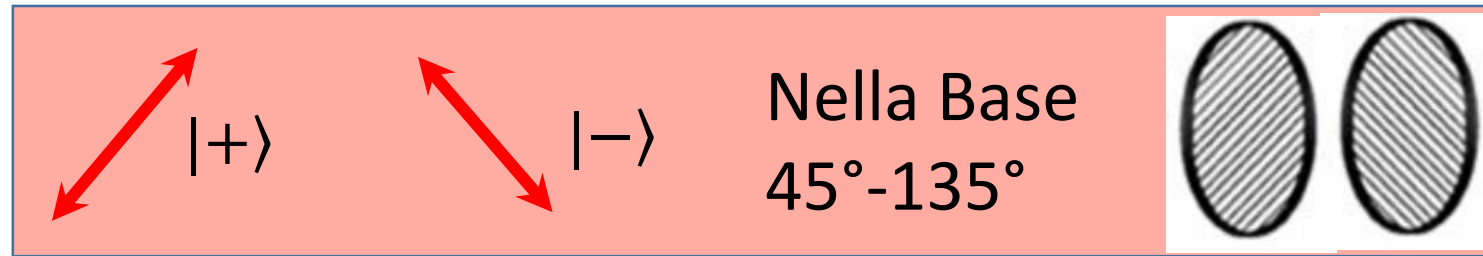
$$P(V) = |\langle V|\mathbf{o}\rangle|^2 = 0$$



$$P(O) = |\langle O|\mathbf{o}\rangle|^2 = 1$$

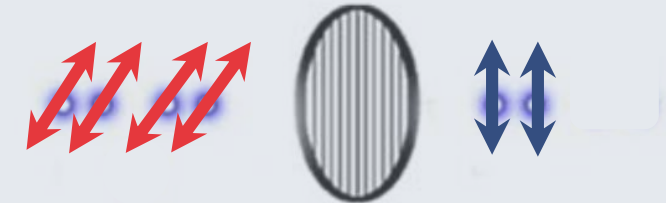
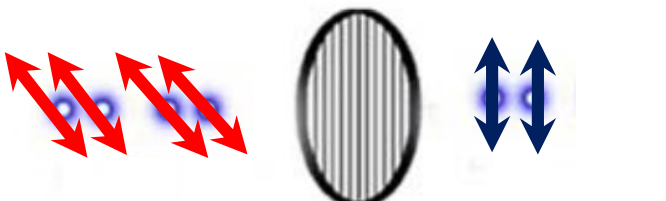
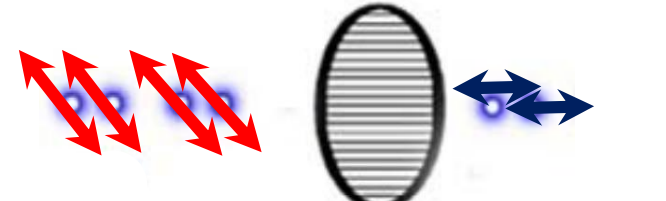


Dualismo onda-particella: polarizzazione +; - dei fotoni



Dualismo onda-particella: polarizzazione +:-135 dei fotoni

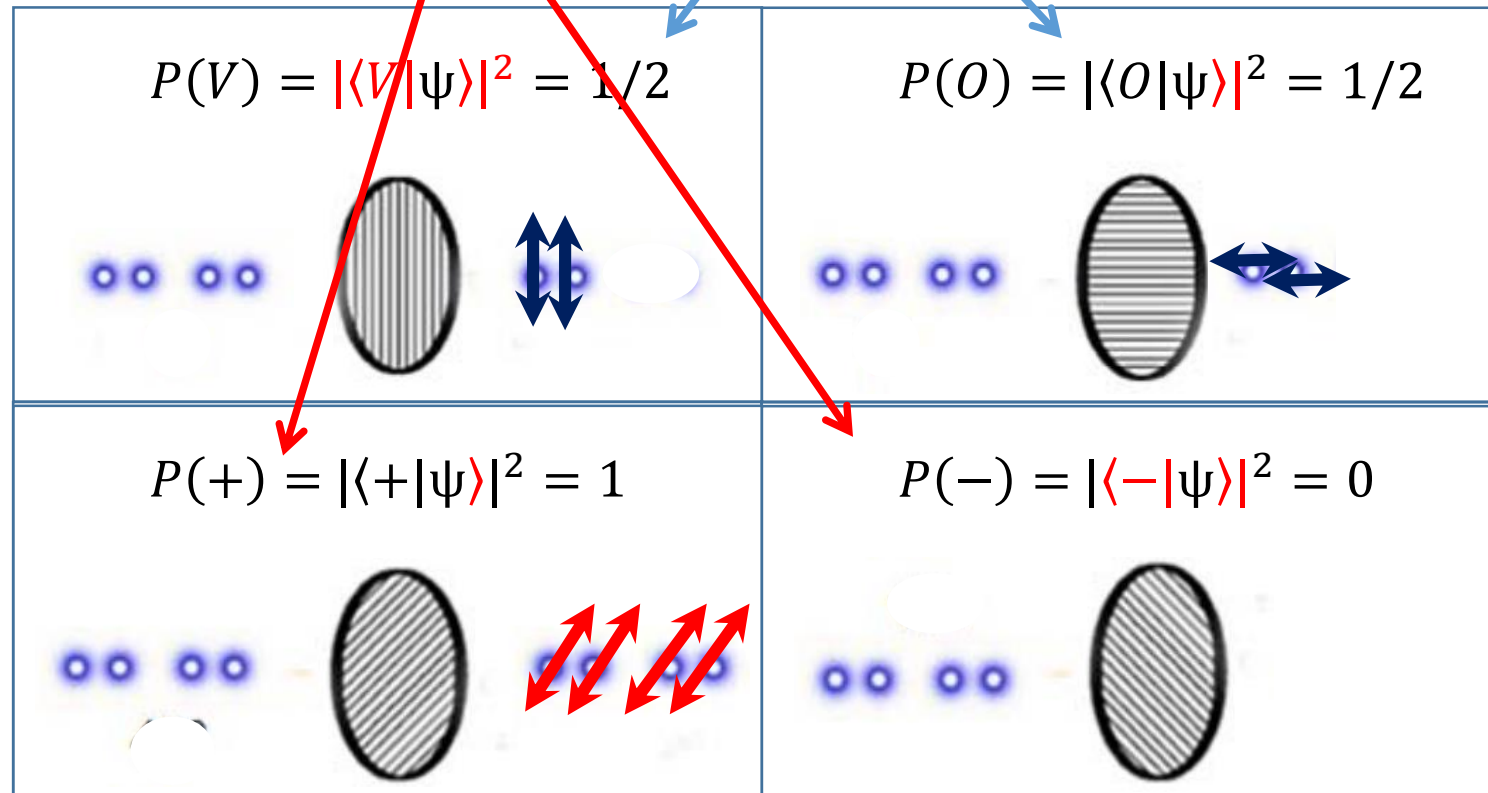
 $|+\rangle$  $|-\rangle$ Nella Base $0^\circ-90^\circ$  

$P(V) = \langle V +\rangle ^2 = 1/2$ 	$P(O) = \langle O +\rangle ^2 = 1/2$ 
$P(V) = \langle V -\rangle ^2 = 1/2$ 	$P(O) = \langle O -\rangle ^2 = 1/2$ 

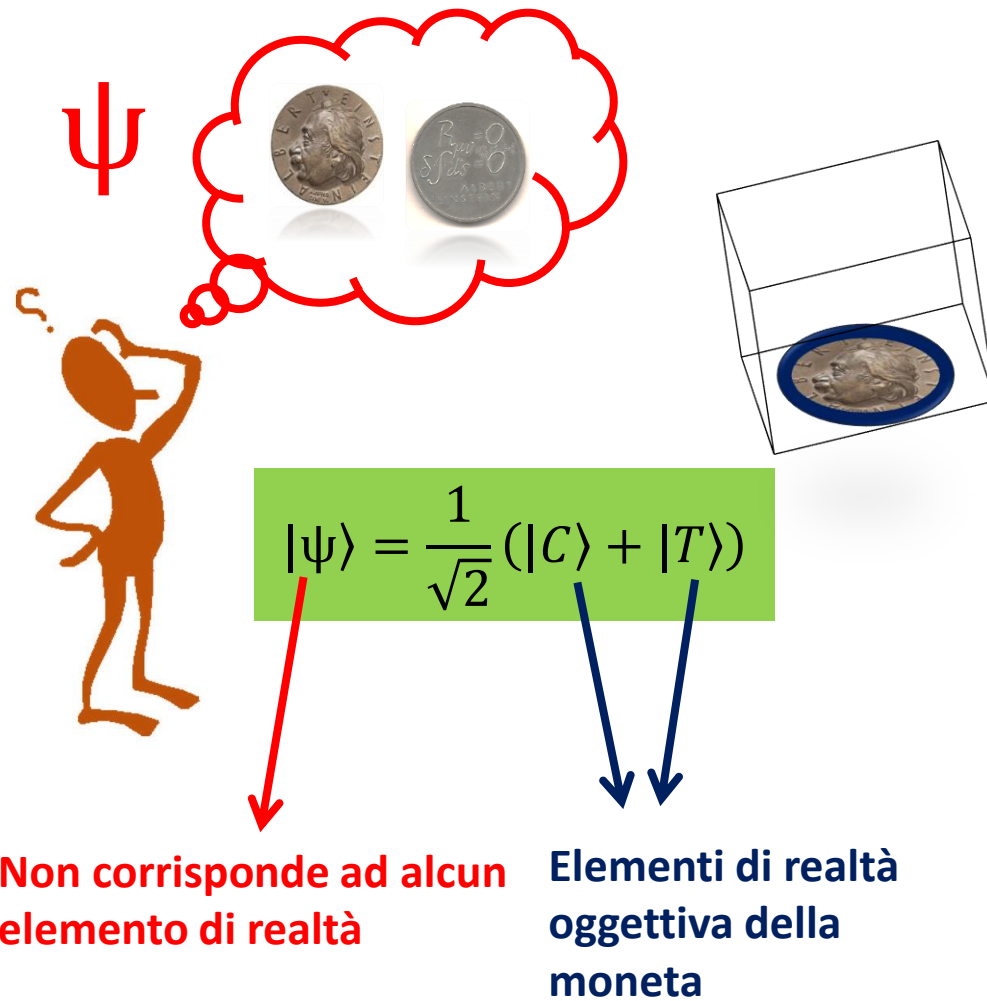
Dualismo onda-particella: polarizzazione 45° dei fotoni

$$|\psi\rangle = |+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|V\rangle + |O\rangle)$$

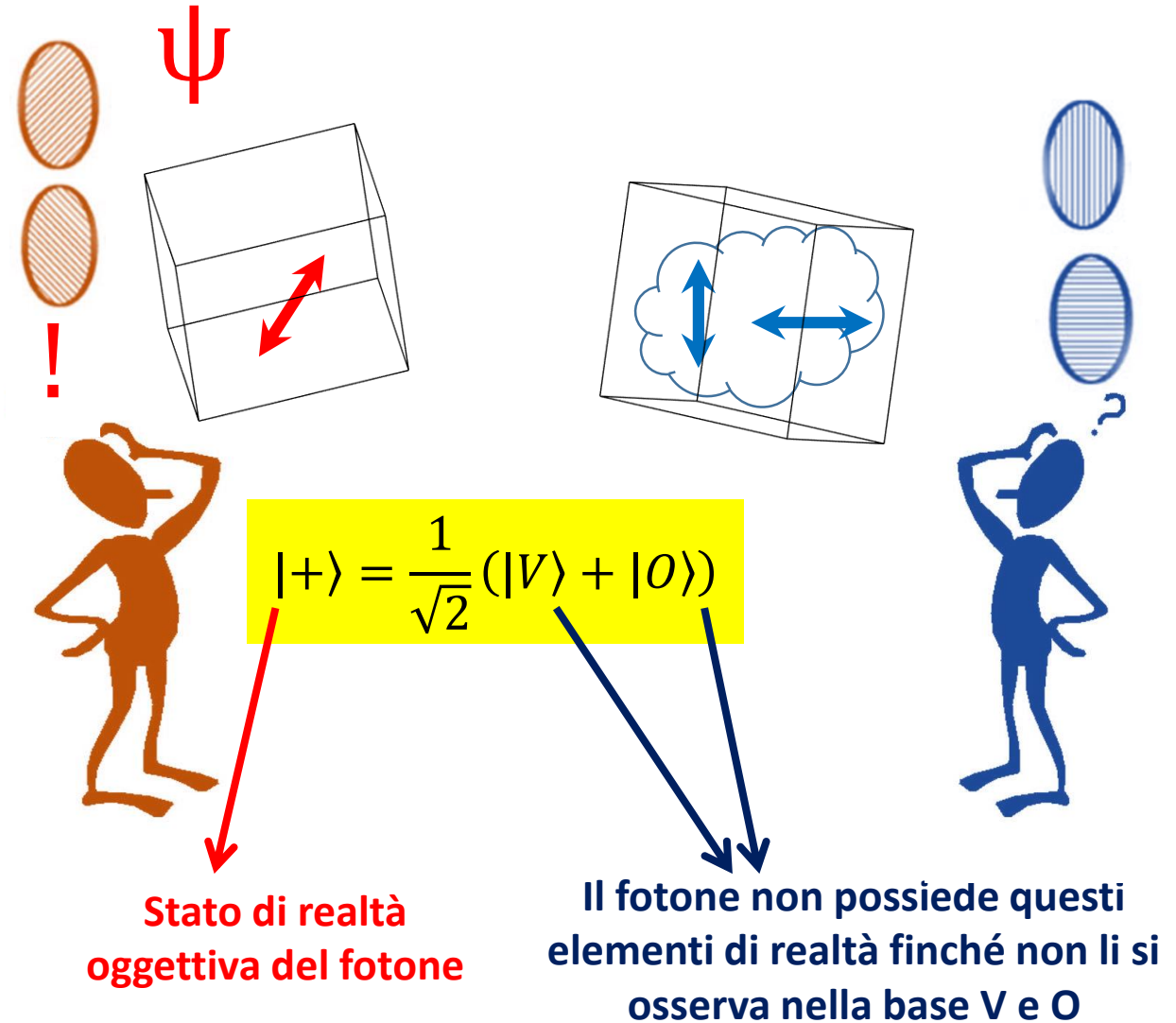
Lo stato 45° posso scriverlo
come sovrapposizione di V
e O



Intepretazione di Copenhagen

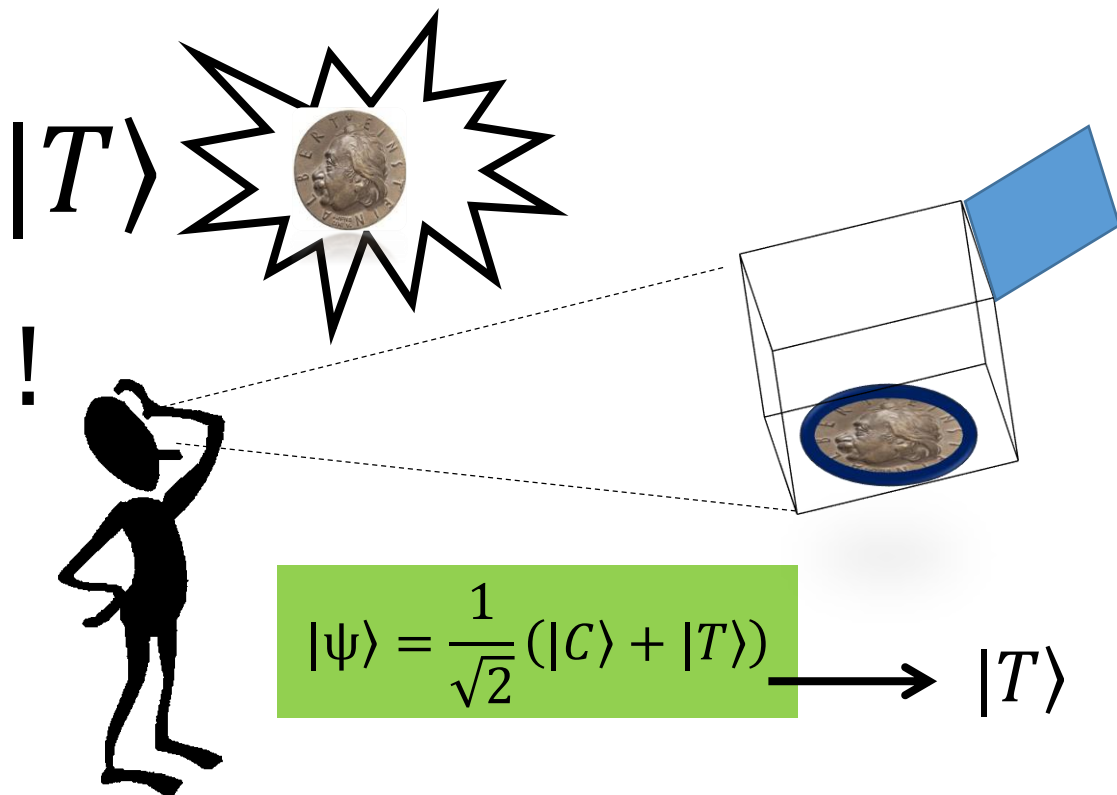


La moneta ha realtà oggettiva sempre indipendente dalla misura che si vuole fare

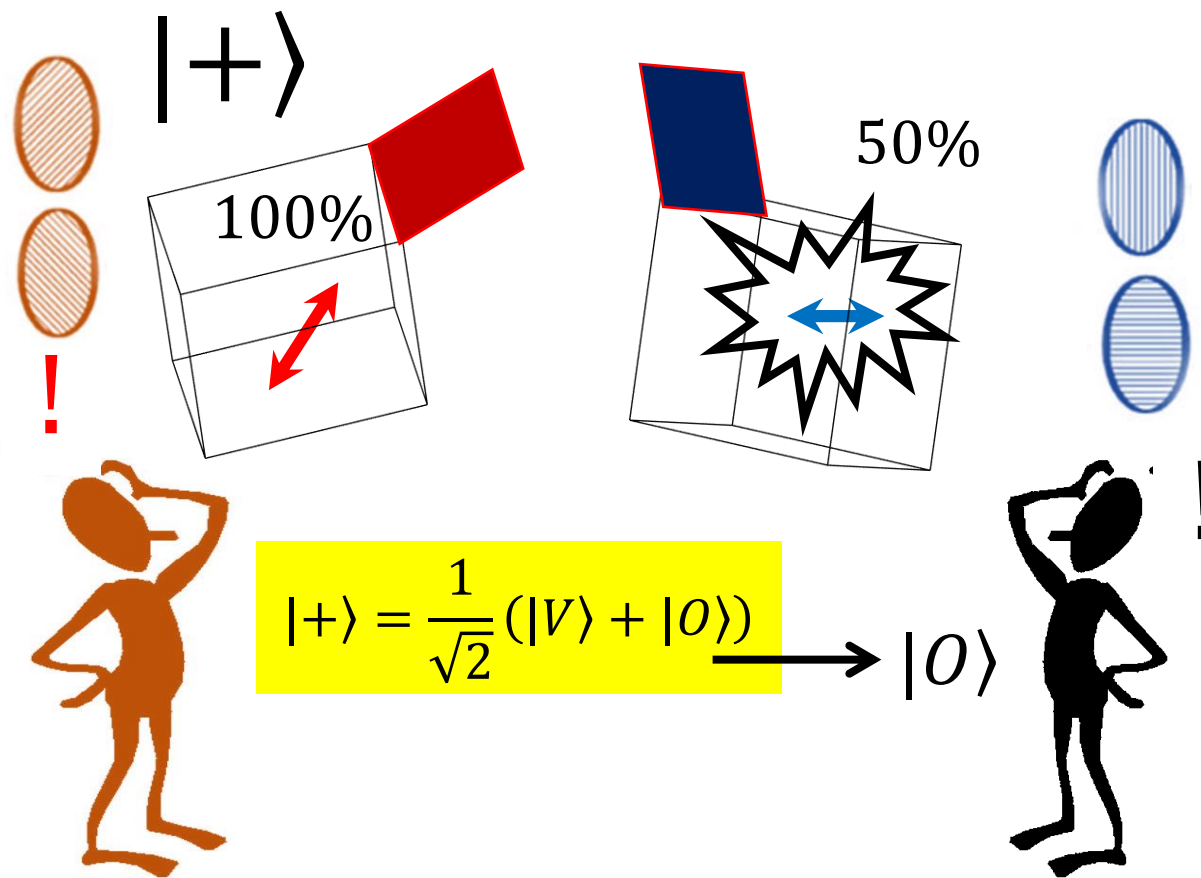


Gli osservabili non sono sempre elementi di realtà: dipende dalla misura che si vuole fare

Significato del Collasso per Copenaghen



Il collasso dello stato è la presa di conoscenza dello stato reale della moneta nella scatola una volta aperta



Il collasso dello stato dipende dall'apparato. Se l'apparato è nella giusta base non vi è alcun collasso. Se è nella base «sbagliata» il collasso dello stato è una attualizzazione della sovrapposizione!

Questioni aperte

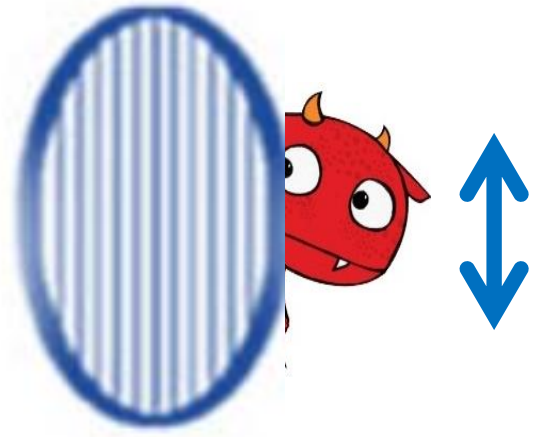
E' possibile escludere che gli apparati ruotino a caso le polarizzazioni seguendo un meccanismo nascosto?



t_1

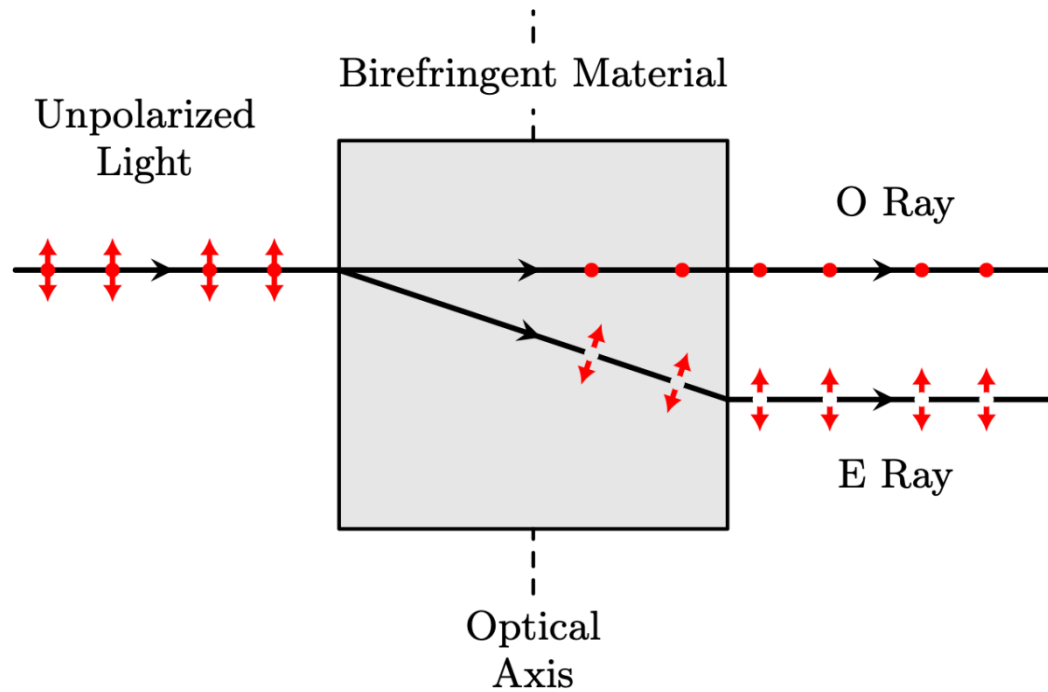


t_2



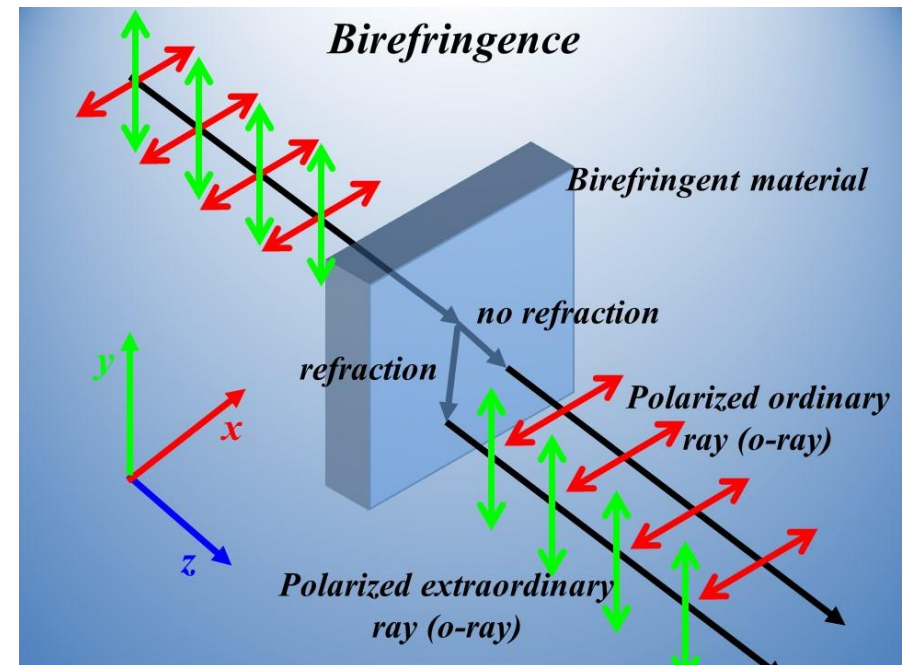
t_3

Cristalli birifrangenti

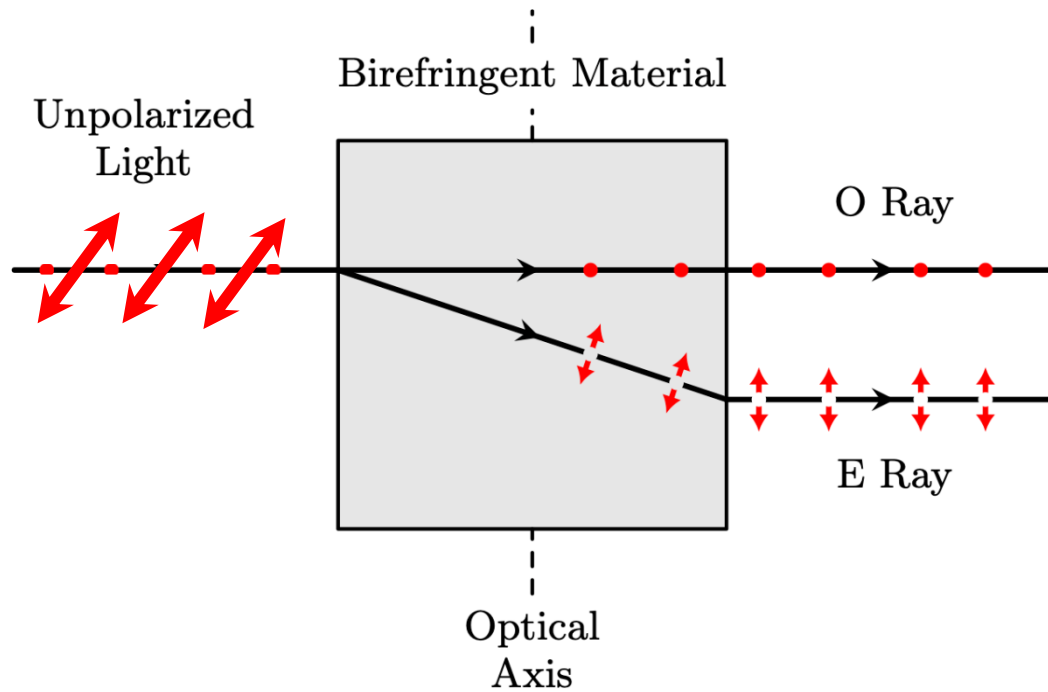


Classicamente l'onda elettromagnetica si divide in due onde con polarizzazioni opposte

- ❑ Se invio un fotone alla volta in stato $|V\rangle$ va giù
- ❑ Se invio un fotone alla volta in stato $|O\rangle$ va dritto
- ❑ Che succede se invio un fotone in stato $|+\rangle = |45^\circ\rangle$?

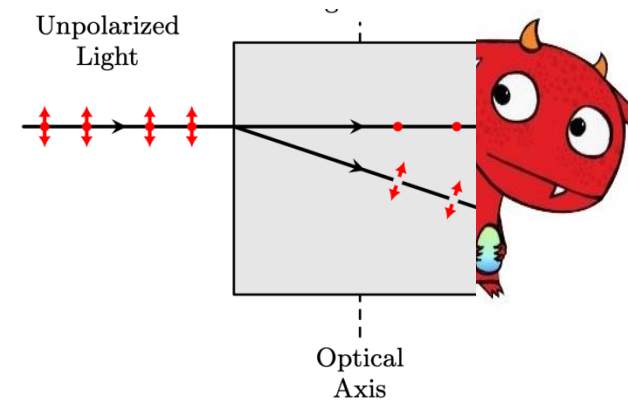


Che succede se invio un fotone in stato $|+\rangle=|45^\circ\rangle$?

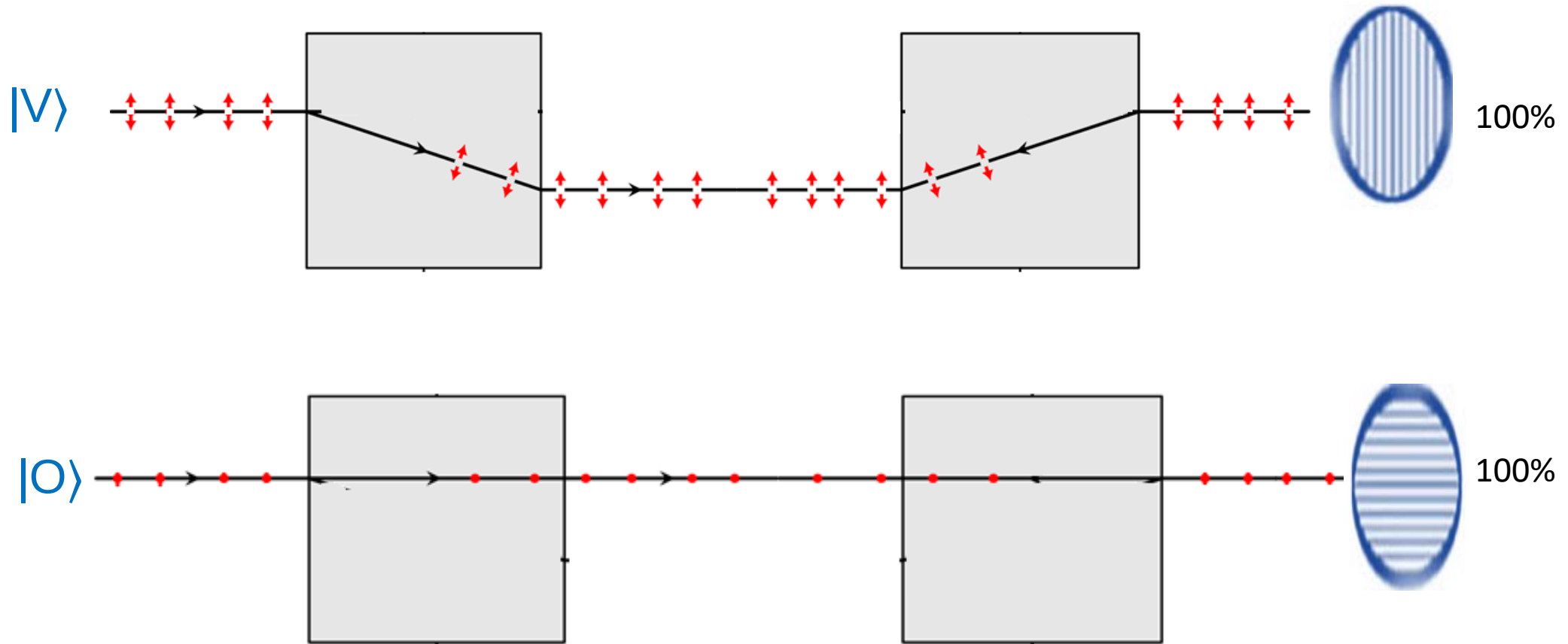


Va a caso dritto o giù (50%/50%)

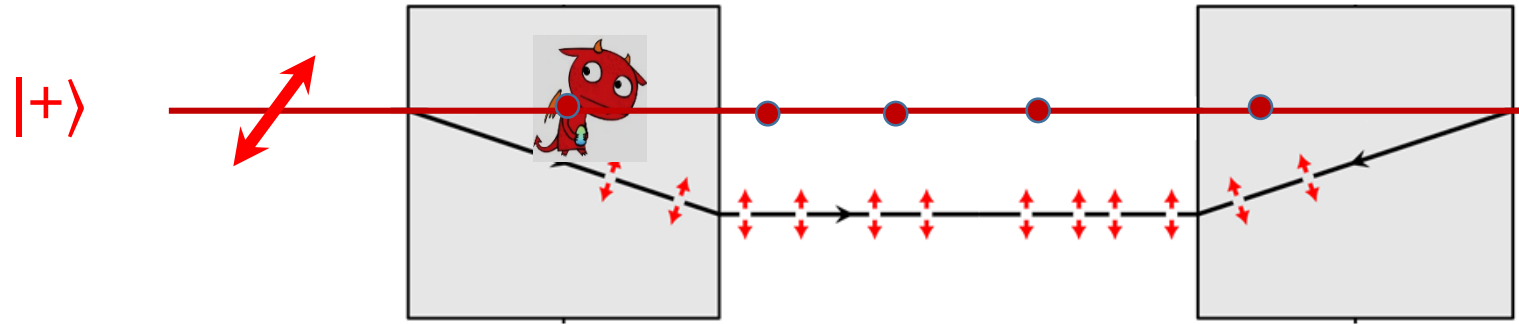
C'è un meccanismo che ruota a caso la polarizzazione del fotone?



Che succede se invio un fotone in stato $|V\rangle$ o $|O\rangle$ su due CB?



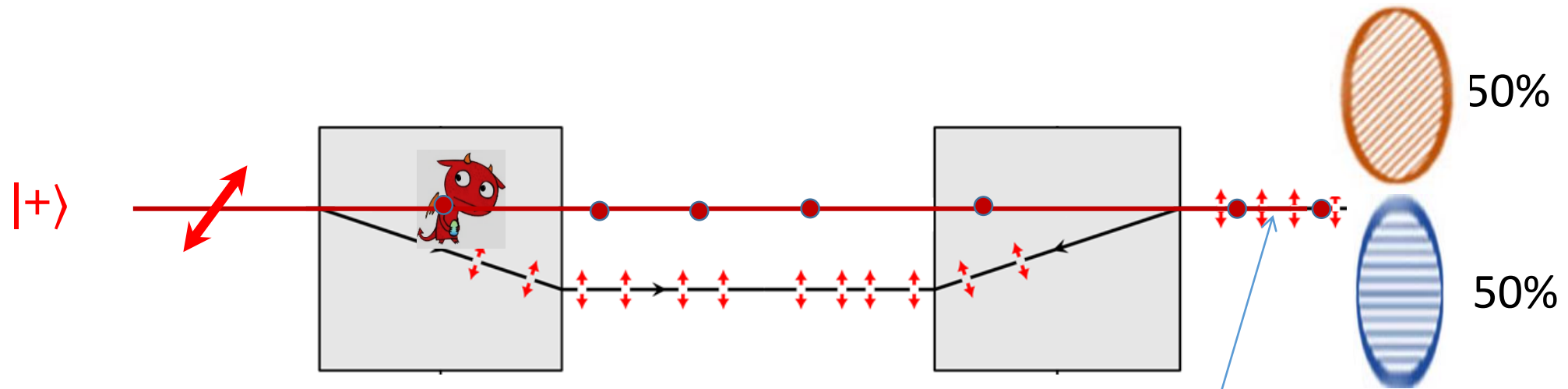
Che succede se invio un fotone in stato $|+\rangle = |45^\circ\rangle$ su due CB?



Possibilità 1: i fotoni, una volta ruotati restano in V o in O anche dopo il secondo CB

Possibilità 2: i fotoni, una volta ruotati restano in V o in O vengono, per simmetria, riorientati di nuovo a 45°

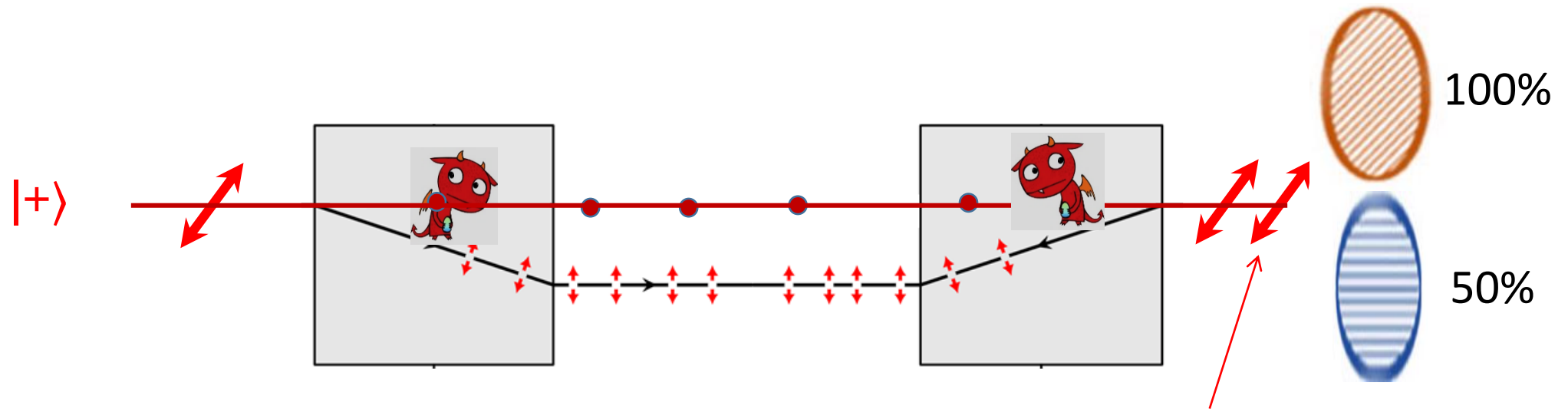
Che succede se invio un fotone in stato $|+\rangle = |45^\circ\rangle$ su due CB?



Possibilità 1: i fotoni, una volta ruotati restano in V o in O anche dopo il secondo CB

Allora prevediamo che in uscita a un polarizzatore 45° o 90° avremo il 50% di fotoni

Che succede se invio un fotone in stato $|+\rangle = |45^\circ\rangle$ su due CB?

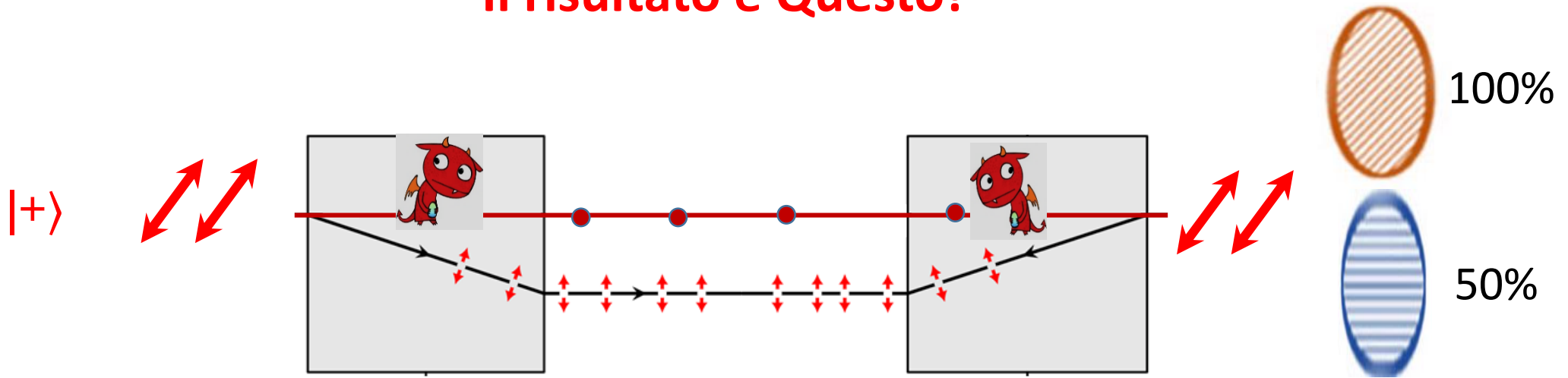


Possibilità 2: i fotoni, una volta ruotati restano in V o in O vengono, per simmetria, riorientati di nuovo a 45°

Allora prevediamo che in uscita a un polarizzatore 45° avremo il 100% di fotoni
In uscita a un polarizzatore a 90° avremo il 50% di fotoni

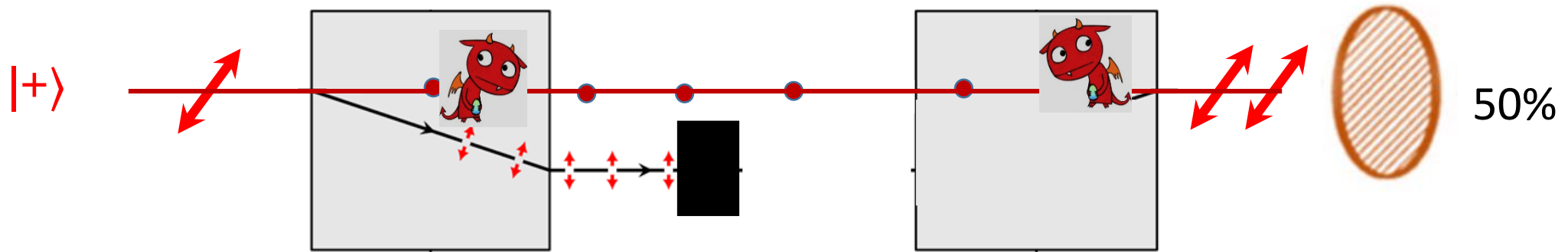
Che succede se invio un fotone in stato $|+\rangle = |45^\circ\rangle$ su due CB?

Il risultato è Questo!

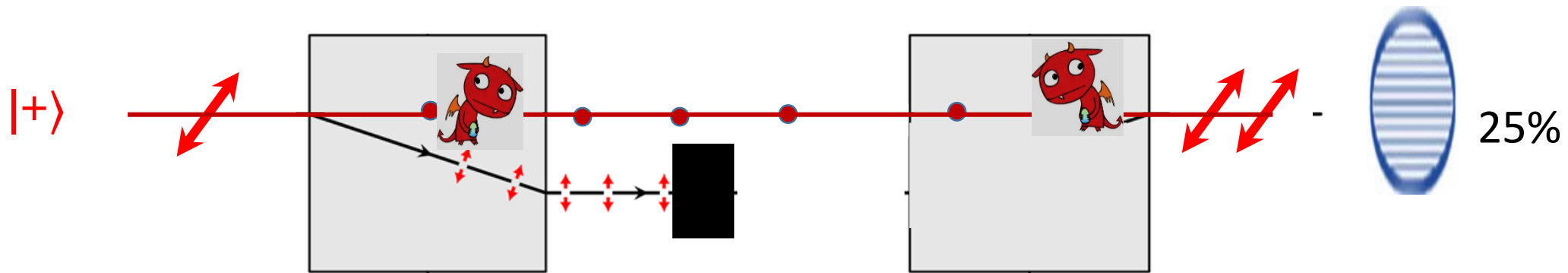


Quindi se vi è un meccanismo sottostante che ruota le polarizzazioni è il secondo!

Che succede se vedo da dove è passato?



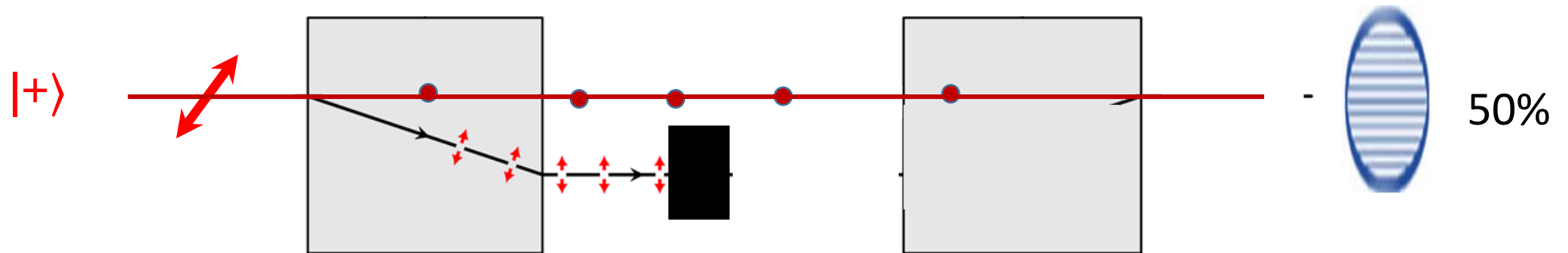
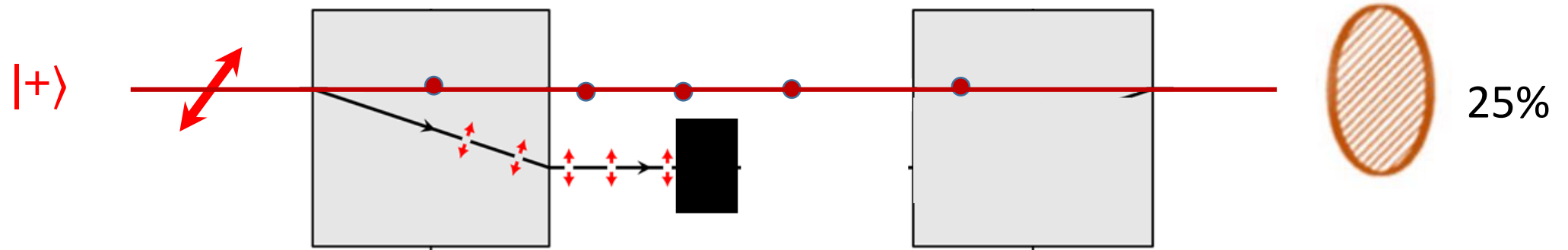
In un test a 45° ci aspettiamo ora il 50%



In un test O ci aspettiamo ora il 25%

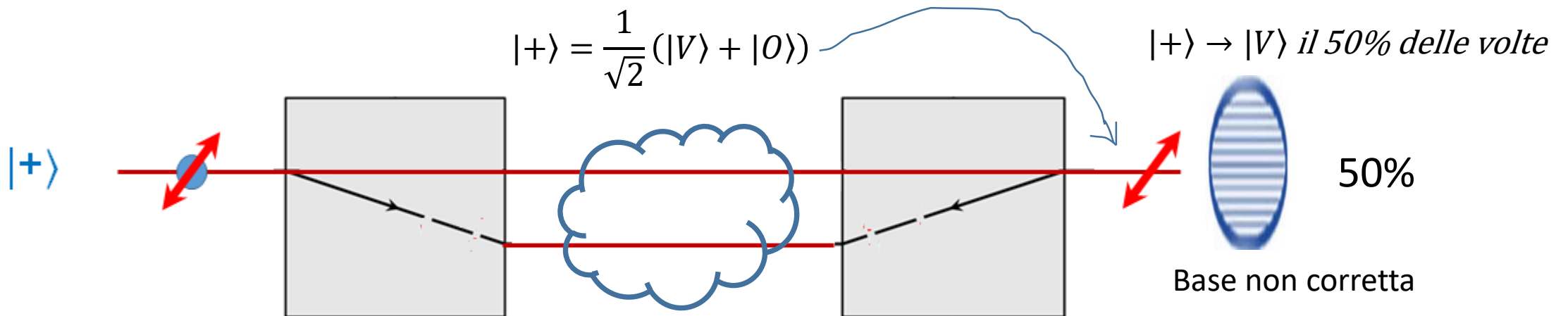
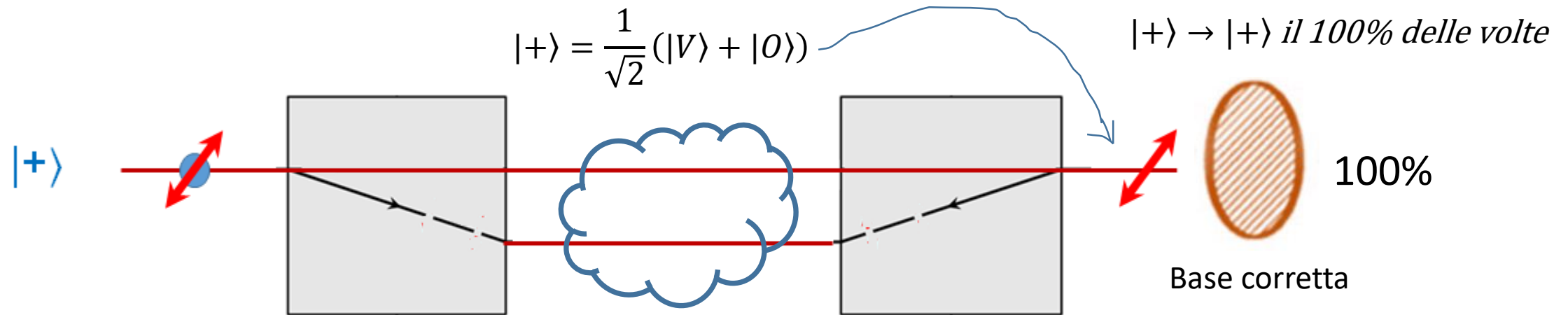
Invece...l'esatto opposto!!!

Invece vediamo 25% con analizzatore a 45°

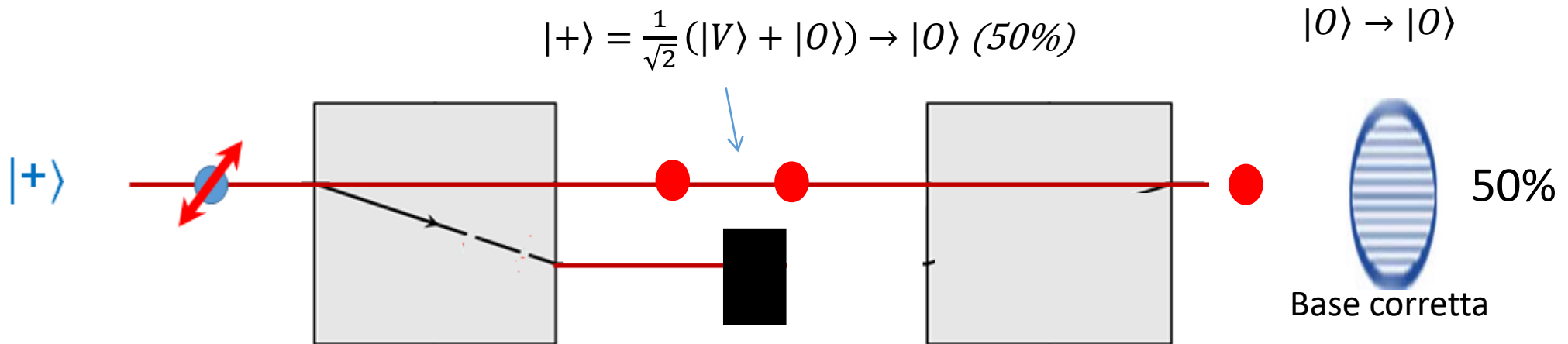
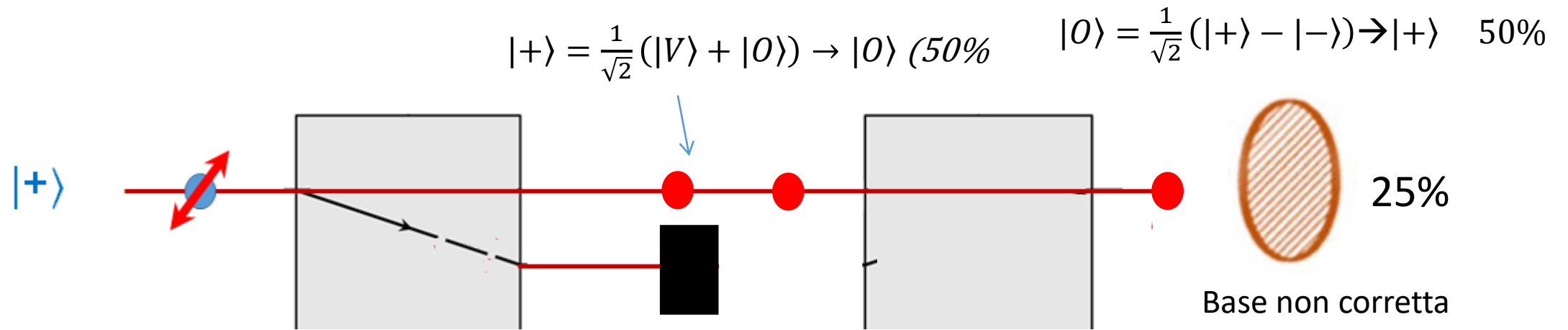


Invece vediamo 0% con analizzatore 0

Previsioni formalismo quantistico



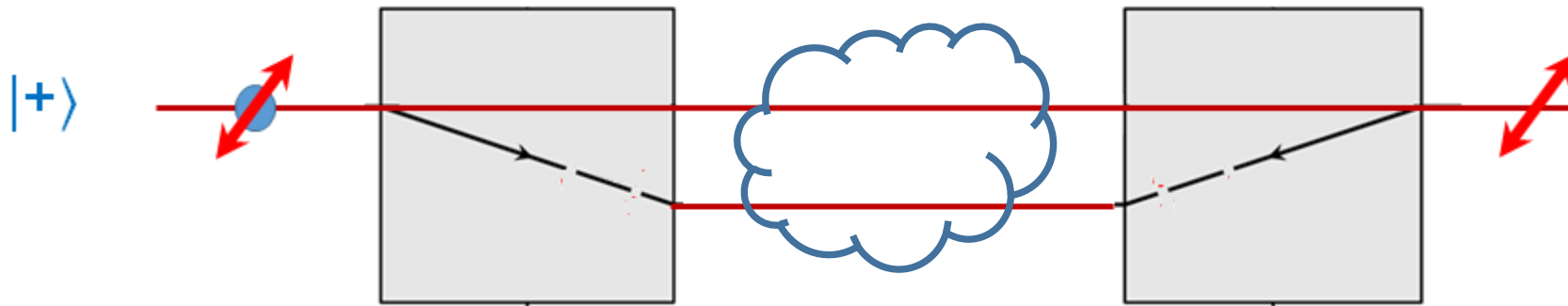
Previsioni formalismo quantistico



Sovrapposizione di traiettorie!!!

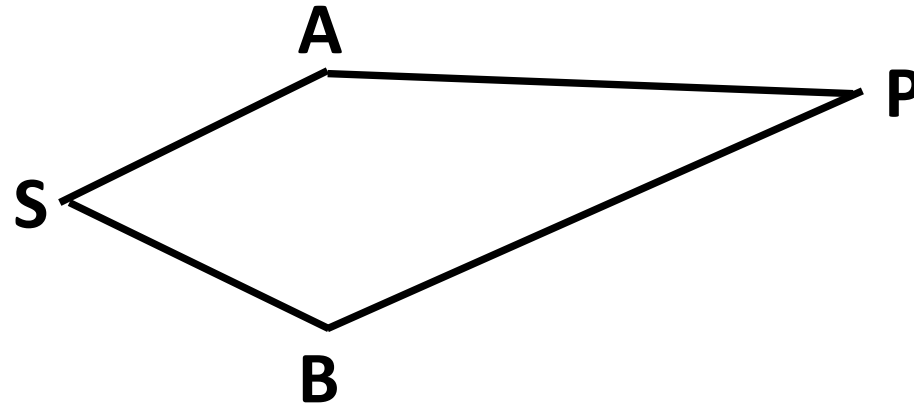
Quindi V ed O non sono elementi di realtà del fotone e quindi nemmeno le traiettorie associate!

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V\rangle + |O\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|giù\rangle + |dritto\rangle)$$



Torniamo alla interferenza

Il quanto ha due alternative SAP e SBP

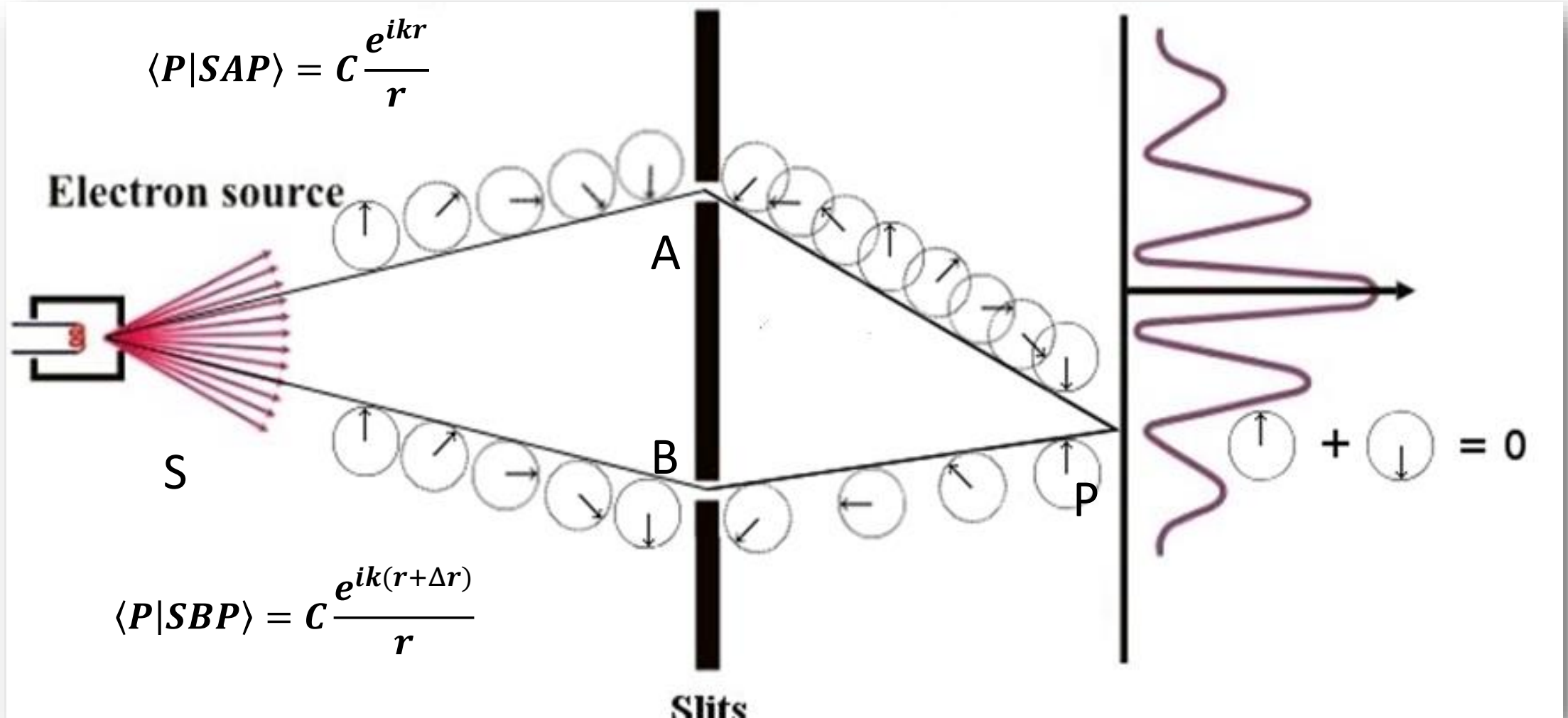


$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|SAP\rangle + |SBP\rangle)$$

$$\begin{aligned} p(P) &= |\langle P|\psi\rangle|^2 = \frac{1}{2} |\langle P|SAP\rangle + \langle P|SBP\rangle|^2 \\ &= \frac{1}{2} (p(SAP) + p(SBP) + \textit{interference}) \end{aligned}$$

Il formalismo quantistico: le ampiezze

$$\text{prob.} = \frac{1}{2} |\langle P|SAP\rangle + \langle P|SBP\rangle|^2 = \frac{C^2}{2r^2} |1 + e^{ik\Delta r}|^2 = \frac{C^2}{r^2} \cos^2(k\Delta r)$$

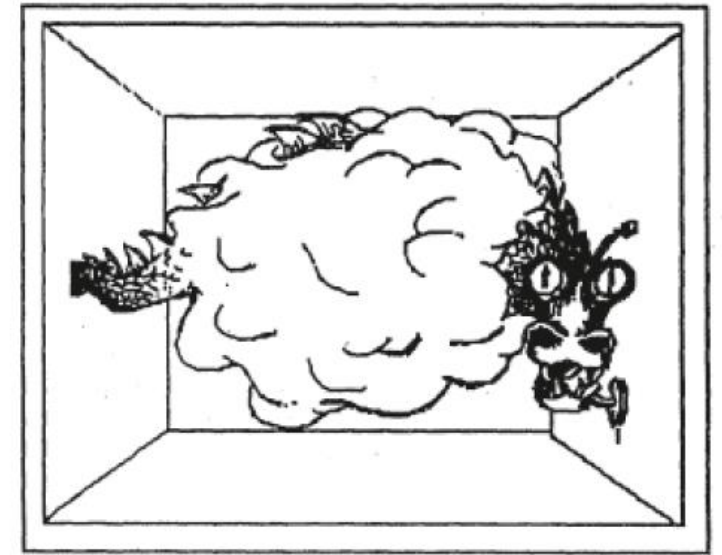


Interpretazioni

Non porti troppe domande: l'interpretazione di Copenhagen

In questa interpretazione la funzione d'onda Ψ descrive in modo completo lo stato di un oggetto quantistico. La Ψ è un ente matematico che vive in uno spazio astratto e fornisce la probabilità di un evento. La sovrapposizione di alternative indica che il sistema si trova in una sorta di realtà sospesa, nebulosa, che evolve seguendo leggi deterministiche (come l'equazione di Shrodinger) ma che collassa in un elemento di realtà classica in modo genuinamente casuale quando il sistema viene osservato o misurato da un apparato classico. Necessariamente il mondo sarà pertanto diviso in oggetto osservato quantistico e apparato di misura classico e solo alcuni elementi di realtà sono posseduti oggettivamente da un sistema quantistico, altri elementi di realtà sono creati mediante le misure con apparati classici.

Ci sono poi elementi di realtà complementari. Impostare un esperimento per misurare un aspetto della realtà non permette di mostrare quello ad esso complementare, se non alterando lo stato del sistema in modo irreversibile. Ad esempio o vediamo frange di interferenza (proprietà ondulatorie) o vediamo due strisce in corrispondenza delle fenditure (proprietà corpuscolari) a seconda se non ci chiediamo o se ci chiediamo da quale fenditura è passato il fotone. Le due domande implicano apparati sperimentali mutuamente esclusivi (principio di complementarità di Bohr) e non è possibile rispondere a tali questioni simultaneamente. La situazione può essere rappresentata dal drago nebuloso di Wheeler che esprime l'intrinseco velo quantistico che parrebbe emergere dalla interpretazione di Copenhagen prima della misura.



Interpretazioni

Non porti troppe domande: l'interpretazione di Copenaghen

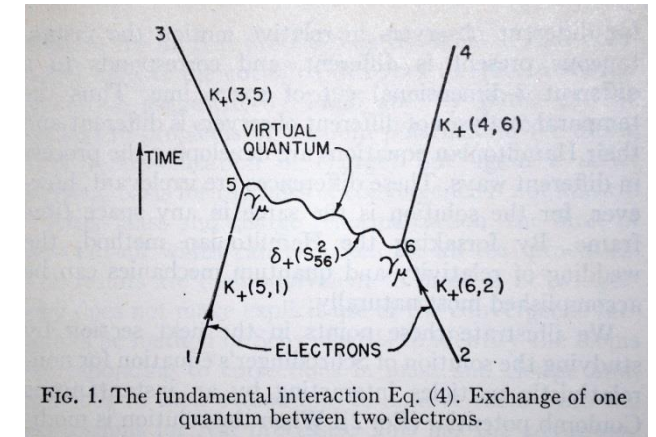
Gli svantaggi della interpretazione di Copenaghen è che non risponde a due domande

1. come è possibile avere una descrizione unitaria del mondo se la teoria divide la realtà in un sistema quantistico (il fotone) e un sistema classico (il polarizzatore e il contatore)?
2. Se un oggetto macroscopico è fatto esso stesso da atomi non dovremmo usare la stessa descrizione quantistica usata per il fotone? Ma allora come mai non vediamo sovrapposizioni di stati per oggetti macroscopici?

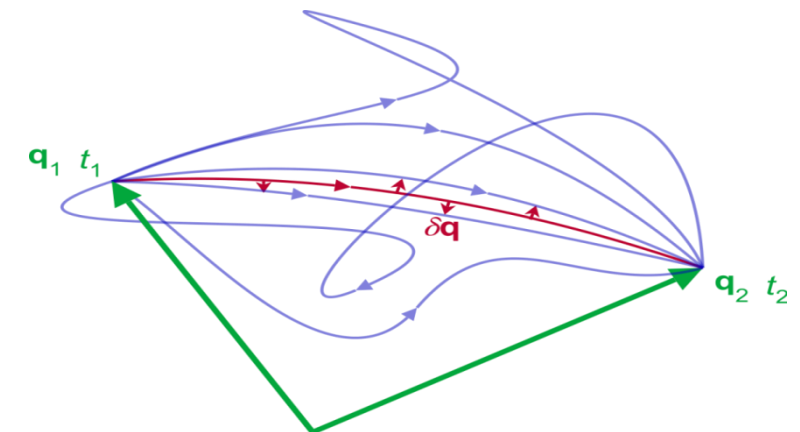
Molti cammini e principio di minima azione

Quante storie! I cammini di Feynman

Piuttosto che interpretare la sovrapposizione come una sospensione della realtà in uno stato nebuloso di elementi di realtà (non ha senso chiedersi se il fotone ha uno stato A o B prima della misura al contrario della moneta) Feynman interpreta la sovrapposizione come storie alternative che hanno luogo simultaneamente (il fotone esiste in entrambi gli stati A e B e fa le due cose simultaneamente senza dividersi!). Fu proprio il principio di minima azione (o di Fermat) a spingere Feynman a concepire questo punto di vista che trova riscontro soprattutto nella elettrodinamica quantistica, in cui ad ogni ampiezza di probabilità di un evento, calcolata con metodi matematici rigorosi ma complessi, si associa un grafico che ridona una minima visualizzazione geometrica del processo.

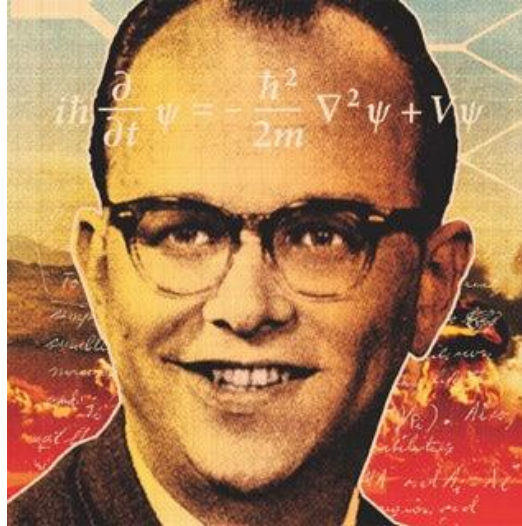
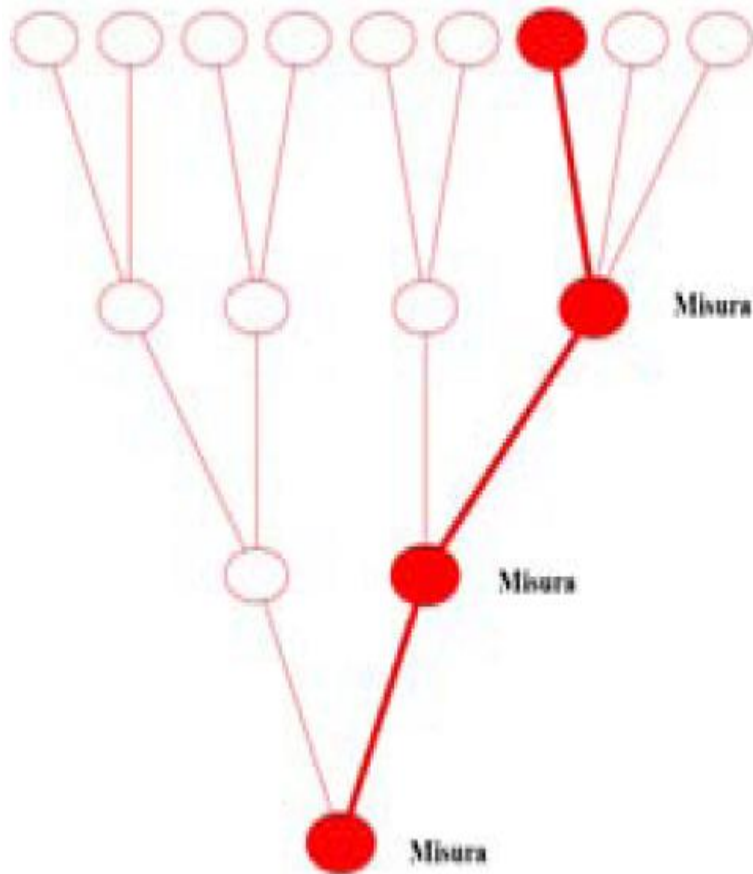


Le traiettorie che in meccanica classica spariscono in MQ vanno tenute in conto



Molti mondi

Il rasoio di Occam? Mai sentito!



Il problema del collasso si risolve a monte e la PSI ha senso per l'intero Universo!

Lo stato A vive in un universo A e lo stato B in un universo B, e questi interagiscono tra loro durante la sovrapposizione. Quando avviene la misura accade che tutto l'universo che interagisce con lo stato quantico si divide esso stesso in due copie, una in cui la particella è collassata in A e una in cui essa è collassata in B. In ciascun universo ci sarà anche l'osservatore che in un universo misurerà lo stato A e nell'altro B. L'osservatore in A perde consapevolezza della sua copia in B. In questo modo il determinismo è ancora vivo e vegeto e la casualità è solo illusoria perché perdiamo conoscenza dell'altro universo. A ben rifletterci quindi mentre in una interpretazione del tutto classica il collasso della funzione d'onda vuol dire prendere conoscenza dello stato reale del sistema, nella interpretazione di Copenaghen il collasso è una oggettivazione dello stato del sistema, nella interpretazione a molti mondi il collasso è altro se non la perdita di informazione perché ci sdoppiamo e noi abbiamo coscienza solo di questo universo A e non dell'altro, come la nostra copia del resto ha consapevolezza solo dell'universo B e non dell'universo A.

Razionalismo

L'assenza di una prova non è la prova dell'assenza: le teorie a variabili nascoste di Bohm



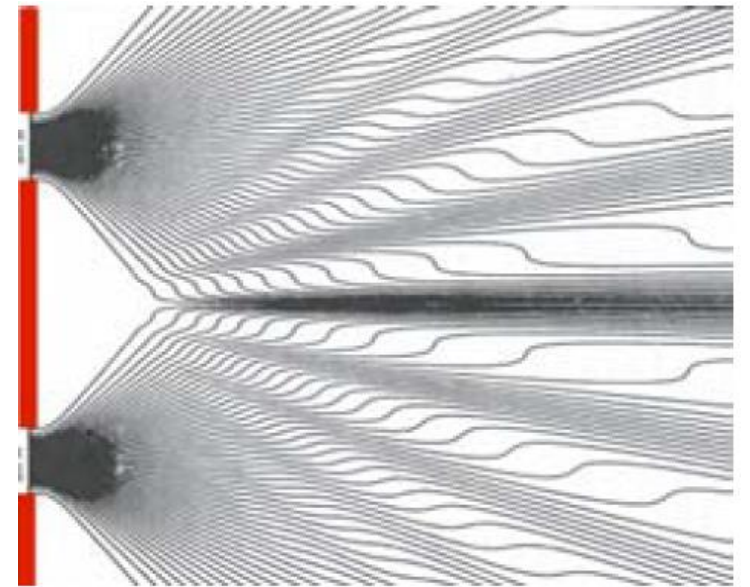
$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U(x) \psi \quad \psi = \langle x | \psi \rangle = R e^{i \frac{S}{\hbar}}$$

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{(\nabla S)^2}{2m} + U(x) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \bullet (Pv) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + U(x) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} = 0$$

$$|\nabla S|^2 = n^2 + \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{\nabla^2 E_0}{E_0}$$



Potenziale Quantistico (non locale)