

Introduzione alla Fisica Quantistica

Andrea Macchi

CNR, Istituto Nazionale di Ottica, sez. Adriano Gozzini, Pisa, Italy

Dipartimento di Fisica Enrico Fermi, Università di Pisa, Italy



CNR-INO
ISTITUTO NAZIONALE DI OTTICA
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE



Formazione Scuola Lavoro @ CNR/INO, Pisa, 03/09/2026
“Tecnologie Fotoniche per lo studio della Materia in Condizioni Estreme”

“I think I can safely
say that nobody
understands
quantum mechanics”
– R. P. Feynman

Richard P. Feynman
«Sta scherzando,
Mr. Feynman!»

Vita e avventure
di uno scienziato
curioso



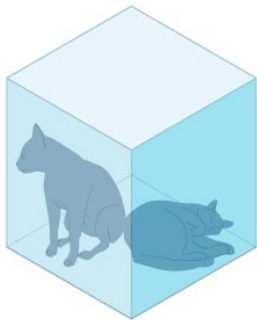
È sempre difficile stabilire
lo **stato** di un gatto in una
scatola . . .



... specialmente quando la scatola è **chiusa**!

Se la scatola è idealmente “isolante” (niente filtra all'esterno) non possiamo sapere se il gatto è sveglio o dorme.

Secondo la **fisica quantistica**, il gatto è **sia sveglio che addormentato**¹ finché non apriamo la scatola (il gatto è in una “**sovrapposizione di stati**”)



Lo stato del gatto è univocamente definito solo **dopo** che lo osserviamo.

NB: stiamo intenzionalmente semplificando il paradosso del “**gatto di Schrödinger**”



¹“Sia vivo che morto” nella formulazione originale.



Andrea Macchi

24 marzo alle ore 22:12 · 🌐



Quelli che gli hanno rubato l'idea: "Schroedinger immagina un gatto che è sveglio e insieme addormentato ... (nella versione originale il gatto non si addormentava, moriva, ma non mi piace scherzare sulla morte di un gatto)" [Carlo Rovelli, "Helgoland" (2020), p.64]; "del gatto di Schroedinger ... chiuso in una scatola non possiamo sapere se è sveglio o dorme (chi scrive adora talmente i gatti da rifiutare la classica alternativa "vivo o morto") [A.M., "La Fisica del Tempo e il Tempo in Fisica", in "In Pensiero", n.9 (2015) 72-80].

<https://www.squilibri.it/catalogo/riviste/in-pensiero-9.html>

Piccola Biblioteca 756

CARLO ROVELLI

Helgoland



Com'è il mondo dei quanti? Facciamo un disegno

La **fotonica quantistica** è in pratica

...

un'officina di meccanica quantistica
dove i **fotoni** sono gli strumenti di
lavoro.

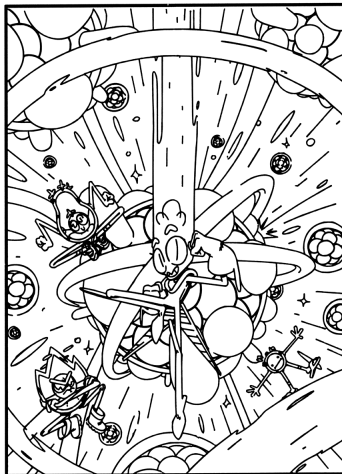
Noi ci focalizzeremo sui fotoni per
spiegare alcuni principi della fisica
quantistica

(col supporto di **I-PHOQS**)



I-PHOQS

INTEGRATED INFRASTRUCTURE INITIATIVE
IN PHOTONIC AND QUANTUM SCIENCES



Il concetto fisico di **stato**

Lo **stato** di un sistema è l'insieme delle quantità **osservabili** o **misurabili** che lo caratterizzano:

la **posizione** e **velocità** di una particella o di un “punto materiale” ●,

la velocità di rotazione e l'inclinazione di una trottola,

la frequenza di un suono ...



©iStockphoto, [consigli.it](https://www.consigli.it)

In fisica **classica** si assume di poter misurare esattamente ogni quantità

senza “disturbare” il sistema,
ottenendo un'informazione “**certa**”
e **completa** sullo stato.



crediti: brgfx - it.freepik.com

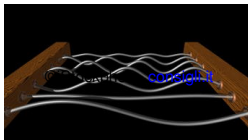
In fisica **quantistica** la **misura** ha una natura molto diversa ...

Un'onda è in generale una **vibrazione** che può essere viaggiante (come le increspature sulla superficie di un liquido) o stazionaria (come il moto delle corde di uno strumento).



crediti: Roger McLassus
(Wikipedia Commons)

Ad esempio il **suono** è un'onda che si propaga in un mezzo materiale (aria o altro) e che può essere eccitata dalla vibrazione di un oggetto (corda vibrante, diapason, membrana del tamburo ...).



crediti: www.thestrad.com

Un'onda “vibrante” è caratterizzata dal verso di propagazione, dalla frequenza (per onde “armoniche” o periodiche) e dall'ampiezza e **direzione** della vibrazione.

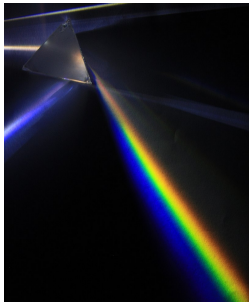


crediti: www.sciencesource.com

Secondo la **fisica classica** (fine '800) la **luce** è un'onda che può propagarsi nel vuoto o in un mezzo (dove mette in vibrazione gli **elettroni** degli atomi).

La direzione della vibrazione è detta **polarizzazione** della luce ed è **trasversale** (perpendicolare al verso di propagazione).

Quindi la polarizzazione è un **vettore** (del quale ci interessa solo la direzione) giacente nel piano ortogonale alla propagazione.



crediti: [D-Kuru](#)
(Wikipedia Commons)

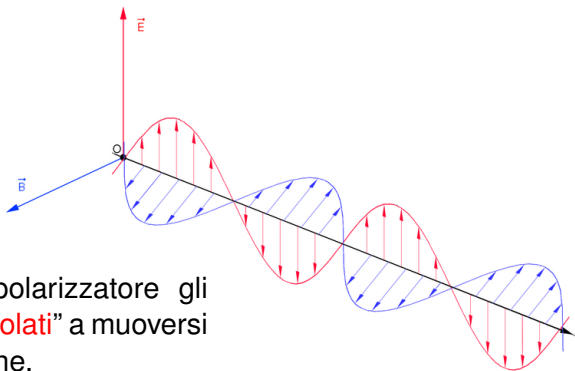
Più precisamente (ma *sempre* in *fisica classica*) la *luce* è un'onda elettromagnetica costituita da *campo elettrico* ($\vec{E}$) e *campo magnetico* ($\vec{B}$) perpendicolari al verso di propagazione.

La *polarizzazione* è la direzione del campo elettrico.

Gli elettroni hanno carica $-e$ e vibrano sotto l'azione della forza

$$\vec{F} = q\vec{E} = -e\vec{E}$$

In un materiale polarizzatore gli elettroni sono “*vincolati*” a muoversi in una sola direzione.



Introducing Ray



ADRIANO BARONE

Autore di fumetti e per l'animazione, ha vinto il premio Boscarato nel 2014, come miglior sceneggiatore italiano.

MATTIA DI MEO

Esordisce nel 2016 su Adventure Time per BOOM! Studios. Ha disegnato una storia per Tutto un Altro Lupo Alberto.

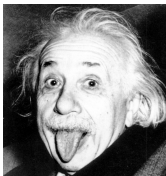


I **fotoni** ovvero i “quanti di luce”

*“Mi sembra che le osservazioni [...] risultino molto più comprensibili se l'energia è distribuita nello spazio in modo **discontinuo**.*

*Secondo l'ipotesi che voglio qui proporre [...] l'energia (della luce) [...] rimane costituita da un numero finito di **quanti** di energia localizzati nello spazio e che si muovono senza suddividersi”*

(Albert Einstein, Un punto di vista euristico sulla produzione e la trasformazione della luce, 1905)

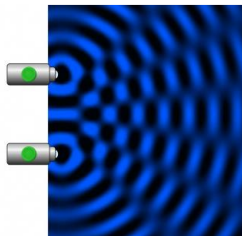


Oggi sappiamo che la luce è costituita da **fotoni** ovvero **particelle elementari** il cui stato individuale è descritto da energia, direzione del moto e polarizzazione.

Dualismo onda-particella

Nonostante l'ipotesi dei quanti spiegasse numerosi fenomeni incomprensibili per la teoria “classica” della luce, trovò resistenza all'implicazione di una natura “duale” dei fotoni: **sia onde, sia particelle.**

Fenomeni come l'**interferenza** (due onde possono **sovrapporsi** sommando le proprie ampiezze in alcuni punti dello spazio o sottraendole in altri) **non** possono essere spiegati con un modello puramente “corpuscolare”.

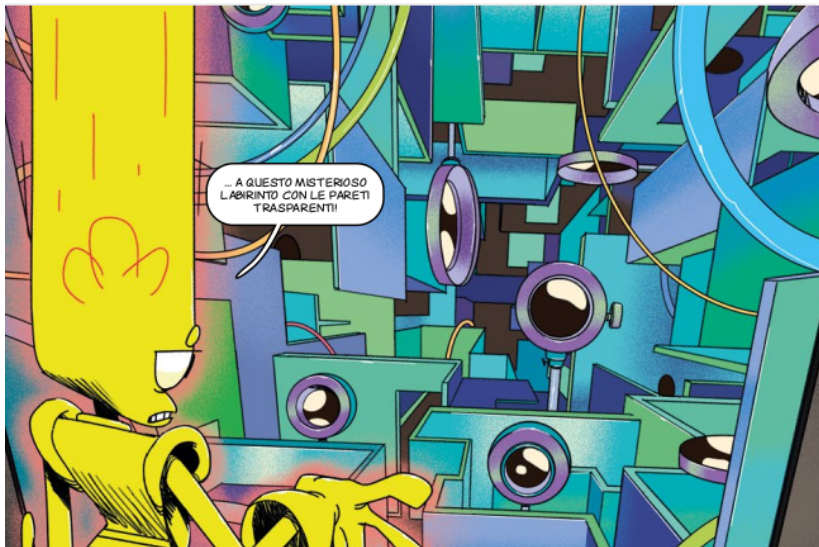


fonte: www.golabz.eu

Accettiamo questo **dualismo** e rappresentiamo un fotone come un “ondina” localizzata (detto anche “pacchetto d'onda”).

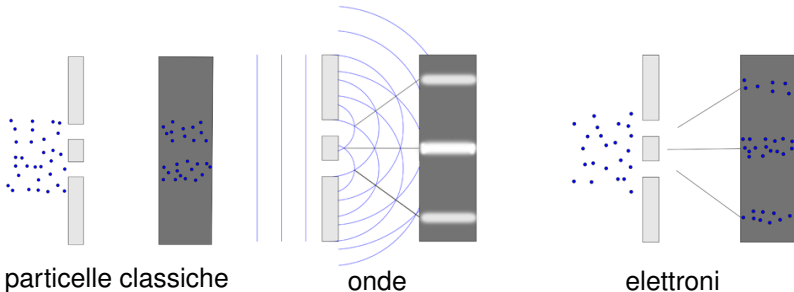


Fare più cammini allo stesso tempo?



Dualismo onda-particella

Anche gli **elettroni**, considerati in origine di natura corpuscolare, esibiscono fenomeni ondulatori come l'interferenza



fonte: plus.maths.org/content/physics-minute-double-slit-experiment-0

Esempio: nella trasmissione attraverso una doppia fenditura la distribuzione degli elettroni mostra frange di interferenza

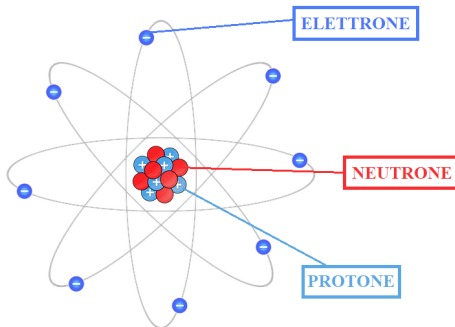
Per approfondire ...



Richard Feynman on Electron 2 Slit Experiment, After noise reduction

youtu.be/b0EChbwSuuQ?si=yKXzW6bjC8II6ZK4

L'atomo "planetario"



Fonte: operachem.com



Relazione di De Broglie

Una particella di quantità di moto $p = mv$
(m massa, v velocità)
corrisponde ad un'onda di lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

NB: la seconda relazione *non* vale per i fotoni che hanno $m = 0$
e per cui $p = \mathcal{E}/c$ ($\mathcal{E}$: energia)



Fotoni: energia, frequenza, colore

Frequenza (ν) o lunghezza d'onda ($\lambda = c/\nu$) determinano il colore della luce visibile dal rosso ($\lambda = 625 - 750\text{nm}$) al violetto ($\lambda = 380 - 450\text{nm}$)

			
Color	Wavelength (nm)	Frequency (THz)	Photon energy (eV)
violet	380–450	670–790	2.75–3.26
blue	450–485	620–670	2.56–2.75
cyan	485–500	600–620	2.48–2.56
green	500–565	530–600	2.19–2.48
yellow	565–590	510–530	2.10–2.19
orange	590–625	480–510	1.98–2.10
red	625–750	400–480	1.65–1.98

L'energia di un fotone è proporzionale a ν ovvero inversamente proporzionale a λ : $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ (h : costante di Planck)
convenientemente misurata in **elettronvolt**: $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
per fotoni visibili varia da **1.65 eV** (rosso) a **3.26 eV** (violetto)

Modello atomico di Bohr

Per l'elettrone atomico nell'atomo di Idrogeno un'orbita circolare di raggio r deve corrispondere a un'onda stazionaria con

lunghezza orbita = numero intero di lunghezze d'onda

$$2\pi r = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad \lambda = \frac{h}{m_e v}$$

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

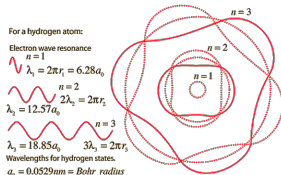
$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2} \rightarrow v = \left(\frac{e^2}{m r} \right)^{1/2}$$

$$r_n = n^2 a_0 \quad a_0 = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$E_n = \frac{m_e v_n^2}{2} - \frac{e^2}{r_n} = -\frac{m_e e^2}{2\hbar^2 n^2} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$$



fonte: Wikipedia, by MikeRun
commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrons-standing-waves-orbits.svg



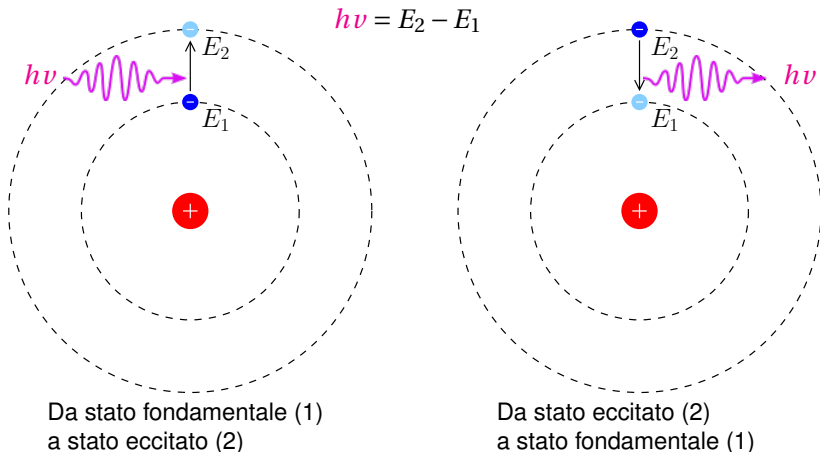
fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Bohr.html>

Salti energetici



Salti energetici

Una transizione dell'elettrone tra due stati ("orbite") di diversa energia implica l'assorbimento o l'emissione di un fotone di energia pari alla differenza tra i due stati



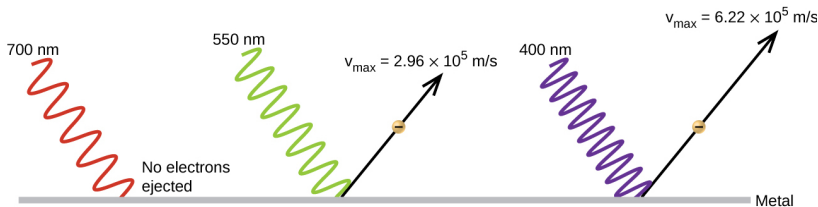
Effetto fotoelettrico

Gli elettroni in un metallo hanno un'energia potenziale $-W$ (< 0)

“Colpiti” da un fotone escono con **energia cinetica**

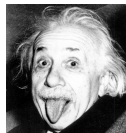
$$\frac{1}{2}m_e v^2 = h\nu - W > 0 \text{ che richiede } \nu > W/h$$

(Esempi numerici per il Potassio)



Da: OpenStax, Chemistry. legacy.cnx.org/content/col11760/1.9

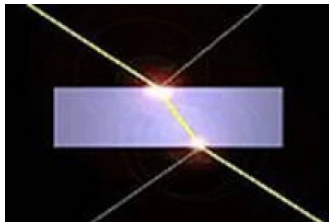
Nobel 1922 per la Fisica “*ad Albert Einstein per i suoi servigi alla Fisica teorica e in particolare per la scoperta della legge dell’effetto fotoelettrico*”



Dal “raggio di luce” al singolo fotone

In condizioni ordinarie la luce ci appare “**continua**” perché contiene un numero molto grande di fotoni.

Un raggio di luce che incide su un materiale trasparente si “scinde” nei raggi **riflesso** e **trasmesso** (o **rifratto**)
Ma quali fotoni “decidono” di essere riflessi o rifratti? E se mandiamo **un solo fotone** alla volta? (si può fare!)



fonte: studenti.it

Spiegazione quantistica: ogni fotone ha una certa **probabilità** di essere riflesso o trasmesso.
Quel che osserviamo **macroscopicamente** è un effetto **medio** su tanti fotoni.



... ma un fotone non potrebbe *scindersi* in due?

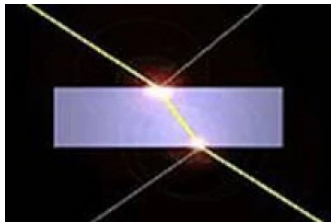
L'energia (E) di un fotone è proporzionale alla frequenza (ν)
che ne determina il colore (per luce visibile)

$$E = h\nu$$

I raggi riflesso e trasmesso hanno lo stesso colore

→ i fotoni nei due raggi hanno la stessa energia.

Se un fotone si scindesse in due fotoni senza cambio di colore violerebbe la conservazione dell'energia.



Welcome to Orbitown

Una splendida giornata a
OrbiTown



Funzione d'onda e orbitali

Indicata generalmente con Ψ è una funzione a valori complessi della posizione che contiene tutta l'informazione misurabile di un sistema quantistico.

Per gli elettroni atomici il modulo quadrato $|\Psi|^2$ è la distribuzione probabilistica di trovare l'elettrone intorno a una certa posizione per un stati atomici dati (**orbitali**), rappresentabile come in figura

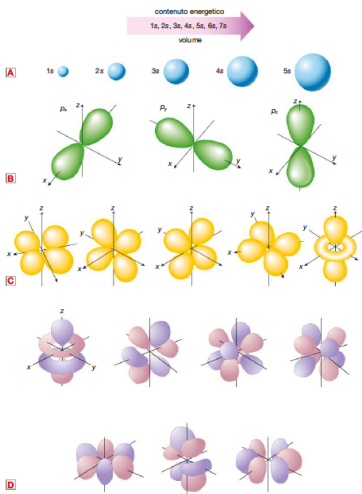


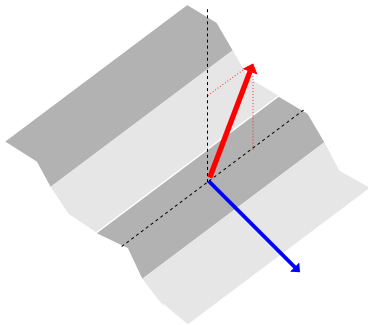
Figura da: Simonetta Klein, "Il racconto della Chimica" (Zanichelli, 2018)

Misure di polarizzazione

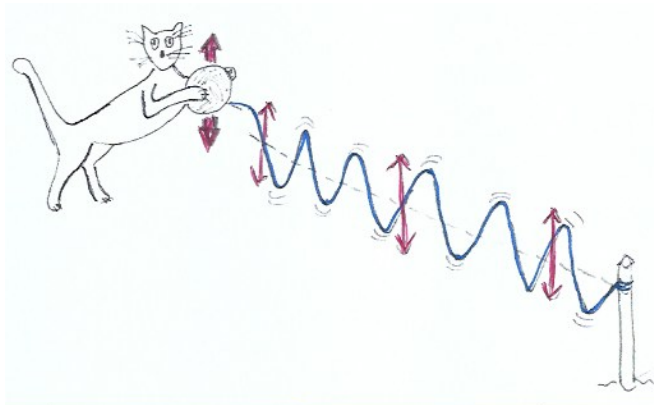
Richiamo: la **polarizzazione** della luce è **trasversale** (perpendicolare al verso di propagazione).

Possiamo rappresentare la polarizzazione come un **vettore** (del quale interessa solo la direzione) giacente nel piano ortogonale alla propagazione.

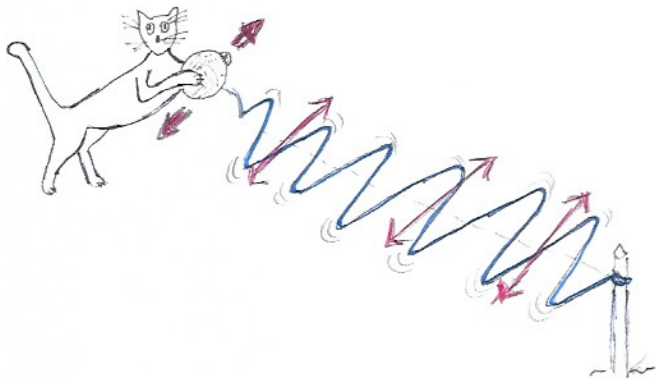
Un **polarizzatore** è un oggetto trasparente solo per luce con polarizzazione orientata in una certa direzione fissata dal materiale che costituisce l'oggetto.



Analogo meccanico: una corda può vibrare **verticalmente** ...



... oppure **orizzontalmente** (o in direzione obliqua)



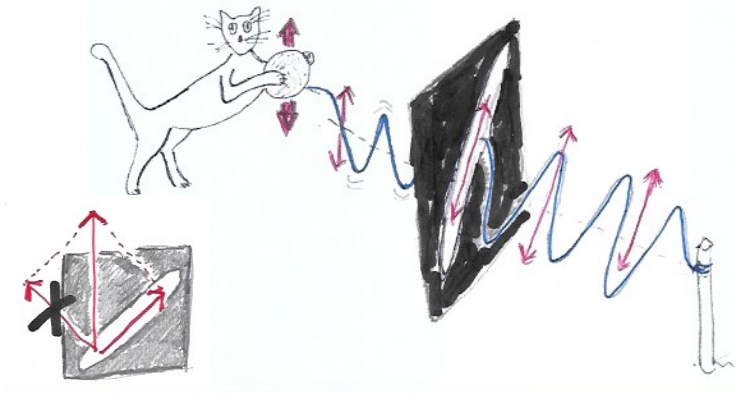
Analogo “meccanico” di un **polarizzatore**:
uno schermo con una stretta fenditura fa passare vibrazioni
parallele alla fenditura ...



... e blocca vibrazioni **perpendicolari** alla fenditura



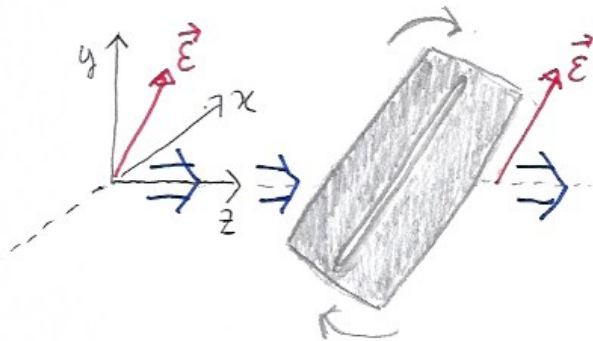
Se la vibrazione è **obliqua** rispetto alla fenditura, questa “seleziona” la **componente parallela** della vibrazione (ricordiamo che la vibrazione è descritta da un vettore!)



regola del parallelogramma per determinare le componenti

Possiamo allora usare un polarizzatore per:

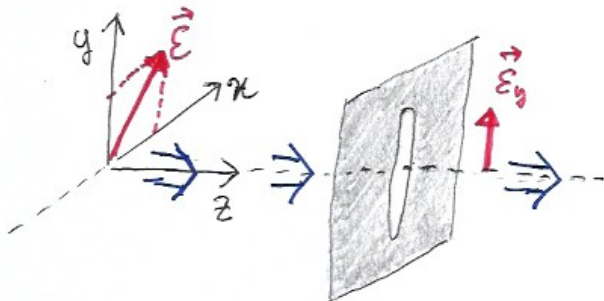
- **misurare** la direzione della polarizzazione (ruotando il polarizzatore finché l'intensità della luce risulti massima)



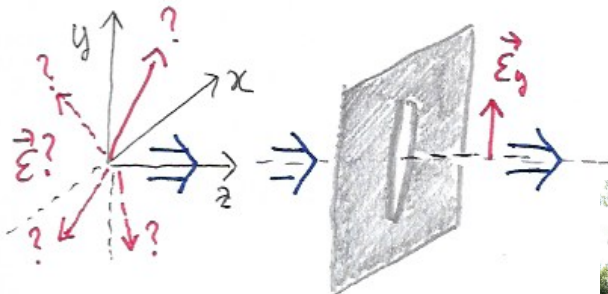
(Indichiamo d'ora in poi con $\vec{\epsilon}$ il vettore polarizzazione generico, con $\vec{\epsilon}_y$ e $\vec{\epsilon}_x$ la polarizzazione “verticale” lungo y e “orizzontale” lungo x . . .)

Possiamo allora usare un polarizzatore per:

- produrre luce con polarizzazione lungo una direzione fissata (ad esempio lungo l'asse y nell'esempio in figura)



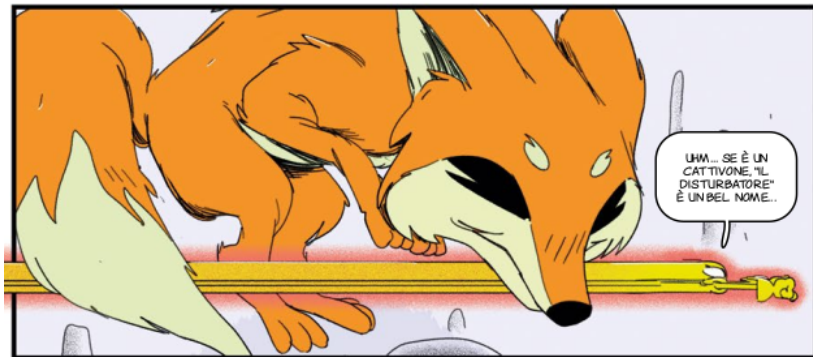
Possiamo allora usare un polarizzatore per:
attenuare l'intensità della luce “naturale” per cui la direzione della polarizzazione cambia rapidamente e casualmente
(*in media* passerà “metà” della luce ...)



Gli occhiali da sole “polarizzati” funzionano su questo principio



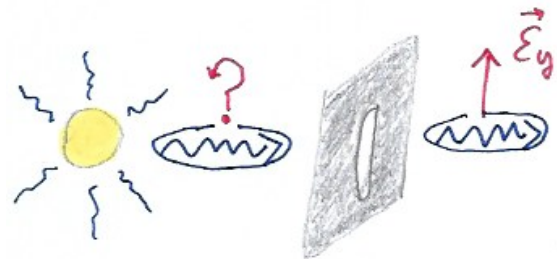
Misure quantistiche: il ruolo dell'osservatore



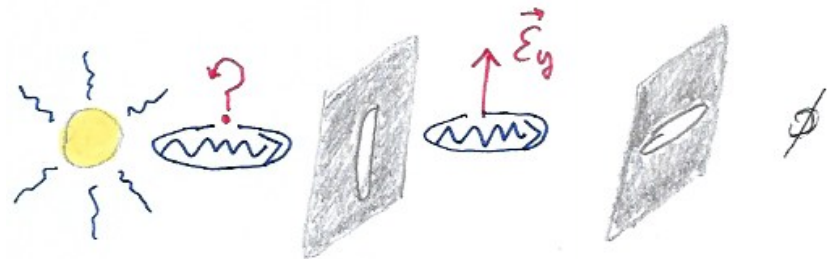
Misure di polarizzazione con singoli fotoni

Usando luce molto attenuata e un polarizzatore “y” possiamo “preparare” un fotone con polarizzazione $\vec{\epsilon}_y$.

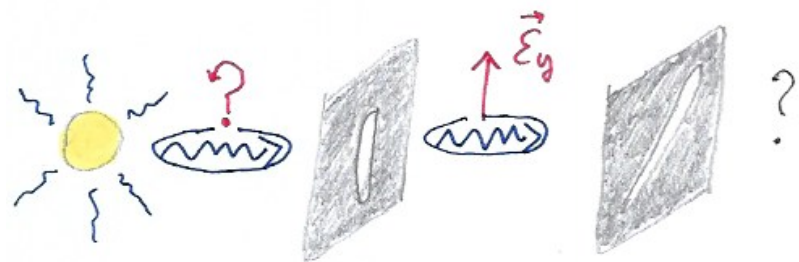
Facciamo ripetute misure di polarizzazione su questi fotoni, *uno alla volta* . . .



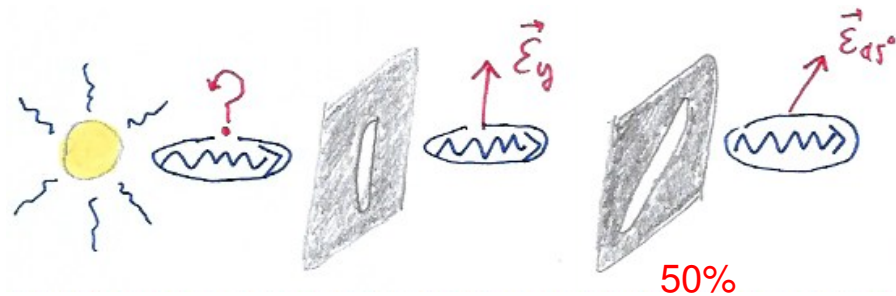
Mettendo in sequenza un polarizzatore “x” siamo sicuri di aver “preparato bene” lo stato $\vec{e}_y$: **non** osserviamo nessun fotone oltre il polarizzatore.
Abbiamo “eliminato” i fotoni con polarizzazione $\vec{e}_x$?



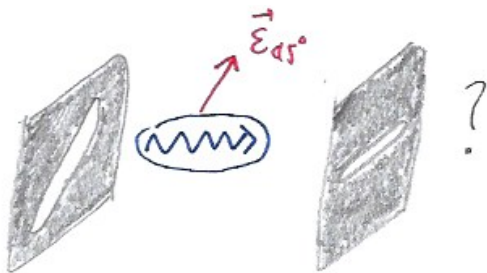
Cosa succede se mettiamo un polarizzatore **obliquo**?



Troviamo un fotone con polarizzazione **obliqua** ...
... MA solo il **50%** delle volte!

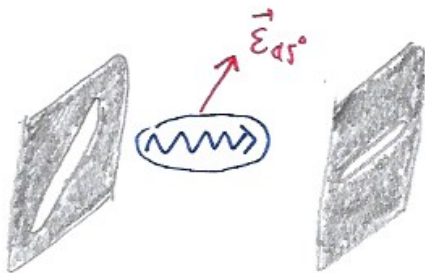


Cosa succede se il fotone polarizzato a 45° ripassa lungo il polarizzatore x ?



Cosa succede se il fotone polarizzato a 45° ripassa lungo il polarizzatore x ?

Il **50%** delle volte ritroviamo un fotone $\vec{e}_x$ nonostante li avessimo “tagliati” in precedenza col polarizzatore y !

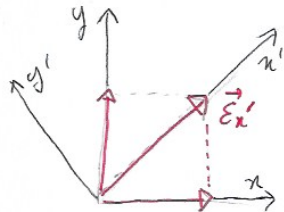
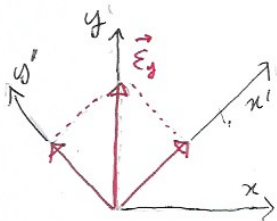


50%

Possiamo visualizzare gli stati di polarizzazione come **vettori** MA in un senso più “astratto” di quello classico.

Le componenti di uno stato “preparato” (es. $\vec{e}_y$) in funzione di altri stati “obliqui” (es. $\vec{e}'_x$, $\vec{e}'_y$) danno le **probabilità** di osservare questi stati in una misura.

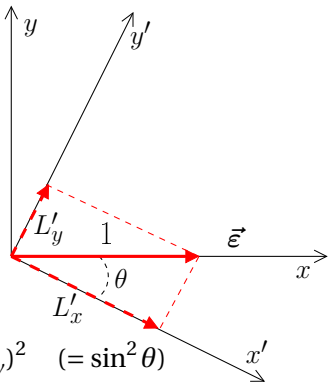
Dopo la misura il sistema è nello stato “misurato” (che è a sua volta una sovrapposizione di stati “obliqui”).



Formula per la probabilità

Rappresentiamo uno stato definito di polarizzazione lungo un asse (es. x) con un vettore di lunghezza 1:

le probabilità di osservare $\vec{e}'_x$ o $\vec{e}'_y$ per il fotone “preparato” in $\vec{e}_x$ (per inclinazione θ arbitraria della base x', y' rispetto a x, y) è data dal *quadrato delle componenti* di $\vec{e}_x$ su x', y' :



$$P(\vec{e}'_x) = (L'_x)^2 \quad (= \cos^2 \theta) \quad P(\vec{e}'_y) = (L'_y)^2 \quad (= \sin^2 \theta)$$

$$P(\vec{e}'_x) + P(\vec{e}'_y) = (L'_x)^2 + (L'_y)^2 = 1$$

Per grandi numeri di fotoni questa formula riproduce i valori dell'intensità della luce trasmessa attraverso un polarizzatore obliquo predetti dalla teoria classica.

Spin: un altro osservabile quantistico

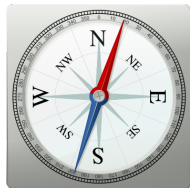
spin [spin] (*past tense spun or span, past participle spun*)

NOUN

1. (*revolution*) giro
 - **to give a wheel a spin** far girare una ruota
 - **to give sth a long/short spin** (*in washing machine*) fare una centrifuga completa/ridotta
 - **to be in a flat spin** (*informal*) essere in preda al panico
 - **to go into a flat spin** lasciarsi prendere dal panico
2. (*on ball*) effetto
 - **to put a spin on a ball** imprimere l'effetto a una palla
3. (*Aeronautics*)
 - **to go into a spin** discendere in avvitamento; (*Automobiles*) fare un testa-coda
4. (*ride*)
 - **to go for a spin** fare un girotto
5. (*Politics*) reinterpretazione *f*
 - **to put a new/different spin on sth** presentare qc da un'angolazione nuova/diversa

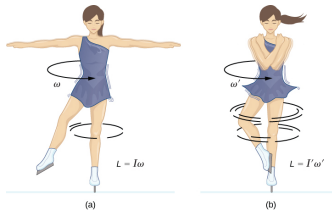
fonte: Collins dictionary (from [Word Reference](#))

Atomi e particelle elementari anche se prive di carica elettrica netta possono sentire l'azione di un **campo magnetico** come l'ago di una bussola



(credit: JayCanuck)

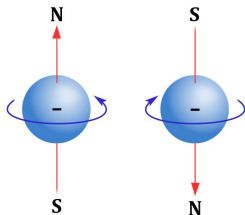
Per una particella **carica** (elettrone, protone, ...) classicamente la proprietà deriverebbe da una **rotazione** attorno ad un asse (da qui "spin")



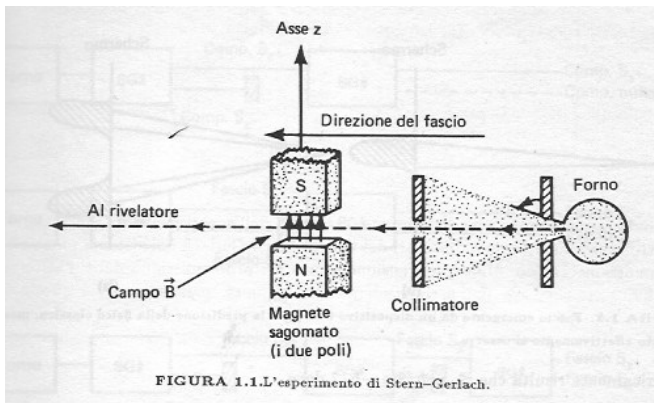
(credit: courses.lumenlearning.com)

Lo spin contribuisce al "momento angolare" di un oggetto che è una quantità conservata (come sanno pattinatrici e ballerine)

(C'è una relazione tra polarizzazione e spin dei fotoni che non approfondiamo qui ...)



Lo spin di una specie di atomi può essere misurato facendoli passare attraverso il campo di un magnete . . .
esperimento di Stern & Gerlach (1922) con atomi di Ag

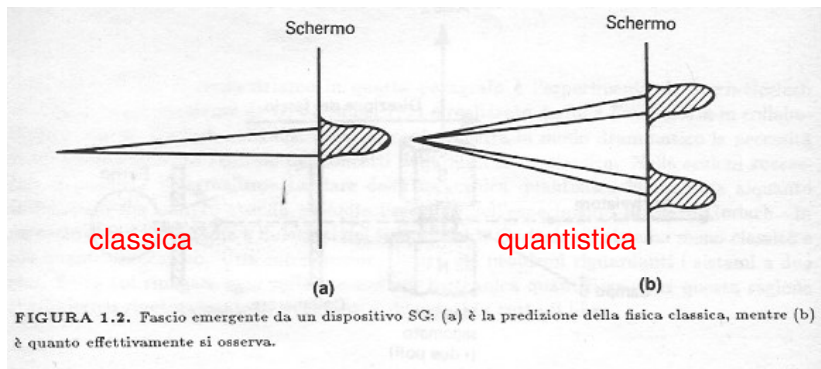


fonte: J. J. Sakurai, *Meccanica Quantistica Moderna* (Zanichelli)

... e i risultati contraddicono la previsione classica di “spargimento uniforme” legato alla “libertà di orientamento” dello spin che invece assume solo **due** direzioni **opposte**:

spin “su” $\uparrow$ e spin “giù” $\downarrow$

NB: la *direzione* in cui misuriamo lo spin è **arbitraria**
(per cambiarla si può ruotare il sistema)



fonte: J. J. Sakurai, *Meccanica Quantistica Moderna* (Zanichelli)

Il diagramma illustra tre configurazioni sperimentali per l'esperimento di Stern-Gerlach sequenziale:

- (a)** Un fascio proveniente da un Forno attraversa un campo magnetico SG_z , viene deflessa in due componenti ($Comp. S_z^+$ e $Comp. S_z^-$), e poi attraversa un secondo campo magnetico SG_z ruotato di 90° . L'uscita mostra la componente $Comp. S_z^+$ e una componente nulla per S_z^- .
- (b)** Un fascio proveniente da un Forno attraversa un campo magnetico SG_z , viene deflessa in due fasci ($Fascio S_z^+$ e $Fascio S_z^-$), e poi attraversa un campo magnetico SG_x . L'uscita mostra due fasci separati, $Fascio S_x^+$ e $Fascio S_x^-$.
- (c)** Un fascio proveniente da un Forno attraversa un campo magnetico SG_z , viene deflessa in due fasci ($Fascio S_z^+$ e $Fascio S_z^-$), e poi attraversa un campo magnetico SG_x . Dopo un'altra deflessione, attraversa un terzo campo magnetico SG_z . L'uscita finale mostra i due fasci originali, $Fascio S_z^+$ e $Fascio S_z^-$.

fonte: J. J. Sakurai, *Meccanica Quantistica Moderna* (Zanichelli)

Principio di Indeterminazione

Ci sono quantità **osservabili** (incluse le diverse componenti di un oggetto vettoriale) che **non** si possono misurare simultaneamente con precisione arbitraria.

Questo vale per osservabili “discreti” (spin) ma anche “**continui**” come la **posizione** (x) e la **quantità di moto** (p).

Se una particella si trova nella regione $[x - \Delta x/2, x + \Delta x/2]$ con quantità di moto compresa in $[p - \Delta p/2, p + \Delta p/2]$ (ovvero Δx e Δp sono le **incertezze** sulla misura) si ha:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

h: costante di Planck

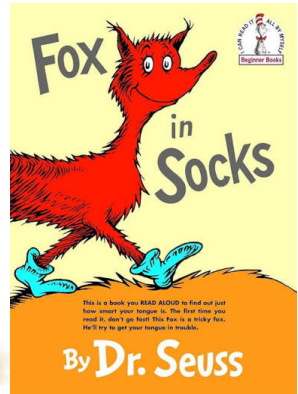
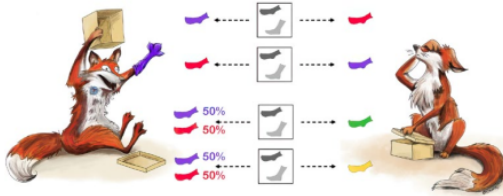
Se “so” dov'è la particella con precisione infinita ($\Delta x = 0$) non ho alcuna informazione sulla sua quantità di moto ($\Delta p = \infty$) (e viceversa: se $\Delta p = 0$ allora $\Delta x = \infty$)



W. Heisenberg

The Strangest Thing (I-PHOQS in Quantum Socks)

MAJA COLAUTTI
ANDREA MACCHI



I Calzini di Bertlmann

Il Prof. **Reinhold A. Bertlmann**

(Università di Vienna)

Indossa *sempre* calzini di colore *diverso*



homepage.univie.ac.at/reinhold.bertlmann

John S. Bell (1928-1990)

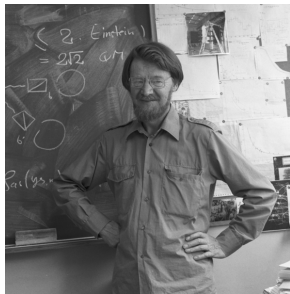
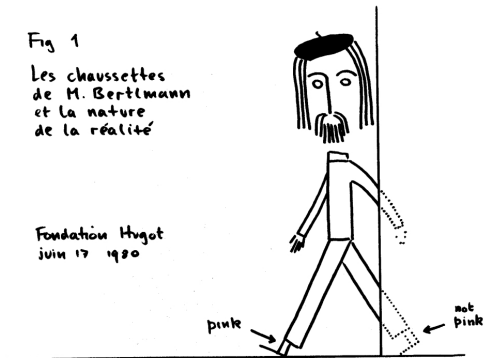


Fig 1

Les chaussettes
de M. Bertlmann
et la nature
de la réalité

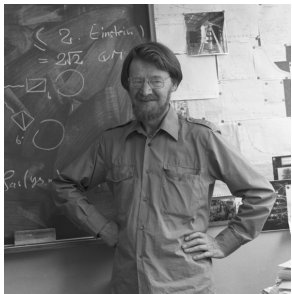
Fondation Hugot
juin 17 1980



“Il dottor Bertlmann ama indossare calzini di colore diversi per il piede destro e per il piede sinistro. È impossibile prevedere quale colore avrà a un dato piede in un dato giorno, ma quando vediamo che il primo calzino è rosa, siamo già certi che il secondo avrà un colore diverso.”

(“Bertlmann’s Socks & the Nature of Reality”, 1980)

John S. Bell (1928-1990) The Nobel Prize in Physics 2022



© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

Alain Aspect



© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

John F. Clauser



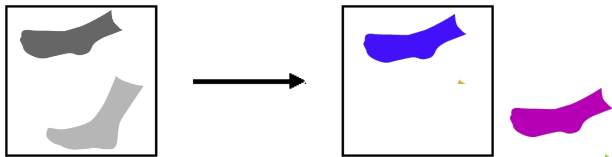
© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

Anton Zeilinger

Nobel per la Fisica 2022 “per i loro esperimenti con l'**entanglement** dei fotoni, che hanno permesso di stabilire la violazione delle **diseguaglianze di Bell** e per i lavori pionieristici nel campo della scienza dell'informazione quantistica”

In un sistema a due parti (es. due calzini) con due stati possibili (colore **rosa** o **blu**) e “**correlati**” (i due calzini sono scelti di colore diverso) la misura su una parte (es. estrazione di un calzino) fornisce informazione sull'altra parte:

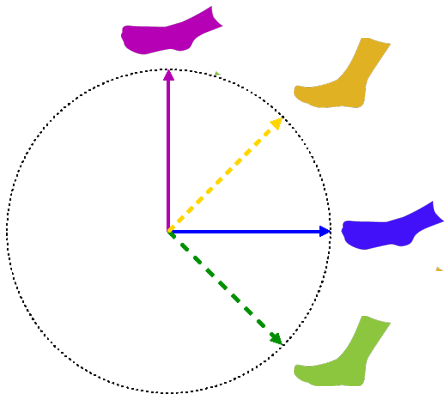
se ho “preparato” una scatola con un calzino **rosa** e uno **blu**, se il primo che prendo è **rosa** allora il secondo sarà necessariamente **blu** (e viceversa)



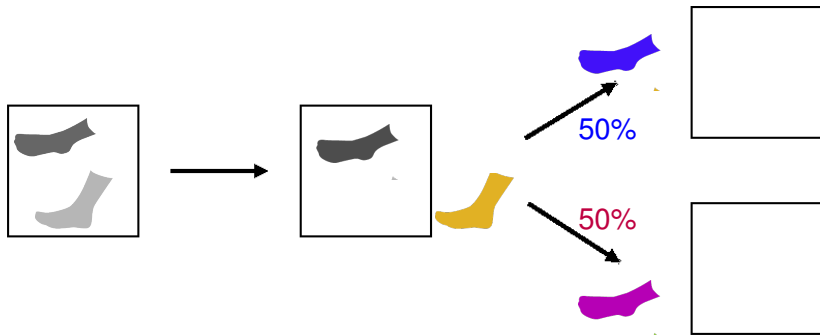
Le due “misure” (estrazione dei calzini) sono **correlate** al 100%: effettuata la prima il risultato della seconda è certo (e fin qui niente di strano ...)

...ma se avessimo calzini
“quantistici” dove il **rosa** e il **blu**
sono una *sovrapposizione* di
arancio e **verde**?

(analogia con gli stati di
polarizzazione dei fotoni
misurati lungo direzioni
diverse)



Se preparata una scatola con calzini **rosa** e **blu** *scelgo* poi di “misurare” i colori **arancio** o **verde**, una seconda misura di colore **rosa** o **blu** darà risultati casuali equiprobabili ovvero totalmente **scorrelati** dalla prima misura.



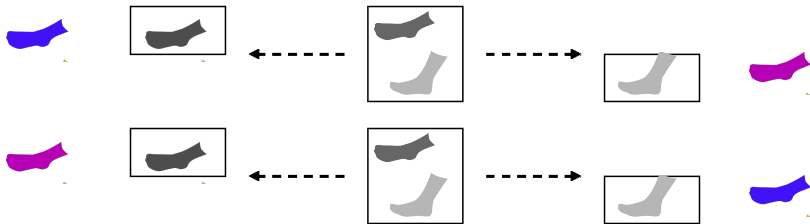
La correlazione tra le misure dipende dalla *scelta* di quale colore misurare

Misure di correlazione a distanza:

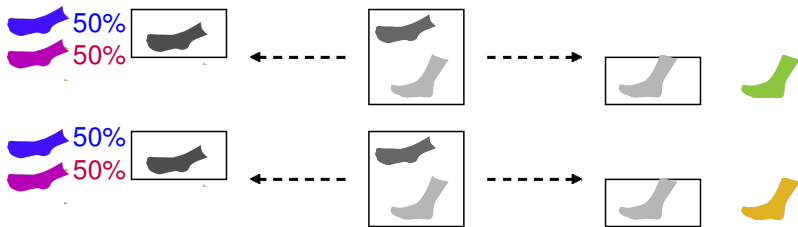
- dividiamo la scatola in due parti (ognuna con un calzino)
- allontaniamo le parti
- due osservatori (**Alice** e **Bob**) misurano indipendentemente il colore del calzino nella “mezza” scatola



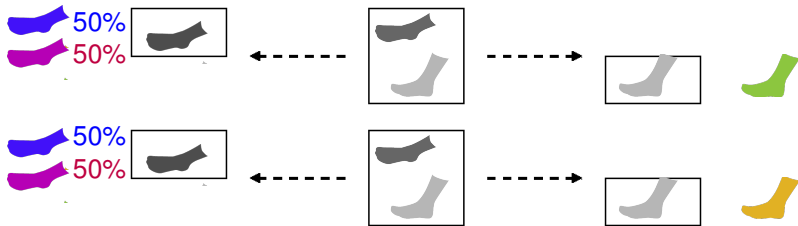
Se Alice e Bob sono d'accordo di misurare i colori **rosa** e **blu**,
troveranno sempre colori diversi: misure **correlate al 100%**



Ma se Bob decide invece di misurare **arancio** e **verde** ...
Alice osserverà **rosa** e **blu** casualmente e con eguale probabilità:
misure interamente **scorrelate**



Ma se Bob decide invece di misurare **arancio** e **verde** ...
Alice osserverà **rosa** e **blu** casualmente e con eguale probabilità:
misure interamente **scorrelate**



Alice e Bob sono d'accordo per effettuare misure *simultanee* ma a distanza così che non possano influenzarsi!



That's Entanglement!

Due oggetti quantistici sono *entangled* se una misura su uno di essi cambia il risultato della misura sull'altro anche se gli oggetti sono *separati* spazio-temporalmente (non è possibile che un osservatore influenzi l'altro).

Interpretazione quantistica "ortodossa": i due oggetti sono in realtà un singolo sistema quantistico e una misura su una parte determina lo stato di tutto il sistema.

"Collins Italian Dictionary Complete and Unabridged" © HarperCollins Publishers

en·tan·gle·ment [ɪntæŋɡlmənt]

NOUN

(*figurative*)

1. (*gen*) coinvolgimento
2. (*romantic*) relazione *f* sentimentale

Altre traduzioni possibili: legame, groviglio, intreccio, ginepraio, *gliuommero*, ...



That's not Amore!

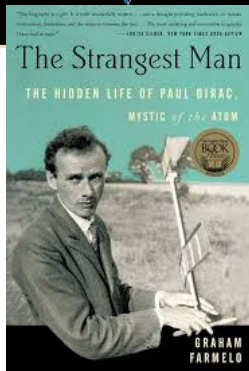
Immagine: greenme.it

“Grazie a questa equazione, detta dell'amore, si descrive il fenomeno dell'entanglement quantistico: se due sistemi interagiscono tra loro per un certo periodo di tempo e poi vengono separati, non possiamo più descriverli come due sistemi distinti . . . Quello che accade a uno di loro continua ad influenzare l'altro, anche se distanti chilometri o anni luce”



Non è altro che l'equazione di Dirac (ricopiata male) che di per sè non spiega l'entanglement (figurarsi l'amore . . .)

$$(\partial + m) \psi = 0$$

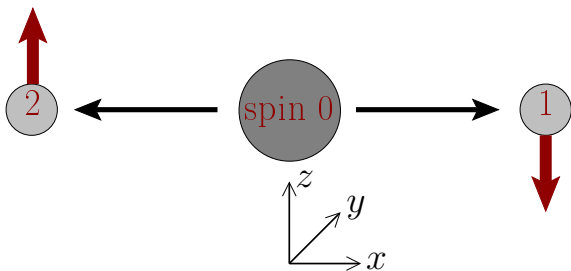


Paul A. M. Dirac (1902-1984)

Misure di correlazione di spin

Una particella priva di spin (**0**) decade in due particelle (**1**, **2**) dotate di spin. Poichè lo spin totale è conservato **1** e **2** devono avere spin **opposti** (**1**=su & **2**=giù oppure **1**=giù & **2**=su)

Una misura di S_z su **1** consente di predire con certezza il risultato di una misura successiva di S_z su **2** anche se le misure sono fatte da osservatori a grande distanza ("correlazione 100%")



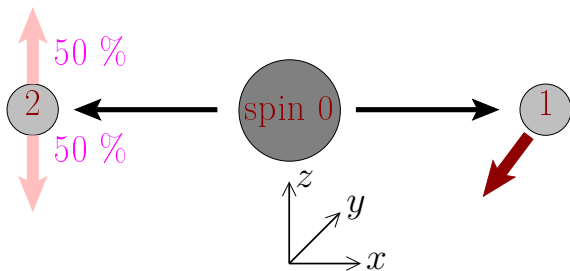
Misure di correlazione di spin

Se però l'osservatore di **1** decide di misurare S_y ...

... ora la particella **1** non ha più uno stato definito di S_z .

Quindi se l'osservatore di **2** misura S_z trova “su” e “giù” con eguale probabilità e nessuna correlazione con **1**.

*I risultati delle misure di **2** dipendono da cosa sceglie di fare **1***
(anche se troppo lontano per influenzare **2** !)



Einstein attacks!



VS



Einstein rifiutò l'idea di misure che si influenzano con
“*una inquietante azione a distanza*” (più veloce della luce?).
“*La situazione fattuale del sistema A è indipendente da quanto
accade al sistema B quando A e B sono spazialmente separati*”
(**principio di località** di Einstein)

Problema noto anche come paradosso EPR da
Einstein-Podolski-Rosen (1935)

Ma l'entanglement *non* permette in ogni caso
una trasmissione “istantanea” di informazioni;
le correlazioni possono essere verificate solo
dopo che Alice e Bob comunicano per
confrontare le misure (una non si accorge “in
diretta” di cosa l'altra decide di misurare)

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

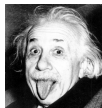
Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

New York Times, 1935

Bell counterattacks!



VS



Esiste una teoria a “**variabili nascoste**” che assume che i valori possibili di una misura su basi diverse siano definiti *a priori* nello stato anche se non misurabili simultaneamente

Ma Bell trovò una relazione sperimentalmente verificabile (**disuguaglianza di Bell**) che ha *falsificato* la teoria

→ “trionfo” dell’interpretazione quantistica “ortodossa”

(derivazione lasciata come “bonus” ...)

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

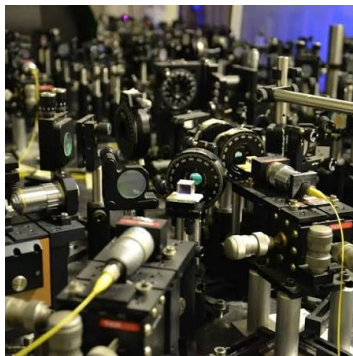
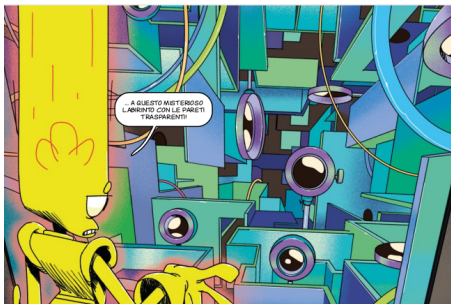
Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

New York Times, 1935

Uno sguardo (anzi una lente) sulle applicazioni



Dipartimento di Fisica,
Università La Sapienza, Roma

Crittografia quantistica

Due stati ortogonali della polarizzazione di un fotone possono essere usati per codificare un **bit** e trasmetterlo

Esempio: ($\vec{e}_x \equiv 0$, $\vec{e}_y \equiv 1$)

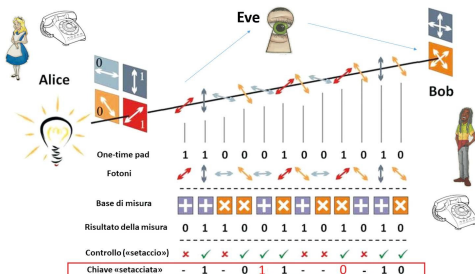
Se non si conosce la base usata un tentativo esterno di “leggere” l’informazione la distrugge e lascia traccia

→ si possono costruire protocolli di trasmissione sicuri al 100%

Per approfondire:

A. Fioretti et al, “Giochiamo con la crittografia quantistica”, *Il Nuovo Saggiatore* **37** (2021) n.5-8, pp.53-59;

“Un emulatore didattico per la crittografia quantistica”, *Giornale di Fisica* LXVI (2025) n.1, pp.3-17

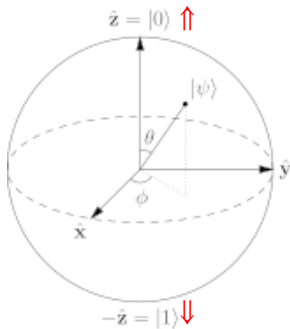


Informazione quantistica: QuBit

Oltre che la polarizzazione di un fotone un “Quantum Bit” QuBit può essere realizzato con lo spin di un atomo ($\uparrow \equiv 0$, $\downarrow \equiv 1$) o altro sistema quantistico a due stati

A differenza del Bit classico un QuBit può stare in una sovrapposizione di 0 e 1!

La *sfera di Bloch* rappresenta la sovrapposizione dei “vettori di stato” in 3D (ovvero la “somma di vettori” usando numeri complessi ...)



credit: [Glosser.ca](https://www.glosser.ca/) (Wikimedia)

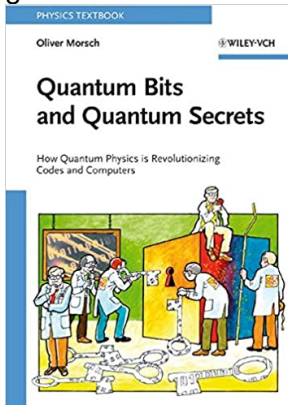
Computazione quantistica

Grazie alla sovrapposizione di stati un **QuBit** contiene “più informazione” di un bit classico.

Una opportuna “misura” può agire da operazione logica sul QuBit: una sequenza di “misure” può eseguire un calcolo.

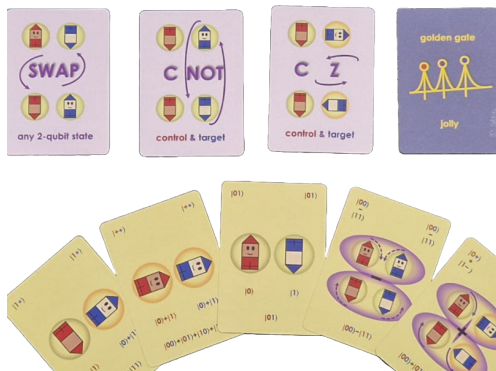
Operare sulla sovrapposizione di stati è simile a un **calcolo parallelo** e quindi più efficiente dei computer tradizionali (con risultati ben determinati nonostante l'**indeterminazione** intrinseca nei processi quantistici!)

Per i dettagli: chiedete a Oliver o leggete il suo libro!



QUANTO: un gioco di carte quantistiche

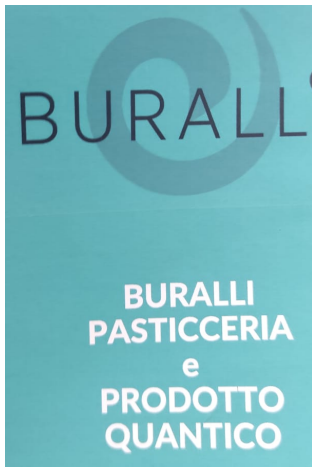
“Per avvicinarsi alla meccanica quantistica giocando a carte con i qubit”



Giovedì 10
con Chiara Menotti
(CNR/INO Trento)

storiefotoniche.ino.cnr.it

Pausa caffè . . . e pasticcini quantici?



Con l'aiuto dell'intelligenza artificiale, forte delle recenti scoperte nelle neuroscienze e nella fisica quantistica, la APP "VeeVee" genera frequenze e cicli di onde motivazionali, che danno la possibilità di attivare la volontà della persona per il proprio equilibrio naturale. Educa la coscienza ad una maggior consapevolezza di se e del proprio ruolo nella società e nell'universo creando frequenze positive ed uno stato di benessere ed armonia. Offre la possibilità di migliorarsi nei vari campi dell'esistenza (benessere, prosperità e amore) donando quel senso di supporto nel raggiungimento dei propri obiettivi. La pasticceria Buralli è la prima in Italia che sceglie di avvalersi di VeeVee per creare insieme un prodotto quantico da far assaggiare ai propri clienti.

Se vuoi scoprire qualcosa di più sul benessere delle frequenze quantiche visita il sito www.veevee.it, scarica la app da appstore o google play e trova la frequenza che ti fa stare meglio. Benvenuto nel mondo di Vee Vee e delle frequenze quantiche"

Bonus Track: la disuguaglianza di Bell

Einstein attacks!



VS



Einstein rifiutò l'idea di misure che si influenzano con
“una inquietante azione a distanza” (più veloce della luce?).
“La situazione fattuale del sistema A è indipendente da quanto
accade al sistema B quando A e B sono spazialmente separati”
(**principio di località** di Einstein)

Problema noto anche come paradosso EPR da
Einstein-Podolski-Rosen (1935)

Ma l'entanglement *non* permette in ogni caso
una trasmissione “istantanea” di informazioni;
le correlazioni possono essere verificate solo
dopo che Alice e Bob comunicano per
confrontare le misure (una non si accorge “in
diretta” di cosa l'altra decide di misurare)

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

New York Times, 1935

Variabili nascoste?

Tentativo di salvare la “**località**”: si assume che i valori di una variabile (quantità fisica osservabile) abbiano valori sempre definiti in basi diverse anche se non misurabili simultaneamente: ciò che non misuriamo rimane “**nascosto**”.

Ad esempio prendendo le basi x, y e x', y' per la polarizzazione dei fotoni si ammette che lo stato di polarizzazione sia del tipo

$$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x) \quad (\varepsilon_x, \varepsilon'_y) \quad (\varepsilon_y, \varepsilon'_x) \quad (\varepsilon_y, \varepsilon'_y)$$

Quando si misura nella base x, y (ottenendo ε_x o ε_y) i valori nella base x', y' rimangono “nascosti”.

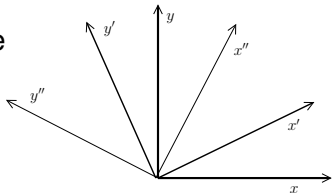
Assumiamo che $(\varepsilon_x, \varepsilon'_x)$ e $(\varepsilon_x, \varepsilon'_y)$ siano equiprobabili: quando Bob invece di misurare ε_x passa alla base x', y' trova ε'_x o ε'_y con 50% di probabilità ciascuno.

Questo rende le correlazioni osservate **compatibili con la località** (e *non* dipendenti dalla “scelta” dell'osservatore) ...

Bell counterattacks – 0

Assunta l'ipotesi di variabili nascoste consideriamo **tre** basi diverse:

$$x, y \quad x', y' \quad x'', y''$$



Alice & Bob scelgono ogni volta una base a piacere e misurano la polarizzazione del proprio fotone. Dato che le polarizzazioni misurate devono essere ortogonali (in qualsiasi base si misurino) ci sono 8 possibili combinazioni. Supponendo che su un totale di N misure la i -esima combinazione si presenti N_i volte la probabilità di ottenerla è $P_i = N_i / N$ con $N = \sum_{i=1}^8 n_i$.

	Alice	Bob
N_1	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$
N_2	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$
N_3	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$
N_4	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$
N_5	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$
N_6	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$
N_7	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$
N_8	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$

Bell counterattacks – 1

Sulla base della tabella del numero di volte in cui ogni stato si presenta si possono calcolare le probabilità delle diverse coppie di risultati della misura di Alice e Bob sui rispettivi fotoni con polarizzazioni ortogonali:

Se Alice trova ε_x e Bob ε'_x

$$P(A: \varepsilon_x, B: \varepsilon'_x) = \frac{N_2 + N_5}{N}$$

Se Alice trova ε_x e Bob ε''_x

$$P(A: \varepsilon_x, B: \varepsilon''_x) = \frac{N_5 + N_6}{N}$$

Se Alice trova ε''_x e Bob ε'_x

$$P(A: \varepsilon''_x, B: \varepsilon'_x) = \frac{N_2 + N_4}{N}$$

	Alice	Bob
N_1	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$
N_2	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$
N_3	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$
N_4	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$
N_5	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$
N_6	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$
N_7	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$
N_8	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$

Bell counterattacks – 2

Sulla base della tabella del numero di volte in cui ogni stato si presenta si possono calcolare le probabilità delle diverse coppie di risultati della misura di Alice e Bob sui rispettivi fotoni con polarizzazioni ortogonali:

Se Alice trova ε_x e Bob ε'_x

$$P(A: \varepsilon_x, B: \varepsilon'_x) = \frac{N_2 + N_5}{N}$$

Se Alice trova ε_x e Bob ε''_x

$$P(A: \varepsilon_x, B: \varepsilon''_x) = \frac{N_5 + N_6}{N}$$

Se Alice trova ε''_x e Bob ε'_x

$$P(A: \varepsilon''_x, B: \varepsilon'_x) = \frac{N_2 + N_4}{N}$$

	Alice	Bob
N_1	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$
N_2	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$
N_3	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$
N_4	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$
N_5	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$
N_6	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$
N_7	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$
N_8	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$

Bell counterattacks – 3

Sulla base della tabella del numero di volte in cui ogni stato si presenta si possono calcolare le probabilità delle diverse coppie di risultati della misura di Alice e Bob sui rispettivi fotoni con polarizzazioni ortogonali:

Se Alice trova ε_x e Bob ε'_x

$$P(A: \varepsilon_x, B: \varepsilon'_x) = \frac{N_2 + N_5}{N}$$

Se Alice trova ε_x e Bob ε''_x

$$P(A: \varepsilon_x, B: \varepsilon''_x) = \frac{N_5 + N_6}{N}$$

Se Alice trova ε''_x e Bob ε'_x

$$P(A: \varepsilon''_x, B: \varepsilon'_x) = \frac{N_2 + N_4}{N}$$

	Alice	Bob
N_1	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$
N_2	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$
N_3	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$
N_4	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$
N_5	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$
N_6	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$
N_7	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_y, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_x, \varepsilon''_x)$
N_8	$(\varepsilon_y, \varepsilon'_x, \varepsilon''_y)$	$(\varepsilon_x, \varepsilon'_y, \varepsilon''_x)$

Bell counterattacks – 4

Poiché $N_2 + N_5 \leq N_2 + N_5 + N_4 + N_6 = (N_5 + N_6) + (N_2 + N_4)$

$$P(A: \epsilon_x, B: \epsilon'_x) \leq P(A: \epsilon_x, B: \epsilon''_x) + P(A: \epsilon''_x, B: \epsilon'_x)$$

(Diseguaglianza di Bell)

Se Alice misura ϵ_x e Bob ϵ'_x

$$P(A: \epsilon_x, B: \epsilon'_x) = \frac{N_2 + N_5}{N}$$

Se Alice misura ϵ_x e Bob ϵ''_x

$$P(A: \epsilon_x, B: \epsilon''_x) = \frac{N_5 + N_6}{N}$$

Se Alice misura ϵ''_x e Bob ϵ'_x

$$P(A: \epsilon''_x, B: \epsilon'_x) = \frac{N_2 + N_4}{N}$$

	Alice	Bob
N_1	$(\epsilon_x, \epsilon'_x, \epsilon''_x)$	$(\epsilon_y, \epsilon'_y, \epsilon''_y)$
N_2	$(\epsilon_x, \epsilon'_y, \epsilon''_x)$	$(\epsilon_y, \epsilon'_x, \epsilon''_y)$
N_3	$(\epsilon_y, \epsilon'_x, \epsilon''_x)$	$(\epsilon_x, \epsilon'_y, \epsilon''_y)$
N_4	$(\epsilon_y, \epsilon'_y, \epsilon''_x)$	$(\epsilon_x, \epsilon'_x, \epsilon''_y)$
N_5	$(\epsilon_x, \epsilon'_y, \epsilon''_y)$	$(\epsilon_y, \epsilon'_x, \epsilon''_x)$
N_6	$(\epsilon_x, \epsilon'_x, \epsilon''_y)$	$(\epsilon_y, \epsilon'_y, \epsilon''_x)$
N_7	$(\epsilon_y, \epsilon'_y, \epsilon''_y)$	$(\epsilon_x, \epsilon'_x, \epsilon''_x)$
N_8	$(\epsilon_y, \epsilon'_x, \epsilon''_y)$	$(\epsilon_x, \epsilon'_y, \epsilon''_x)$

Violazione della disuguaglianza di Bell -0

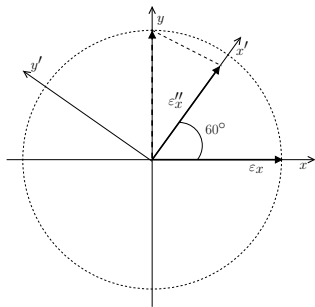
Con le regole della fisica quantistica “ortodossa” possiamo calcolare le probabilità della disuguaglianza:

Scegliamo un angolo di 60° tra le basi x, y e x', y' .

- A usa x, y e trovi ϵ_x con probabilità $50\%=1/2$;

- se anche B usasse x, y troverebbe ϵ_y con probabilità $100\%=1$;

- se invece B usa x', y' la probabilità che trovi ϵ'_x è data dal quadrato della proiezione di ϵ_y su x' .

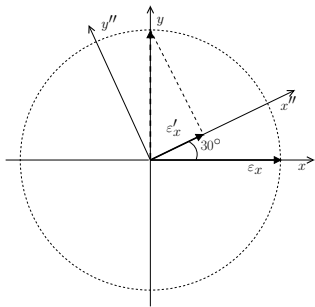


$$P(A: \epsilon_x, B: \epsilon'_x) = \left(\frac{1}{2}\right) \sin^2 60^\circ = \frac{1}{2} \times \frac{3}{4} = \frac{3}{8}$$

Violazione della disuguaglianza di Bell -1

Con le regole della fisica quantistica “ortodossa” possiamo calcolare le probabilità della disuguaglianza:

Scegliamo un angolo di 30° tra le basi x, y e x'', y'' e assumiamo nuovamente che A trovi ϵ_x ; ripetendo il ragionamento precedente cambiando solo il valore della proiezione di ϵ_x su x'' (a causa del diverso angolo tra le due direzioni).

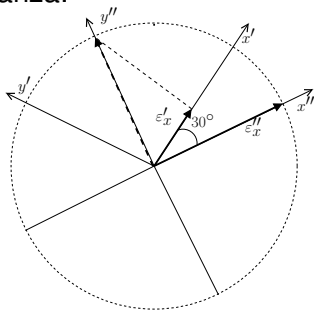


$$P(A: \epsilon_x, B: \epsilon''_x) = \left(\frac{1}{2}\right) \sin^2 30^\circ = \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{8}$$

Violazione della disuguaglianza di Bell -2

Con le regole della fisica quantistica “ortodossa” possiamo calcolare le probabilità della disuguaglianza:

Infine assumiamo che A misuri in x'', y'' trovando ϵ''_x e ripetiamo ancora il ragionamento per una misura di B lungo x', y' :



$$P(A: \epsilon''_x, B: \epsilon'_x) = \left(\frac{1}{2}\right) \sin^2 30^\circ = \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{8}$$

Violazione della disuguaglianza di Bell - 4

Riassumendo i risultati del calcolo secondo la fisica quantistica “ortodossa”

$$P(A : \epsilon_x, B : \epsilon''_x) + P(A : \epsilon''_x, B : \epsilon'_x) = \frac{1}{8} + \frac{1}{8} = \frac{1}{4} < \frac{3}{8} = P(A : \epsilon_x, B : \epsilon'_x)$$

→ **la disuguaglianza di Bell è violata**

Diversi esperimenti hanno verificato la violazione

→ la teoria “locale” è falsificata (Bell wins!)

... et ce n'est qu'un debut ...



The screenshot shows a video player interface. The main content is a presentation slide with the following elements:

- Logos:** Institut d'Optique Graduate School, université Paris-Saclay, and CNRS.
- Speaker:** A small video inset in the top right shows Alain Aspect.
- Title:** "From Einstein's LichtQuanten to Wheeler's delayed choice experiment: wave-particle duality for a single photon".
- Images:** Three book covers are displayed: "Introduction to QUANTUM OPTICS", a portrait of Albert Einstein, and "EINSTEIN AND THE QUANTUM".
- Date and Event:** "14/04/2021 : World Quantum Day" and "Journée mondiale de la Quantique".
- Location:** "Alain Aspect, Institut d'Optique Graduate School, Palaiseau, France".
- Links:** Several URLs are listed, including <http://www.lcf.institutoptique.fr/Alain-Aspect-homepage> and MOOC links to Coursera.
- Video Player Controls:** A progress bar at the bottom shows the video is at 4:03 / 14:26:29. Other controls include play, volume, and a settings icon.

World Quantum Day – Alain Aspect, From Einstein to Wheeler: Wave-Particle duality of a single photon

<https://youtu.be/RSXpeDgqUO4>