

# 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



PCTO “Giochiamo con la crittografia quantistica”, 16/04/2021

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

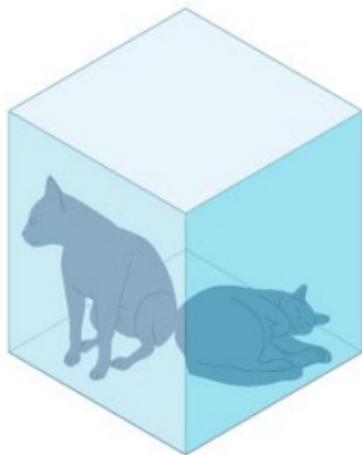


... specialmente quando la scatola è **chiusa!**

Del “gatto di Schrödinger” chiuso in una scatola non possiamo sapere se è sveglio o addormentato.

Secondo la **fisica quantistica**, il gatto è ***sia sveglio che addormentato***<sup>1</sup> 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.



---

<sup>1</sup>“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*

Due **calzini** identici possono essere indossati ciascuno indifferentemente su un piede destro o sinistro.

Dal punto di vista quantistico, lo stato di entrambi i calzini *prima che uno di essi sia indossato* è una **sovrapposizione** di “**destro**” e “**sinistro**”.



Nel momento in cui il primo calzino viene indossato su un piede (ad esempio il destro), diventano univocamente definiti sia lo stato del primo calzino (“destro”) che del secondo (“sinistro”).

Lo stato dei calzini è univocamente definito solo **dopo** che **uno** essi ha “interagito” con un piede.

Esempio creato da Marco Fulvio Barozzi ([keespoppinga.blogspot.com](http://keespoppinga.blogspot.com))

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](http://consigli.it)

In fisica **classica** si assume di poter misurare esattamente ogni quantità **senza "disturbare" il sistema**, ottenendo così un'informazione "certa" e **completa** sullo stato.



crediti: brgfx - [it.freepik.com](http://it.freepik.com)

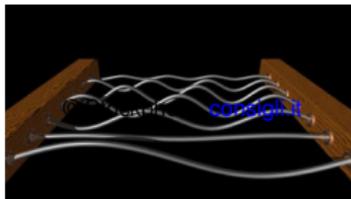
In fisica **quantistica** la **misura** ha una natura molto diversa ...

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 ...).



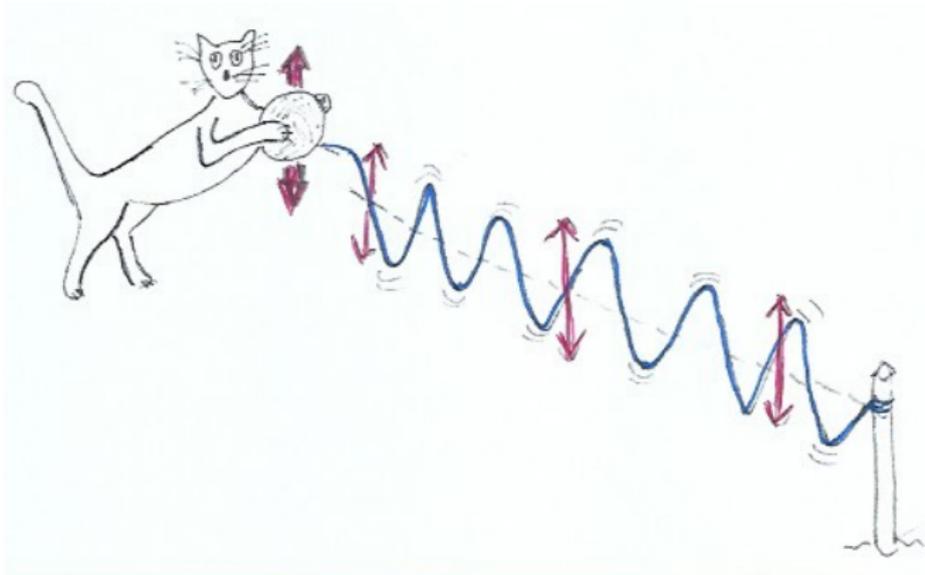
crediti: [www.thestrad.com](http://www.thestrad.com)

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

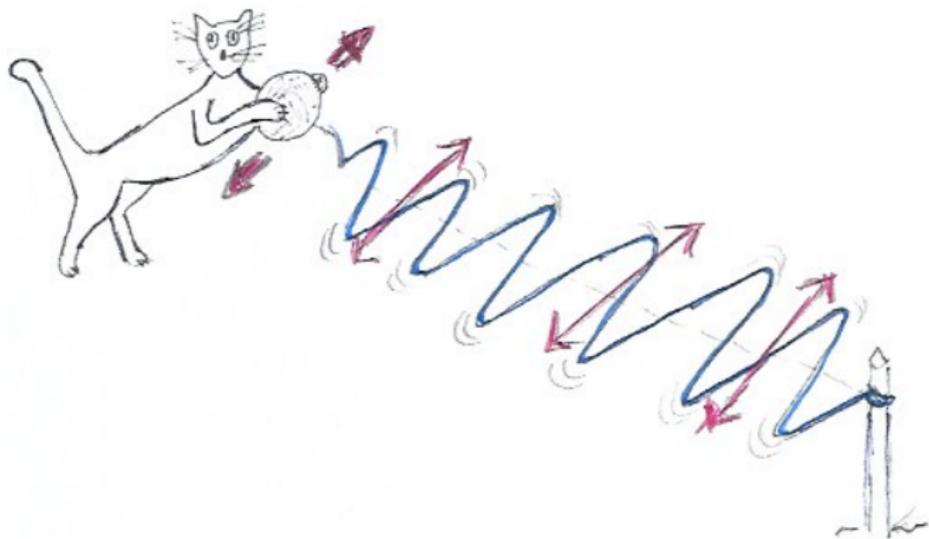


crediti: [www.sciencesource.com](http://www.sciencesource.com)

Ad esempio una corda può vibrare **verticalmente** ...



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



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)

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

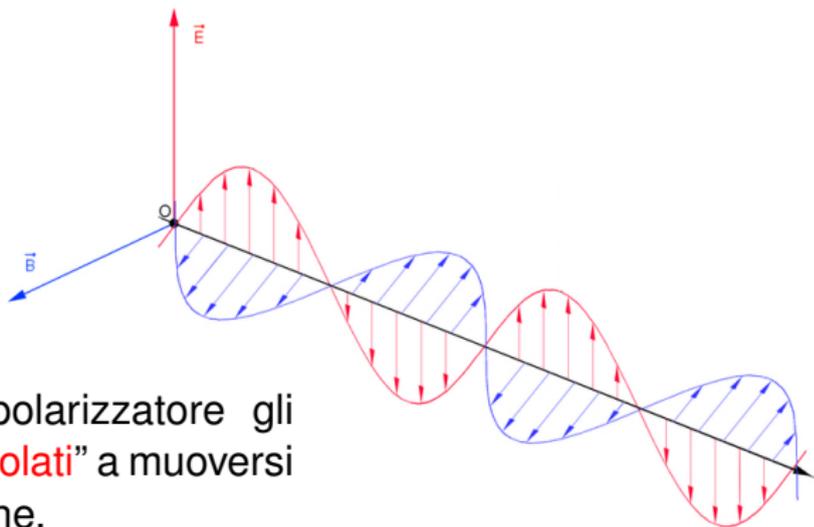
Più precisamente (ma *sempre* in *fisica classica*) la luce è un'onda elettromagnetica costituita da campo elettrico ( $\vec{E}$ ) e campo magnetico ( $\vec{B}$ ) perpendicolari al verso di propagazione.

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.



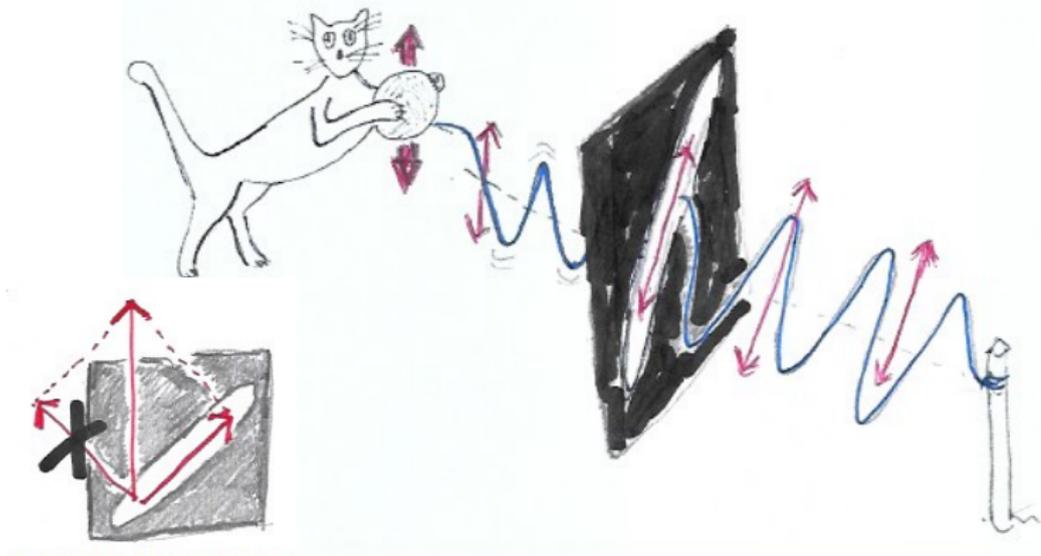
Analogo “meccanico” di un polarizzatore:  
uno schermo con una stretta fenditura fa passare vibrazioni  
parallele alla fenditura . . .



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



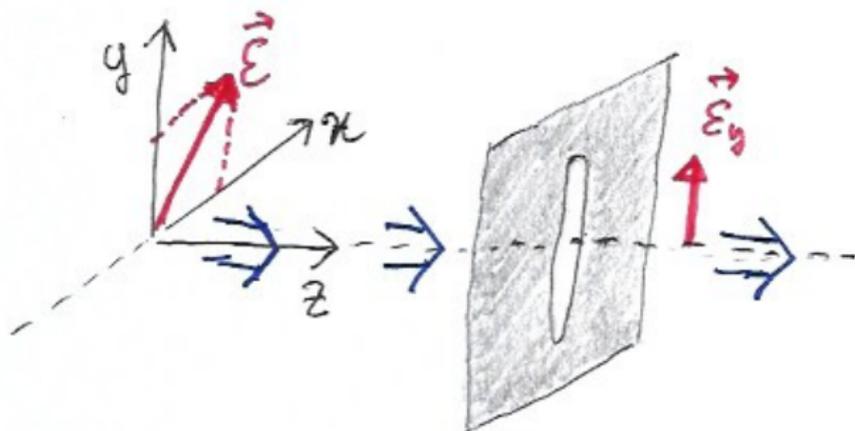
Se la vibrazione è **obliqua** rispetto alla fenditura, questa “selezione” la **componente parallela** della vibrazione (ricordiamo che la vibrazione è descritta da un vettore!)



*regola del parallelogramma per determinare le componenti*

Possiamo allora usare un polarizzatore per:

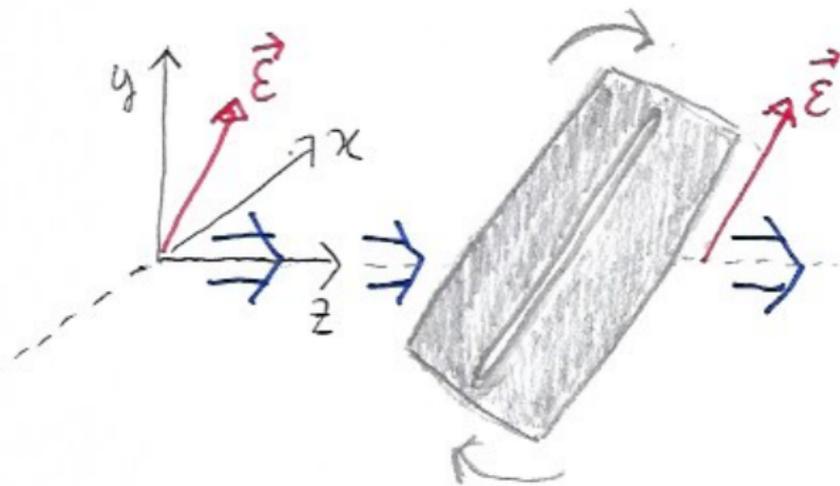
- produrre luce con polarizzazione lungo una direzione fissata (ad esempio lungo l'asse  $y$  nell'esempio in figura)



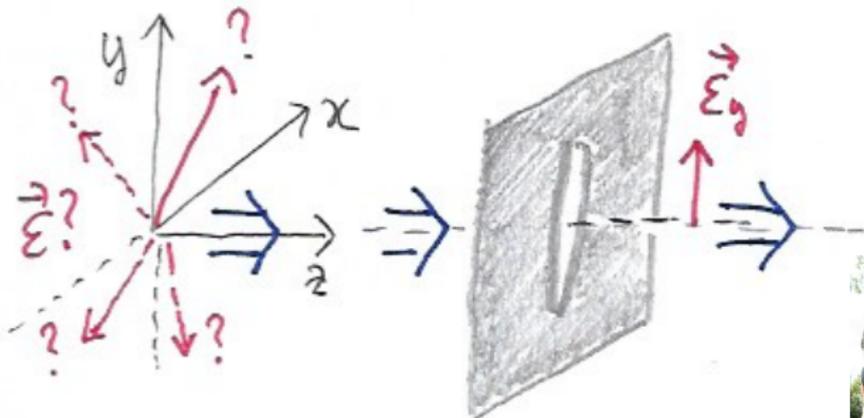
(Indichiamo d'ora in poi con  $\vec{E}$  il vettore polarizzazione generico, con  $\vec{E}_y$  e  $\vec{E}_x$  la polarizzazione “verticale” lungo  $y$  e “orizzontale” lungo  $x$  . . .)

Possiamo allora usare un polarizzatore per:

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



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



Gli occhiali da sole "polarizzati" funzionano su questo principio

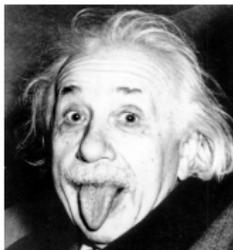


## I **fotoni** ovvero i “quanti di luce”

*“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**.

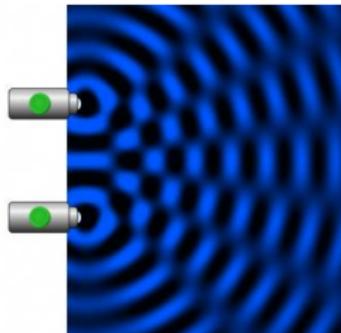


## Dualismo onda-particella

Nonostante l'ipotesi dei quanti spiegasse numerosi fenomeni incomprensibili per la teoria "classica" della luce, trovò resistenza all'implicazione che i fotoni avessero una natura "duale":

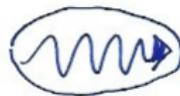
**sia onde, sia particelle.**

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](http://www.golabz.eu)

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

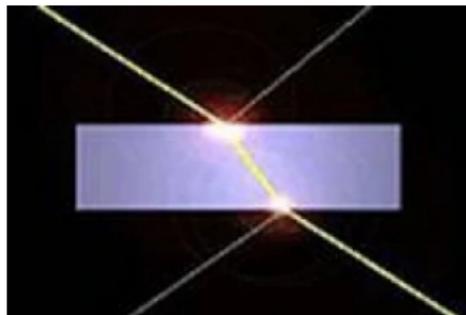


## Dal “raggio di luce” al singolo fotone

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

Un raggio di luce che incide sulla superficie di un materiale trasparente si “scinde” in raggio **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](http://studenti.it)

Idea: ogni fotone ha una certa **probabilità** di essere riflesso o trasmesso.

Quel che osserviamo **macroscopicamente** è un effetto **medio** su tanti fotoni.



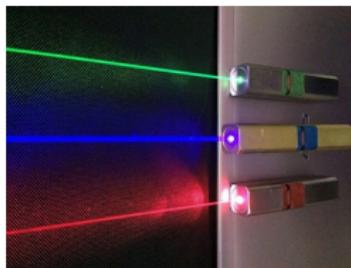
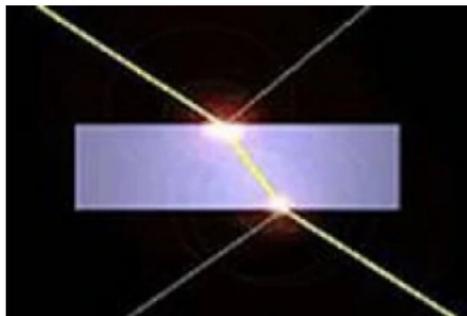
... ma un fotone non potrebbe *scindersi* in due?

L'energia di un fotone è proporzionale alla frequenza ( $\nu$ ) della luce:  $E = h\nu$  ( $h$ : costante di Planck)

La frequenza della luce visibile determina il colore: i raggi riflesso e trasmesso hanno lo stesso colore, quindi i fotoni nei due raggi hanno la stessa energia.

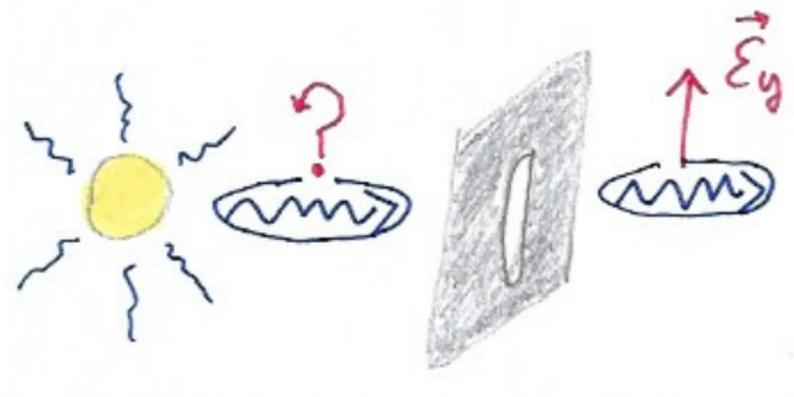
Se il singolo fotone si scindesse in due fotoni senza cambio di colore, questo violerebbe la conservazione dell'energia.

I laser ci offrono luce con un colore "puro" e quindi fotoni di energia con valore preciso.



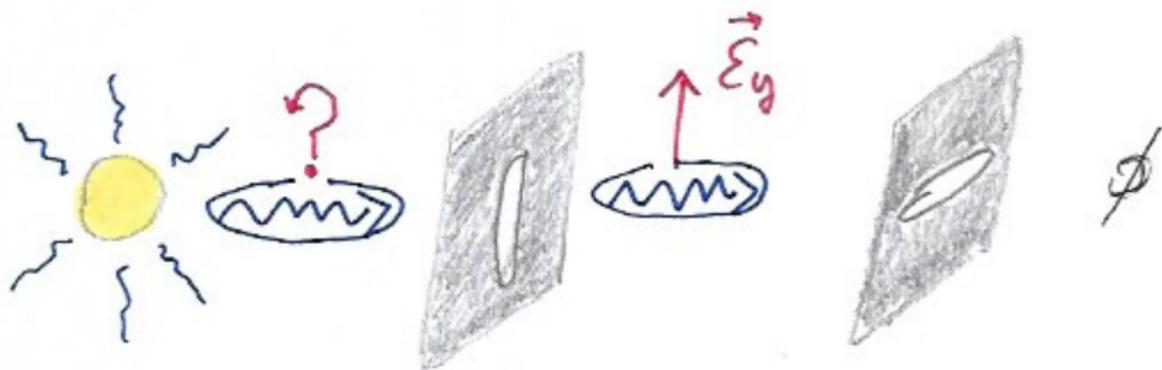
## Misure di polarizzazione con singoli fotoni

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* . . .

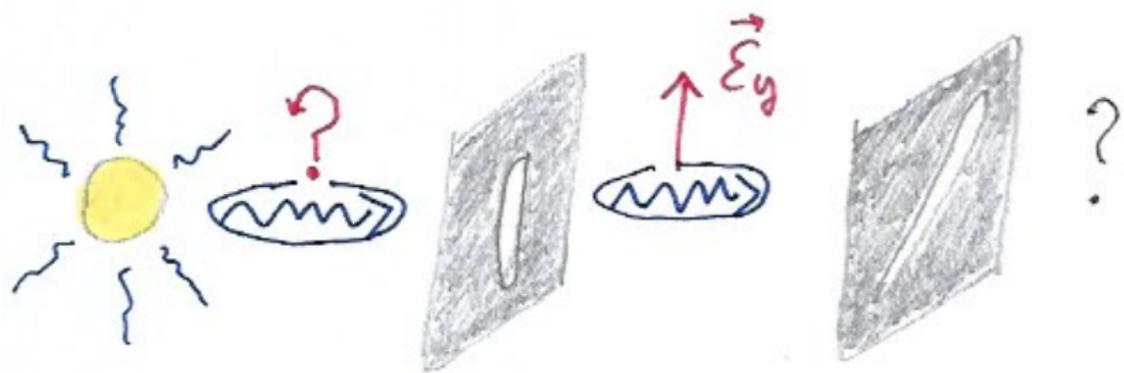


Mettendo in sequenza un polarizzatore “x” siamo sicuri di aver “preparato bene” lo stato  $\vec{e}_y$ : **non** osserviamo nessun fotone oltre il polarizzatore.

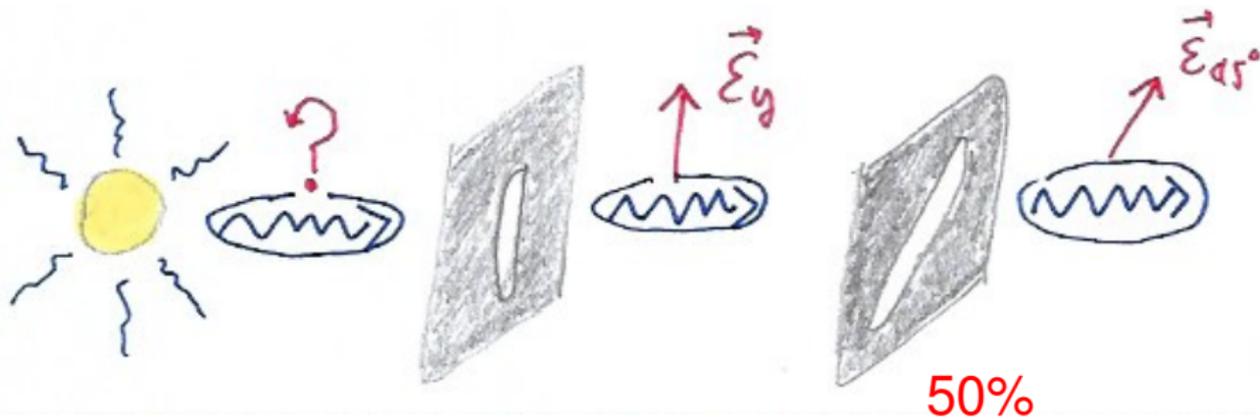
Abbiamo “eliminato” i fotoni con polarizzazione  $\vec{e}_x$ ?



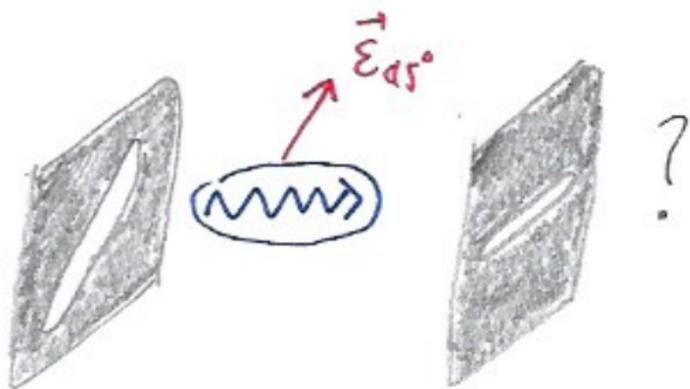
Cosa succede se mettiamo un polarizzatore **obliquo**?



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

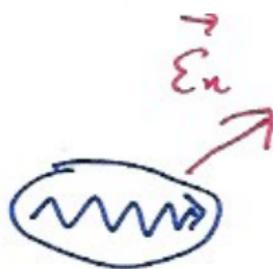
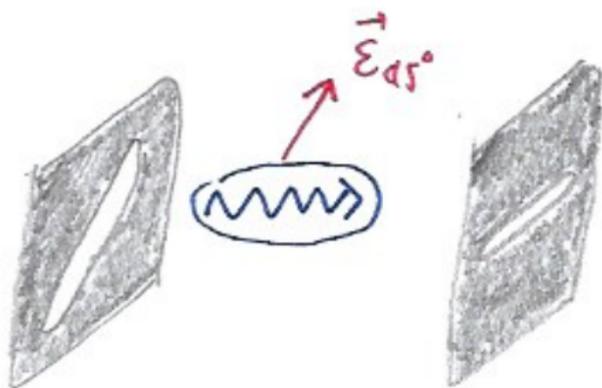


Cosa succede se il fotone polarizzato a  $45^\circ$  ripassa lungo il polarizzatore  $x$ ?



Cosa succede se il fotone polarizzato a  $45^\circ$  ripassa lungo il polarizzatore  $x$ ?

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

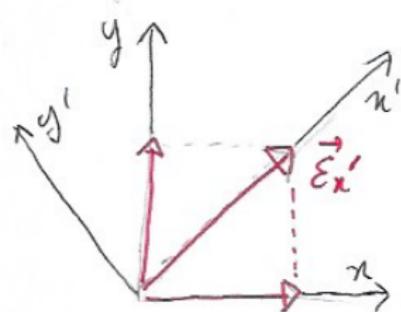
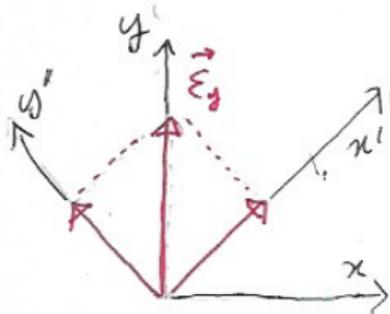


**50%**

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”).



## Spin: un osservabile “molto” quantistico

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

NOUN

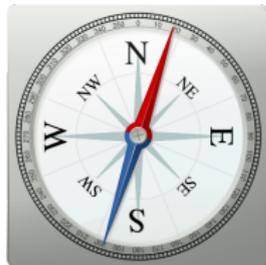
1. (*revolution*) giro
  - **to give a wheel a spin** far girare una ruota
  - **to give sth a long/short spin** (*in washing machine*) fare una centrifuga completa/ridotta
  - **to be in a flat spin** (*informal*) essere in preda al panico
  - **to go into a flat spin** lasciarsi prendere dal panico
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](#))

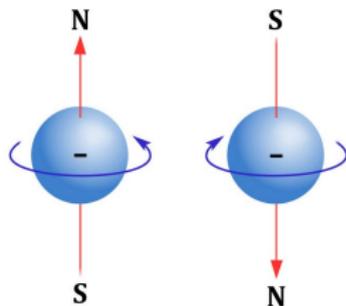
## Spin: un osservabile “molto” quantistico

Atomi e particelle elementari anche prive di carica elettrica (neutroni e neutrini) sentono l'azione di un **campo magnetico** un pò come l'ago di una bussola.

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



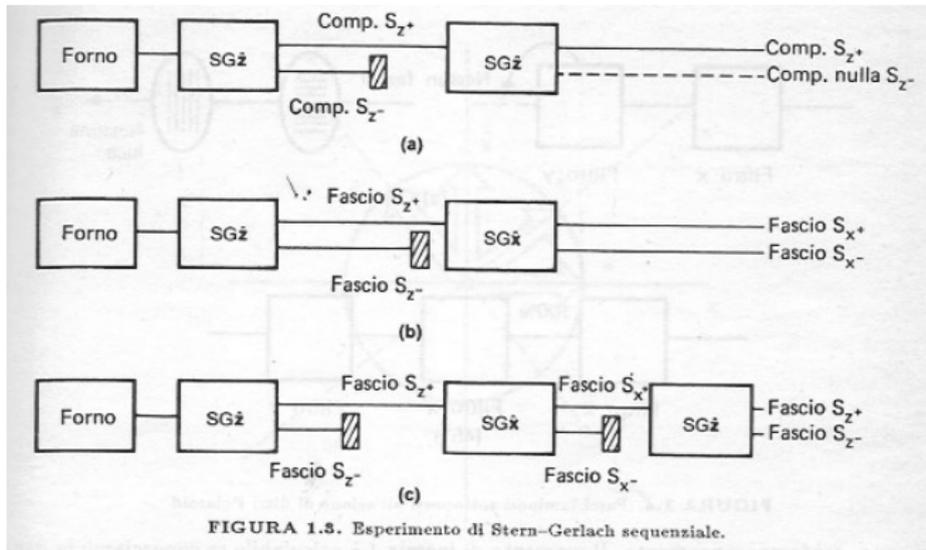
(credit: JayCanuck)







Cambiando l'orientazione del magnete si possono fare misure sequenziali dello spin lungo direzioni ortogonali, analogamente alle misure di polarizzazione dei fotoni (e con risultati analoghi!)



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

## Principi generali dedotti dagli esperimenti:

In fisica **classica**

**osservabile = misurabile**

- possiamo “misurare” univocamente lo **stato** di un sistema associando un valore univoco a ogni sua caratteristica.

In fisica **quantistica**

**osservabile  $\neq$  misurabile**

- a ogni caratteristica misurabile non è associato un valore univoco ma una **probabilità** di ottenerlo
- ogni misura **cambia** lo stato del sistema
- i risultati di misure successive **dipendono dall'ordine** in cui vengono eseguite.

## Indeterminazione delle misure

Poiché una misura cambia uno stato di un sistema, in generale **non è possibile misurare osservabili diversi con precisione arbitraria.**

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

Se affermo che 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  $\Delta x$  e  $\Delta p$  sono le **incertezze** sulla misura) vale la relazione

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

(**principio di indeterminazione di Heisenberg**)

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.

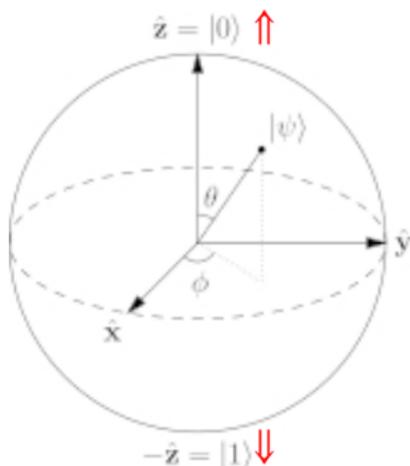
## Informazione quantistica: QuBit

Il costituente elementare dell'informazione in un computer è il **bit**: un oggetto che può assumere valori **0** e **1** (quindi con una sequenza di bit costruiamo **numeri binari** come 100110101)

Si può pensare di usare come bit la polarizzazione di un fotone ( $\vec{\epsilon}_x \equiv 0$ ,  $\vec{\epsilon}_y \equiv 1$ ) o lo spin di un atomo ( $\uparrow \equiv 0$ ,  $\downarrow \equiv 1$ ) ...

... ma questo **quantum bit (QuBit)** può essere in una **sovrapposizione** di **0** e **1**!  
(la sfera rappresenta la sovrapposizione dei "vettori di stato" in 3D)

Il QuBit è alla base dei **computer quantistici** ...



credit: [Glosser.ca](#) (Wikimedia)

## Possibilità, Entropia, Tempo

Il **disordine dell'Universo (Entropia)** **aumenta sempre<sup>2</sup>** e determina la **freccia del tempo** che percepiamo; è un effetto puramente **macroscopico** o avviene anche a livello (sub)atomico? Cos'è il “disordine” di un **atomo** o di una **particella**?

Se interpretiamo la sovrapposizione quantistica in più stati come “**possibilità**”, ogni **misura** (o in generale ogni **interazione** del sistema con altri) porta a uno stato definito e **riduce le alternative possibili**.

Entropia e freccia del tempo in un sistema “elementare” sono allora il “**restringersi delle possibilità**”.



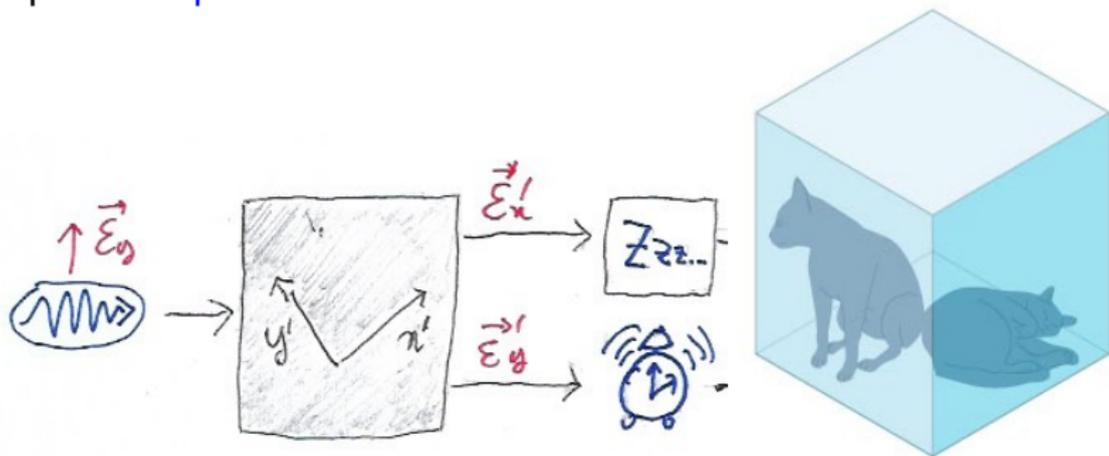
---

<sup>2</sup>Secondo principio della termodinamica

... allora il gatto?

Gli effetti quantistici sono evidenti su scala **atomica**: non li vediamo manifestarsi per oggetti **macroscopici** come il gatto (che quindi o dorme o è sveglio con certezza?)

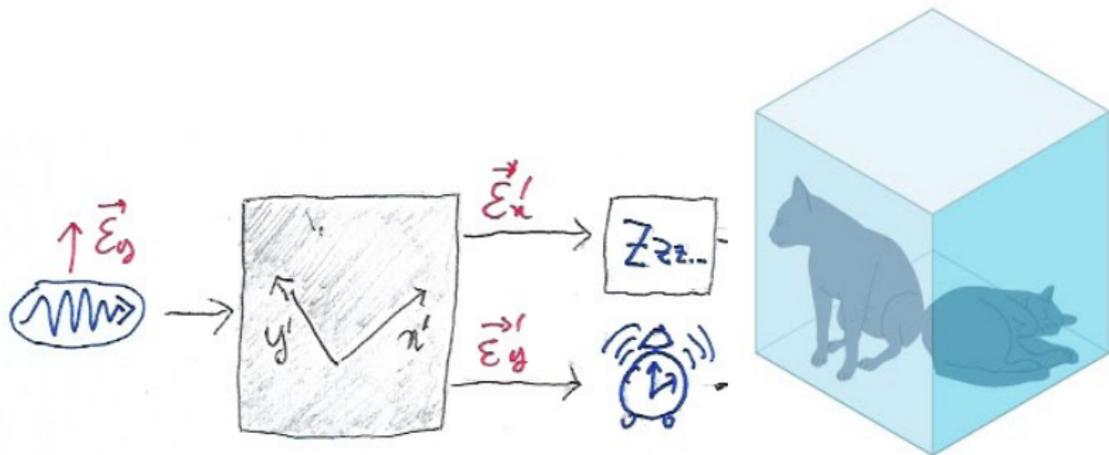
Possiamo però “accoppiare” la scatola col gatto ad un dispositivo **quantistico** ...



... se la misura di polarizzazione “obliqua” su un singolo fotone con polarizzazione “preparata”  $\vec{e}_y$  dà

- $\vec{e}'_x$ : si apre una boccetta di **sonnifero**
- $\vec{e}'_y$ : suona una **sveglia**

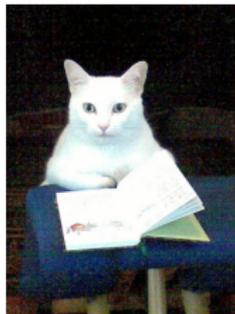
Finchè non “misuriamo” la polarizzazione, lo stato del gatto è **correlato** a quello del fotone (e quindi è una sovrapposizione di sveglio e addormentato ...)



...come continuiamo ad osservare



(i gatti forse hanno studiato la fisica quantistica più di noi ...)



...e forse per questo alcuni fisici e alcune fisiche non li amano!



**Gabriella Greison**  
**UCCIDERÒ IL GATTO  
DI SCHRÖDINGER**

**24 aprile Ore 21**  
**in streaming**  
**dal Teatro Nuovo**  
**di Salsomaggiore Terme**

REGIA DI **MARCO CARONNA**  
CON **GABRIELLA GREISON** E **MARCO CARONNA**  
MUSICHE DI **FABIO CINTI**

**IMARTS**

[internationalmusic.it/uccidero-il-gatto-di-schrodinger/](https://internationalmusic.it/uccidero-il-gatto-di-schrodinger/)

... e i calzini?

Supponete di regalare uno dei calzini identici **quantistici** ad un amico o amica prima di separarvi per un lungo viaggio. Concordate di indossare ognuno un calzino su un piede “a caso” una volta a destinazione.

Quando l'amico/a è arrivato/a indossate il vostro calzino su un piede a scelta, ad esempio il sinistro.



Se avete scelto il **sinistro**, il/la vostro/a amico/a sceglierà **necessariamente** il **destro** (o viceversa), ma voi lo scoprirete solo dopo aver telefonato ...

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

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

université PARIS-SACLAY

cnr

alain aspect

# From Einstein's LichtQuanten to Wheeler's delayed choice experiment: wave-particle duality for a single photon

Introduction to QUANTUM OPTICS

EINSTEIN AND THE QUANTUM A. DOUGLAS STONE

14/04/2021 : World Quantum Day  
Journée mondiale de la Quantique

Alain Aspect, Institut d'Optique Graduate School, Palaiseau, France

<http://www.lcf.institutoptique.fr/Alain-Aspect-homepage>

MOOC: <https://www.coursera.org/learn/quantum-optics-single-photon>

4:03 / 1:26:29

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

<https://youtu.be/RSXpeDgqUO4>