

Introduzione alla Fisica Quantistica (1/2)

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



Percorso per le Competenze Trasversali e l'Orientamento
"Tecnologie Quantistiche", 06/09/2023

“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 . . .



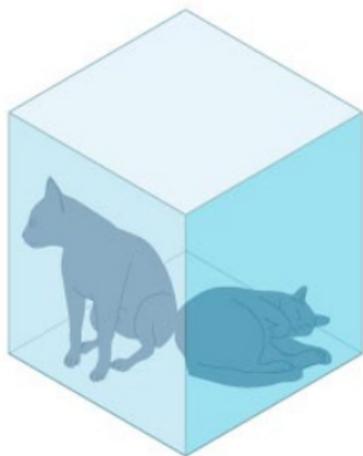
... specialmente quando la scatola è chiusa!

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



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

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 ...

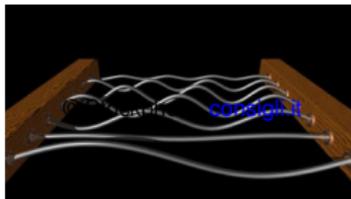
- ▶ Luce classica: onde elettromagnetiche
- ▶ Luce quantistica: i fotoni (“quanti di luce”)
- ▶ Misure di polarizzazione sui fotoni
- ▶ Conclusione (?): la misura quantistica

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 ...).



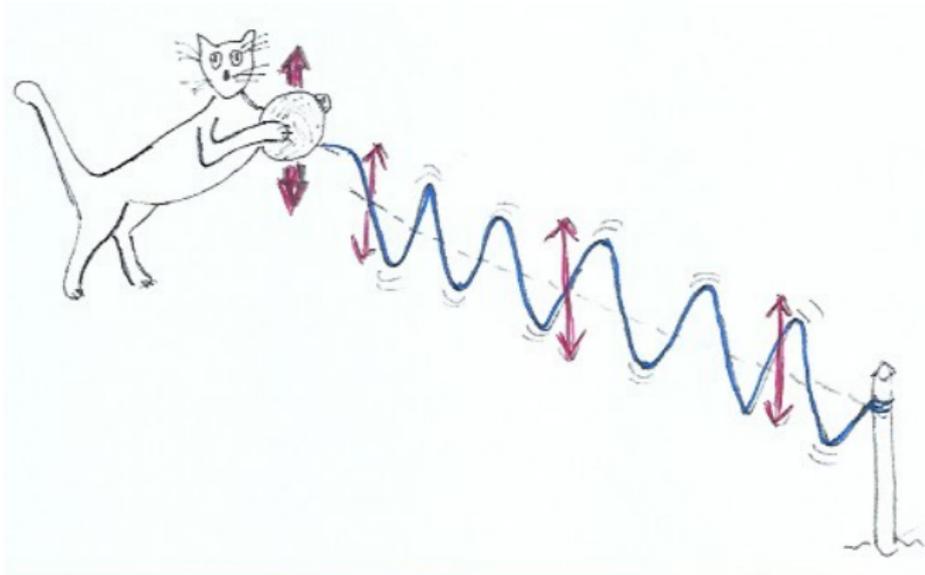
crediti: www.thestrad.com

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

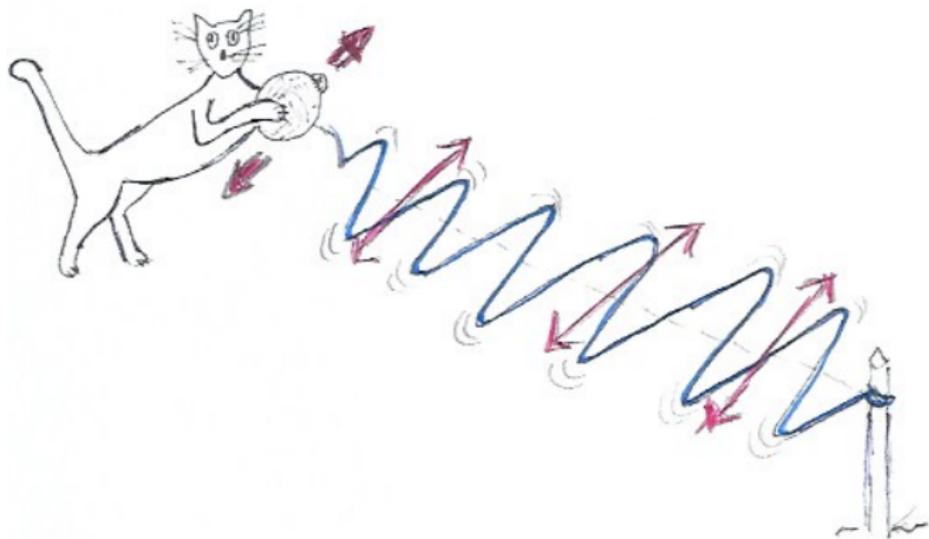


crediti: www.sciencesource.com

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.

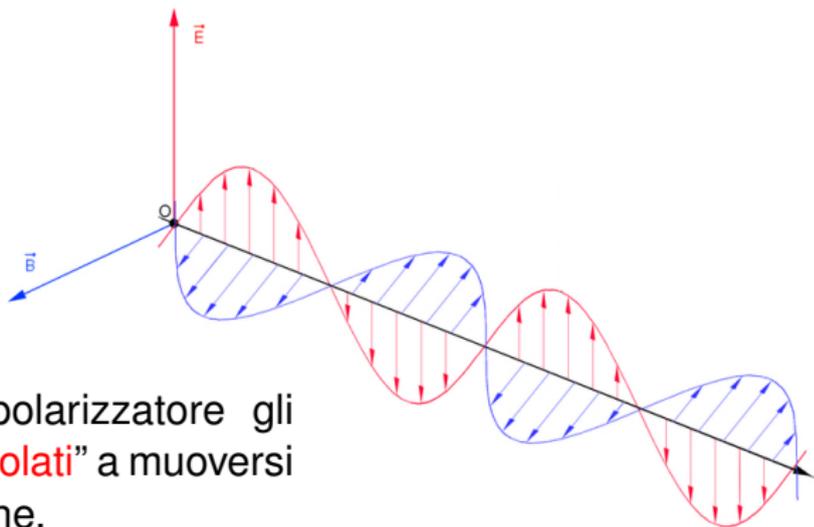
Più precisamente (ma *sempre* in *fisica classica*) la luce è un'onda elettromagnetica costituita da campo elettrico (\vec{E}) e campo magnetico (\vec{B}) perpendicolari al verso di propagazione.

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.



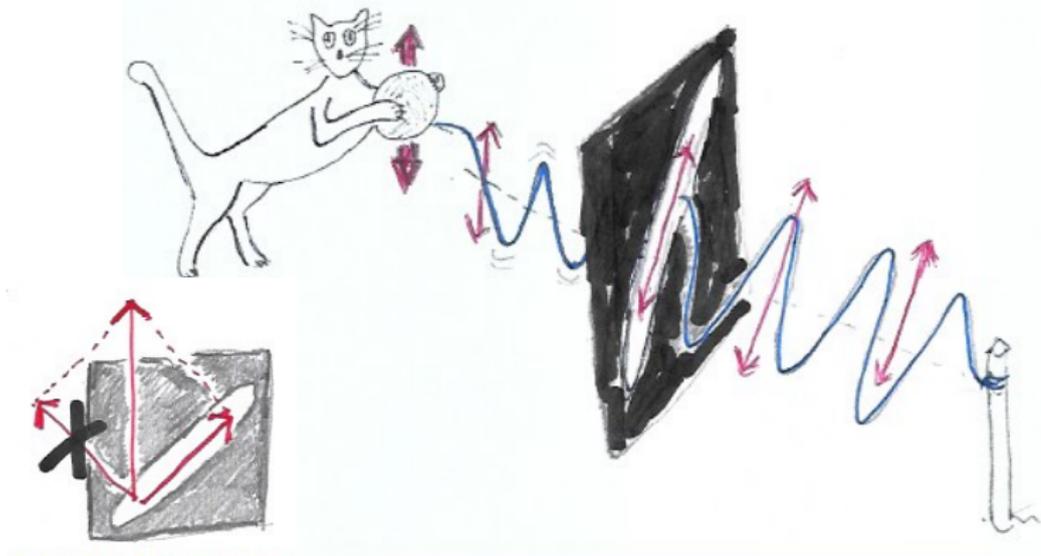
Analogo “meccanico” di un polarizzatore:
uno schermo con una stretta fenditura fa passare vibrazioni
parallele alla fenditura . . .



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



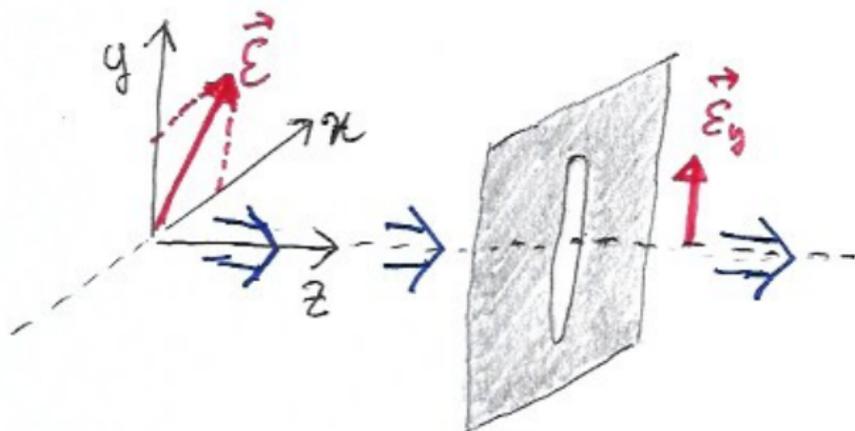
Se la vibrazione è **obliqua** rispetto alla fenditura, questa “seleziona” la **componente parallela** della vibrazione (ricordiamo che la vibrazione è descritta da un vettore!)



regola del parallelogramma per determinare le componenti

Possiamo allora usare un polarizzatore per:

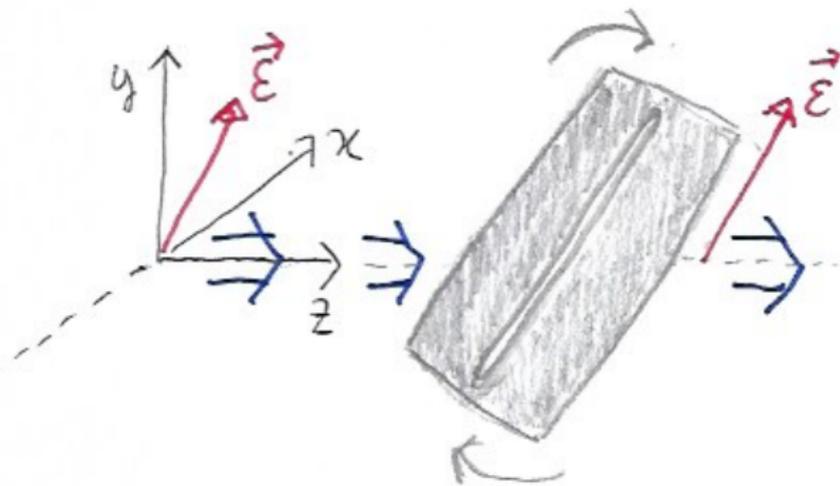
- produrre luce con polarizzazione lungo una direzione fissata (ad esempio lungo l'asse y nell'esempio in figura)



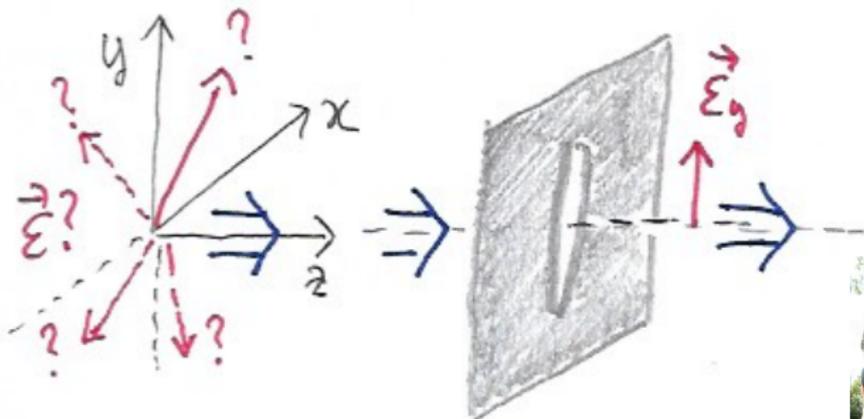
(Indichiamo d'ora in poi con \vec{E} il vettore polarizzazione generico, con \vec{E}_y e \vec{E}_x la polarizzazione “verticale” lungo y e “orizzontale” lungo x . . .)

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* passerà "metà" della luce ...)



Gli occhiali da sole "polarizzati" funzionano su questo principio

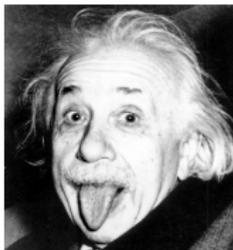


I **fotoni** ovvero i “quanti di luce”

*“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)

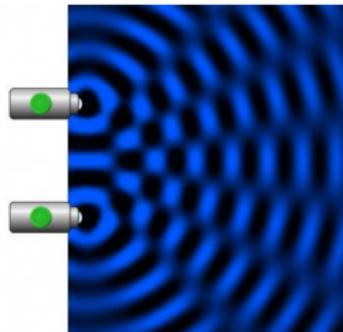


Oggi sappiamo che la luce è costituita da **fotoni** ovvero **particelle elementari** il cui stato individuale è descritto da energia, direzione del moto e **polarizzazione**.

Dualismo onda-particella

Nonostante l'ipotesi dei quanti spiegasse numerosi fenomeni incomprensibili per la teoria "classica" della luce, trovò resistenza all'implicazione 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".



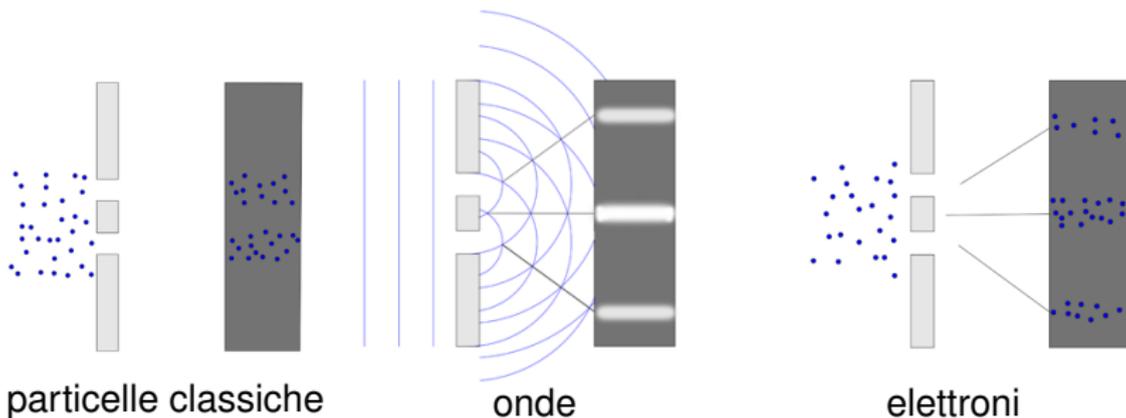
fonte: www.golabz.eu

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



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

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

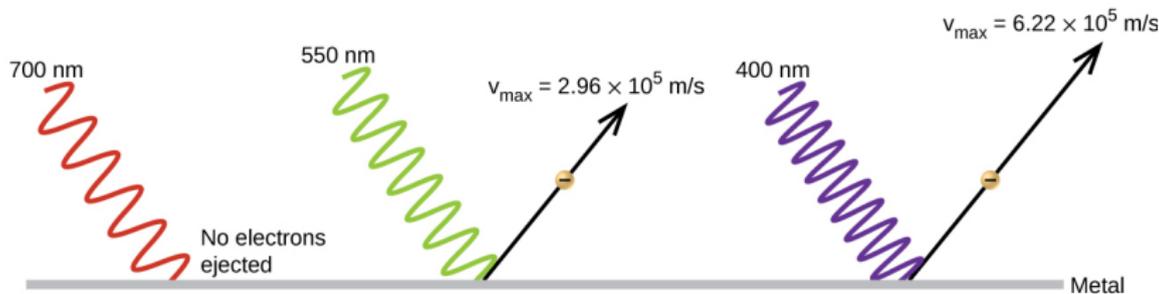
L'energia di un fotone è proporzionale a (ν) ovvero inversamente proporzionale a (λ): $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ (h : costante di Planck)
 convenientemente misurata in **elettronvolt**: $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 per fotoni visibili varia da **1.65 eV (rosso)** a **3.26 eV (violetto)**

Effetto fotoelettrico

Gli elettroni dentro 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)



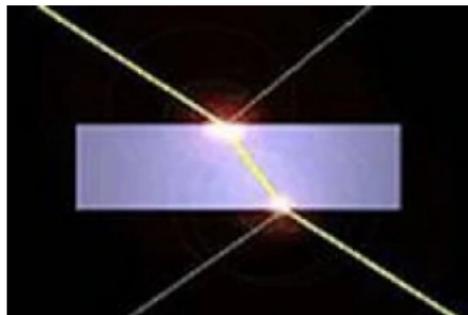
Da: OpenStax, Chemistry. legacy.cnx.org/content/col11760/1.9

Nobel 1922 per la Fisica *“ad Alfred Einstein per i suoi servizi 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.

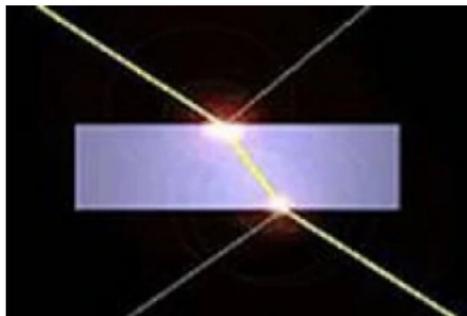


... ma un fotone non potrebbe *scindersi* in due?

Ricordiamo che l'energia di un fotone è $E = h\nu$ la frequenza (ν) che ne determina il colore (per luce visibile):

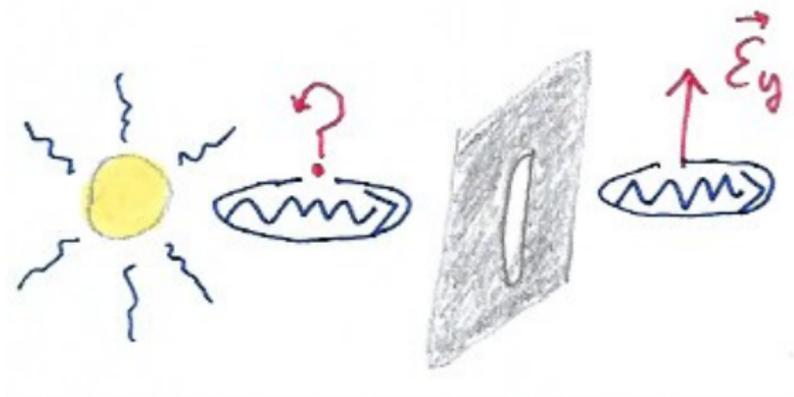
i raggi riflesso e trasmesso hanno lo stesso colore, quindi i fotoni nei due raggi hanno la stessa energia.

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

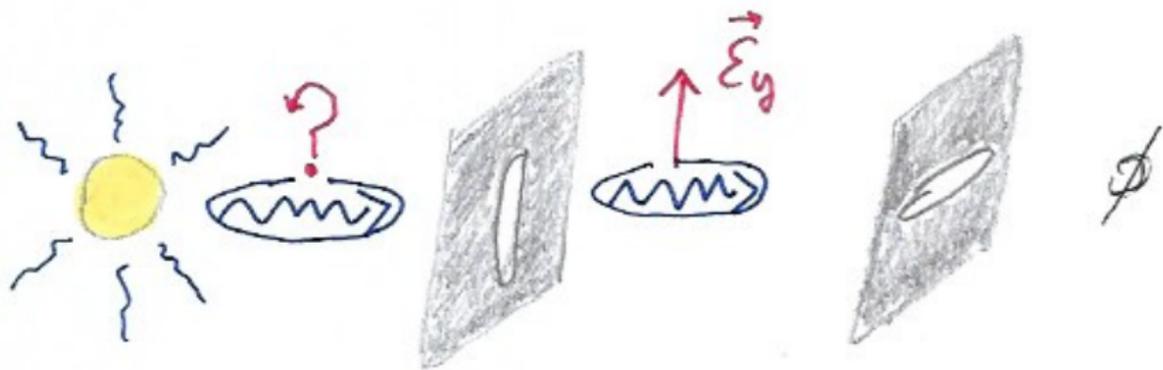


Misure di polarizzazione con singoli fotoni

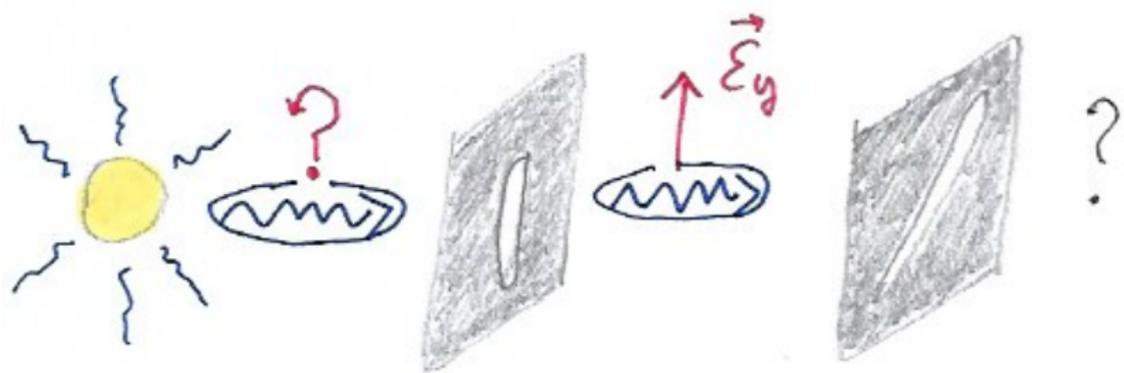
Usando luce molto attenuata e un polarizzatore “y” possiamo “preparare” un fotone con polarizzazione $\vec{\epsilon}_y$.
Facciamo ripetute misure di polarizzazione su questi fotoni, *uno alla volta* . . .



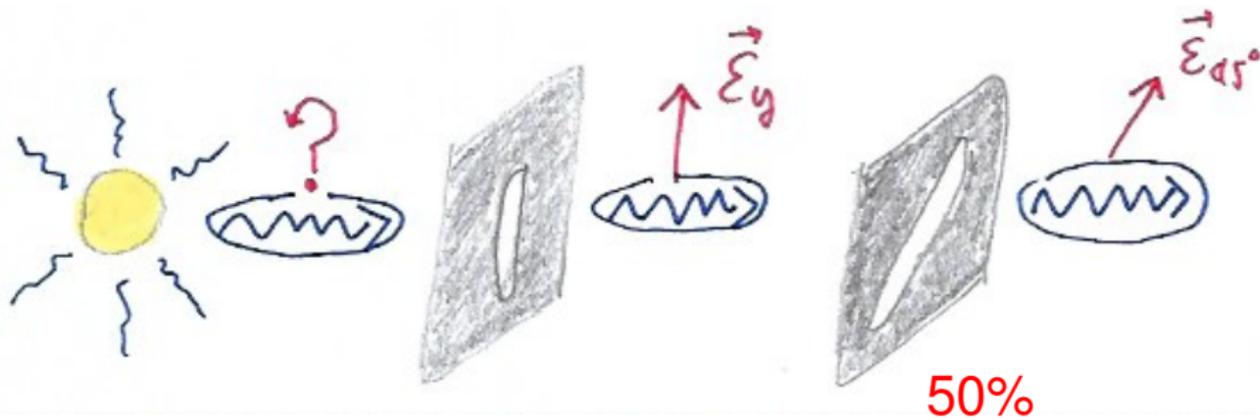
Mettendo in sequenza un polarizzatore “x” siamo sicuri di aver “preparato bene” lo stato \vec{e}_y : **non** osserviamo nessun fotone oltre il polarizzatore.
Abbiamo “eliminato” i fotoni con polarizzazione \vec{e}_x ?



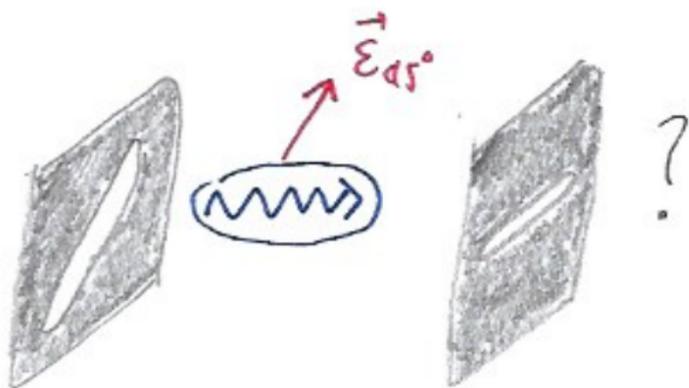
Cosa succede se mettiamo un polarizzatore **obliquo**?



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

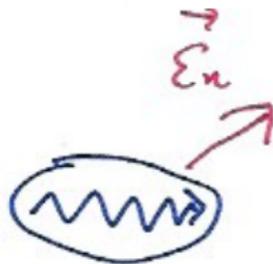
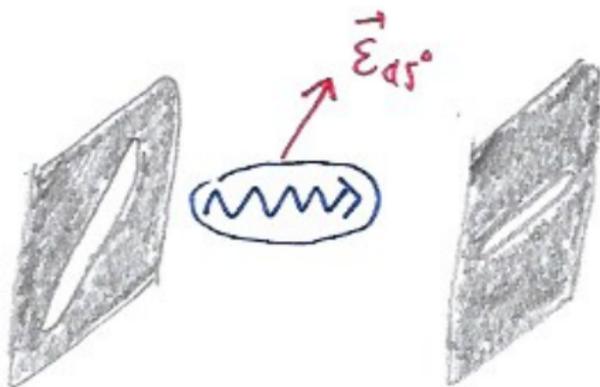


Cosa succede se il fotone polarizzato a 45° ripassa lungo il polarizzatore x ?



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

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

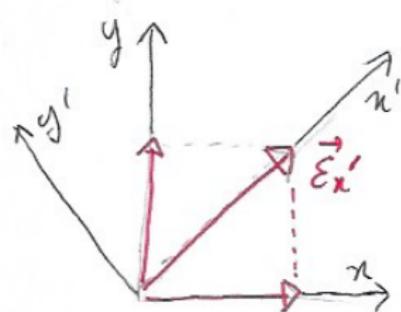
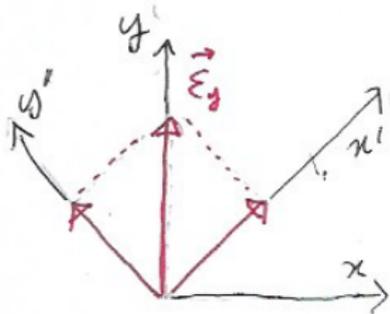


50%

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”).



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.

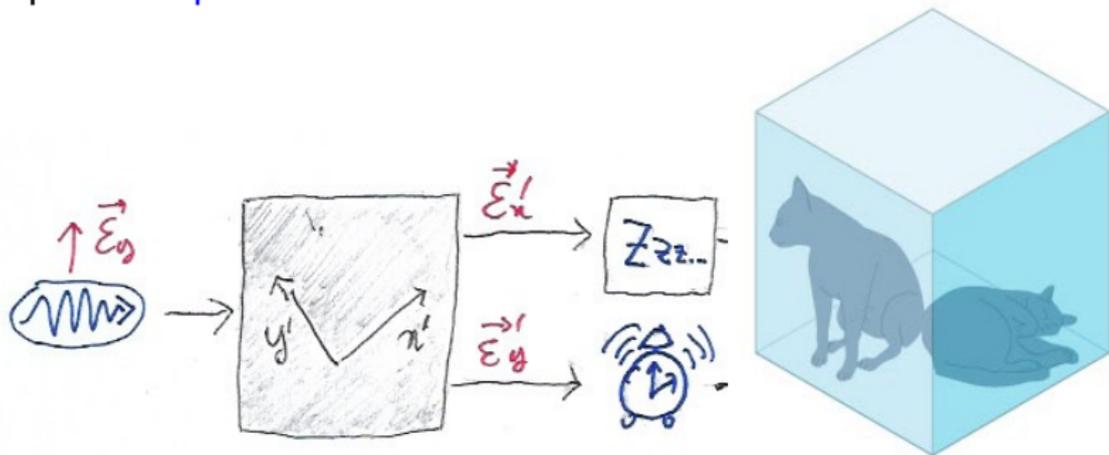
In fisica **quantistica**

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.

... allora il gatto?

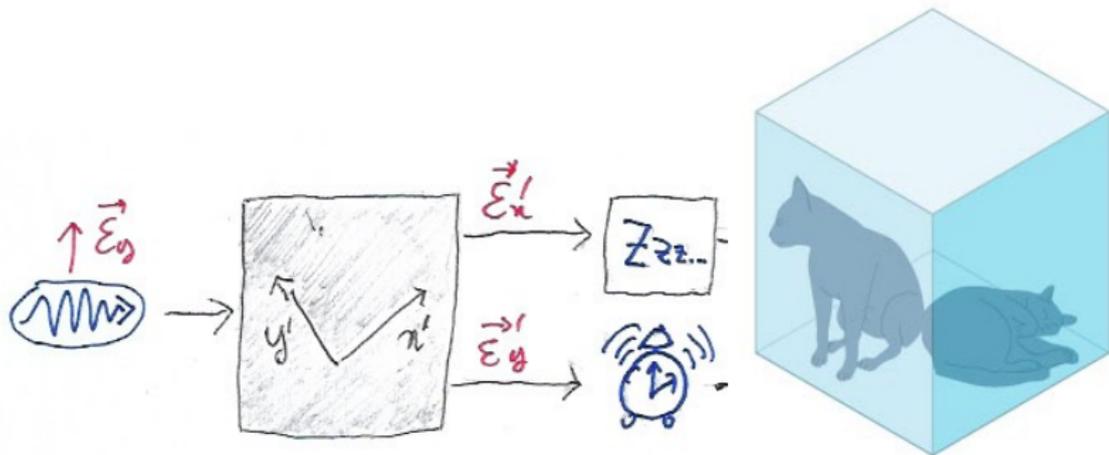
Gli effetti quantistici sono evidenti su scala **atomica**:
non li vediamo manifestarsi per oggetti **macroscopici**
come il gatto (che quindi o dorme o è sveglio con certezza?)
Possiamo però “accoppiare” la scatola col gatto ad un
dispositivo **quantistico** ...



... 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 ...)

