

# 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 . . .



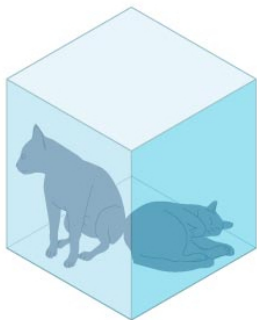
... specialmente quando la scatola è chiusa!

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*<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.

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



---

<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*



## 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](http://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](http://it.freepik.com)

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

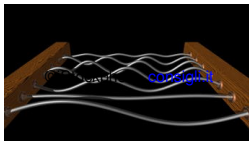
- ▶ Luce classica: onde elettromagnetiche
- ▶ Luce quantistica: i fotoni (“quanti di luce”)
- ▶ Misure di polarizzazione sui fotoni
- ▶ Conclusione (?): la misura quantistica

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).



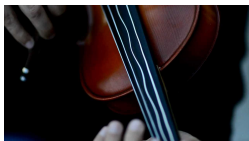
crediti: Roger McLassus  
(Wikipedia Commons)

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

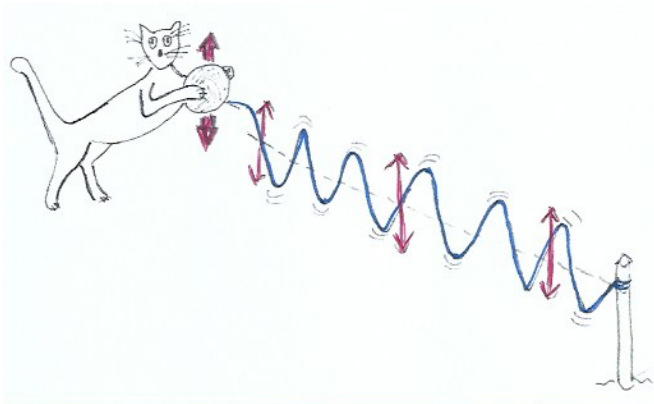
Un'onda “vibrante” è caratterizzata dal verso di propagazione, dalla frequenza (per onde “armoniche” o periodiche) e dall'ampiezza e **direzione** della vibrazione.



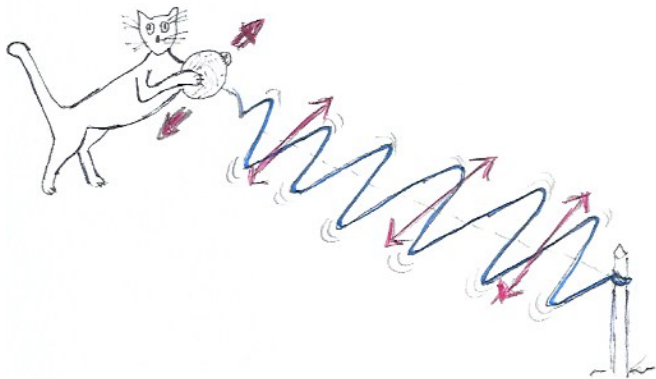
crediti: [www.sciencesource.com](http://www.sciencesource.com)



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

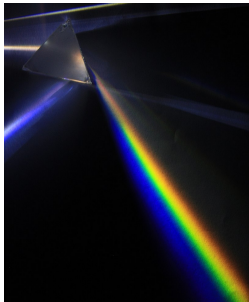


... oppure **orizzontalmente** (o in direzione obliqua)



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.

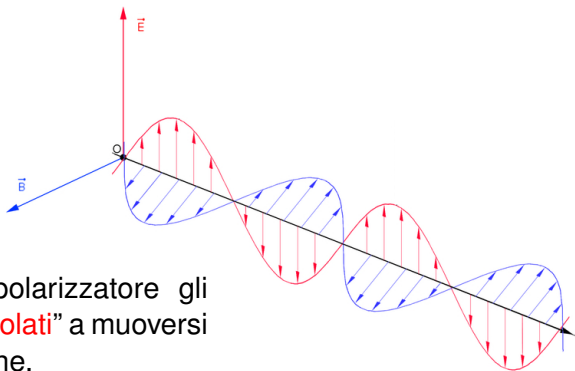
Più precisamente (ma *sempre* in *fisica classica*) la luce è un'onda elettromagnetica costituita da campo elettrico ( $\vec{E}$ ) e campo magnetico ( $\vec{B}$ ) perpendicolari al verso di propagazione.

La polarizzazione è la direzione del campo elettrico.

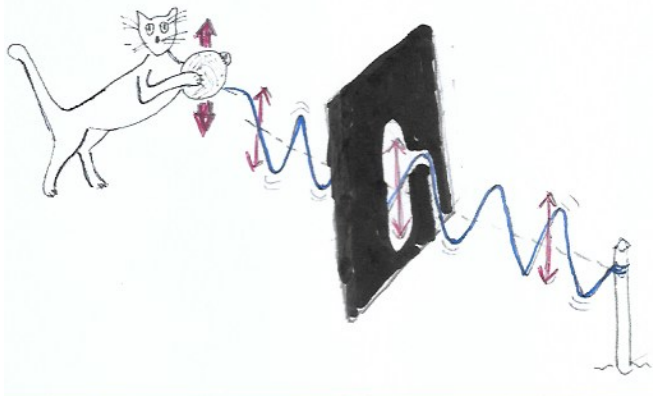
Gli elettroni hanno carica  $-e$  e vibrano sotto l'azione della forza

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

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



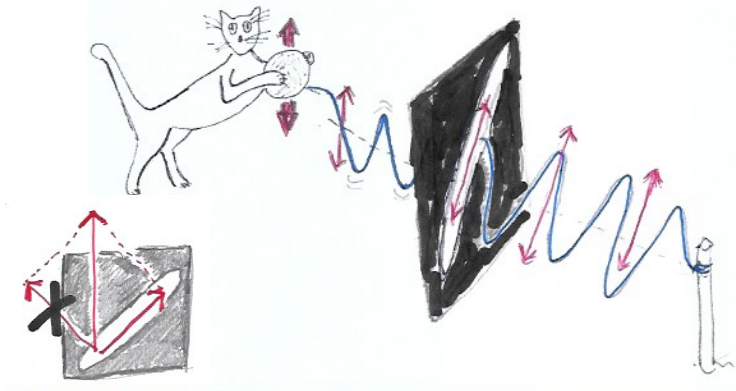
Analogo “meccanico” di un polarizzatore:  
uno schermo con una stretta fenditura fa passare vibrazioni  
parallele alla fenditura . . .



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



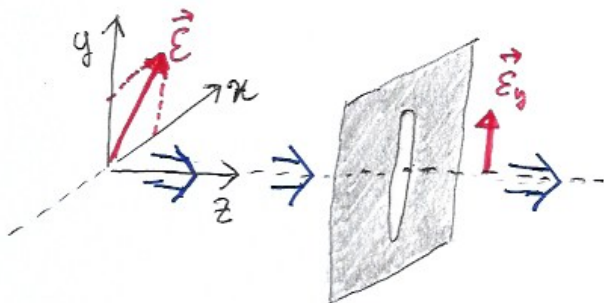
Se la vibrazione è **obliqua** rispetto alla fenditura, questa “seleziona” la **componente parallela** della vibrazione (ricordiamo che la vibrazione è descritta da un vettore!)



*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)

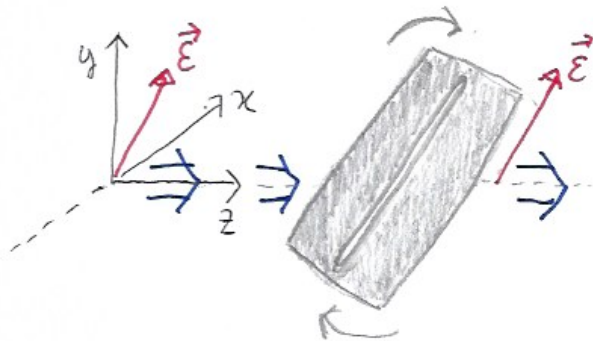


(Indichiamo d'ora in poi con  $\vec{e}$  il vettore polarizzazione generico, con  $\vec{e}_y$  e  $\vec{e}_x$  la polarizzazione “verticale” lungo  $y$  e “orizzontale” lungo  $x$  . . .)

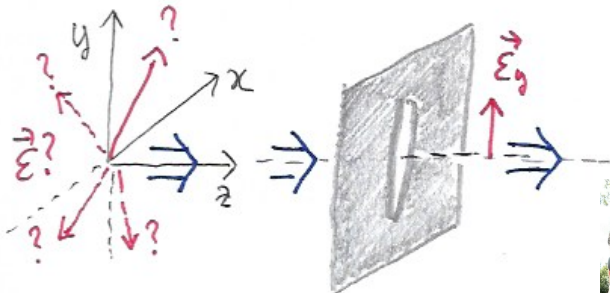


Possiamo allora usare un polarizzatore per:

- **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

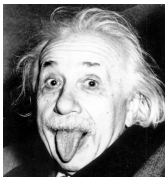


I **fotoni** ovvero i “quanti di luce”

*“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)*

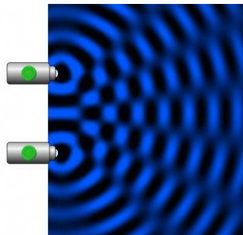


Oggi sappiamo che la luce è costituita da **fotoni** ovvero **particelle elementari** il cui stato individuale è descritto da energia, direzione del moto e **polarizzazione**.

## Dualismo onda-particella

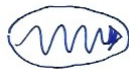
Nonostante l'ipotesi dei quanti spiegasse numerosi fenomeni incomprensibili per la teoria "classica" della luce, trovò resistenza all'implicazione di una natura "duale" dei fotoni: **sia onde, sia particelle.**

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".



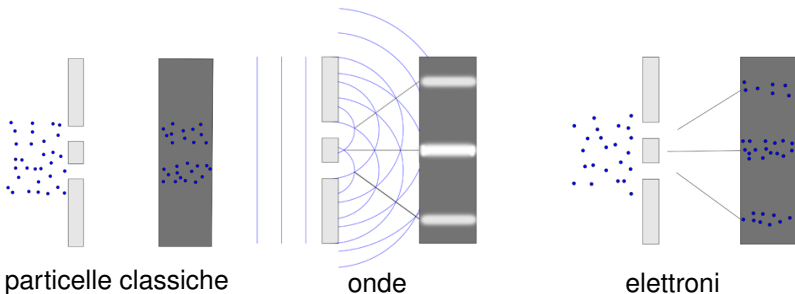
fonte: [www.golabz.eu](http://www.golabz.eu)

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](https://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=yKXzW6bjC8lI6ZK4](https://youtu.be/b0EChbwSuuQ?si=yKXzW6bjC8lI6ZK4)

Frequenza ( $\nu$ ) 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

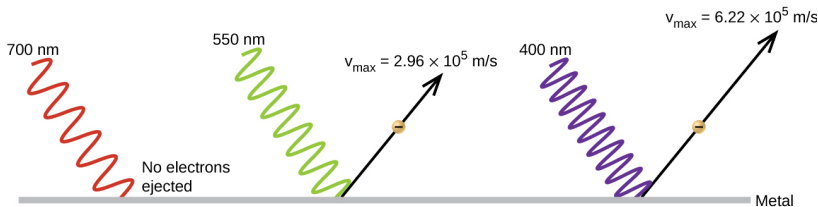
L'energia di un fotone è proporzionale a ( $\nu$ ) ovvero inversamente proporzionale a ( $\lambda$ ):  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  ( $h$ : costante di Planck)  
 convenientemente misurata in **elettronvolt**:  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$   
 per fotoni visibili varia da **1.65 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](https://legacy.cnx.org/content/col11760/1.9)

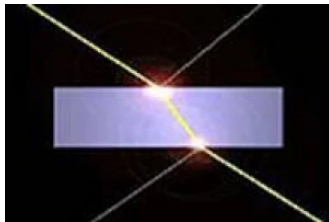
Nobel 1922 per la Fisica “*ad Alfred Einstein per i suoi servizi alla Fisica teorica e in particolare per la scoperta della legge dell’effetto fotoelettrico*”



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](http://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.

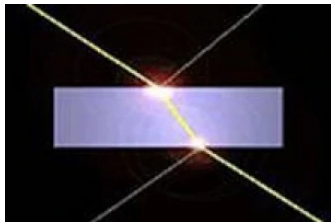


... ma un fotone non potrebbe *scindersi* in due?

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

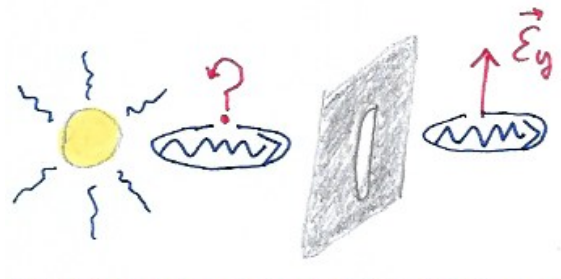
i raggi riflesso e trasmesso hanno lo stesso colore, quindi i fotoni nei due raggi hanno la stessa energia.

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

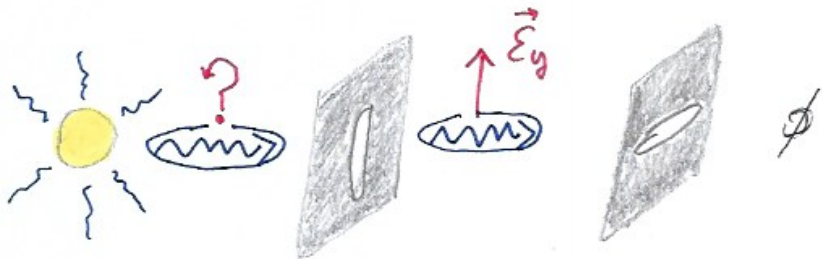


## Misure di polarizzazione con singoli fotoni

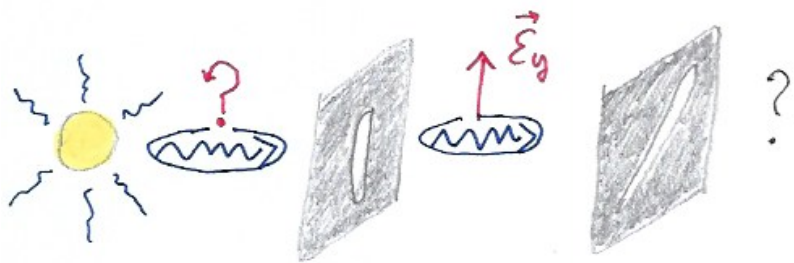
Usando luce molto attenuata e un polarizzatore “y” possiamo “preparare” un fotone con polarizzazione  $\vec{\epsilon}_y$  .  
Facciamo ripetute misure di polarizzazione su questi fotoni, *uno alla volta* . . .



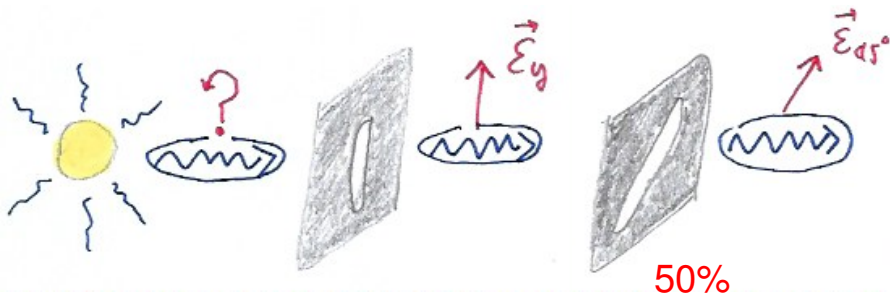
Mettendo in sequenza un polarizzatore “x” siamo sicuri di aver “preparato bene” lo stato  $\vec{e}_y$ : **non** osserviamo nessun fotone oltre il polarizzatore.  
Abbiamo “eliminato” i fotoni con polarizzazione  $\vec{e}_x$ ?



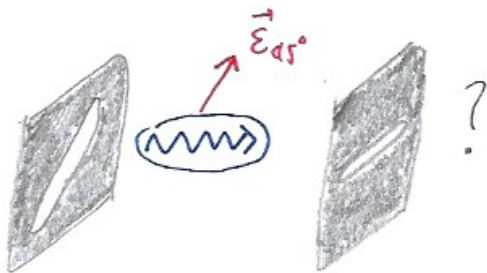
Cosa succede se mettiamo un polarizzatore **obliquo**?



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

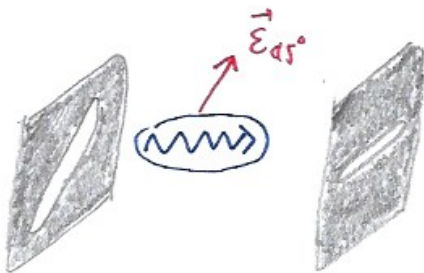


Cosa succede se il fotone polarizzato a  $45^\circ$  ripassa lungo il polarizzatore  $x$ ?



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

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



**50%**





## 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.

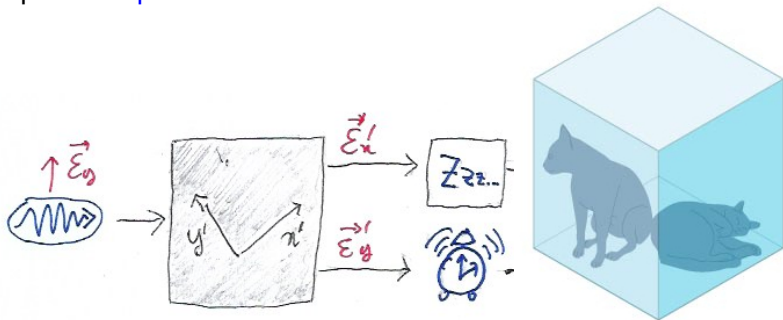
In fisica **quantistica**

**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?

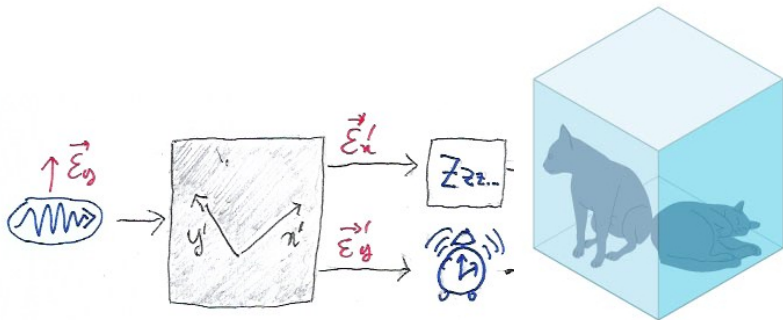
Gli effetti quantistici sono evidenti su scala **atomica**:  
non li vediamo manifestarsi per oggetti **macroscopici**  
come il gatto (che quindi o dorme o è sveglio con certezza?)  
Possiamo però “accoppiare” la scatola col gatto ad un  
dispositivo **quantistico** ...



... 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 ...)

