

**Relatività e Meccanica Quantistica: concetti e idee**  
**Relativity and Quantum Mechanics: concepts and ideas**



**Settimana 7**

**Lezione 7.1**

**Einstein, Podolsky e Rosen mettono in crisi  
la Meccanica Quantistica**

**Carlo Cosmelli**



## Einstein, Podolsky e Rosen: 25 marzo 1935



Il 25 marzo 1935 Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) pubblicano un articolo dal titolo:

### **La descrizione della Realtà della Meccanica Quantistica può considerarsi completa?**

Il punto, in breve, e per ora, è questo:

- La MQ dice che: la descrizione della realtà avviene tramite la funzione d'onda, che rappresenta TUTTA l'informazione che si può avere su di un sistema.
- E le previsioni sono probabilistiche.
- Tramite un esperimento mentale EPR dimostrano che in realtà la funzione d'onda NON descrive completamente un particolare sistema...
- Quindi la MQ è incompleta.

Ora vedremo di chiarire il significato dell'esperimento EPR, e come la «soluzione» sia stata trovata solo nel [1964 Bell - teo], [1982 Aspect //2015 Hensen et al. - exp] , stravolgendo la nostra idea di realtà.

## Nozioni preliminari: la polarizzazione della luce

La luce (composta da fotoni) può essere descritta come la propagazione di un'onda, il campo elettromagnetico.

La grandezza che «oscilla», in un'onda e.m., è il campo elettrico  $\mathbf{E}$  (oscilla anche il campo magnetico  $\mathbf{B}$ , ma ora non ci interessa).

### La polarizzazione della luce:

La polarizzazione della luce è la direzione di oscillazione del campo Elettrico.

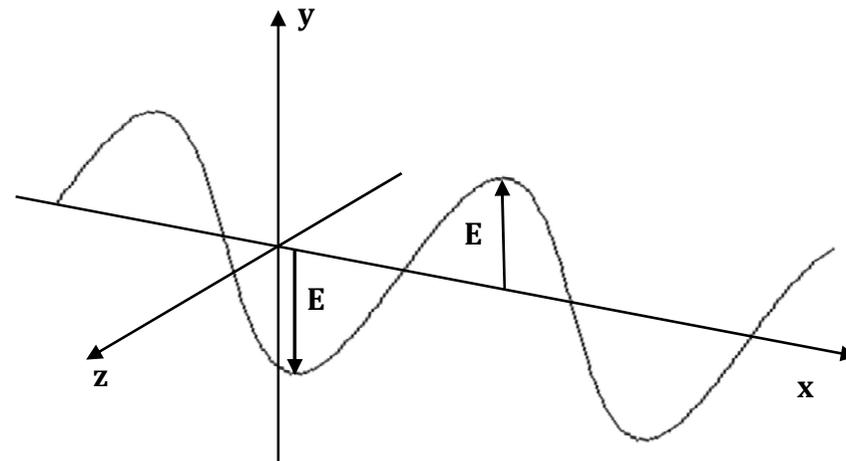
Se questa direzione è costante nel tempo il raggio di luce si dice polarizzato linearmente. E' il caso che considereremo. La direzione di polarizzazione si chiama «asse di polarizzazione»: lo chiameremo  $\mathbf{e}_F$

Esempio: il campo Elettrico oscilla lungo la direzione  $\mathbf{y}$ , la luce (il fotone) quindi ha polarizzazione  $\mathbf{e}_F = \mathbf{y}$ .

**(vedi molla)**



**Nota:** perché  $\mathbf{E}$  è perpendicolare al moto? 



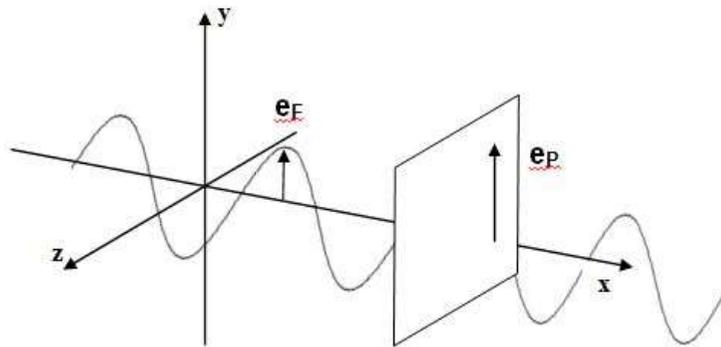
## Il polarizzatore - 1

Un **polarizzatore** è un elemento fisico, caratterizzato da una **direzione particolare**, la direzione del polarizzatore  $\mathbf{e}_p$ , che **seleziona la luce che incide su di esso, facendola passare tutta, nulla, o una parte**.



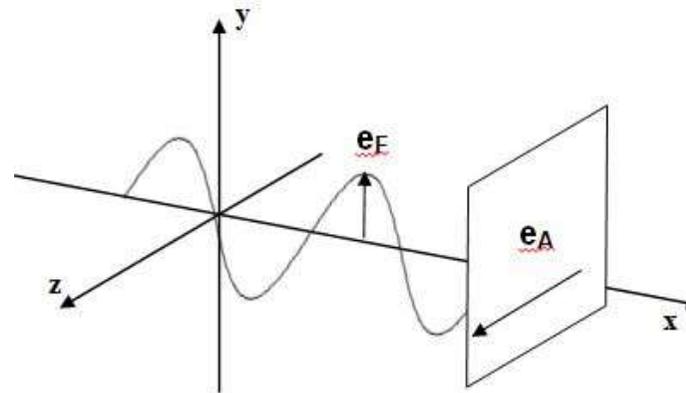
Se il polarizzatore  $\mathbf{e}_p$  viene investito da luce polarizzata  $\mathbf{e}_F$ , ho due casi limite:

$\mathbf{e}_p = \mathbf{e}_F \Rightarrow$  la luce passa



$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{E}_{\text{in}}$$

$\mathbf{e}_p \perp \mathbf{e}_F \Rightarrow$  la luce non passa



$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{0}$$

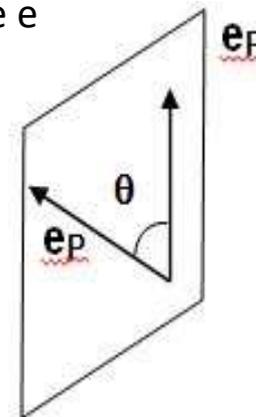
## Il polarizzatore – Tanti fotoni/1 fotone

Nel caso in cui il **polarizzatore faccia un angolo  $\theta$  con la polarizzazione del campo elettrico** passerà solo una parte della luce:

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} \cos \theta \quad \text{e} \quad I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \cos^2 \theta \quad ; \quad \text{ma} \quad \cos^2 \theta \leq 1, \quad \text{quindi} \quad I_{\text{out}} \leq I_{\text{in}}$$

Supponiamo di **inviare molta luce (tanti fotoni)** al polarizzatore e consideriamo tre casi particolari:

Direzione	$\theta$	$\cos \theta$	$\cos^2 \theta$	risultato
$e_p = e_A$	0	1	1	$I_{\text{out}} = I_{\text{in}}$
$e_p \perp e_A$	$90^\circ$	0	0	$I_{\text{out}} = 0$
$e_p \angle e_A$	$45^\circ$	$1/\sqrt{2}$	$1/2$	$I_{\text{out}} = I_{\text{in}}/2$



In ogni caso il polarizzatore non può «aumentare» la luce che gli arriva. Ma... 3P

Quindi se mandiamo **tanti fotoni e la polarizzazione è  $45^\circ$**  ne passano la metà

Ora se la luce è “tanta”, cioè ho tanti fotoni, l’intensità in uscita è semplicemente la metà di quella in ingresso, **ma se ho un solo fotone per volta, non può passare  $1/2$  fotone!! E allora?**

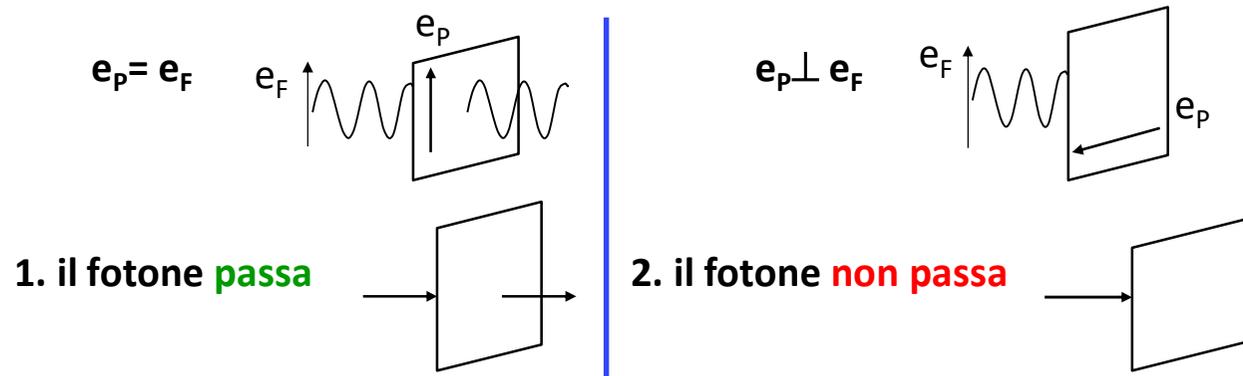


## L'interpretazione ortodossa della MQ (Copenhagen)

Quello che succede, e la relativa “spiegazione” è data dall'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica

- Ogni dispositivo di misura può dare solo alcuni risultati predeterminati (autovalori). Se l'oggetto è «semplice», allora è facile:

Nel caso di un fotone e del polarizzatore si hanno due soli risultati possibili:



Ad ognuno dei due risultati possibili (passa; non passa) corrisponde **un autostato** del sistema fisico da esaminare.



## Autovalori ed Autostati

Esempio: Polarizzatore con polarizzazione  $\mathbf{e}_p = \mathbf{y}$

I due **autovalori** sono “passa” ; “non passa”

Se l'**autostato** del fotone è  $\mathbf{e}_f = \mathbf{e}_p = \mathbf{y} \Rightarrow$  ho l'autovalore “**passa**”

Se l'**autostato** del fotone è  $\mathbf{e}_f \perp \mathbf{e}_p = \mathbf{y} \Rightarrow$  ho l'autovalore “**non passa**”

Se il sistema in esame è in un “**autostato**” sappiamo con **certezza il risultato della misura.**

Altrimenti possiamo solo sapere la **probabilità di ottenere un certo risultato.**

**Cioè: Cosa succede se il fotone fa un angolo qualunque  $\theta$  con il polarizzatore?**



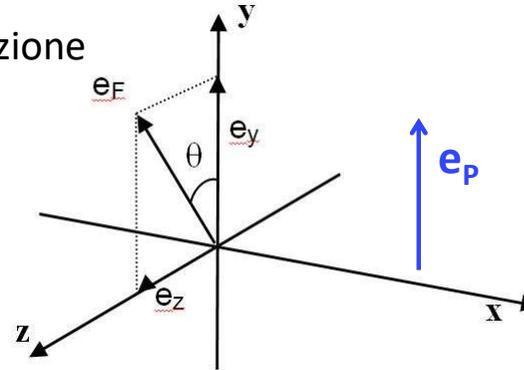
## Probabilità di un certo stato generico (difficile)



1. Si scompone lo stato del sistema in una combinazione lineare degli autostati del sistema di misura:

$$\Rightarrow \mathbf{e}_F = \mathbf{e}_y \cos \theta + \mathbf{e}_z \sin \theta$$

(Posso farlo perché in MQ posso sovrapporre gli stati, cioè le soluzioni del sistema)



Nota: nel disegno a sinistra la lunghezza di  $e_y$  e di  $e_z$  è disegnata errata, deve essere un pochino maggiore di quella indicata, infatti sia  $e_F$  che  $e_y$  ed  $e_z$  devono avere modulo 1.

2. La **probabilità** di ottenere un certo risultato (che deve essere uno degli autovalori del sistema di misura) è proporzionale al **quadrato del coefficiente del rispettivo autostato**:

Es. La probabilità di ottenere che **passi** ( $e_y$ ) è  $P(e_y) = \cos^2 \theta$

se  $\theta = 45^\circ$ , allora  $\cos^2 \theta = \frac{1}{2}$ ;  $P(45^\circ) = \frac{1}{2}$ : cioè **passa 1 fotone ogni 2**

**Il risultato è che il fotone, che aveva polarizzazione  $e_F$ , passa o non passa con una probabilità del 50%.**

## Cosa succede e cosa è successo



Il fotone che passa (tutti i fotoni che passano) risulta **polarizzato secondo la direzione del polarizzatore  $e_p$** .

C'è stato un brusco **cambiamento nello stato dei fotoni**:  $e_f \rightarrow e_p$ . Prima della misura il fotone era in una sovrapposizione di stati, poi cambia!

È il cosiddetto “collasso” della funzione d'onda del sistema.

Se avessi scelto un polarizzatore con un asse di polarizzazione diverso, il fotone che usciva sarebbe stato diverso.

Il **misuratore** (l'interazione del sistema quantistico con il sistema “esterno”) **cambia lo stato del sistema fisico**.

**Le probabilità (a priori) si realizzano in un risultato certo (a posteriori).**

**La misura modifica il sistema in esame.** (vedi 2 polarizzatori + schermo)

# La visione del mondo della Relatività e della Meccanica Quantistica

Settimana 7

Lezione 7.2

Stati a due fotoni

( la prima di due lezioni difficili)



**Carlo Cosmelli**



**coursera**

## La notazione di Dirac - 1



- Consideriamo un generico stato  $\psi$  di un fotone creato come somma di due stati diversi 1 e 2:

$$\psi = a_1 \psi_1 + a_2 \psi_2$$

Es.  $\psi_1 = \text{"V"}$  può essere lo stato di un fotone con polarizzazione **V**erticale  $\uparrow$  e  
 $\psi_2 = \text{"O"}$  lo stato di un fotone con polarizzazione **O**rizzontale  $\leftarrow$

- Le probabilità di ottenere uno dei due stati, **se venissero misurati**, sono:

$$P_1 = P(\psi_1) = [a_1]^2 \quad \text{e} \quad P_2 = P(\psi_2) = [a_2]^2$$

- Nella notazione di **Dirac** lo stato  $\psi$  si scrive:

$$|\psi\rangle = a_1 |\psi_1\rangle + a_2 |\psi_2\rangle$$

I fattori  $a_1$  e  $a_2$  sono i coefficienti che determinano la probabilità di ottenere il valore descritto da  $\psi_1$  e  $\psi_2$

Le  $|\psi\rangle$  sono le funzioni d'onda che descrivono gli stati 1 e 2.

## La notazione di Dirac - 2



Per esempio nel caso di **un fotone, polarizzato** V = Verticalmente  
(O = Orizzontalmente) :

**|V>**: E' lo stato di un fotone che passa al 100% un test con un polarizzatore Verticale.  
Dopo il test il fotone sicuramente sarà Verticale.

**|O>**: E' lo stato di un fotone che passa al 100% un test con un polarizzatore Orizzontale.  
Dopo il test il fotone sarà sicuramente Orizzontale

Per un fascio di luce con polarizzazione a 45° si avrà:  $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|V\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|O\rangle$

$$P(\text{"passa V"}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2} = 50\% \quad P(\text{"passa O"}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2} = 50\%$$

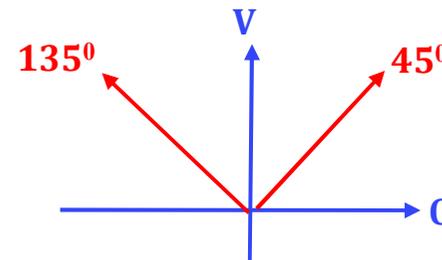
## Le direzioni che utilizzeremo negli esperimenti

Nel grafico sono indicate le direzioni delle due coppie di assi relativi alla polarizzazione dei fotoni o dei polarizzatori che verranno utilizzati:



Considereremo due polarizzatori, con due coppie di assi ortogonali:

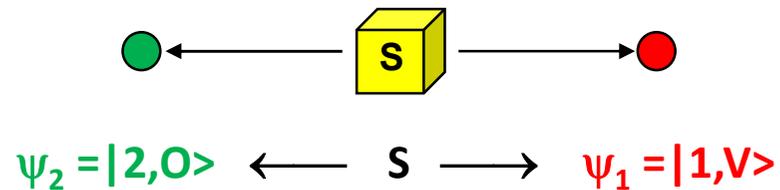
- 1) La coppia **(V,O)**: Verticale a  $90^\circ$ , Orizzontale a  $0^\circ$ .
- 2) La coppia ruotata di  $45^\circ$ : le diagonali a  $45^\circ$  e a  $135^\circ$ .



## Misure di polarizzazione su coppie di fotoni

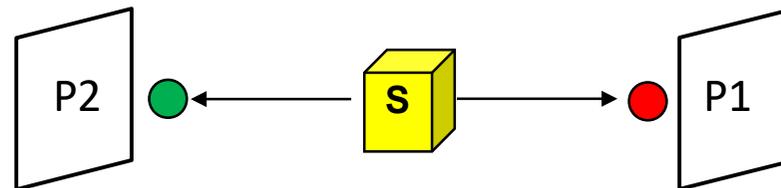


Consideriamo una sorgente **S** che, opportunamente eccitata, emetta **due fotoni indipendenti 1 e 2**, uno con polarizzazione verticale **V** e l'altro con polarizzazione orizzontale **O**, in direzioni opposte.



Lo stato totale dei due fotoni sarà descritto dalla funzione d'onda totale:  $|\psi\rangle = |1, V\rangle \cdot |2, O\rangle$

Inseriamo ora due polarizzatori lungo il cammino dei due fotoni, e facciamo **tre test di polarizzazione** sui due fotoni, **cambiando l'asse di polarizzazione di uno dei polarizzatori**.



## Misure di polarizzazione

$P(0)$ ,  $P(V)$  e  $P(45^\circ)$  sono dei polarizzatori con l'asse di polarizzazione diretto rispettivamente **Orizzontalmente**, **Verticalmente** o a  **$45^\circ$**



Risultato	Polarizzatore 2	Sorgente di 2 fotoni indipendenti	Polarizzatore 1	Risultato
[passa al 100%]	← $P(0)$	$ 2,0\rangle \leftarrow S \rightarrow  1,V\rangle$	$P(V) \rightarrow$	[passa al 100%]
[passa al 100%]	← $P(0)$	$ 2,0\rangle \leftarrow S \rightarrow  1,V\rangle$	$P(0) \rightarrow$	[non passa al 100%]
[passa al 100%]	← $P(0)$	$ 2,0\rangle \leftarrow S \rightarrow  1,V\rangle$	$P(45^\circ) \rightarrow$	[( <b>non</b> ) passa al 50%]

“**passa al 50%**” significa che se ripeto la misura 100 volte, otterrò “**in media**” che passerà 50 volte.

Se faccio una sola misura avrò la **probabilità del 50%** che il fotone passi o che non passi, quindi sul risultato della singola misura **non posso fare previsioni certe**.



## Scomposizione della funzione d'onda

Perché nel terzo caso il fotone  $|1, V\rangle$  passa o non passa al 50%?

Scomponiamo lo stato  $|1, V\rangle$

secondo le due direzioni  $45^\circ$  e  $135^\circ$ :  $|1, V\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|1, 45^\circ\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1, 135^\circ\rangle$



Otteniamo così per  $\psi$ , **stato di partenza dei due fotoni**, la seguente espressione:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|1, 45^\circ\rangle \cdot |2, O\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1, 135^\circ\rangle \cdot |2, O\rangle$$

Ora la **probabilità che il fotone 1 passi il test con  $P(45^\circ)$**  è:  $P(1, 45^\circ) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2} = 50\%$

**Ma cosa succede dopo la misura se il fotone passa il test  $P(45^\circ)$  ?**

## Collasso della funzione d'onda dopo la misura

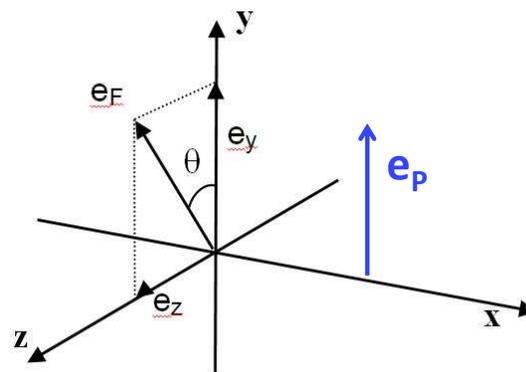
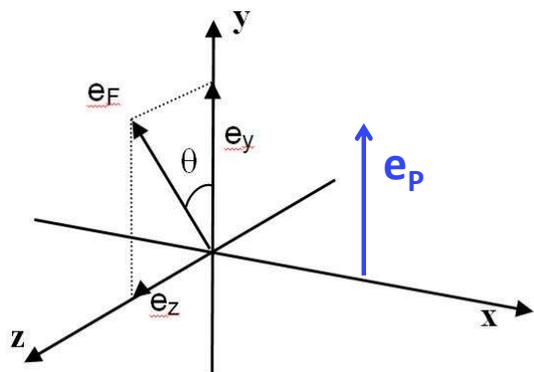
Se il fotone **supera il test**, subito dopo la misura, avrò avuto il **collasso della funzione d'onda** nello stato di uscita, il fotone avrà **acquisito con certezza la polarizzazione a  $45^\circ$** , e la funzione d'onda sarà diventata:

$$|\psi\rangle = |1, 45^\circ\rangle \cdot |2, 0\rangle$$

Cioè, essendo il fotone a  $45^\circ$ , non ho più la parte di  $|\psi\rangle$  che descriveva lo stato del fotone 1 a  $135^\circ$ , mentre il fotone 2 non è stato influenzato, continua a essere «0»



# disegni



**La visione del mondo  
della Relatività e della Meccanica Quantistica  
Settimana 7**

**Lezione 7.3  
Stati entangled (interlacciati)  
L'EPR  
( la seconda di due lezioni difficili)**

**Carlo Cosmelli**



## Stati entangled (interlacciati), la caratteristica peculiare della MQ. 1.



Supponiamo ora di creare i seguenti stati, uno stato con i due fotoni entrambi  $|V\rangle$  ed un altro con i due fotoni entrambi  $|O\rangle$ .

$$|\Phi\rangle = |1, V\rangle \cdot |2, V\rangle \quad |\Lambda\rangle = |1, O\rangle \cdot |2, O\rangle$$

Ora creiamo lo **stato somma (sovrapposizione lineare)** dei due precedenti, con percentuale del 50%:

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

- Un test di polarizzazione Orizzontale o Verticale sul fotone 1, oppure sul fotone 2 darà **sempre una probabilità del 50%** di trovare O oppure V.  
Se trovo che il fotone 1 ha passato il test **V**, allora «dopo la misura» avrò:  $|\psi\rangle = (|1, V\rangle \cdot |2, V\rangle)$
- **Il risultato sarà lo stesso per tutti e due i fotoni, sempre.**

## La caratteristica degli Stati Entangled

Ripetiamo il test, con polarizzatori diversi:

Se, sullo stesso sistema, faccio un test di polarizzazione con due polarizzatori a  $45^\circ$  oppure a  $135^\circ$  otterrò: (il calcolo non è facile, lo saltiamo)

$$P_1(45) = P_2(45) = 50\% \quad P_1(135) = P_2(135) = 50\%$$

Questo ragionamento vale per **qualsunque altra coppia** di direzioni ortogonali:  $(20^\circ, 110^\circ)$ ,  $(30^\circ, 120^\circ)$ ,  $(110^\circ, 200^\circ)$ ...

- Ognuno dei due fotoni ha una Probabilità  $P=50\%$  di passare un test lungo una **qualsiasi direzione** arbitraria: **SEMPRE**.
- Ma il risultato sarà **lo stesso** per tutti e due i fotoni. **SEMPRE**



## Stati entangled (interlacciati) 2.



- Ognuno dei due fotoni ha una Probabilità  $P=50\%$  di passare un test lungo una **qualsiasi direzione** arbitraria  $\theta$  : **SEMPRE**.
- Ma il risultato sarà **lo stesso** per tutti e due i fotoni. **SEMPRE**

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |\Phi\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\Lambda\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1, \theta\rangle \cdot |2, \theta\rangle) + \frac{1}{\sqrt{2}} (|1, \theta + 90^\circ\rangle \cdot |2, \theta + 90^\circ\rangle)$$

Se misuro 1:  $P(1, \theta) = 50\%$  ..... dopo la misura di 1:  $|\psi(2)\rangle = |\psi(1)\rangle$

Analogamente per il fotone 2:  $P(2, \theta) = 50\%$  ... dopo la misura di 1:  $|\psi(1)\rangle = |\psi(2)\rangle$

## Stati entangled – conclusioni 1



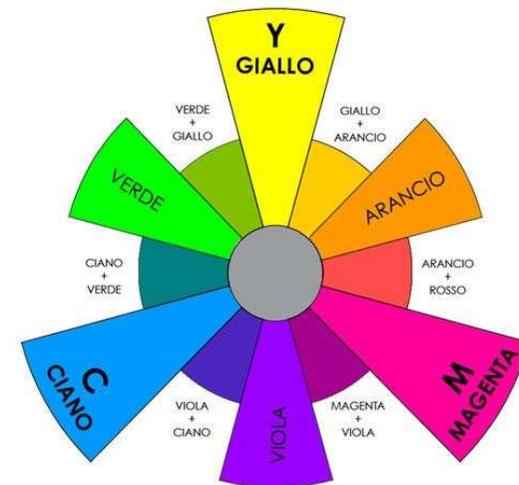
- Non esiste alcuna direzione in cui la Polarizzazione possa essere prevista con certezza.
- Ma in ogni caso il risultato ottenuto per qualunque test è lo stesso per tutti e due i fotoni.

“Entangled” sta appunto a significare questa caratteristica di “interlacciamento” fra due «particelle» (fotoni, elettroni, atomi...molecole).

ATTENZIONE: non è una correlazione «classica».

- I calzini di Mr. Bertlmann (vedi slide successiva)
- Due guanti....mano sinistra e mano destra.

La correlazione che ho è come se avessi due palline di due colori complementari, e che potessi fare dei test su qualunque coppia di colori, trovando sempre un 50%....per qualunque coppia di colori che andassi a sottoporre a test: [blu-arancio] , [verde-magenta] [viola-giallo], [x, y]....



## Stati entangled – conclusioni 2



Il fisico Reinhold Bertlmann indossava sempre calzini di colori diversi (verdi- rossi)

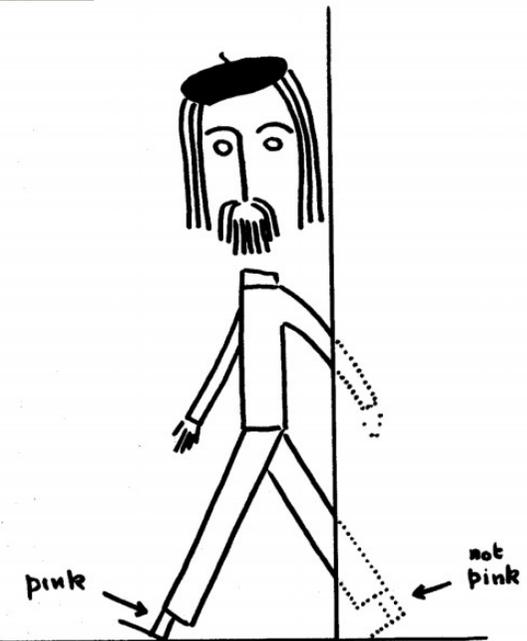


Il fatto di «vedere» (misurare) il colore di un calzino, dava subito un'informazione certa sul colore dell'altro. Ma non c'è nulla di sensazionale...il colore dei calzini era noto e fissato a priori.

Fig 1

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

Fondation Hugot  
juin 17 1990



Ora siete pronti per vedere come Einstein & C. distrussero la MQ (per un po'): EPR 1935



Premesse e definizione dei termini:

### Realismo

Se, **senza disturbare** in alcun modo un sistema, è possibile **prevedere con certezza** il risultato di una misura di un'osservabile del sistema, **indipendentemente da qualunque osservatore e dal fatto che la misura in questione venga fatta oppure no**, allora il sistema possiede la relativa proprietà, che sarà quindi un elemento di realtà fisica.

### Località Einsteiniana

Gli elementi di realtà fisica posseduti oggettivamente da un sistema non possono venire influenzati **istantaneamente** a distanza. [vale la RS: impossibilità di segnali che viaggiano a velocità  $v > c$ ]

### Completezza (di una teoria)

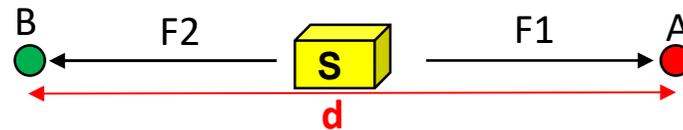
Ogni elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica.  
[Nota: non viceversa - Modello Standard e Higgs, ma gravità e Mercurio]

**Nell'articolo EPR gli autori assumono l'ipotesi di località  
per tutti i processi fisici**

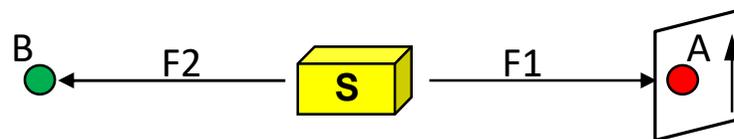
## L'argomento EPR: attenzione, non è la trattazione originale di Einstein! A.E. utilizza $[x,p]$

1. Assumiamo uno stato composto da **due fotoni entangled**:  $\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [|1, V\rangle \cdot |2, V\rangle + |1, 0\rangle \cdot |2, 0\rangle]$

2. **Allontaniamo i due fotoni** fin quando saranno, al tempo  $t$ : il **fotone 1 in A**, il **fotone 2 in B**.  $[AB=d]$



3. Eseguiamo, al tempo  $t$  e nel punto **A**, un test di polarizzazione sul fotone **1** con un polarizzatore verticale **V**:



**Se** il fotone 1 passa il test,

un istante  $dt$  dopo la misura su 1 lo stato del sistema sarà:  $\psi(t + dt) = |1, V\rangle \cdot |2, V\rangle$

4. Quindi l'osservatore in **A**, solidale con il polarizzatore A, **potrà prevedere con certezza, senza disturbarlo**, che il fotone **2**, se facessi una misura in **B** al tempo  $t + \Delta t$ , con  $\Delta t \ll t_c$ , passerebbe un test di polarizzazione verticale con la probabilità del 100%.

[cioè la luce, per andare da A a B, ci metterebbe un tempo  $t_c = \frac{d}{c} \gg \Delta t$ ]

## L'argomento EPR: le conclusioni



5. Quindi il fotone 2 ha un **elemento di realtà fisica, la polarizzazione V** (vedi definizione di realismo).

6. Ma, **per l'ipotesi di località, la misura in A non può aver influito sul fotone 2**, (un segnale alla velocità della luce...non arriva in tempo) quindi il fotone 2 possedeva questa proprietà anche prima della misura fatta all'istante  $t$ , indipendentemente dalla misura fatta sul fotone 1.

7. Quindi **c'è un elemento di realtà che la teoria non è in grado di descrivere.**

**8. Quindi la teoria (la MQ) è incompleta.**

Cosa scrive A. Einstein chiudendo l'articolo: *"Mentre noi abbiamo mostrato che la funzione d'onda non fornisce una descrizione completa della realtà fisica, abbiamo lasciato aperta la questione se una descrizione siffatta esista o no. Tuttavia noi crediamo che una teoria di questo genere sia possibile"*.

*COMMENTI VARI: Bohr, Born, Popper*

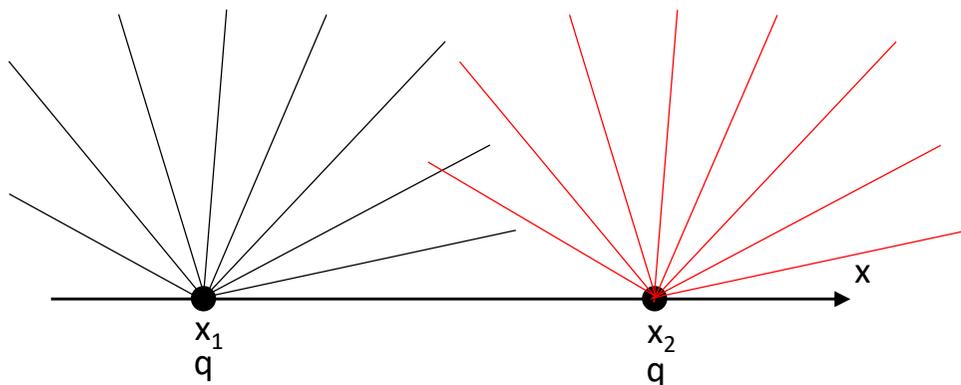
**Altre teorie non sono state trovate, né è stato trovato un completamento della teoria.**

**Questa obiezione ha resistito fino al 1982**



## La direzione del campo Elettrico - I

Il campo elettrico delle due cariche ferme in  $x_1$  e  $x_2$  è radiale



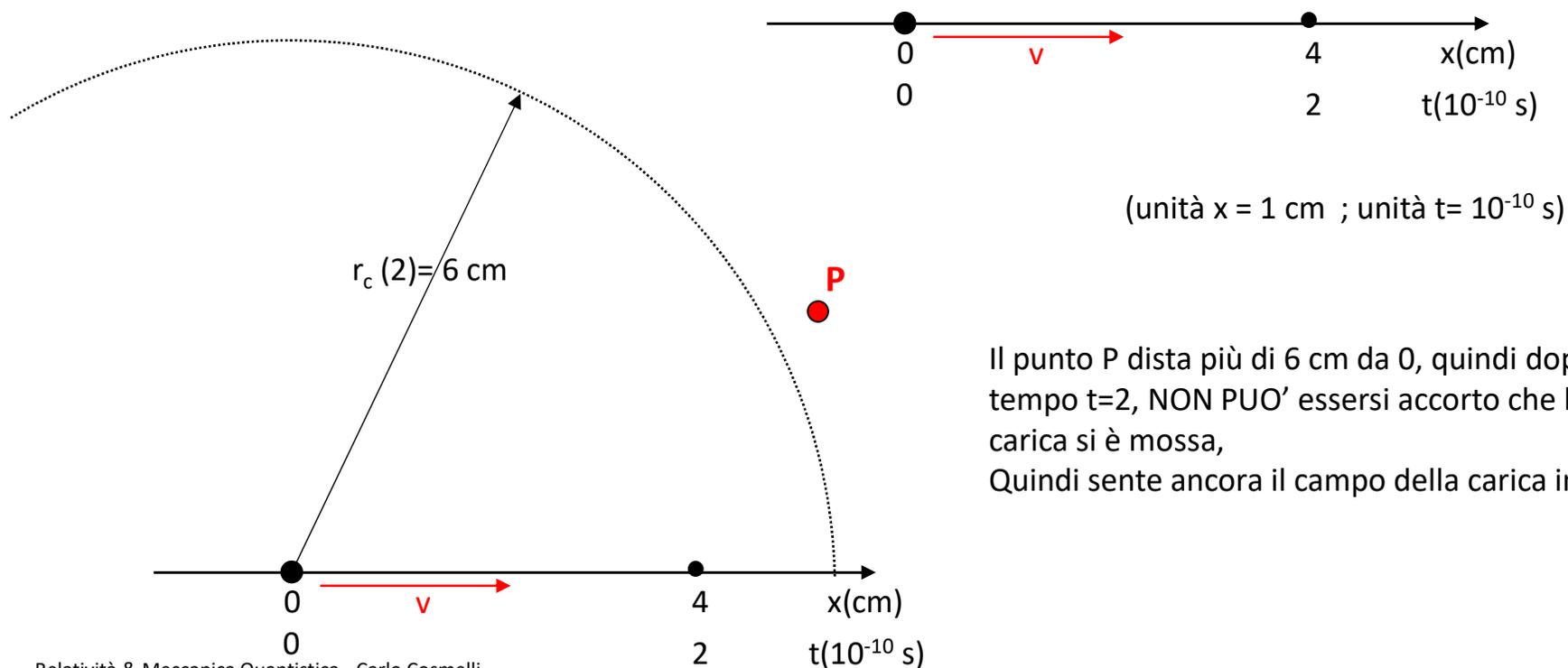
Se ho una sola carica in  $X_1$  e la porto in  $X_2$ , con velocità  $v$ , cosa succede al campo  $E$ ?

- La velocità di  $q$  sia  $v = \frac{2}{3}c = 2 \cdot 10^8$  m/s

- Il tempo necessario per percorrere 1 cm sarà:  $t(1\text{cm}) = \frac{1\text{ cm}}{v} = \frac{1\text{ cm}}{\frac{2}{3}c} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-10}$  s

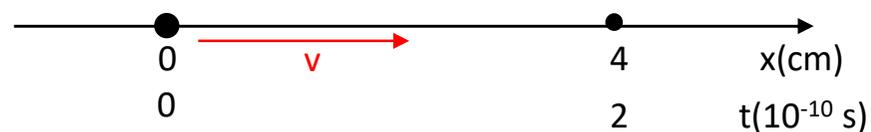
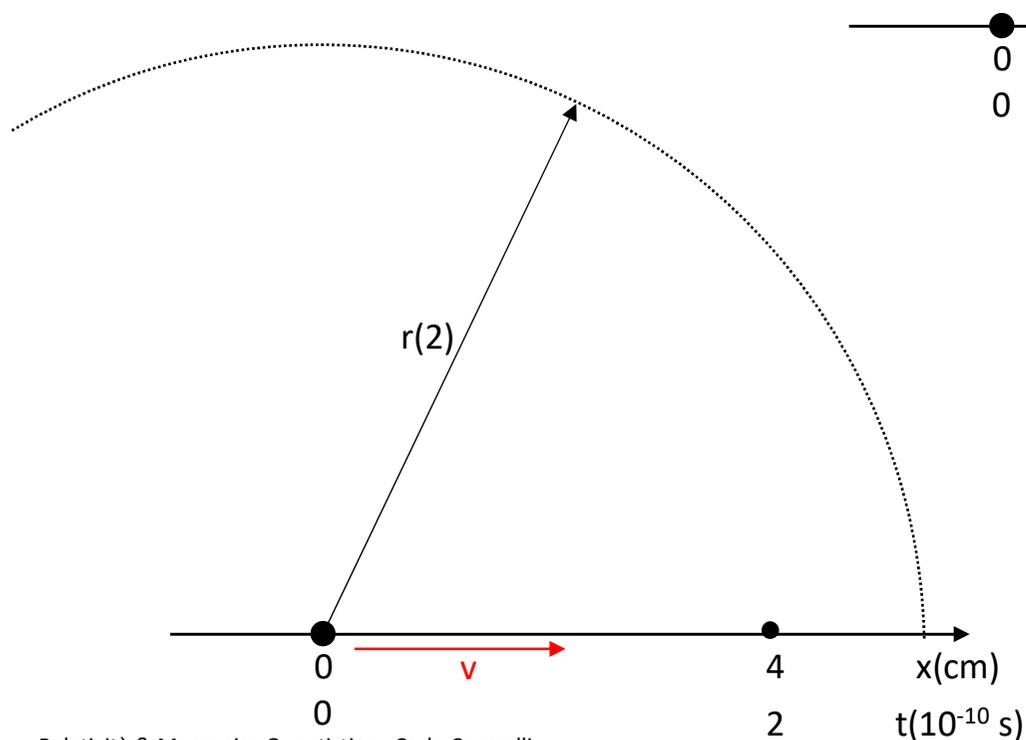
## La direzione del campo Elettrico - II

- Il tempo necessario per percorrere 1 cm sarà:  $t(1\text{cm}) = \frac{1}{2} 10^{-10} \text{ s}$
- Il tempo necessario per percorrere 4 cm sarà :  $t(4\text{cm}) = 2 \cdot 10^{-10} \text{ s}$
- Dopo  $t = 2 \cdot 10^{-10} \text{ s}$  la luce avrà percorso  $r_c(2 \cdot 10^{-10} \text{ s}) = ct = 6 \text{ cm}$

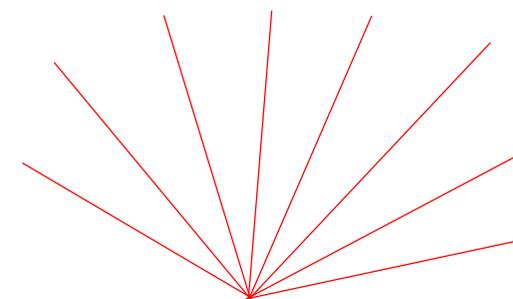


## La direzione del campo Elettrico - III

- Il tempo necessario per percorrere 1 cm sarà:  $t(1cm) = \frac{1}{2} 10^{-10} s$
- Il tempo necessario per percorrere 4 cm sarà :  $t(4cm) = 2 10^{-10} s$
- Dopo  $t = 2 10^{-10} s$  la luce avrà percorso  $r(2 10^{-10} s) = ct = 6 cm$



(unità  $x = 1 cm$  ; unità  $t = 10^{-10} s$ )



## La direzione del campo Elettrico - III



- Le linee del campo elettrico si raccordano in una piccola corona sferica di raggio  $ct$  il cui spessore dipende dalla velocità con cui il corpo ha accelerato.

- Il campo statico è radiale
- Il campo dinamico, che si sposta nel tempo con velocità  $c$ , è perpendicolare alla direzione di propagazione...è un'onda elettromagnetica

