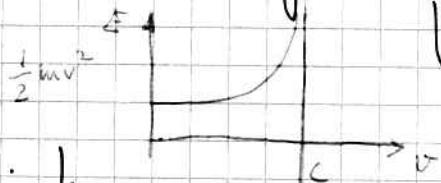


Energia Relativistica

Per mantenere invariante E per trasformazioni di Lorentz

definendo $E \equiv M_0 c^2 \gamma = \frac{M_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$



si ha:

Energia Totale Relativistica di una particella di massa M_0 .

$$E^2 - p^2 c^2 = M_0^2 c^4 \quad [\text{Invariante}]$$

$$e \quad \vec{p} = \vec{v} \frac{E}{c^2} = \frac{E \beta}{c} \begin{cases} m_0 \neq 0 = M_0 \beta \gamma c \\ m_0 = 0 = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \end{cases}$$

Articolo (1905) vol 18 p. 639-641

"Se un corpo emette, sotto forma di radiazione, un'energia E , la sua massa diminuisce di $\frac{E}{c^2}$ "

"La radiazione trasferisce inerzia..."

$$\text{Scrivendo } E(v \ll c) \approx M_0 c^2 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots \right] \quad \left(\frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} \right)$$

$$= M_0 c^2 + \frac{1}{2} M_0 v^2 + \dots$$

Energia
(Propria)
dovuta a M_0

Energia
Cinetica

Energia Relativistica

Per mantenere invariante $\mathcal{E}$ per trasformazioni di Lorentz

definendo $\mathcal{E} \equiv M_0 c^2 \gamma = \frac{M_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

si ha:



Energia Totale Relativistica di una particella di massa M_0 .

$$\mathcal{E}^2 - p^2 c^2 = M_0^2 c^4 \quad [\text{Invariante}]$$

$$e \quad \vec{p} = \vec{v} \frac{\mathcal{E}}{c^2} = \frac{\mathcal{E} \vec{\beta}}{c} \begin{cases} m_0 \neq 0 = M_0 \gamma \vec{\beta} c \\ m_0 = 0 = \frac{\mathcal{E}}{c} = \frac{h\nu}{c} \end{cases}$$

Articolo (1905) vol 18 p. 639-641

"Se un corpo emette, sotto forma di radiazione, un'energia $\mathcal{E}$, la sua massa diminuisce di $\frac{\mathcal{E}}{c^2}$ "

"La radiazione trasferisce inerzia..."

$$\text{Scrivendo } \mathcal{E}(v \ll c) \approx M_0 c^2 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \dots \right]^{\frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4}}$$

$$= M_0 c^2 + \frac{1}{2} M_0 v^2 + \dots$$

↑
Energia
(Propria)
dovuta a M_0

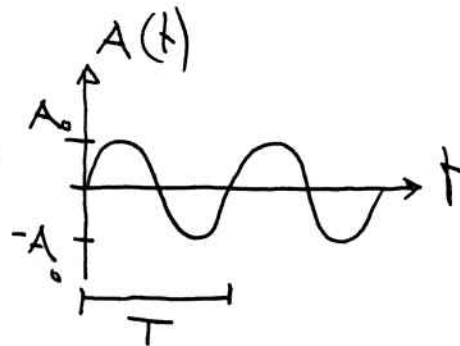
↑
Energia
Cinetica

Onde - oscillazioni

$$A(x, t) = A_0 \sin \omega_0 t \cdot \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$$

$x = 0$ (x fissato)

$$A(t) = A_0 \sin \omega_0 t$$



$T = \text{periodo}$

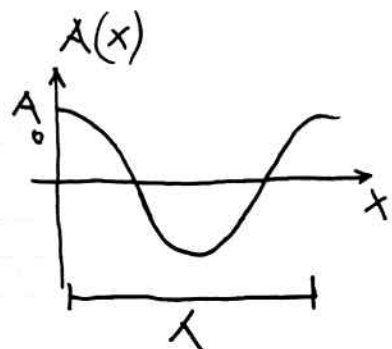
$$\frac{1}{T} = \text{frequenza} = \nu$$

$$\omega_0 = \text{pulazione} = 2\pi \nu$$

$$k = \frac{\pi}{2\omega_0}$$

$t = \text{fissato}$

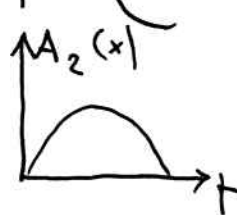
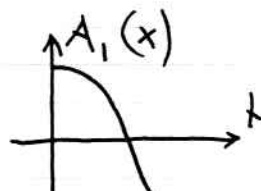
$$A(x) = A_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$$



$$A_1(x) = \cancel{A_1} \cos \omega_1 t$$

$$A_2(x) = \cancel{A_2} \cos(\omega_1 t + \varphi)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$



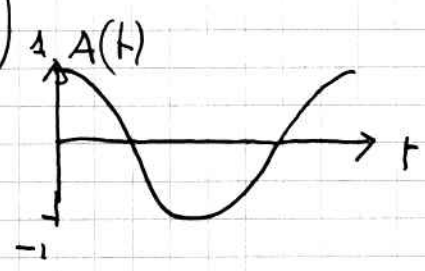
$$\begin{aligned} A_1(x) + A_2(x) &= \cancel{\frac{1}{2}} \cos \left(\frac{2\omega_1 t + \varphi}{2} \right) 2 \cos \frac{1}{2} (2\omega_1 t + \varphi) \cos \frac{1}{2} (-\varphi) \\ &= 2 \cos \left(\omega_1 t + \frac{\varphi}{2} \right) \cos \frac{\varphi}{2} \end{aligned}$$

Onde

definizione T, v, ω, λ funzione oscillante x, t
 $\cos \sin$

In un punto $A(t) = A_0 \cos \omega_0 t$
 $B(t) = B_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$ angolo

$t = 0$ $A(0) = A_0$
 $B(0) = B_0 \cos \varphi$

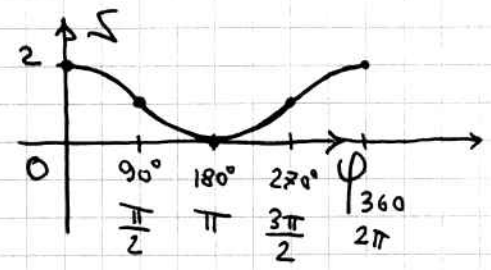
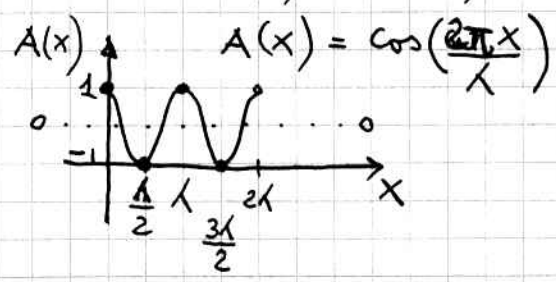


$\varphi = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$

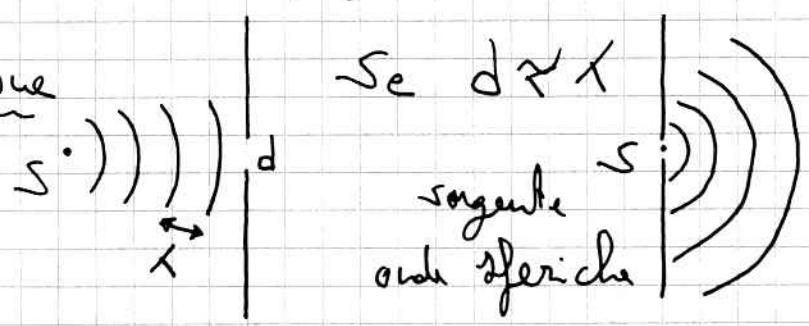
$B(0) = 0$



$S = A(t) + B(t) = 1 + \cos \varphi$



Diffrazione



Interferenza

Somma di onde con la stessa frequenza

Probabilità [Teorica] [Valutazione Combinatoria]

eventi semplici // tutti // incompatibili

P. di un evento "casuale"

↳ può avere più modalità

→ ripetendolo "identico" ha risultati diversi

- Anche se i singoli valori sono "casuali", le medie hanno valori definiti, sempre meno differenti all'aumentare delle misure.

Definizione; calcolo p; caso eventi definiti in tipo e numero:

$$\left. \begin{array}{l} N = \text{Numero eventi totale} \\ n = \text{numero eventi "favorevoli"} \end{array} \right\} p(n) = \frac{n}{N}$$

Ex: Dado a 6 facce

Evento: 1 lancio

$N = \text{Numero eventi possibili} = 6$ [1, 2, 3, 4, 5, 6]

$n = \text{Evento favorevole: uscita "6"} = 1$

$$p = \frac{1}{6}$$

$n = \text{Evento favorevole: uscita numero pari [2, 4, 6]} = 3$

$$p = \frac{3}{6} = \frac{1}{2} = 50\%$$

Frequenza: [Statistica]

[faccio]; eseguo "N" prove; conto "n" (sperimentale)

$$f = \frac{n}{N}$$

$$[Per N \rightarrow \infty |f - p| < \varepsilon]$$

Valutazione n_e aspettati

Evento con probabilità $p(e)$
 Numero "Lanci" o "prove" = N

$$n_e(\text{aspettati}) = N \cdot p(e)$$

Esempio: Torte o Groce $p(T) = \frac{1}{2}$

faccio $N_{\text{ lanci}}$ $N = 200$

$$\text{mi aspetto } n_e(T) = N \cdot p(T) = 200 \times \frac{1}{2} = 100 \text{ Torte}$$

Inferenza Bayesiana

$P(\text{Bayesiana}) \equiv$ grado di fiducia soggettivo da parte del ricercatore

Si modifica con il seguirvi delle osservazioni

$$P(Bay)$$

$$\rightarrow \lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

$$\text{Wien: } u = \frac{a \nu^3}{e^{\frac{b \nu}{T}}}$$

$$\text{Planck } \langle \epsilon \rangle = \frac{h \nu}{e^{\frac{h \nu}{k T}} - 1}$$

$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ S.I.}$$

$$\text{Stefan-Boltzmann } \dot{E} = \sigma T^4 \quad \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Rayleigh-Jeans

$$u(\nu, T) = \frac{8 \pi \nu^2}{c^3} k T$$

MQ - Schema

39 bis

- Problemi in fisica classica 40
- Soluzioni in ordine cronologico 40-41

- Prerequisiti:

- Cosa è un'onda, $[A, \nu, T, \lambda, \phi]$
- Interferenza
- Diffrazione
- Luce: onda trasversale; $A = E$
Polarizzazione $I = A^2$

- Perché una teoria completamente diversa e
la difficoltà oggettiva

- CM, Newton: o.k. "poche" particelle $\nleftrightarrow$ No attriti
↳ + Termodinamica: "tante" particelle $\rightarrow$ medie
calore, Temperatura $\rightarrow$ irreversibilità
 $\rightarrow$ direzione fenomeni naturali
↳ + Maxwell, e.m.: luce come onde e.m.

- Relatività [vvc]: $c = \text{costante}$ $\nleftrightarrow$ s, t relativi
in sistemi I.

- QM:
 - Nuova rappresentazione degli elementi di realtà
(onde; matrici) microscopici
 - Problemi di "interpretazione" con il senso comune
 - Principi (x)
 - Limitazione sulla conoscenza

→ • Esperimento Feynman palla hole

→ Principi; discussione $\rightarrow$ (soluzioni 41)

Sovrapposizione $\nleftrightarrow$ Corrispondenza

Indeterminazione $\nleftrightarrow$ Collasso

Meccanica Quantistica [non relativistica]

(40)

Problemi [GCG cap. 1] - Effetto fotoelettrico $I \propto V$ con $V > V_s$
 $I \propto \text{Ampere}$

- Colore oggetti f (Temperature) ? Non torna
- Emissione radiazione corpo nero: calcolo $\rightarrow \infty$
- a Proprietà atomi: costanti, perché? Sistema planetario, ma con orbite "assolutamente" costanti
- b Sistema planetario: togliendo un solo elettrone, quello esterno, le modifiche sono molto maggiori che togliendone molti $\begin{matrix} 10 \\ \text{Ne} \\ 53 \\ \text{I} \neq 54 \\ \text{Xe} \end{matrix}$
- Gli elettroni non cadono nel nucleo $\rightarrow$
(Rutherford 1911) ruotano $\rightarrow a \neq 0 \rightarrow$ irradiano $\rightarrow$ perdono E.

Soluzioni (QM)

Planck (1900): L'Energia viene scambiata per multipli $h \cdot \nu$. Un campo di radiazione scambia energia con la materia per multipli di $h \cdot \nu$. $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Einstein (1905): "fotone", l'energia della luce è distribuita nello spazio con discontinuità $E = h \cdot f$

Bohr (1912): Elettroni solo su alcune orbite. Ogni orbita può accogliere un numero massimo di elettroni.

$\rightarrow$ Righe spettrali O.K.

41' Perché non si vedono le proprietà ondulatorie della materia macroscopica

- Polvere: $\phi = 1 \mu\text{m}$ $m \sim 10^{-15} \text{ kg}$ $v = 1 \text{ mm/s}$
 $\lambda = \frac{h}{p} = 6.6 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}$ trascurabile vs. $1 \mu\text{m}$

- Neutrone termico: $m_n = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $T \sim 300 \text{ K}$

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m} \sim \frac{3}{2} kT$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{3mkT}} \approx 1.4 \text{ \AA}$$

è la distanza fra
gli atomi diffrazione.

- Elettrone: $m_e = 0.9 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$

- accelerato da V ; $E = qV$ $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} \approx \frac{12.3}{\sqrt{V}} \text{ \AA}$

- Elettrone acceleratore: $E \sim 1 \text{ GeV} = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$

$$\lambda = \frac{hc}{E} \sim 1.2 \cdot 10^{-15} \text{ m} \quad (\text{Nucleo Atomico})$$

De Broglie (1924)

Ad ogni particella con massa m è associata un'onda con $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ (

- In un'orbita l'onda non deve interferire per avere uno stato stazionario

$$2\pi r = n\lambda$$

(Slinkys)

- Ogni particella è anche un'onda (è uno stato quantistico)

Schrödinger (1926)

- Ogni particella è descritta da una funzione d'onda $\psi(r, t)$ che contiene tutta l'informazione che è possibile ottenere dalla particella.

- $\psi(r, t)$ è un'ampiezza di probabilità $\left\{ \begin{array}{l} \text{ha } \infty \\ \text{parametri,} \\ \text{non 6.} \end{array} \right.$

- $dP = |\psi|^2 d^3z$ è la probabilità di trovare la particella nel volume $d^3z = dx \cdot dy \cdot dz$

- Una particella di massa m , soggetta ad un potenziale $V(\vec{r}, t)$ è descritta dall'eq. di S.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

è lineare $\Rightarrow$ vale il principio di

sovrapposizione: $[(S_1 = \text{Soluzione}) \vee (S_2 = \text{Soluzione})]$

$\Rightarrow (S_1 + S_2)$ è una soluzione

lo: [qui; là] $\Rightarrow$ [qui e là]

$\rightarrow$ GCG cap. 4

$\rightarrow$ GCG pag. 94

Heisenberg (1927):

- "Non possiamo sapere, per una questione di principio tutti i dettagli del presente." H. 1927
- Le due grandezze $\bar{x}$, $\bar{p}$ non hanno più significato nella rappresentazione della MQ.

Sistema Macroscopico (la particella $\rightarrow$ polvere + l') $p \sim 10^{-18} \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{m}}$

$$\text{Se } \Delta x \sim 0,01 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta p \sim \frac{\hbar}{\Delta x} \sim 10^{-26} \text{J} \cdot \text{s}/\text{m}$$

Non ci sono limitazioni pratiche

Microscopio

Elettrone, modello di Bohr con orbita classica:

$$\text{Es: } p = m v \quad p r = n \hbar \quad (1)$$



$$\text{traiettoria} \Rightarrow \Delta x \ll r \quad \Delta p \ll p$$

$$(2) \text{ quindi } \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\Delta p}{p} \ll 1 \quad \text{ma il P.I: } \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\Delta p}{p} \geq \frac{\hbar}{2p}$$

$$\text{che, usando la (1), diventa } \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\Delta p}{p} \geq \frac{1}{n}$$

Incompatibile con la (2) a meno che $n \gg 1$

$\Rightarrow$ Stabilite Atomo di Idrogeno nello stato di base.

$$\text{elettrone nel campo coulombiano del protone } V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r}$$

$$q^2/4\pi\epsilon_0 \doteq e^2 \quad \bar{V} \sim -\frac{e^2}{2a_0} \quad \text{raggio medio} \Rightarrow \Delta p \sim \hbar/2a_0$$

$$\Rightarrow \bar{T} \geq \bar{T}_{\min} = \frac{\Delta p^2}{2m} \sim \frac{\hbar^2}{2m a_0^2} \quad E_{\min} = \bar{T}_{\min} + \bar{V} = \frac{\hbar^2}{2m a_0^2} - \frac{e^2}{2a_0}$$

$$\text{il minimo si ha per } a_0 = \frac{\hbar^2}{m e^2} \Rightarrow E_0 = -\frac{m e^4}{2 \hbar^2} \quad (\text{Voula!})$$

Esperimento	"Oggetto"	Probabilità Interinitali misurata (x)	P_{12}	Interferenza
Proiettili N	"pacchetto singolo"	Discreta 1 "clik" per ogni arrivo $p(x) = \frac{n(x)}{N}$	$P_1 + P_2$	NO
Onde suono, acqua luce	Onda di ampiezza $A(x,t)$	$I(x) = A ^2$ continua	$I_{12} = A_1 + A_2 ^2$ $= A_1 + A_2 + 2\sqrt{A_1 A_2} \cos \delta$	SI termine che da l'interferenza
Elettroni (1 per volta) tutti con la stessa velocità v_e	Onda di $\lambda = \frac{h}{p}$ Particella di m_e, v_e <u>NON</u> è un'onda né una particella	Arrivo "discreto" (1 clik $\neq$) arrivo $p(x) = \frac{n(x)}{N}$ $\Downarrow$ Particella che pian piano danno la figura di diffrazione	$P_{12} \neq P_1 + P_2$	SI $\Downarrow$ Onda con $I_1 = A_1 ^2$ $A_1 =$ Ampiezza di probabilità $I_1 =$ Probabilità

ma esperimento
la lastra per
poco tempo si
vedono i singoli
conteggi, mentre un'onda
debole darebbe
una debole
interferenza

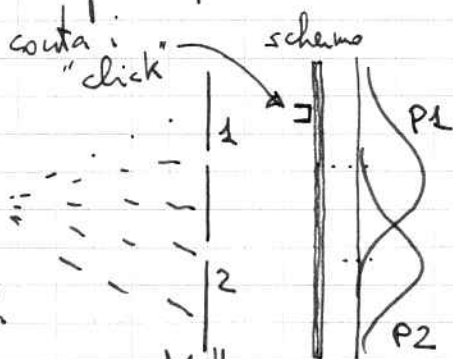
$\Rightarrow$ è un oggetto quantistico

Feynman - 6 pezzi f. - VI comportamento quantistico

Proiettili

indistruttibili

P₁ si calcolano dalle frequenze dei "click"



P₁ = solo 1 aperta
P₂ = " 2 aperte

P₁₂ = aperte 1 e 2

Arrivano 1 per volta

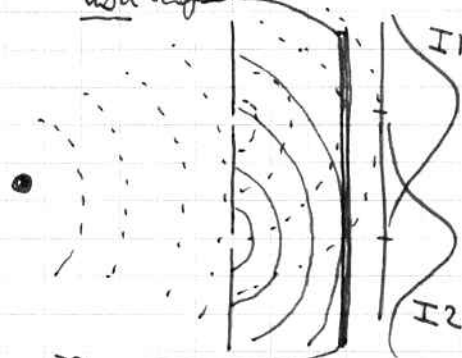
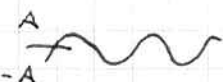
$$P_{12} = P_1 + P_2$$

Onde

(acqua)
Luce

non riflette

misura A



I = intensità dell'onda
 $\propto A^2$; è continua

(Interferenza di due onde)
costruttiva
distruttiva

$$I_1 = |A_1|^2$$

$$I_2 = |A_2|^2$$

$$I_{12} = |A_1 + A_2|^2$$

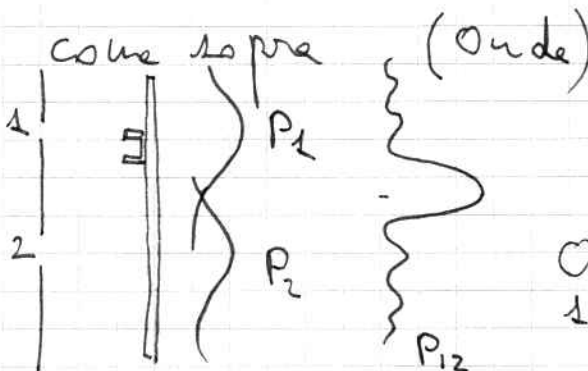
$$\delta = \text{spaziatura} = \frac{2\pi \Delta x}{\lambda}$$

$$= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

termine di interferenza

Elettroni

Il rivelatore è come quello dei proiettili; si sentono singli "click"



(Onde)

Con chi interferisce l'elettrone?

Ogni elettrone passa da 1 o da 2

$$P_{12} \neq P_1 + P_2$$

$$P_1 = |\phi_1|^2$$

$$P_2 = |\phi_2|^2$$

$$P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$$

Elettroni: Osservati per vedere da dove passano

⇒ come i proiettili

dopo (Non è possibile guardarli senza distruggere)
l'interferenza → indeterminazione

- Proviamo a osservarli con luce più debole

$\Rightarrow$ una luce più debole non vuol dire
con meno energia; data la frequenza ν ,
in ogni caso ogni fotone ha $E = h\nu$, $p = \frac{h}{\lambda}$
solo che ho meno fotoni al secondo.

$\Rightarrow$ Qualcuno interviene e $\rightarrow$ vedo da dove parte ν
" non " " $\rightarrow$ non " " " " $\nu\nu$

Se $\nu \Rightarrow$ non ho interferenza

Se $\nu\nu \Rightarrow$ ho interferenza

Allora diminuisco l'energia del fotone,
diminuisco ν , $\Rightarrow$ aumento λ , e non

so distinguere le due fenditure
(la risoluzione di due oggetti è $\sim \lambda$)

cioè vedo  un lampo intorno
alle fenditure

$\Rightarrow$ e rivedo la figura di interferenza

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

(è intrinseca secondo me)

G.C. G. cap 4. - Esperimento due polaroid

$$I(\text{trasmissione}) = I_0 \cos^2 \theta (\hat{p}_{\text{polar.}}^{\text{fibre}}, \hat{p}_{\text{fil.}}^{\text{fil.}})$$

- Planck-Einstein (fotoni; particelle) - de Broglie

$$E = h\nu$$

$$E = \hbar \omega$$

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

anche $\bar{p} = \hbar \bar{k}$

$$\bar{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{v}$$

[- Dualismo onda-particella (fotoni)

1) Gli aspetti di o. e di p. sono irreparabili

2) Le previsioni ... probabilistiche

3) Informazione ... $\Psi(r, t) \rightarrow$ Ampiezza di probabilità]

Funzione d'onda

i) Al concetto classico di "traiettoria" si sostituisce il concetto di "stato" variabile nel tempo.

Lo stato quantistico di una particella è caratterizzato da una funzione d'onda $\psi(r, t)$ che contiene tutta l'informazione che è possibile ottenere della particella.

ii) $\psi(r, t)$ è interpretata come ampiezza di probabilità

$$p(r, t) = |\psi(r, t)|^2$$

iii) decomposizione spettrale

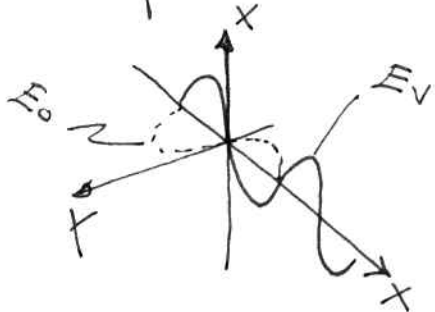
iv) L'evoluzione di $\psi(r, t)$ con il tempo è:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(r, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(r, t) + V(r, t) \psi(r, t)$$

45'

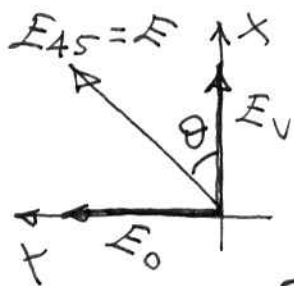
Decomposizione di un vettore secondo le sue componenti (su due assi arbitrari)

Esempio: Polarizzazione campo Elettrico (onda e.m.)



E_V : polarizzazione Verticale, $\hat{y}$
 E_O : " Orizzontale, $\hat{x}$

(Nota: O, V sono convenzionali)



Amplitude Standard

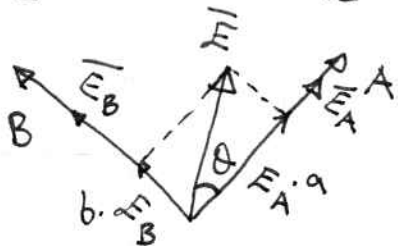
$$\vec{E}_{45} = \vec{E}_V + \vec{E}_O \quad \parallel \quad E_{45}^2 = \frac{1}{2} E^2 + \frac{1}{2} E^2 = E^2$$

$$E_O = \frac{1}{\sqrt{2}} E$$

$$E_V = \frac{1}{\sqrt{2}} E$$

$$E_{45} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_V + \frac{1}{\sqrt{2}} E_O$$

In generale



$$\vec{E} = a \vec{E}_A + b \vec{E}_B$$

$$\vec{E} = \cos \theta \vec{E}_A + \sin \theta \vec{E}_B$$

$$\begin{cases} E_{45} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_V + \frac{1}{\sqrt{2}} E_O \\ E_{135} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_V - \frac{1}{\sqrt{2}} E_O \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_V = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{45} + \frac{1}{\sqrt{2}} E_{135} \\ E_O = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{45} - \frac{1}{\sqrt{2}} E_{135} \end{cases}$$

Onde classiche

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \Delta k \cdot \Delta x \gtrsim 1$$

Principio di incertezza di Heisenberg

$$\Delta x \cdot \Delta p \gtrsim \hbar \quad \left(\text{La MQ entra nel momento in cui associamo un } \lambda \text{ ad una particella} \right)$$

⇔

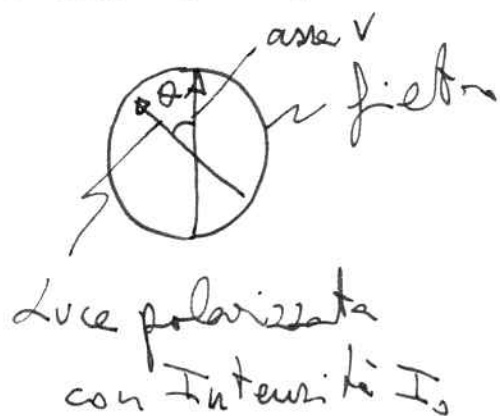
Conseguenze fisiche

- L'equazione di Schrödinger è deterministica.
- L'indeterminazione appare quando viene misurata una quantità fisica.
- Principio di sovrapposizione [vedi G.C.G. pag. 71]
 $| \text{Sovrapposizione} \rangle = | 1 \rangle + | 2 \rangle \quad \left(\begin{array}{l} \text{elettrone attraverso 1 +} \\ \text{elettrone attraverso 2} \end{array} \right)$

Schrodinger: quando non si capisce una cosa si inventa un nuovo termine e si crede di averla capita

(Principio di Complementarità di Bohr per il dualismo onda-corpuscolo: si completano escludendosi, esistono "in potenza" fin quando vengono misurate)

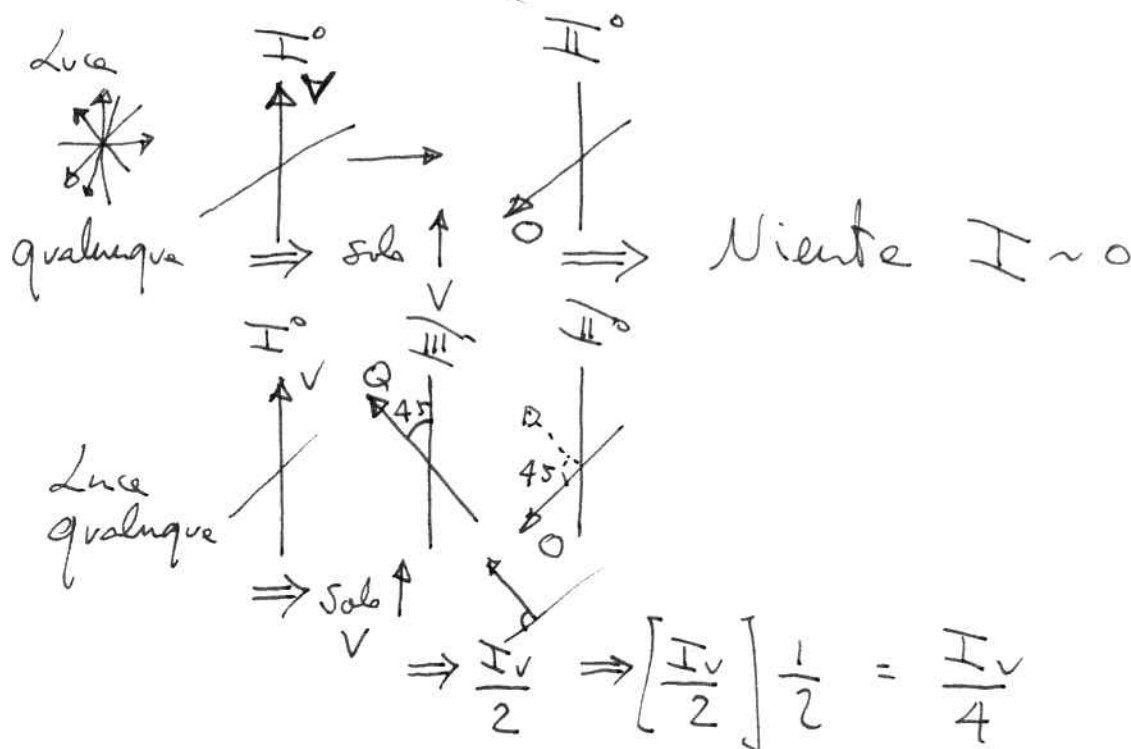
La luce attraversa 3 filtri polarizzatori



$$I(\text{intensità})_{\text{Trasmessa}} = I_0 \cos^2 \theta$$

→ luce polarizzata secondo v

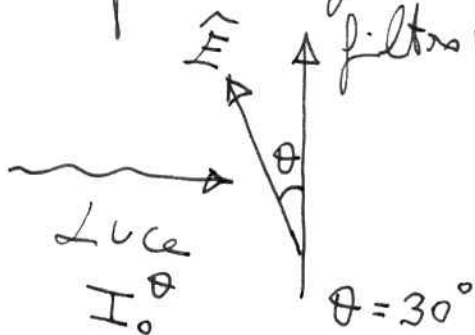
$I_{\text{incidente}} : (E_i = \cos \theta E_v + \sin \theta E_o)$



θ	$\sin \theta$	$\cos \theta$	$\sin^2 \theta$	$\cos^2 \theta$
+ 0	0	1	0	1
• 30	$1/2$	$\sqrt{3}/2$	$1/4$	$3/4$
• 45	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	$1/2$	$1/2$
60	$\sqrt{3}/2$	$1/2$	$3/4$	$1/4$
+ 90	1	0	1	0
■ 120	$\sqrt{3}/2$	$-1/2$	$3/4$	$1/4$
• 135	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	$1/2$	$1/2$

Nota

Interpretazione probabilistica del funzionamento di un polarizzatore per singoli fotoni:



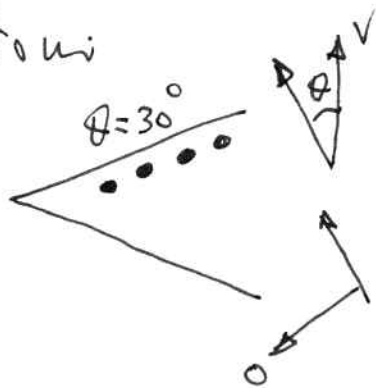
$$I_T^V = I_0 \cos^2 \theta = I_0 \frac{3}{4}$$



$$I_T^O = I_0 \sin^2 \theta = I_0 \frac{1}{4}$$

Singoli fotoni

n fotoni
(p.e. 4)

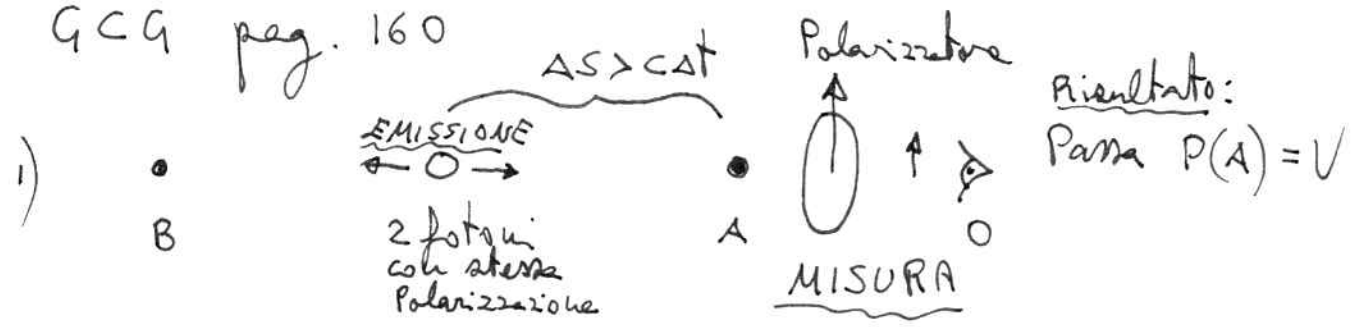


$$n_T^V = \frac{3}{4} n = 3 \dots$$

$$n_T^O = \frac{1}{4} n = 1 \dots$$

- Concettualmente in breve (molto breve)

GCG pag. 160



- 1) Panna $\Rightarrow P(B) = V$; la località vieta che la misura di B sia stata influenzata da A
- 2) $\Rightarrow$ La proprietà $P(B)$ già esisteva. La MQ non la poteva prevedere $\Rightarrow$ La MQ non è completa



I posteri (EPR originale)

1) Teoria Completa

$\Rightarrow \forall$ elemento di realtà deve esserci una controparte teorica

Vedi: elemento di realtà fisica

[ad ogni elemento di realtà posso associare un elemento della teoria]

Dimostrazione $\rightarrow$ se può essere predetta senza alterare il sistema

1) Dato Heisenberg: se conosco $p \Rightarrow x$ non ha realtà fisica

I Quindi $\circ$: la descrizione della MQ della realtà fatta dalla stessa ψ non è completa

II oppure : due operatori ... che non commutano non possono avere simultaneamente realtà.

(9 x 5 ct)

* gli elementi di realtà fisica non possono venir influenzati istantaneamente

Esperiments: Misura $x(A) \rightarrow$ sono inferire $x(B) \rightarrow \psi(B)$
 " $p(A) \rightarrow$ " " $p(B) \rightarrow \psi'(B)$

$\Rightarrow$ ho 2 funzioni d'onda per la stessa

realità $[B \text{ dopo la misura su } A]$ le ψ dovevano
 $\psi(B) \rightarrow x(B)$ esistere prima
 $\psi'(B) \rightarrow p(B) = [B]$ della misura (A)
 [località]

Quindi ho due operatori che non commutano $[p, x]$ che hanno simultaneamente realtà fisice.

$\Rightarrow$ la II non è vera

$\Rightarrow$ è vera la I
 $\nwarrow$

Nota: A e B sono entangled prima della misura (grandezza = $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{2} & 0 \end{pmatrix}$) a $t = t_0$

prima $t < t_0$ $\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} |A, v\rangle |B, v\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |A, 0\rangle |B, 0\rangle$ *

dopo $t > t_0$
 (...v) $\psi = |A, v\rangle |B, v\rangle$

II Linea di pensiero (GCG 159) disegno 8.3

1) Misura $x(A) \Rightarrow |\psi(t+dt)\rangle = |A, v\rangle |B, v\rangle$
 (ottiene v)

2) $\Rightarrow$ Posso prevedere che una misura in B darebbe v
 $\Rightarrow$ B ha un elemento di realtà fisica $[p=v]$

3) Secondo la località non può essere stata la misura su A

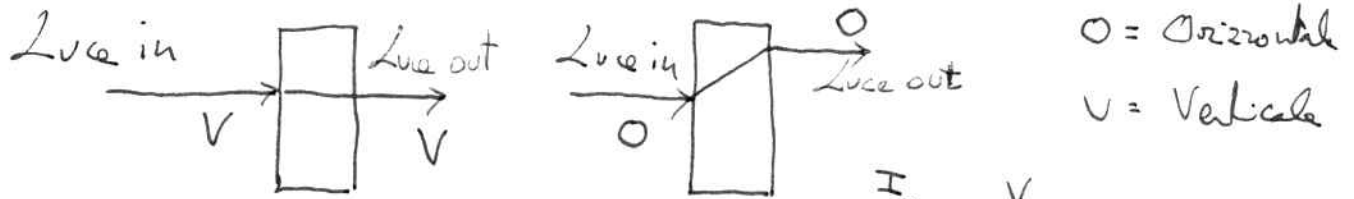
$\Rightarrow$ B possedeva questa proprietà anche "prima" e

indipendentemente. $\Rightarrow$ Ma la teoria mi dice che

una misura su B sarebbe probabilistica; quindi manca la controparte teorica

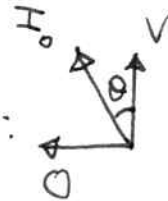
Bell (da N. Herkert - Quantum Reality) 49

* Strumento Rivelatore di polarizzazione: (Calcite)
 Cristallo Birifrangente (GCA p. 33) Polarizz.



O = Orizzontale
 V = Verticale

Con polarizzazione qualunque:



$$I(V) = I_0 \cos^2 \theta$$

$$I(O) = I_0 \sin^2 \theta$$

* Sorgente: Sorgente Hg
 [Cristallo non lineare] emette 2 fotoni
 i fotoni Green & Blue stanno in un
 twin state (hanno stessa polarizzazione)
 P → completamente casuale
 ho 50% di P di rivelare
 ad un qualunque angolo

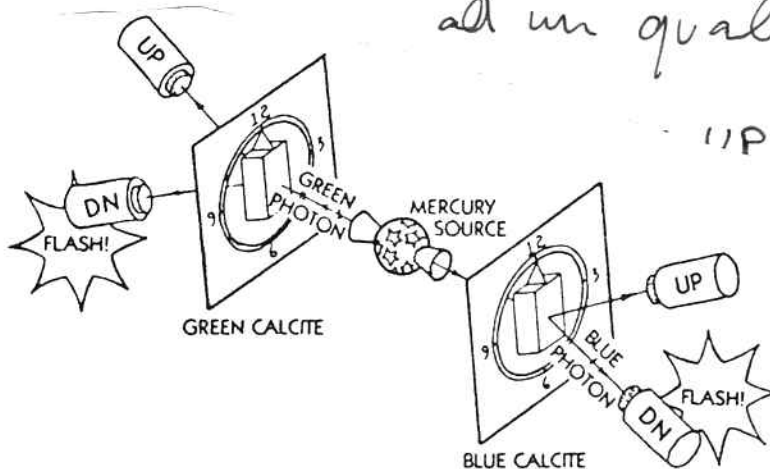


FIG. 12.1 The EPR experiment. The central mercury source emits pairs of photons (Green and Blue) in the twin state. At Green and Blue measuring sites, the polarization $P(\theta)$ of each of these photons is recorded with a calcite based P meter. Bell's theorem concerns the unusual strength of the polarization correlation existing between these Green and Blue photons.

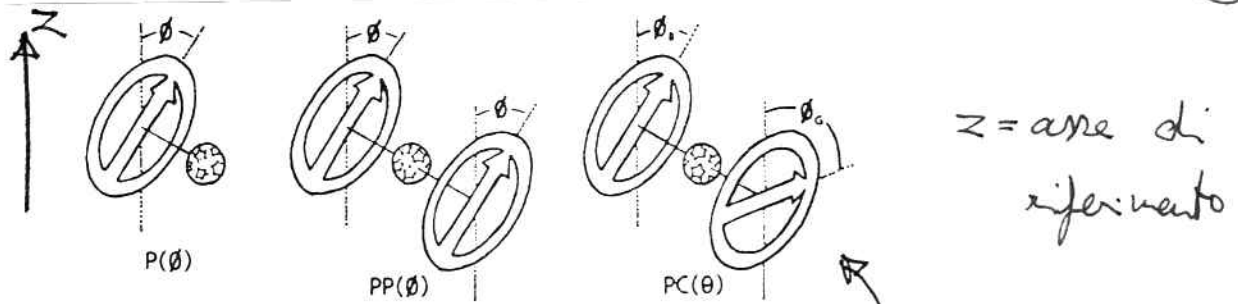


FIG. 12.2 Three kinds of polarization measurement. A. Measuring $P(\phi)$ —ordinary polarization—involves counting the number of photons polarized along (up) or across (down) the calcite's optic axis oriented at angle ϕ . B. Measuring $PP(\phi)$ —paired polarization—involves comparing the polarization of two photons at the same angle ϕ (miss or match). C. Measuring $PC(\theta)$ —polarization correlation—involves comparing the polarization of two photons at two different angles (θ is the angular difference between the two calcite settings).

$$\theta = \theta_A - \theta_B$$

Le tre misure di polarizzazione

- 1) $P(\theta)$ conta U, D con il cristallo che fa un angolo θ (Polarizz. Ordinaria)
- 2) $PP(\theta)$: Paired Polarization : si confrontano i risultati misurati su B, A con i due cristalli che hanno lo stesso angolo θ
- 3) $PC(\theta)$: Polarizzazione Correlazione
Misura con i due cristalli a different angoli $\theta = \theta_A - \theta_B$

Risultati per PC : $\begin{cases} UU ; DD & \text{match} \\ UD ; DU & \text{miss} \end{cases}$

- Teoria ed esperimento

$$PC[\theta_A; \theta_B] = PC(\theta)$$

$$\theta = \theta_A - \theta_B$$

(provata)

Risultati Numerici:

Si (vede) conta la frazione dei (matches) uguali:

PC = 1 tutti uguali

PC = 0 " differenti

$$PC = \frac{u^0 \text{ uguali}}{u^0 \text{ totali}}$$

$$E(\text{Error}) = \frac{u^0 \neq}{u^0 \text{ totali}}$$

[Su 2 stelle]

Twin state

$$PC(0) = PP = 1$$

$$PC(90^\circ) = 0 \quad (\text{uno dei due scambia } U \leftrightarrow D)$$

$$PC(0) : \begin{matrix} U & D & D & U & D & U & D & U & U & D \\ U & D & D & U & D & U & D & U & U & D \end{matrix} = 1$$

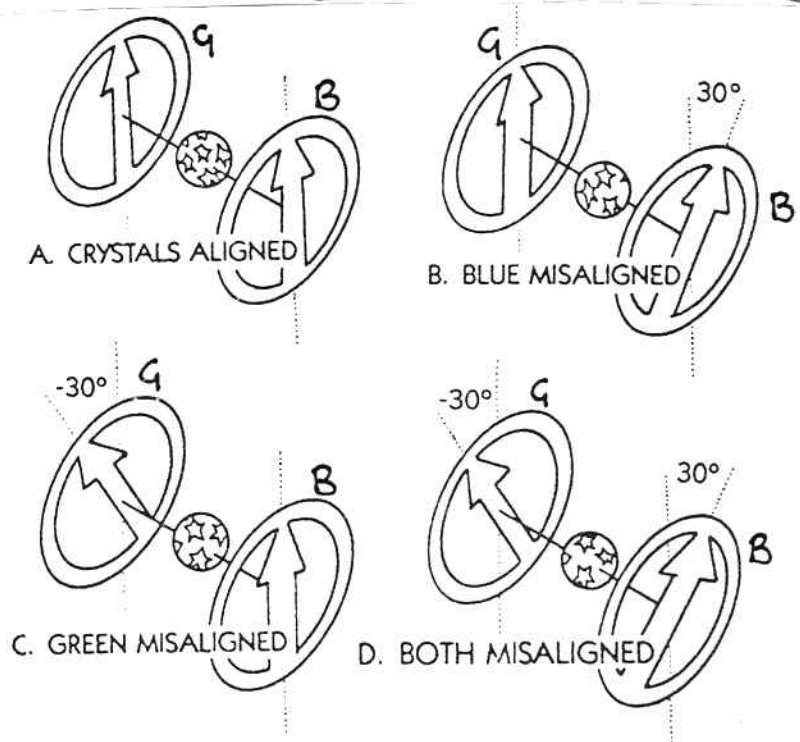
$$PC(\theta) : \begin{matrix} U & D & D & U & D & U & D & U & D & U & D & U & D & U \\ U & D & U & U & D & U & U & U & D & D & D & U & D & D & U \end{matrix} \quad \frac{12}{16} = \frac{3}{4}$$

$\theta = 30^\circ (= \frac{3}{4})$

* * * *

≠ ≠ ≠ ≠

Errori: 1/4



A: PC = 1 Errori = 0

B: B = 30° E = 1/4

C: G = -30° E = 1/4

D: B = 30° G = -30°

Spontane B: E = 1/4

" G: E = 1/4

Spontane tutti e due:

$$E = \frac{2}{4} \text{ MA}$$

potrebbero esserci 2 errori contemporanei (diventa un match)

$$\Rightarrow E \leq \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

FIG. 12.3 Simple proof of Bell's theorem. A Both calcites aligned errors = zero. B Blue crystal tilted by 30°; errors = 1 in four marks. C Green crystal tilted by -30°. errors = 1 in four marks. D. Both Green and Blue crystals tilted by 30°; what's the new error? If we assume locality (Green's move cannot change Blue's mark), this new error cannot be greater than 2 in four marks. However, for EPR photons the PC measurement at 60° gives 3 errors in four marks. Therefore locality assumption is false.

$$E(2\theta) \leq 2 E(\theta) \quad \theta$$

$$E(\theta) = \sin^2 \theta$$

(52)

Match	2	0
	0,5	30
	1,5	60
	0	90

$$E(\text{località}) \leq \frac{1}{2} \quad E(\text{esperimento}) = \frac{3}{4}$$

Aspect (1982)

$$S(\text{Località}) \leq 0$$

= Sospettato

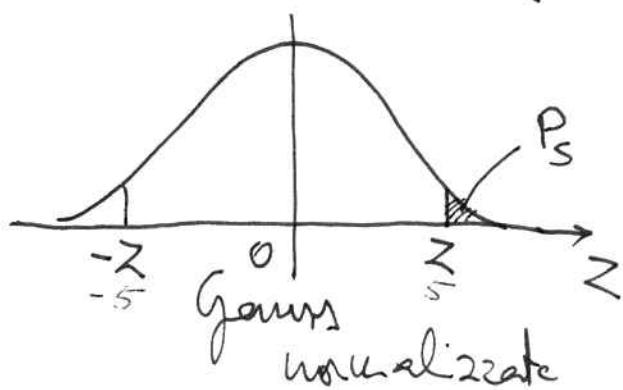
$$S(QM) = 0,112$$

= S previsioni MQ

$$S(\text{Exp}) = 0,101 \pm 0,020 = \text{Sospettato} \pm \sigma$$

Distanza [Valore misurato - Valore atteso] / σ

$$= Z = \frac{0,101 - 0}{0,020} = 5,05 \approx 5$$



$$P_Z = \int_{-Z=-5}^{Z=5} f(z) dz = 0,9999994$$

$$P_S [S_{\text{exp}} > S_{\text{atteso}}] = \frac{1 - P_Z}{2} = 3 \times 10^{-8}$$

La probabilità di aver ottenuto quel risultato "per caso" è di 3 su 10 milioni!
[facendo 1 prova al giorno: 1 volta ogni 3000 anni]