

LA CRISI DELLA FISICA CLASSICA

III^a PARTE

Prof. V.Lubicz

Dualità onda-particella

- Esperimenti ideali di interferenza con pallottole, onde ed elettroni
- Principio di indeterminazione



La Meccanica Quantistica

- Probabilità e ampiezze di probabilità
- Principi della meccanica quantistica
- Variabili nascoste (?)
- L' equazione di Schrödinger

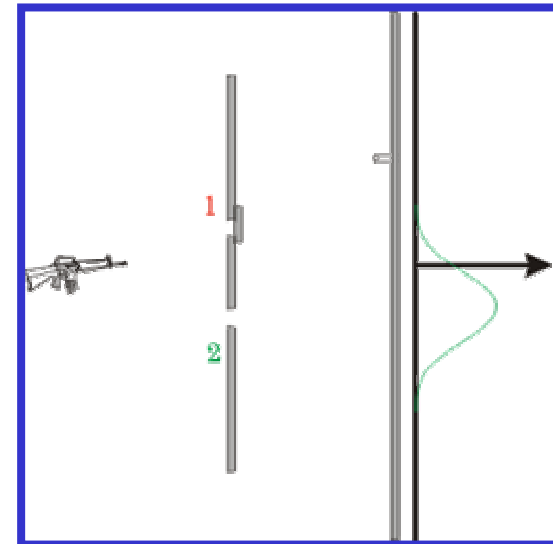
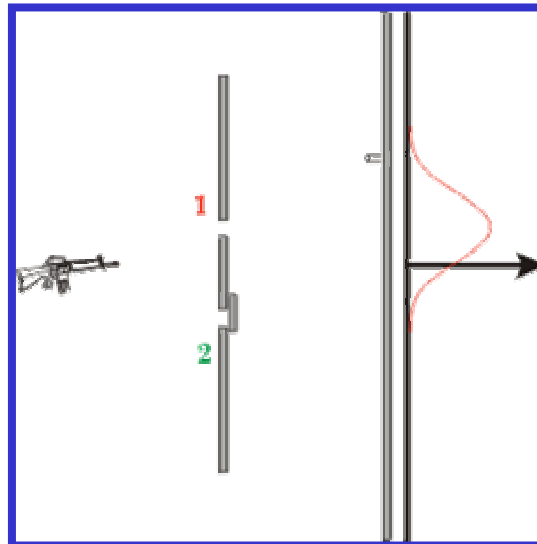
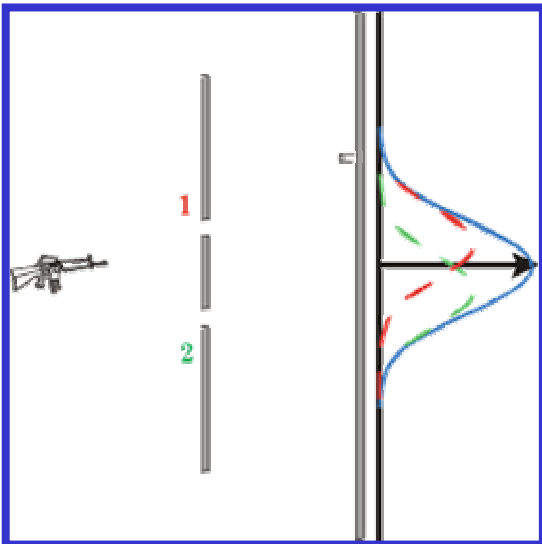
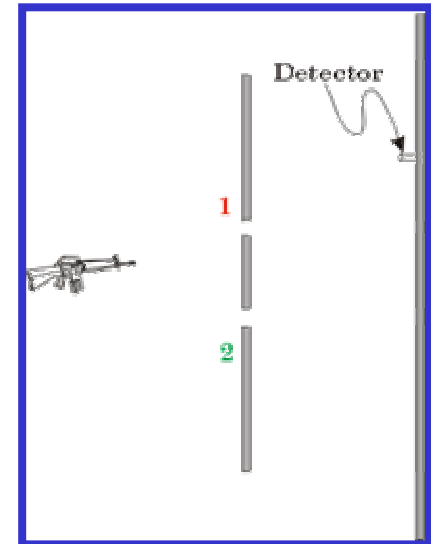


**DUALITA' ONDA-PARTICELLA:
ESPERIMENTI DI INTERFERENZA
CON PALLOTTOLE,
ONDE ED ELETTRONI**

ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA: PROIETTILI

♦ I proiettili arrivano sempre a blocchi, identici e distinti

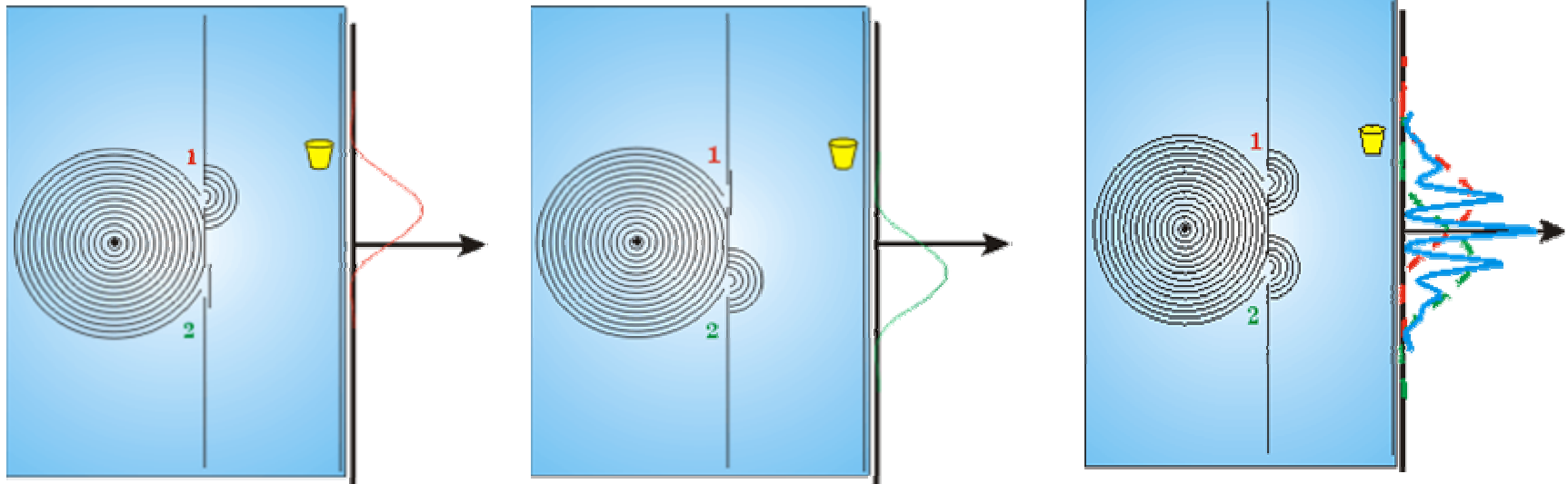
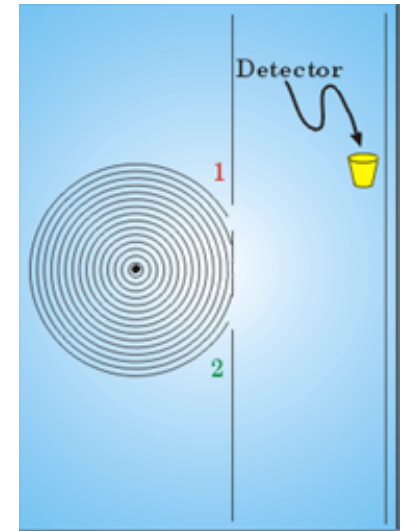
♦ $N_{12} = N_1 + N_2 \rightarrow$ Non si ha interferenza



ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA: ONDE D'ACQUA

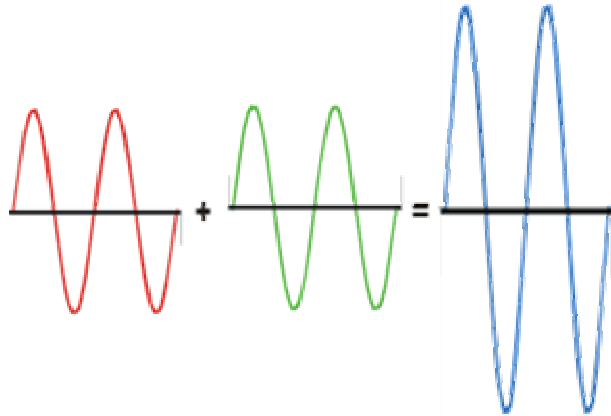
♦ L' intensità può assumere qualsiasi valore;
non possiede una struttura a "blocchi"

♦ $I_{12} \neq I_1 + I_2 \rightarrow$ Si ha interferenza

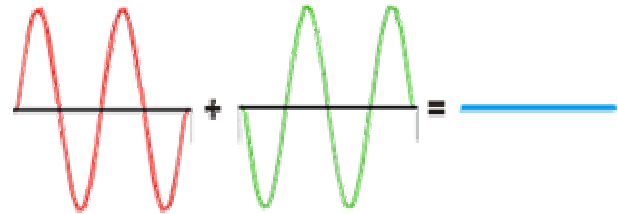


MATEMATICA DELL' INTERFERENZA

Interferenza costruttiva



Interferenza distruttiva



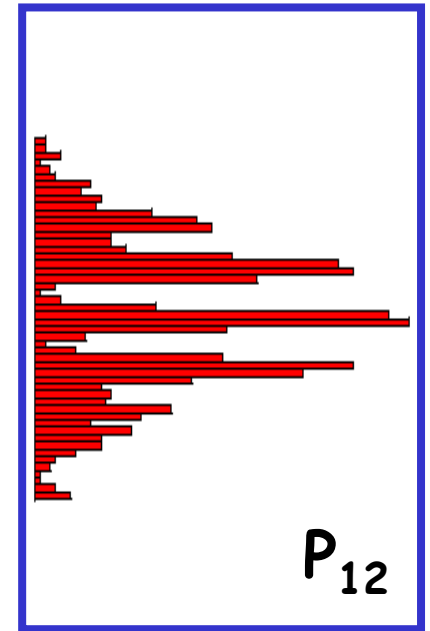
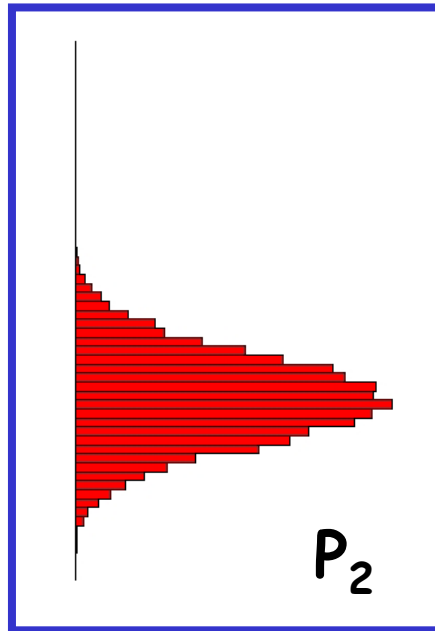
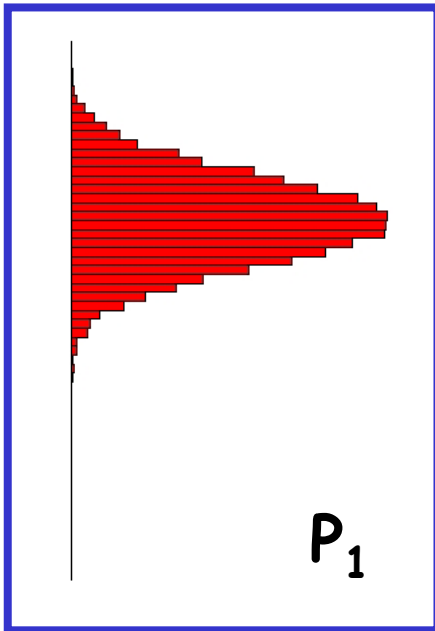
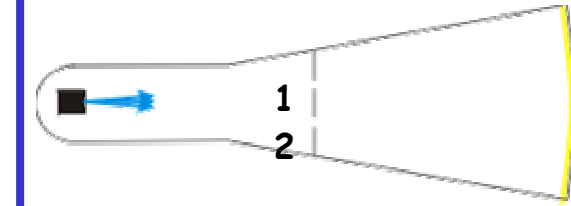
$$I_1 = |h_1|^2 \quad , \quad I_2 = |h_2|^2$$

$$I_{12} = |h_1 + h_2|^2 = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2 |h_1| |h_2| \cos \theta$$

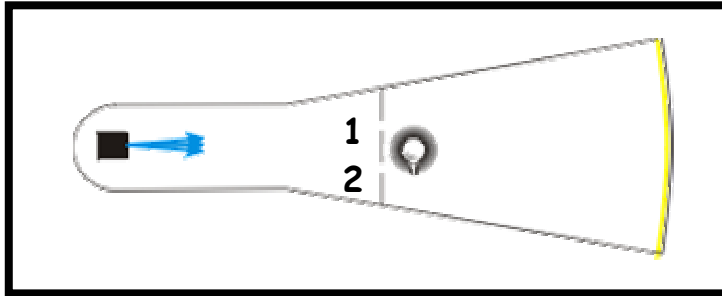
ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA: ELETTRONI

♦ Gli elettroni arrivano sempre in granuli, tutti identici tra loro

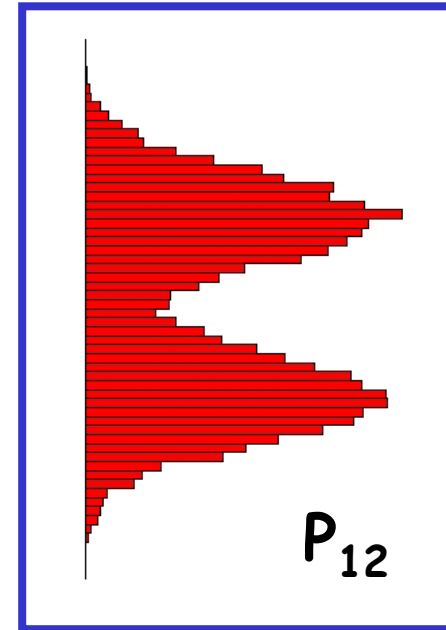
♦ $P_{12} \neq P_1 + P_2 \rightarrow$ Si ha interferenza



OSSERVAZIONE DEGLI ELETTRONI



- ♦ Gli elettroni osservati risultano essere passati o dal foro 1 oppure dal foro 2
- ♦ $P_{12} = P_1 + P_2 \rightarrow$ Non si ha interferenza



E' possibile migliorare l'esperimento ?

“E' impossibile ideare un esperimento in grado di determinare da quale foro sia passato l'elettrone che allo stesso tempo non perturbi l'elettrone sufficientemente da distruggere l'interferenza”

**PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE
DI HEISENBERG**

$$\Delta x \Delta p \geq h$$

LA MECCANICA QUANTISTICA

ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA

RISULTATI
"INCOMPRESIBILI"

MA

DESCRIZIONE
MATEMATICA SEMPLICE

La curva di interferenza degli elettroni è la stessa delle onde d'acqua ($I_{12} = |h_1 + h_2|^2$)



$$P = |\phi|^2$$

Probabilità

Ampiezza di probabilità

- Quando **NON** si osservano gli elettroni

$$P_1 = |\phi_1|^2 \quad , \quad P_2 = |\phi_2|^2 \quad , \quad P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$$

- Quando **si osservano** gli elettroni:

$$P_1 = |\phi_1|^2 \quad , \quad P_2 = |\phi_2|^2 \quad , \quad P_{12} = |\phi_1|^2 + |\phi_2|^2$$

PRINCIPI DELLA MECCANICA QUANTISTICA

- Particella \longleftrightarrow Funzione d'onda: $\phi(x)$
"Dualità" onda-particella (Particella libera \longleftrightarrow Onda piana)

- Ruolo della misura: [Principio di indeterminazione]
 $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2 \longleftrightarrow P_{12} = |\phi_1|^2 + |\phi_2|^2 \quad \Delta x \Delta p \geq \hbar$

- Principio di sovrapposizione: $\phi_{12} = \phi_1 + \phi_2$

- Principio di indeterminazione: ~~traiettoria~~
 \longrightarrow Indistinguibilità delle particelle identiche

DETERMINISMO E INDETERMINISMO

Determinismo della fisica classica

"Noi dobbiamo riguardare il presente stato dell'universo come l'effetto del suo stato precedente e come la causa di quello che seguirà. Ammesso per un istante che una mente possa tener conto di tutte le forze che animano la natura, assieme alla rispettiva situazione degli esseri che la compongono, se tale mente fosse sufficientemente vasta da poter sottoporre questi dati ad analisi, essa abbraccerebbe nella stessa formula i moti dei corpi più grandi dell'universo assieme a quelli degli atomi più leggeri. Per essa niente sarebbe incerto ed il futuro, così come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi."

Pierre Simon de Laplace

Essai philosophique sur les probabilités, 1812

Crisi del determinismo

- Meccanica statistica
- Sistemi caotici

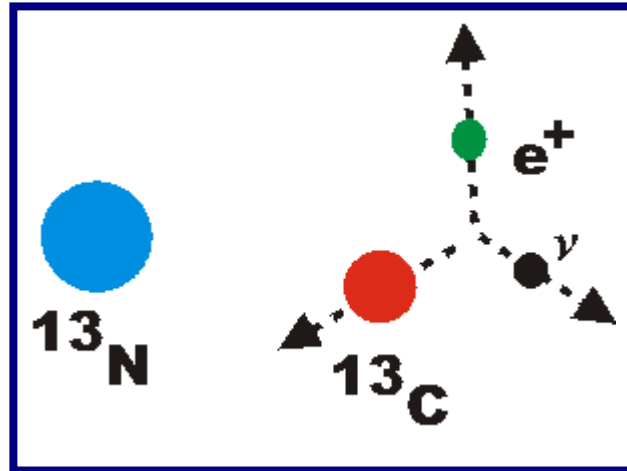
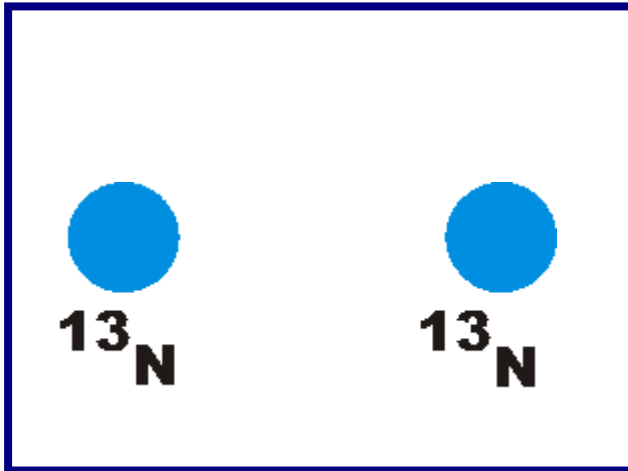
Meccanica quantistica → Fine del determinismo
Probabilità'. Principio di indeterminazione

ESISTONO "VARIABILI NASCOSTE" ?

Esempio: I decadimenti radioattivi



$T \approx 10$ minuti
(Tempo di dimezzamento)

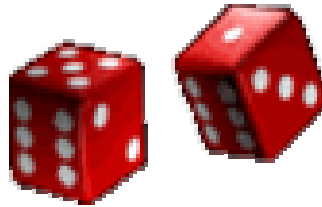


" Qual è la differenza tra i 2 atomi di azoto? "

Disuguaglianza di Bell: $N(A, \beta) + N(B, \not\beta) \geq N(A, \not\beta)$

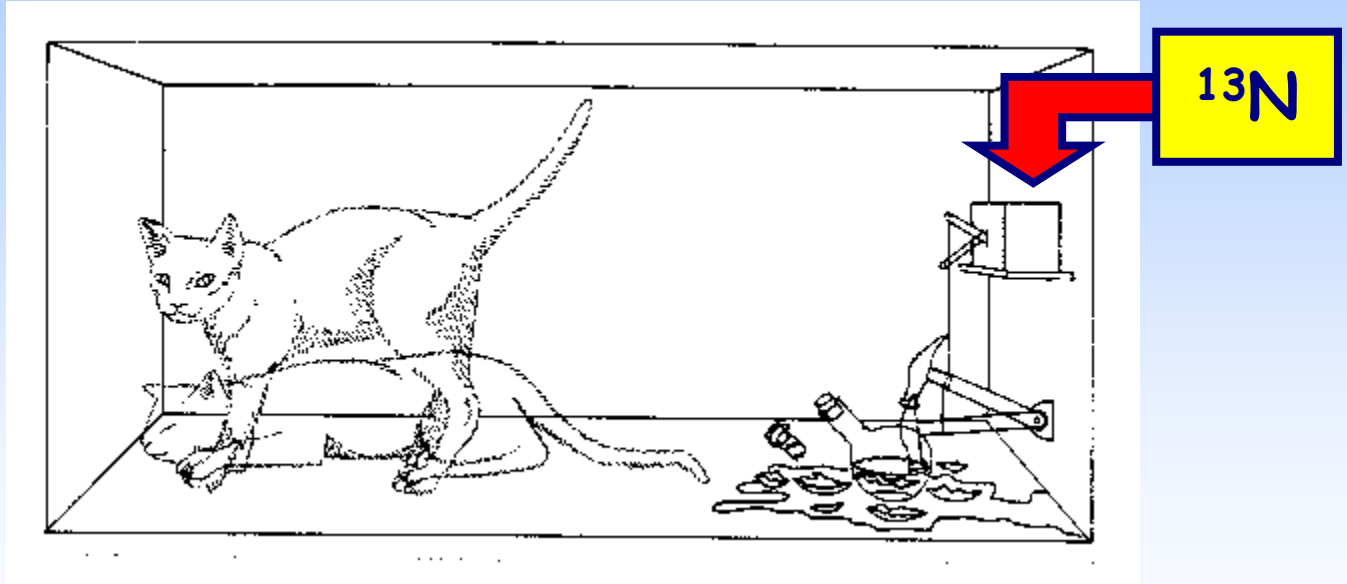
NON ESISTONO VARIABILI NASCOSTE !!

A. Einstein: "Dio non gioca a dadi con l'universo"



N. Bohr: "Smettila di dire a Dio cosa deve fare"

Il gatto di Schrödinger



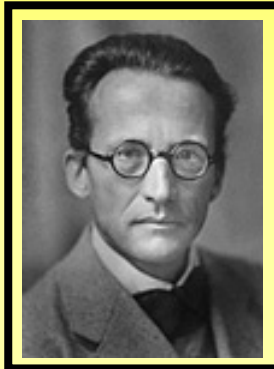
- 1) Cosa succede dopo un tempo di dimezzamento?
- 2) Il gatto si trova in una sovrapposizione di "gatto vivo" e "gatto morto"?

L' EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER

IL CASO DELLA PARTICELLA LIBERA

Onda piana $\psi = A e^{i(kx - \omega t)}$

Schrödinger
1926



$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hbar \omega \psi = E \psi \quad , \quad -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial x} = \hbar k \psi = p \psi$$

$$\hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

+

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

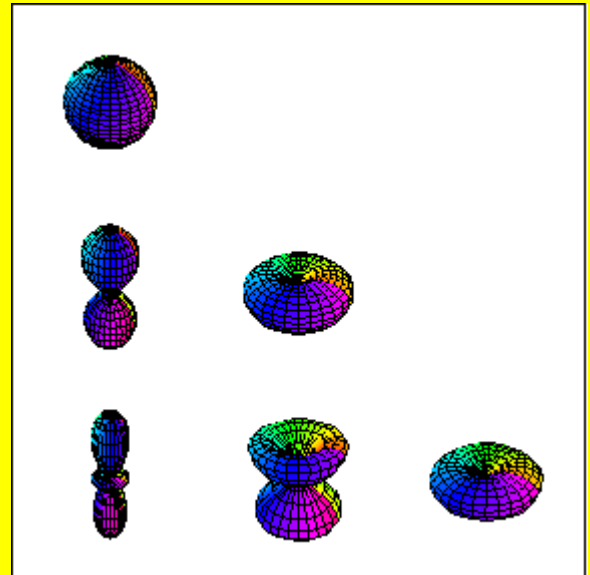
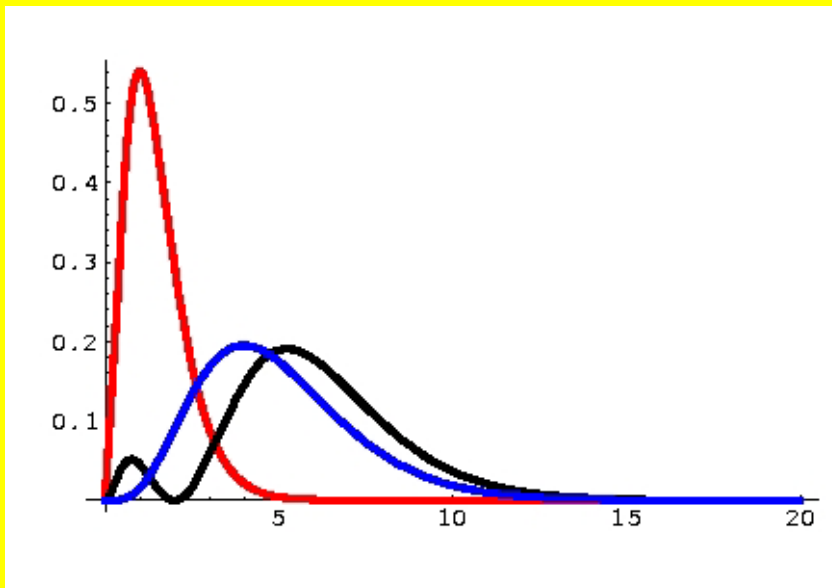


$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$$

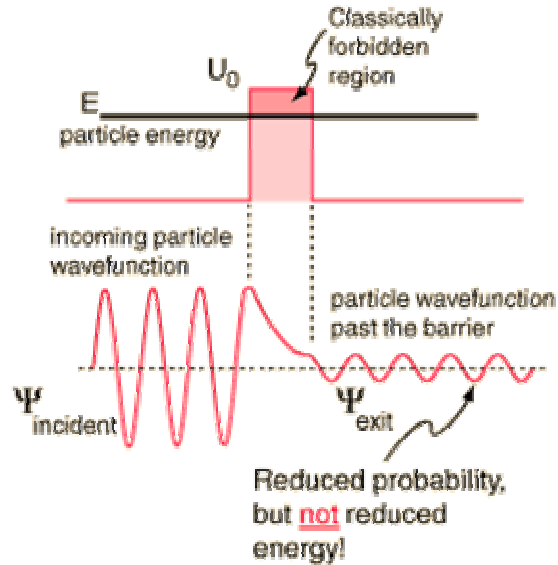
L' ATOMO DI IDROGENO

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x,t) = H \psi(x,t)$$

$$E_n = -\frac{Z^2}{n^2} R$$



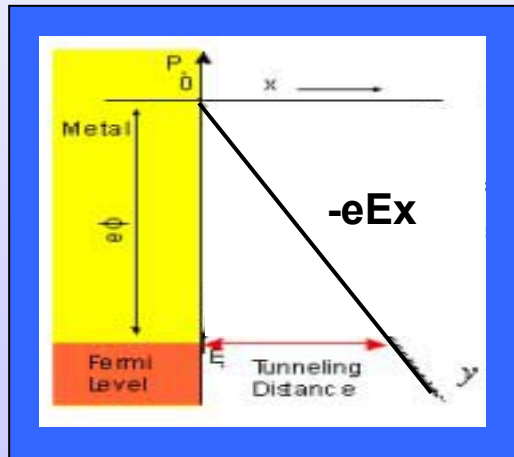
EFFETTO TUNNEL



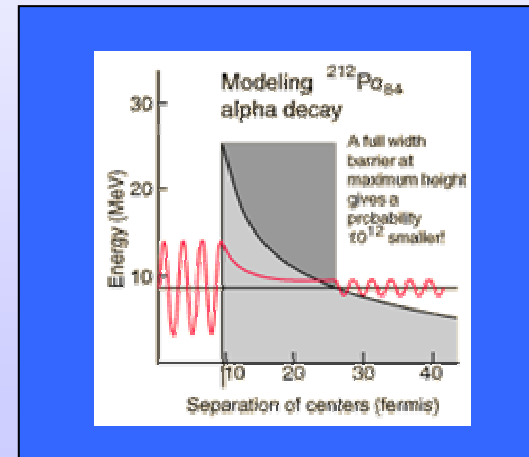
Probabilità di attraversamento della barriera:

$$P \simeq \text{Exp} \left[-2 \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}} \right]$$

Emissione fredda



Decadimento alfa



**"Chi non resta sbalordito dalla meccanica
quantistica evidentemente non la capisce"**

Niels Bohr, 1927