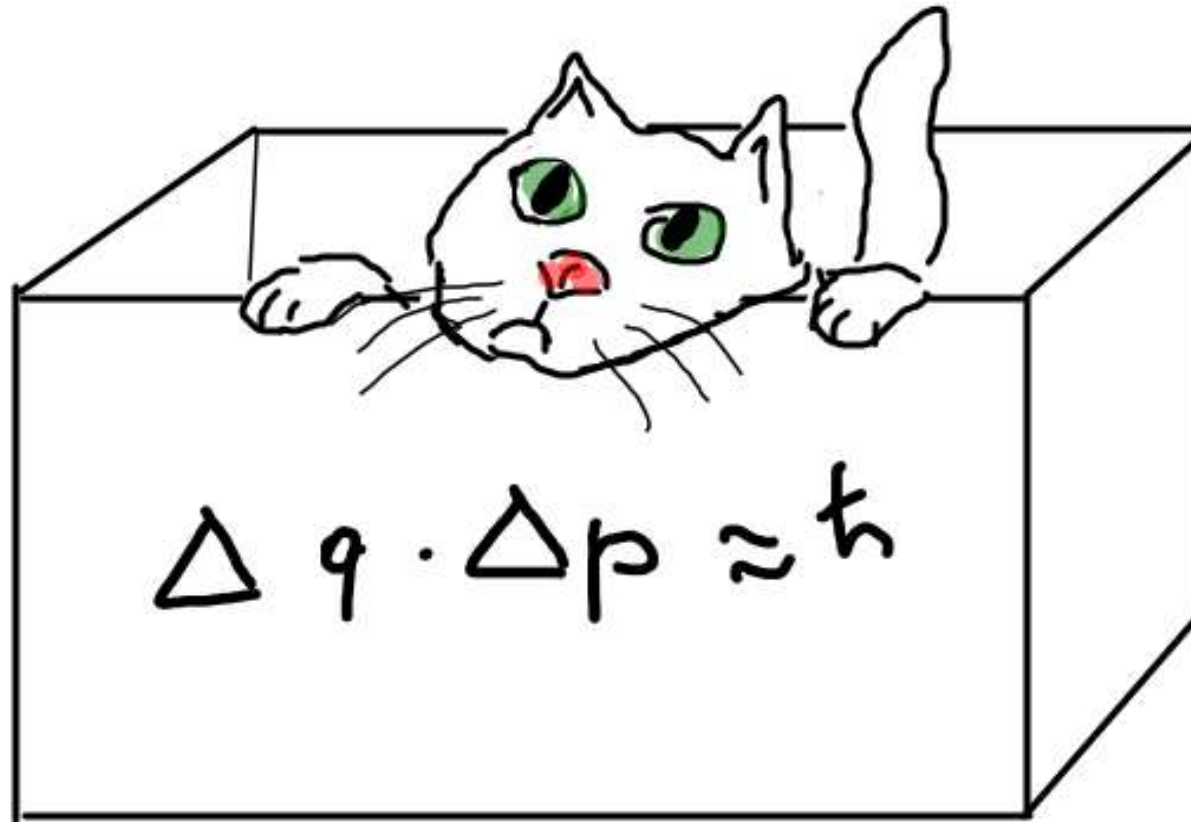


Meccanica quantistica



Lezione 2
(la materia)

Premessa: i numeri complessi

Numeri immaginari

$$\sqrt{-9} = 3i \quad i = \sqrt{-1}$$

$$i^2 = -1 \quad i^3 = -i \quad i^4 = 1 \quad i^5 = i$$

**Numero
reale** **+** **Numero
immaginario** **=** **Numero
complesso**

$$2 + 3i$$

$$z = a + bi \quad (a, b \text{ REALI})$$

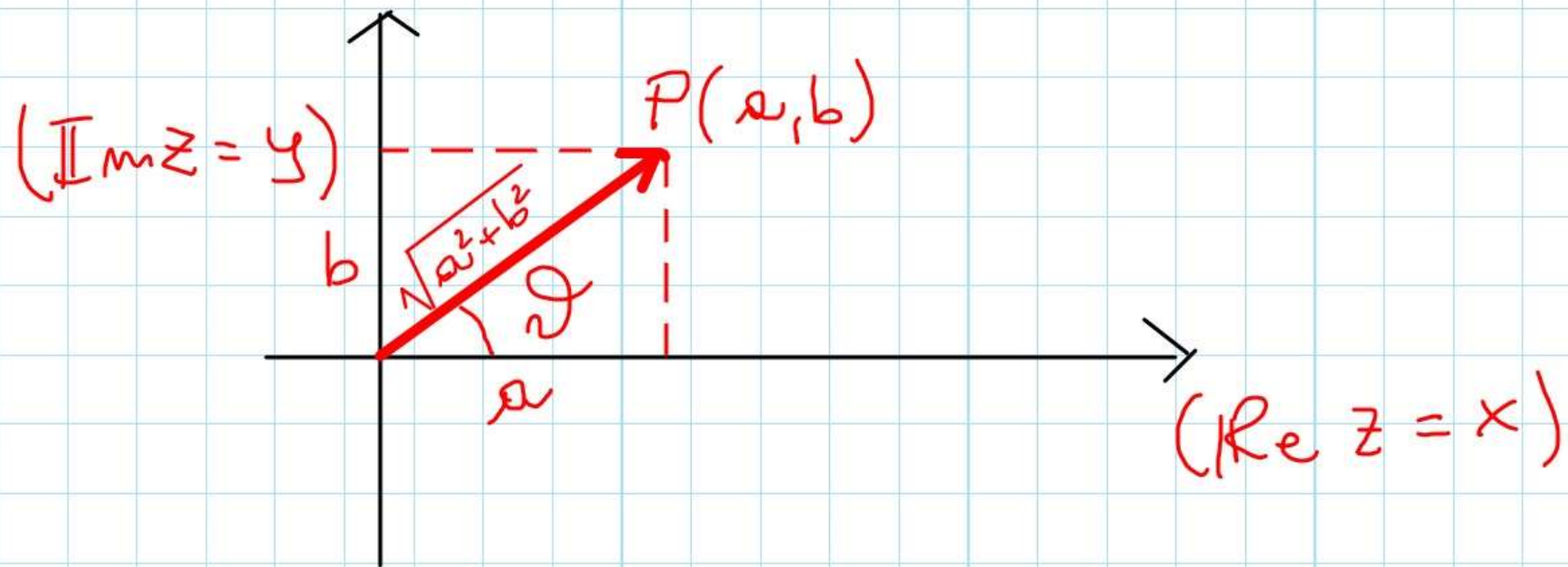
$$\bar{z} = a - bi \quad (\text{coniugato})$$

MODULO

$$|z|^2 = z \cdot \bar{z} = (a + ib)(a - ib) =$$
$$= a^2 + b^2$$

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

LA RAPPRESENTAZIONE CARTESIANA



NUMERO COMPLESSO = VETTORE

RAPPRESENTAZIONE TRIGONOMETRICA

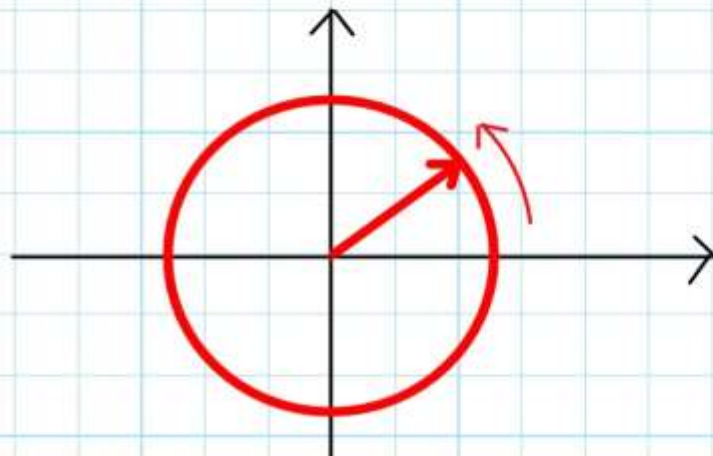
$$Z = \rho (\cos \vartheta + i \sin \vartheta)$$

RAPPRESENTAZIONE ESPONENZIALE

$$Z = \rho e^{i\vartheta}$$

Quindi

$$Z = \underset{E^-}{\rho} e^{i\omega t}$$



UN VETTORE DI
MODULO ρ CHE
RUOTA SU
SÈ STESSO !!!

OPPURE

DUE OSCILLAZIONI ARMONICHE LUNGO
LE DIREZIONI ORTOGONALI x E y
SFASATE DI UN QUARTO DI CICLO
($\pi/2$).

Ricapitolando ...

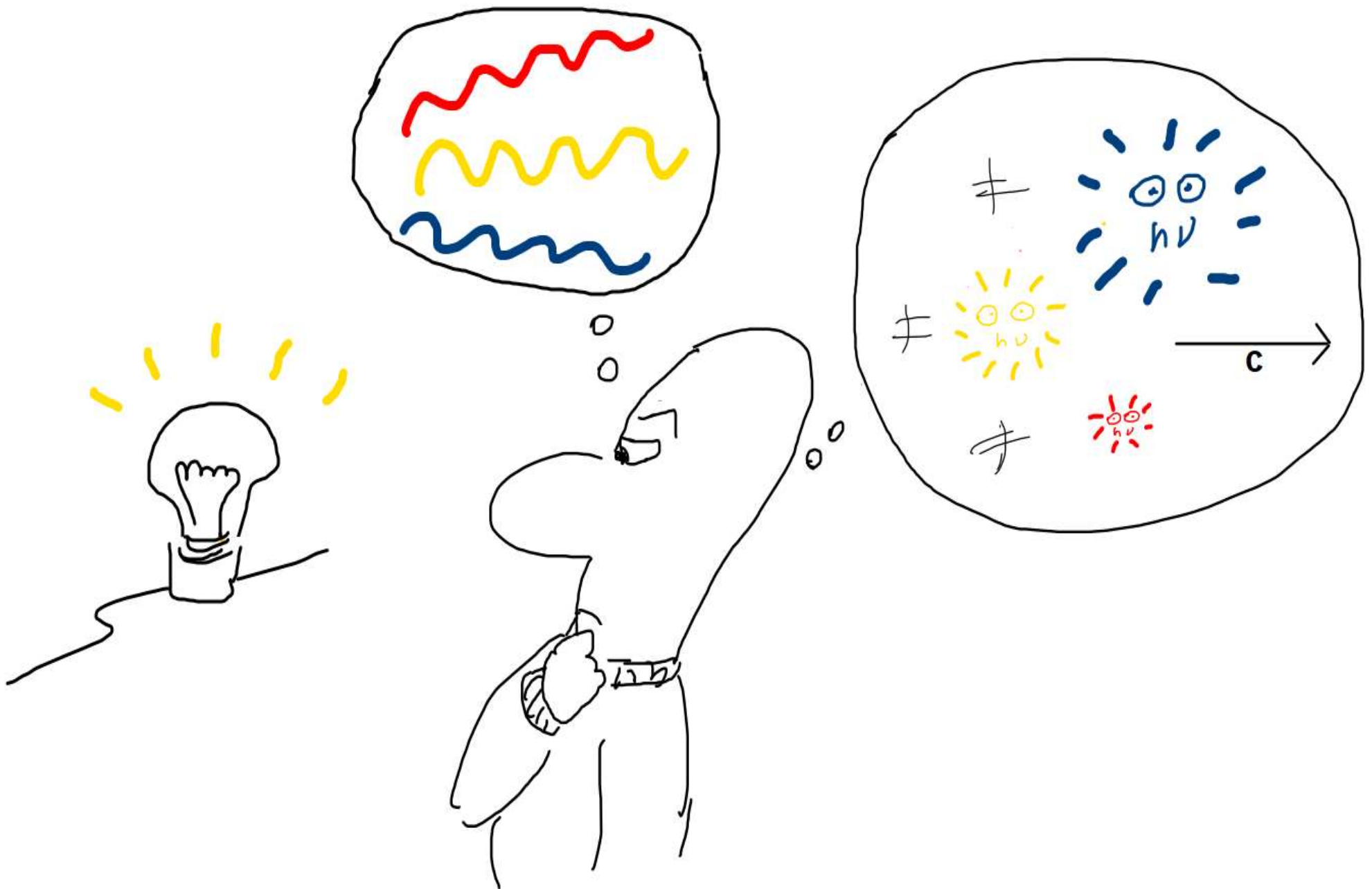
Abbiamo portato a casa alcuni risultati interessanti:

1. L'interpretazione della radiazione termica con l'ipotesi dei quanti di luce

2. I quanti di luce sono corpuscoli

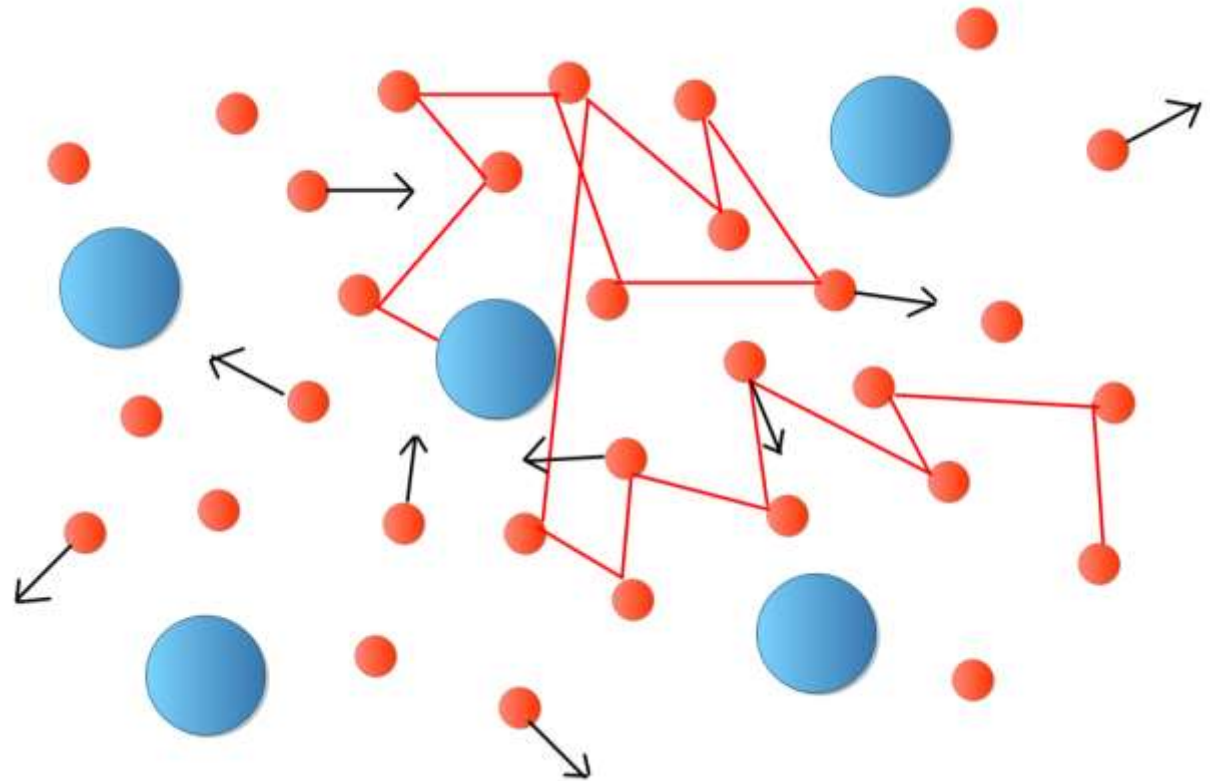
... anche se ora abbiamo in testa un po' di confusione ...

... la luce è onde o corpuscoli?



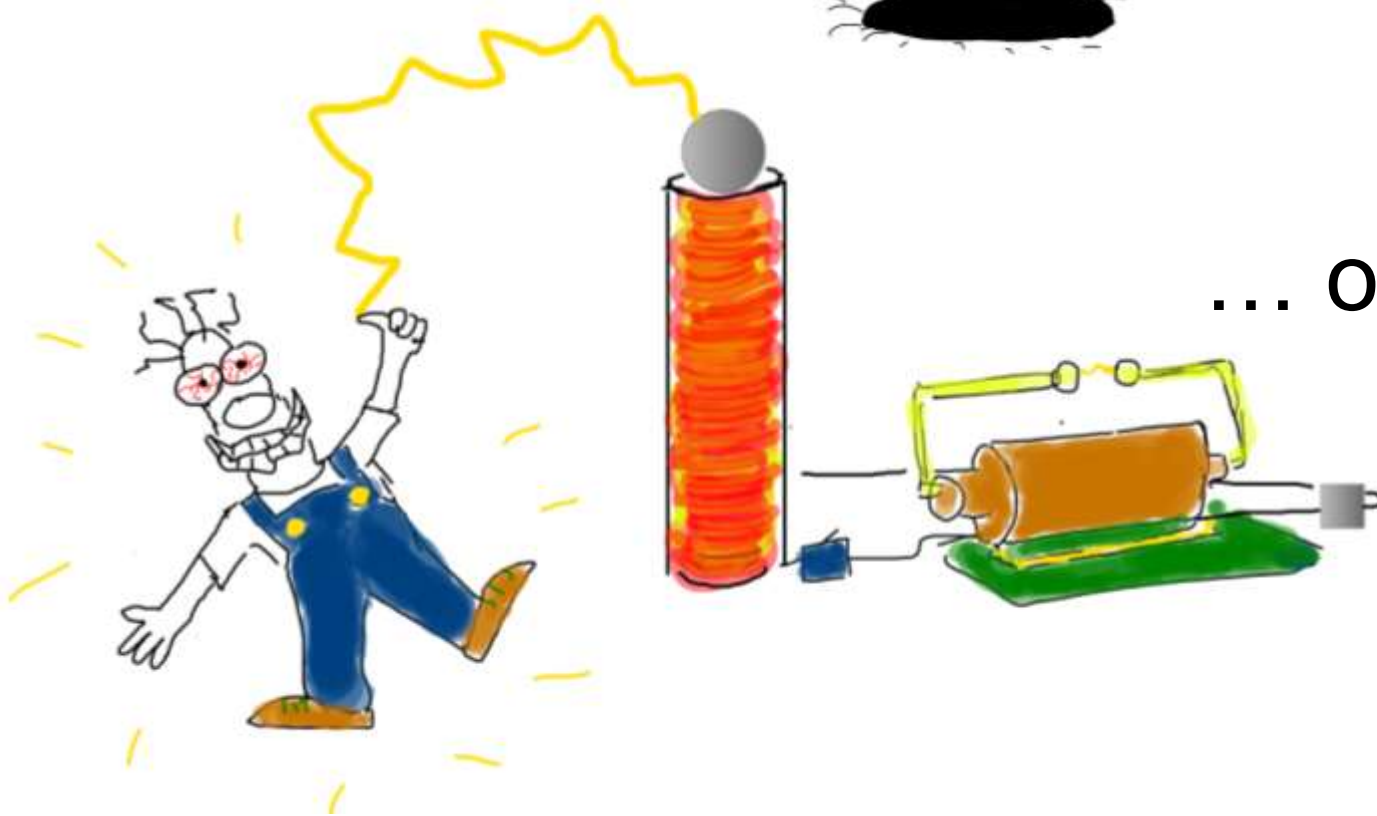
3. Confutazione delle questioni dei positivisti contro gli atomi (L. Boltzmann): la materia è fatta di atomi. E, tanto per ribadire il concetto ...

1905: A. Einstein
(sempre lui!)
interpreta il moto
browniano (moto
caotico di particelle
solide in un fluido)
applicando la
meccanica statistica.



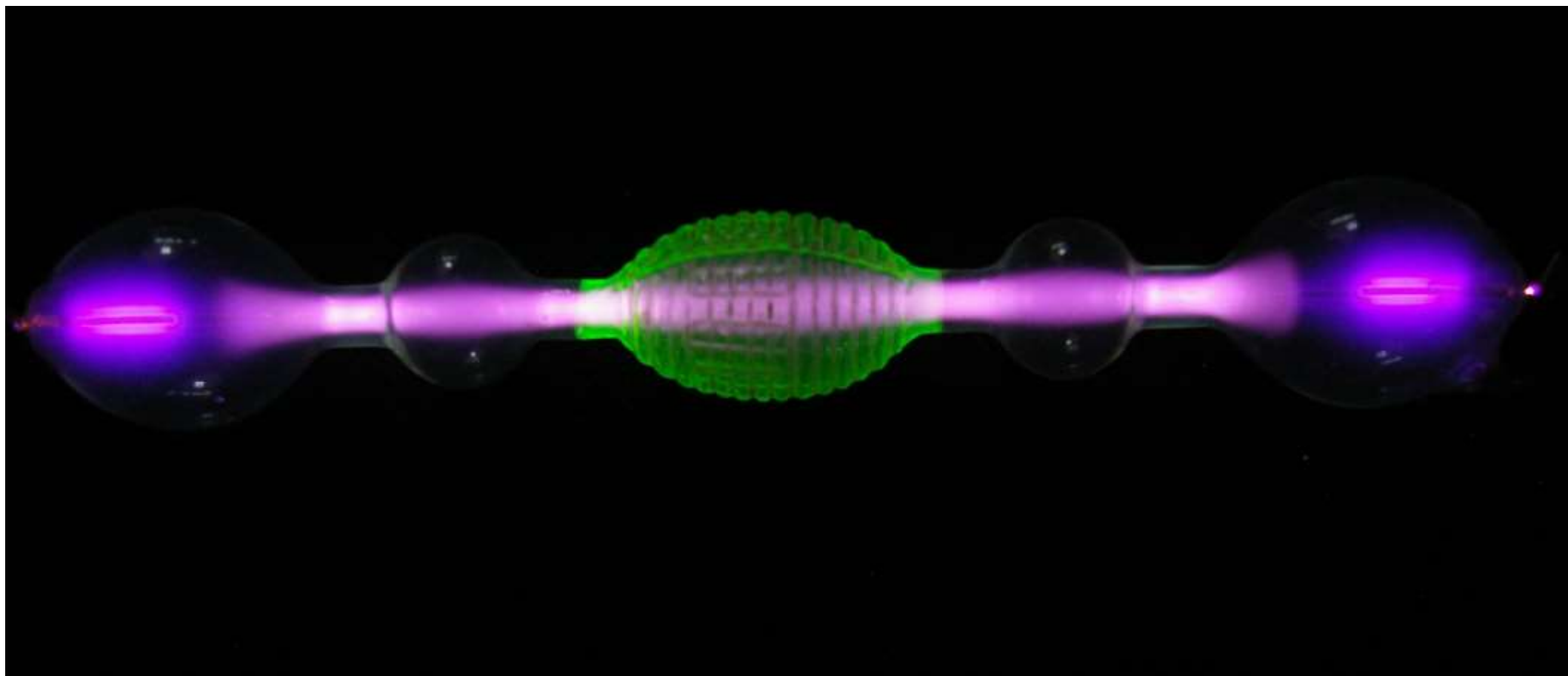
Resta vivo il dibattito su che cos'è la
Fisica ...

Matematici ...



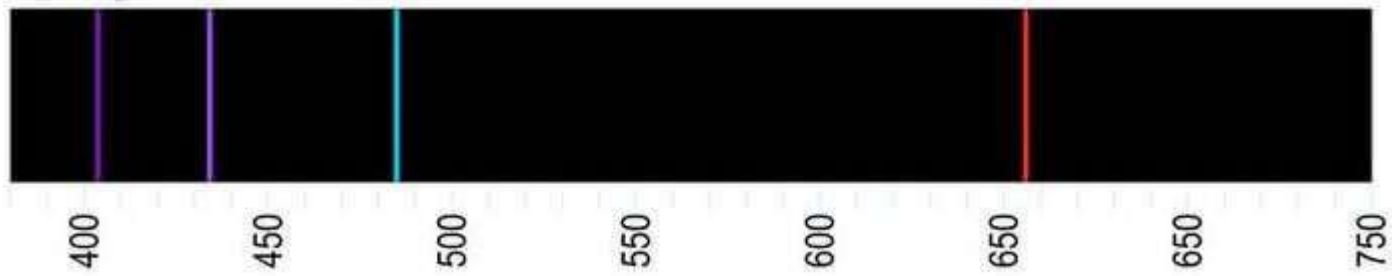
... o smanettoni?

Elettroluminescenza

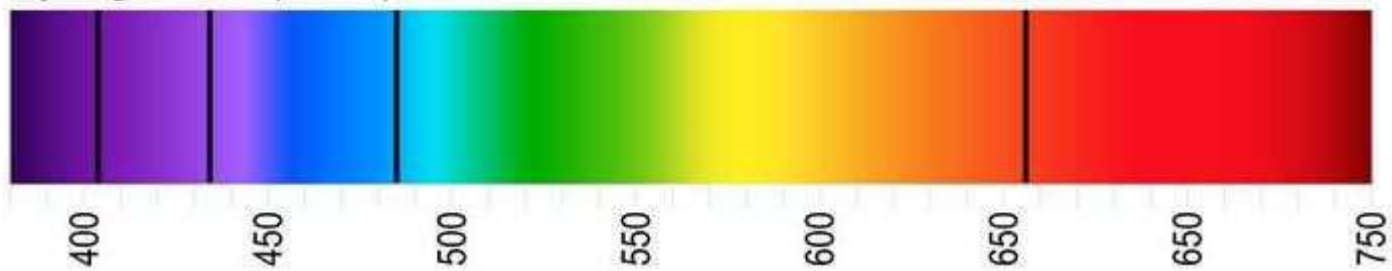


Gli spettri luminosi a righe (emissione ed assorbimento)

Hydrogen Emission spectrum



Hydrogen Absorption spectrum



Cronologia

1896: L'ELETTRONE (J.J. THOMSON)

1896: RAGGI X (W. ROENTGEN)

1897: RADIOATTIVITÀ (H. BECQUEREL)

1900: IL "CORPO NERO" E I
"QUANTI DI LUCE" (M. PLANCK)

1902: IL RADIO (P. E. M. CURIE)

1905: INTERPRETAZIONE
DELL'EFFETTO FOTOELETTRICO
(A. EINSTEIN)

1905: INTERPRETAZIONE DEL "MOTO
BROWNIANO" (A. EINSTEIN)

1907-11: RADIOATTIVITÀ α, β, γ , "TRASMUTAZIONE"
DELLI ELEMENTI (RUTHERFORD)

1911: IL "NUCLEO" (RUTHERFORD)

1913: L'ATOMO QUANTIZZATO (N. BOHR)

1913: IL NUMERO ATOMICO.
(H. MOSELEY)

1924: ONDE DI DE BROGLIE

1926: PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE
(W. HEISENBERG)

1927: MECCANICA ONDULATORIA (E. SCHRÖDINGER)

1928: MECCANICA QUANTISTICA
RELATIVISTICA (P.A.M. DIRAC)

1931: RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE
(J. CURIE e F. JOCIOT)

1932: SCOPERTA DEL NEUTRONE (J. CHADWICK)

1934: TEORIA STATISTICA DI UN GAS DI FERMI

1934: TEORIA DEL DECADIMENTO β
(E. FERMI)

1934: NEUTRONI LENTI (E. FERMI)

1935: INTERAZIONE FORTE (H. YUKAWA)

1935: INTERAZIONE FORTE (H. YUKAWA)

1938: FISSIONE NUCLEARE (O. HAHN, F. STRASSMAN)

1939: CICLO $p-p$ (H. BETHE et al.)

1948: Q.E.D. (R.P. FEYNMAN, J. SCHWINGER,
S. TOMONAGA)

TEORIA QUANTISTICA DELLE
INTERAZIONI FONDAMENTALI
PER "SCAMBIO DI PARTICELLE
VIRTUALI" (MEDIATORI DI
INTERAZIONE).

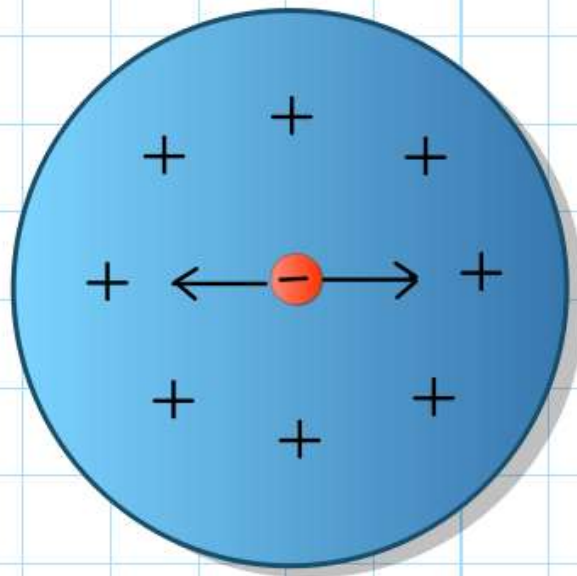
lee ...

ALLORA GLI ATOMI SONO OSCILLATORI?
E CHI È CHE OSCILLA?

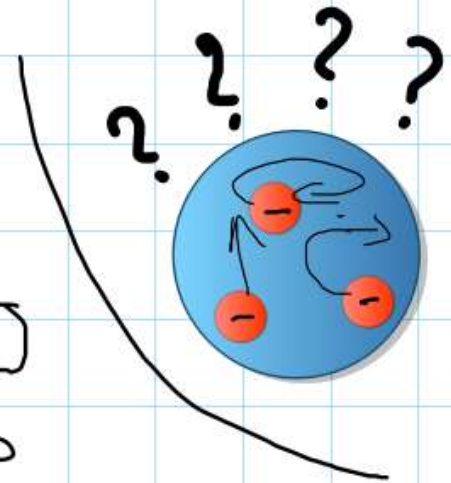
THOMSON HA SCOPERTO CHE I
RAGGI CATTODICI SONO FORMATI DA
PARTICELLE NEGATIVE (ELETTRONI)
QUINDI SONO LORO CHE OSCILLANO.

ATOMO DI THOMSON

1 IDROGENO



ALTRI →



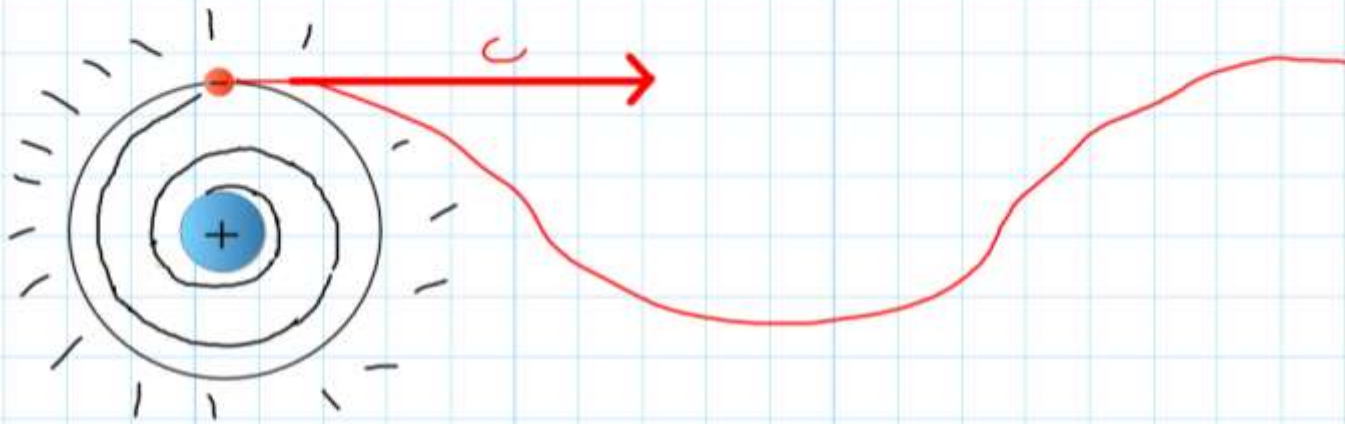
J. J. Thomson immagina l'atomo come una atmosfera sferica di carica positiva a bassa densità con dentro gli elettroni. La stabilità dell'atomo di idrogeno è garantita dal fatto che l'unico elettrone vi si trova in equilibrio stabile al centro.

Trovare configurazioni stabili degli altri atomi è molto più difficile!

Poi l'atomo di Thomson prevede le righe di emissione dell'idrogeno soltanto con ipotesi “ad hoc” sulla sua distribuzione della carica positiva.

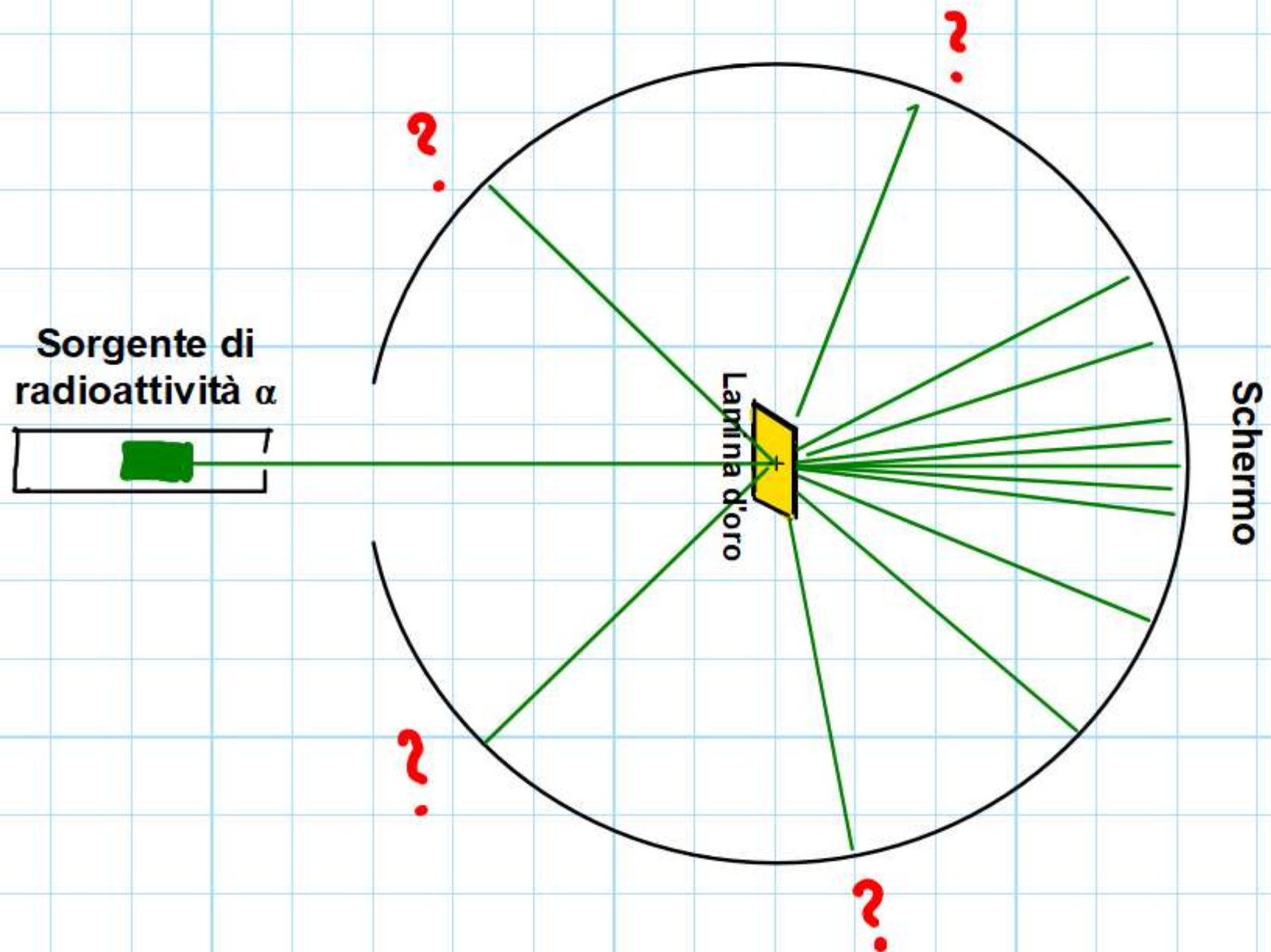
Per gli spettri degli altri atomi non funziona.

È L'ATOMO COL NUCLEO E
GLI ELETTRONI INTORNO
COME PIANETI INTORNO AL SOLE?



Un atomo simile (Perrin 1908) perderebbe continuamente energia per irraggiamento (una carica accelerata emette radiazione elettromagnetica) e collasserebbe in pochi minuti.

Esperimento di Rutherford (1911)



Perché riflessioni a grandi angoli?
Minuscoli grumi "duri" separati da enormi vuoti!

Dalla distribuzione delle direzioni di scattering alle dimensioni dei pieni e dei vuoti

$$\text{NUCLEO} \approx 10^{-13} \text{ cm}$$

$$\begin{array}{l} \text{SPAZI} \\ \text{INTERNUCLEARI} \end{array} \approx \begin{array}{l} \text{DIMENSIONI} \\ \text{ATOMI} \end{array} \approx 10^{-8} \text{ cm}$$

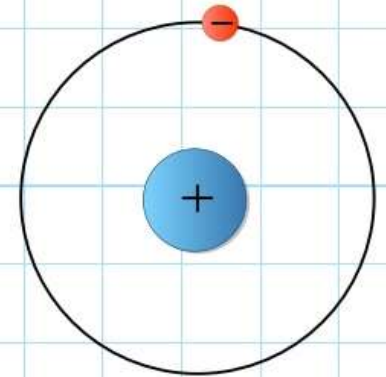
L'atomo quantizzato (N. Bohr 1913)

INTEGRALE DI AZIONE: $A = \int_{t_0}^{t_1} \mathcal{L} dt$

$\Rightarrow \oint \sum_i p_i \cdot dq_i = m v \cdot 2\pi r$
su di un
percorso
chiuso

$$\left[\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \text{s} = \text{J} \cdot \text{s} \right]$$

$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$



***Ipotesi di Bohr: l'Azione è quantizzata
(condizione di stabilità delle orbite
elettroniche)***

Un po' di calcoli ...

$$A = m h$$

$$2\pi r m v = m h$$

$$r m v = m \frac{h}{2\pi} = m \hbar$$

PER ORBITE CIRCOLARI: $m \cdot a = F$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}$$

$$\frac{m v^2 r^2}{m r} = e^2$$

$$\frac{m^2 \hbar^2}{m r} = e^2 \Rightarrow$$

$$r_n = \frac{\hbar^2}{m e^2} n^2$$

RAGGIO DI BOHR

$$r_0 = \frac{\hbar^2}{m e^2} = \frac{(1,05 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec})^2}{0,911 \cdot 10^{-27} \text{ g} \cdot (4,8 \cdot 10^{-10} \text{ es})^2} =$$

$$\approx 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm} = 0,5 \text{ \AA}$$

LIVELLI ENERGETICI E SPETTRO DELL'IDROGENO

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{e^2}{r} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r} - \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r}$$

$m \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}$ $\nearrow$

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n} = -\frac{m e^4}{2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

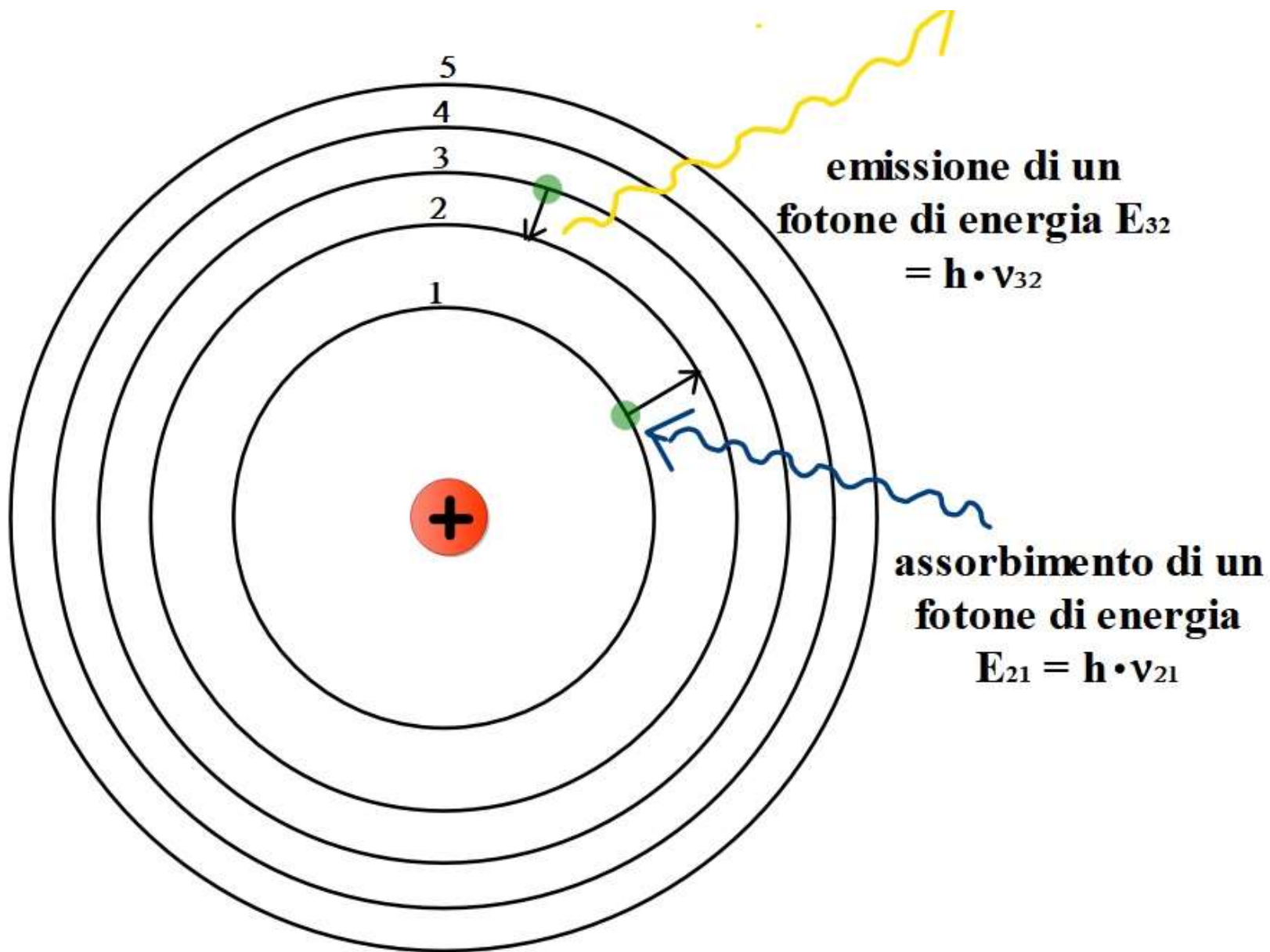
FREQUENZA DI UN SALTO QUANTICO TRA 2 LIVELLI ENERGETICI

$$h \nu_{mm} = \frac{E_m - E_n}{2\pi \hbar} = \boxed{\frac{m e^4}{4\pi \hbar^3}} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

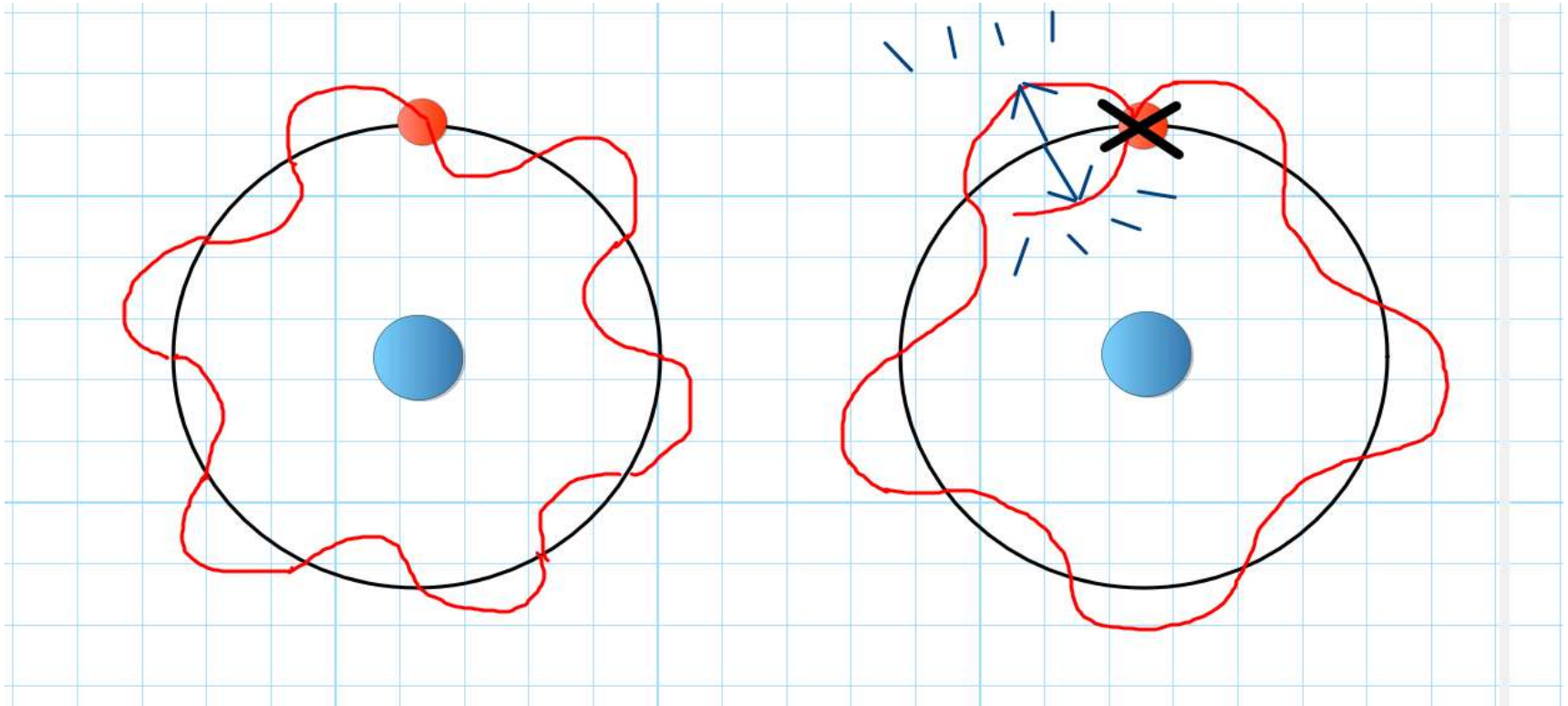
$$\frac{1}{\lambda_{mm}} = \frac{\nu_{mm}}{c} = \boxed{\frac{m e^4}{4\pi \hbar^2 c}} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$R_H = \frac{0,911 \cdot (4,8 \cdot 10^{-10})^4}{4\pi (1,05 \cdot 10^{-27})^2 \cdot 3 \cdot 10^{10}} \approx 1,1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

COSTANTE DI RYDBERG



Ma da dove viene la stabilità? La risposta nelle
“particelle – onde” (L. V. De Broglie)



$$2\pi r = n\lambda$$
$$\Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow 2\pi r p = n h$$

AZIONE
QUANTIZZATA
DI BOHR.

RELAZIONI DI DE BROGLIE

$$\left(\begin{array}{l} \text{LUNGHEZZA} \\ \text{D'ONDA} \end{array} \right) \lambda = \frac{h}{p}$$

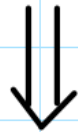
$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \left(\begin{array}{l} \text{QUANTITÀ} \\ \text{DI} \\ \text{MOTO} \end{array} \right)$$

$$\left(\text{FREQUENZA} \right) \nu = \frac{E}{h}$$

$$E = h\nu \quad \left(\text{ENERGIA} \right)$$

LE PARTICELLE DIVENTANO
ONDE.

Particella in una scatola

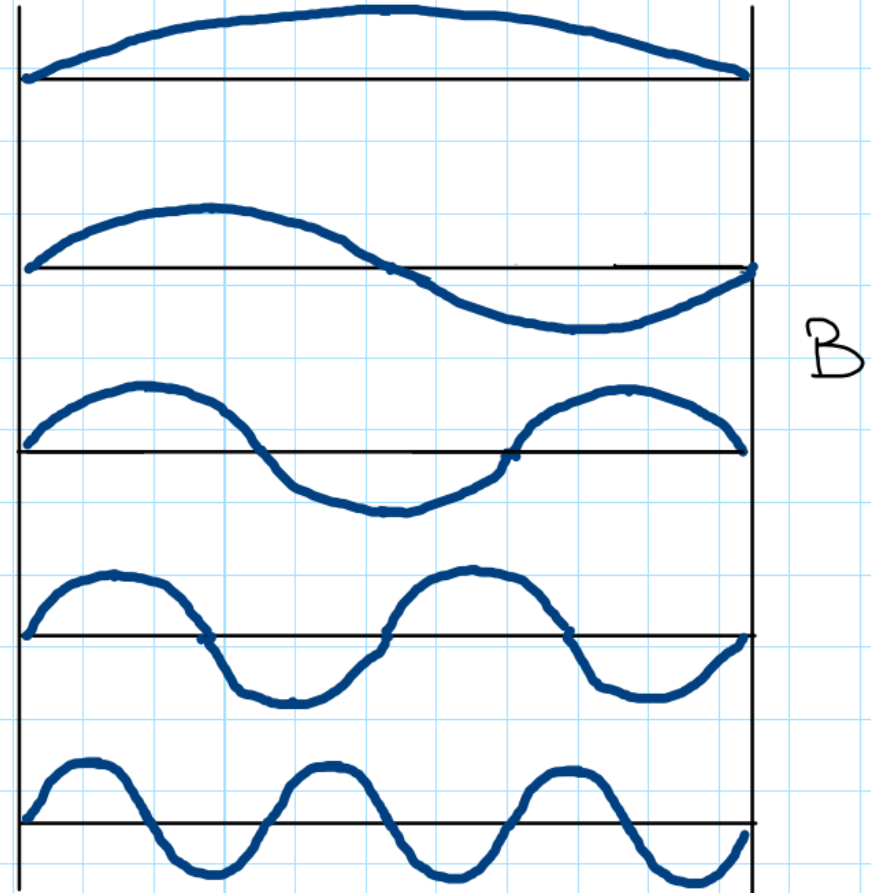


Onde Stazionarie:
solo alcuni modi di oscillazione
riescono a sopravvivere



L'Energia di una particella - onda
assume valori discreti"

A



Le cose si complicano un po' troppo ... per mettere ordine, pensiamo agli "osservabili"!

W. HEISENBERG

LE TEORIE FISICHE DEVONO SOLO
PREVEDERE LE GRANDEZZE OSSERVABILI;
NON DEVONO PER FORZA ESSERE RICONDOTTE
AD IMMAGINI ...



MECCANICA MATRICIALE

NOI OSSERVIAMO SOLTANTO
FENOMENI DOVUTI A PASSAGGI DI
STATO; SE INDICHIAMO OGNI STATO
CON UN NUMERO INTERO PROGRESSIVO
OGNI VALORE MISURATO DI UNA QUALSIASI
GRANDEZZA OSSERVABILE POTRÀ ESSERE
ORDINATA IN RELAZIONE AL VARIARE DI
2 DI QUESTI NUMERI, FORMANDO UN
INSIEME DI NUMERI "DISCRETI" CON UN
DOPPIO ORDINAMENTO CHIAMATO "MATRICE".

ESEMPIO: TRANSIZIONI ENERGETICHE
DELL' ATOMO (DA LIVELLO i
A LIVELLO j)

$$\begin{pmatrix} E_{00}=0 & E_{01} & E_{02} & E_{03} & \dots \\ E_{10} & E_{11}=0 & E_{12} & E_{13} & \dots \\ E_{20} & E_{21} & E_{22}=0 & E_{23} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ E_{m0} & E_{m1} & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

TUTTE LE GRANDEZZE SONO ESPRESSE DALLE
MATRICI DELLE LORO POSSIBILI MISURE.

2 MISURE DI GRANDEZZE IN SUCCESSIONE



PRODOTTO DELLE LORO
MATRICI

$$\begin{array}{c} A \\ \left(\begin{array}{cc} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{array} \right) \end{array} \cdot \begin{array}{c} B \\ \left(\begin{array}{cc} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{array} \right)$$

$$\begin{array}{c} \left(\begin{array}{cc} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{array} \right) \\ B \end{array} \cdot \begin{array}{c} \left(\begin{array}{cc} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{array} \right) \\ A \end{array} = \left(\begin{array}{cc} b_{11}a_{11} + b_{12}a_{21} & b_{11}a_{12} + b_{12}a_{22} \\ b_{21}a_{11} + b_{22}a_{21} & b_{21}a_{12} + b_{22}a_{22} \end{array} \right)$$

$$A \cdot B \neq B \cdot A$$

p = QUANTITÀ DI MOTO

q = POSIZIONE

$$q \cdot p \neq p \cdot q$$

$$q p - p q = \frac{h}{2\pi i}$$

PRINCIPIO

DI
INDETERMINAZIONE

DI
HEISENBERG
(1926)

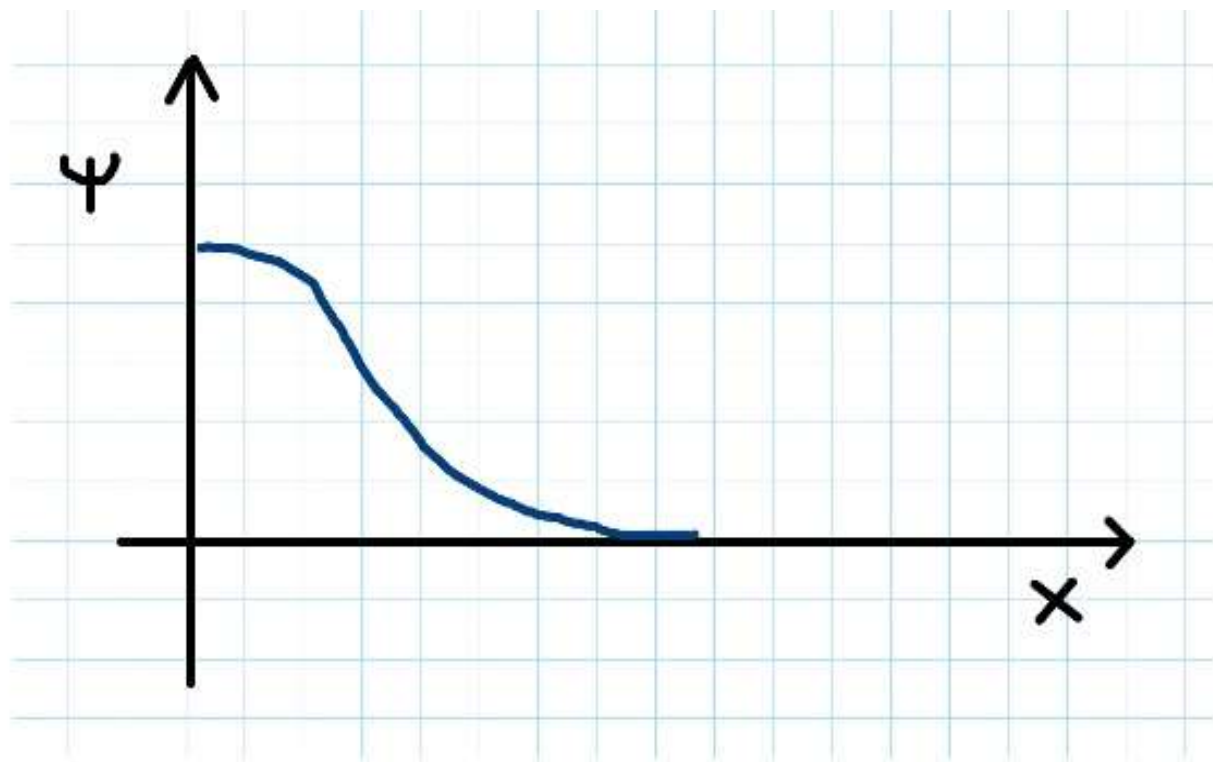
LA POSIZIONE DI HEISENBERG

STIMOLA IL DIBATTITO FILOSOFICO SU

COSA SIGNIFICA CAPIRE, TRA:

- (1) NEOPOSITIVISTI LOGICI (R. CARNAP)
 - (2) BERTRAND RUSSEL
 - (3) KARL POPPER
- ecc...

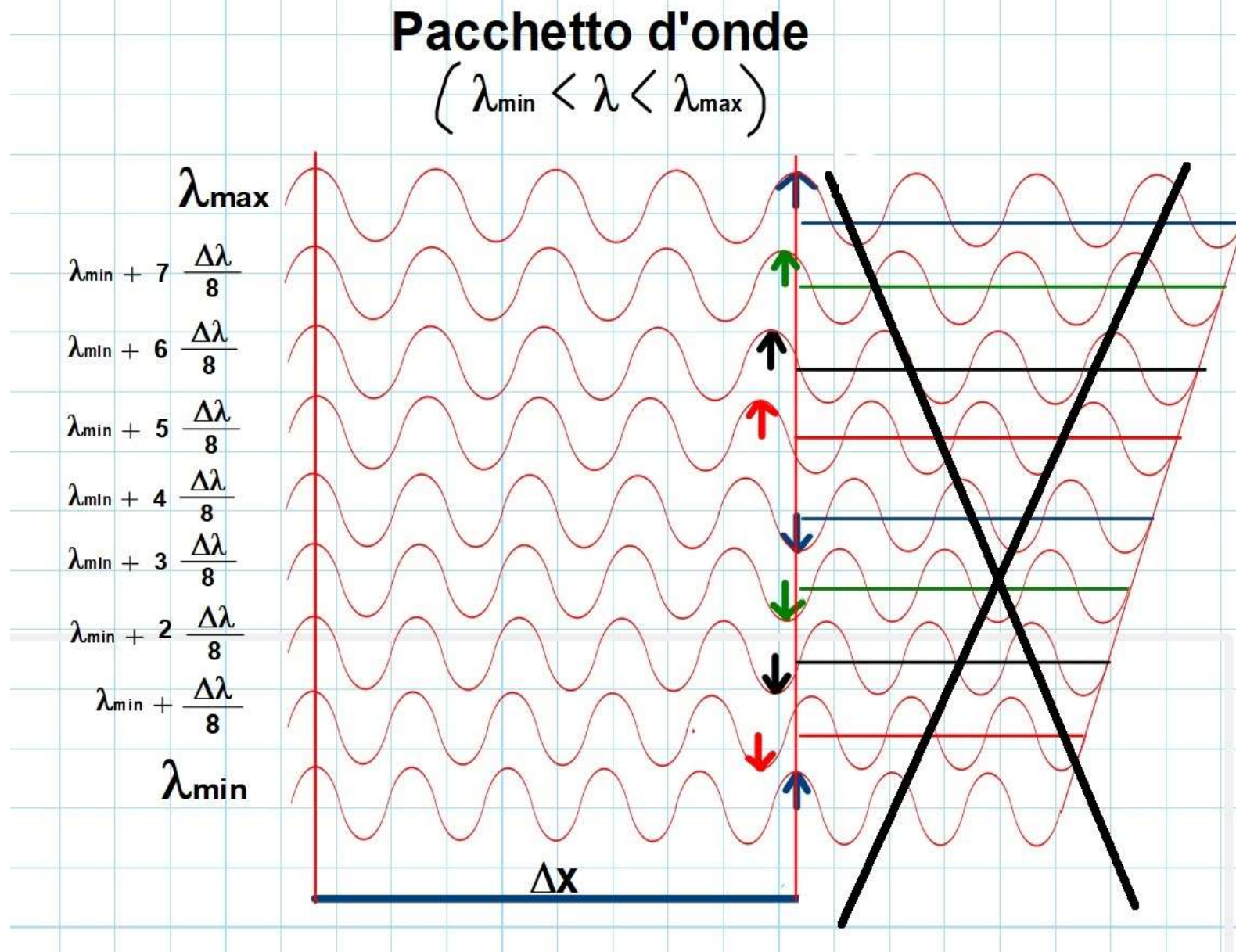
Dalla meccanica ondulatoria al principio di indeterminazione (E. Schroedinger 1927)



Un impulso di lunghezza Δx si può scomporre in un "pacchetto d'onde" continuo con lunghezze d'onde distribuite su di un intervallo $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$

Se le onde partono in fase a $x = 0$ si sommano costruttivamente e quindi c'è il picco dell'impulso.

Dopo Δx la più lunga e la più corta sono di nuovo in fase (differenza di un ciclo).



Quando questo succede però tutte le onde del pacchetto si trovano in opposizione di fase a due a due, quindi il pacchetto si annulla tutto! Δx è quindi la lunghezza della perturbazione trasmessa.

$$\frac{\Delta x}{\lambda_{\max}} = 4$$

$$\frac{\Delta x}{\lambda_{\min}} = 5$$

$$\frac{\Delta x}{\lambda_{\min}} - \frac{\Delta x}{\lambda_{\max}} = 1$$

$$K = \frac{1}{\lambda}$$

$$\Delta x (K_{\max} - K_{\min}) = 1$$

$$\boxed{\Delta x \cdot \Delta K = 1}$$

$$\Delta x \cdot \Delta k = 1$$

LEGGI DI

DE BROGLIE

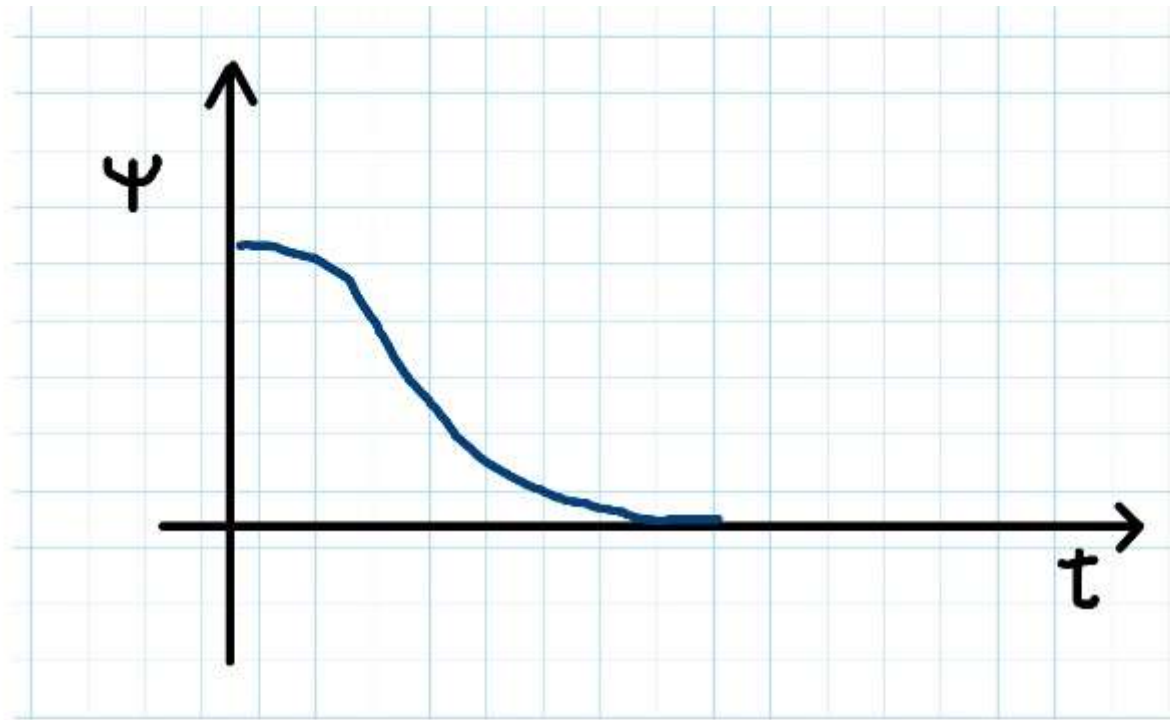
$$p = \frac{h}{\lambda} = h k$$

$$\textcircled{h} \Delta x \cdot \textcircled{\Delta k} = h$$

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

FORMA
ONDULATORIA
DEL PRINCIPIO
DI INDETERMINAZIONE

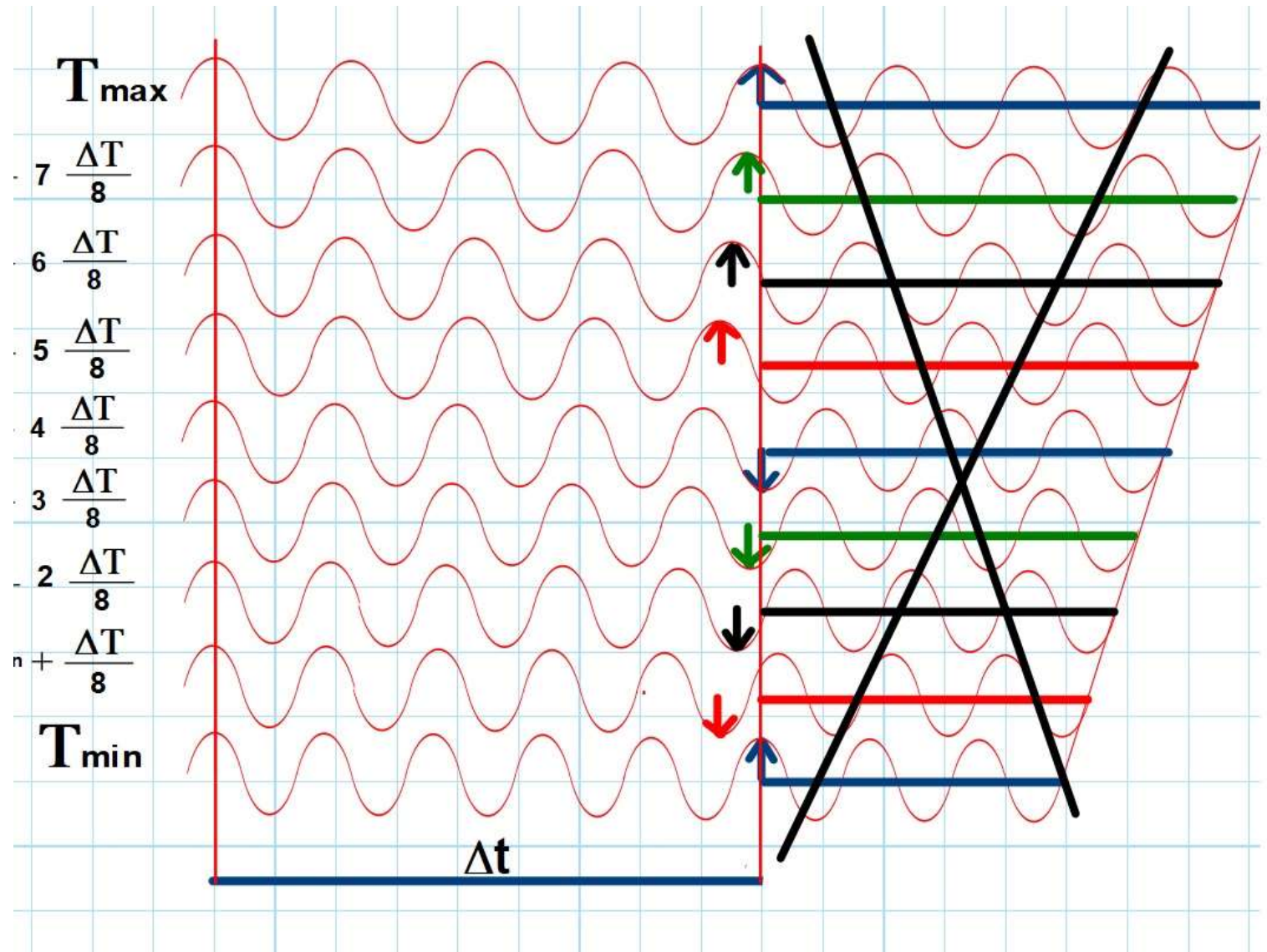
Indeterminazione energia – tempo



Allo stesso modo un impulso di lunghezza Δt si può scomporre in un "pacchetto d'onde" continuo con frequenze distribuite su di un intervallo $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$

Se le onde partono in fase a $t = 0$ si sommano costruttivamente e quindi c'è il picco dell'impulso.

Dopo Δt la più lunga e la più corta sono di nuovo in fase (differenza di un ciclo).



Quando questo succede però tutte le onde del pacchetto si trovano in opposizione di fase a due a due, quindi il pacchetto si annulla tutto! Δt è quindi l'intervallo di tempo della perturbazione trasmessa.

$$\frac{\Delta t}{T_{\text{MAX}}} = 4$$

$$\frac{\Delta t}{T_{\text{MIN}}} = 5$$

$$\frac{\Delta t}{T_{\text{MIN}}} - \frac{\Delta t}{T_{\text{MAX}}} = 1$$

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

$$\Delta t (\nu_{\text{MAX}} - \nu_{\text{MIN}}) = 1$$

$$\boxed{\Delta t \cdot \Delta \nu = 1}$$

$$\Delta t \cdot \Delta \nu = 1$$

LEGGI DI
DE BROGLIE

$$E = h\nu$$

$$\textcircled{h} \Delta t \cdot \Delta \nu = h$$

$$\Delta t \cdot \Delta E = h$$

FORMA
ONDULATORIA
DEL PRINCIPIO
DI INDETERMINAZIONE
ENERGIA - TEMPO

La larghezza delle righe degli spettri a emissione ed assorbimento e l'indeterminazione del tempo delle transizioni elettroniche.

Prova sperimentale: la diffrazione di un fascio di elettroni

DAVISSON - GERMER (1927)

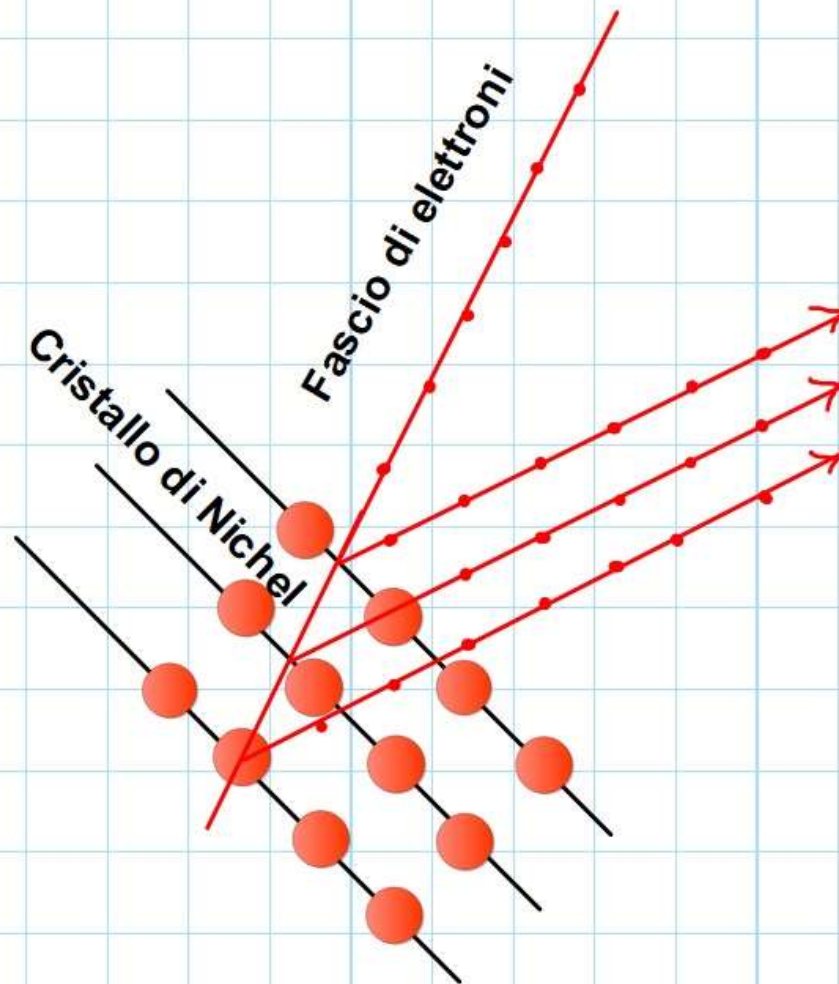


Figura di diffrazione

Meccanica quantistica e mondo del “probabile” (M. Born)

EQUAZIONE DI
SCHRÖDINGER

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

FUNZIONE D'ONDA DI UNA
PARTICELLA LIBERA

$$\psi(x,t) = A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$$

$$|\psi|^2 = A^2(x, y, z)$$

$$\int_V |\psi|^2 dx dy dz = P(V)$$

(PROBABILITÀ DI
TROVARE LA
PARTICELLA NEL
VOLUME V)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_m^* \psi_m \, dx \, dy \, dz = \langle \psi_m | \psi_m \rangle$$

2 STATI POSSIBILI MUTUAMENTE
ESCLUDENTISI SONO RAPPRESENTATI
DALLE FUNZIONI D'ONDA $|\psi_1\rangle$ e $|\psi_2\rangle$

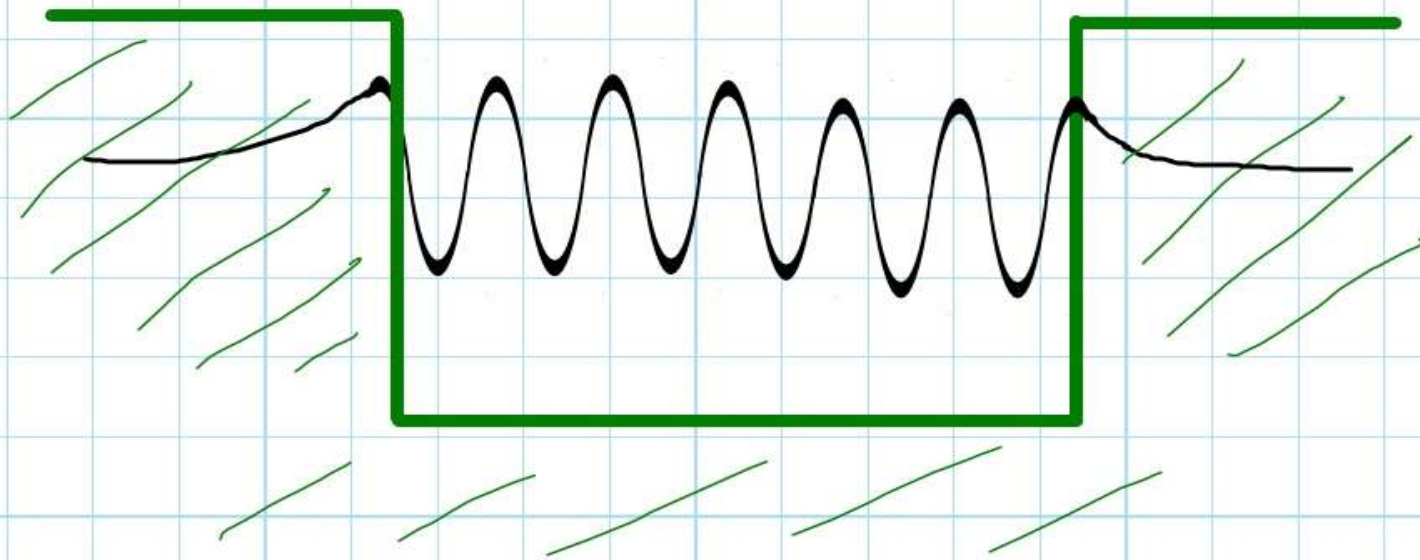
$$\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle = 0$$

$$\langle \psi_1 | \psi_1 \rangle = 1$$

$$\langle \psi_2 | \psi_2 \rangle = 1$$

Roba da pazzi? Eppure funziona! L'effetto "tunnel"

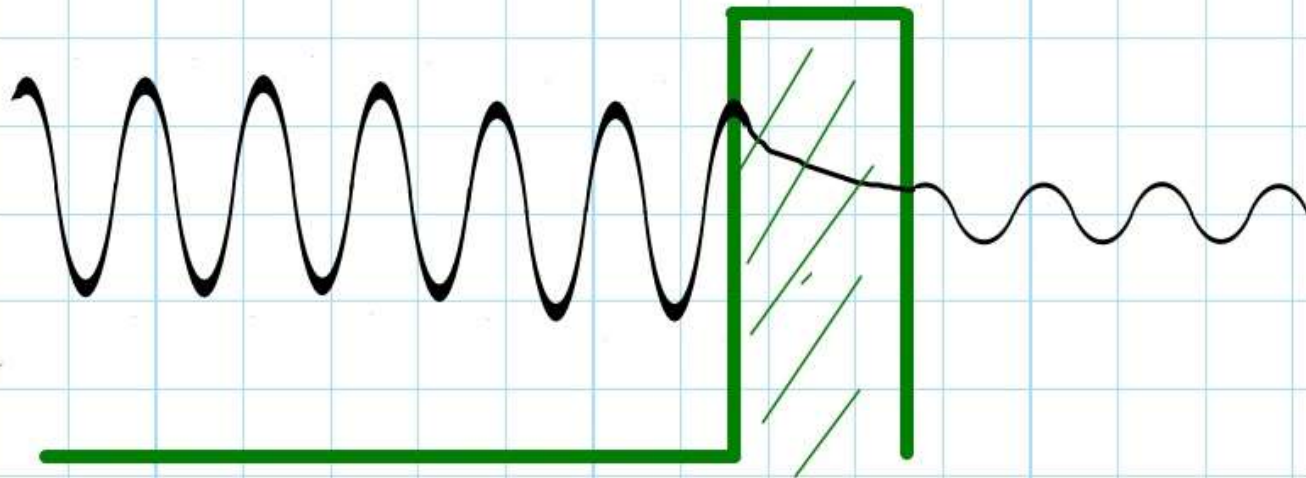
Onda - particella in una scatola/buca di potenziale



La linea verde rappresenta il potenziale di un campo di forze che costringe la particella a restare confinata in un certo intervallo di posizione.

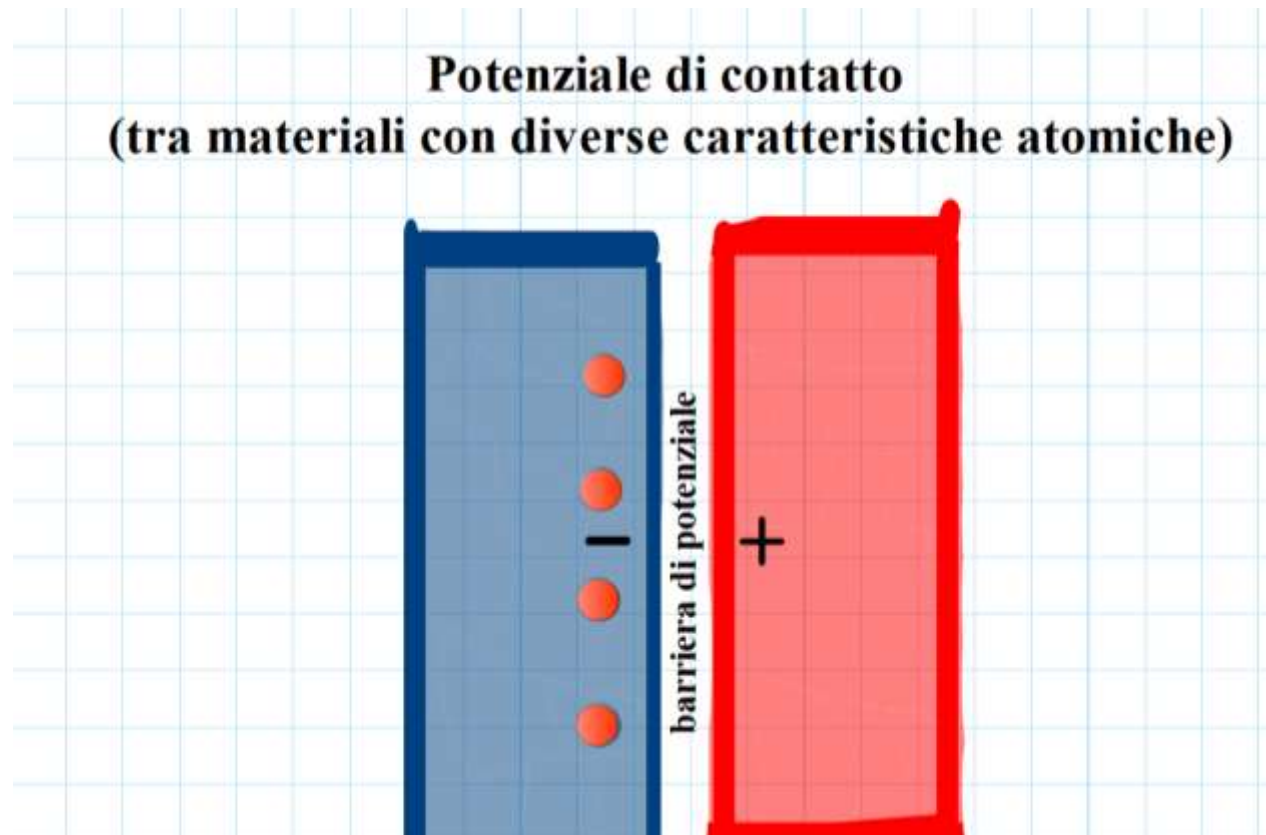
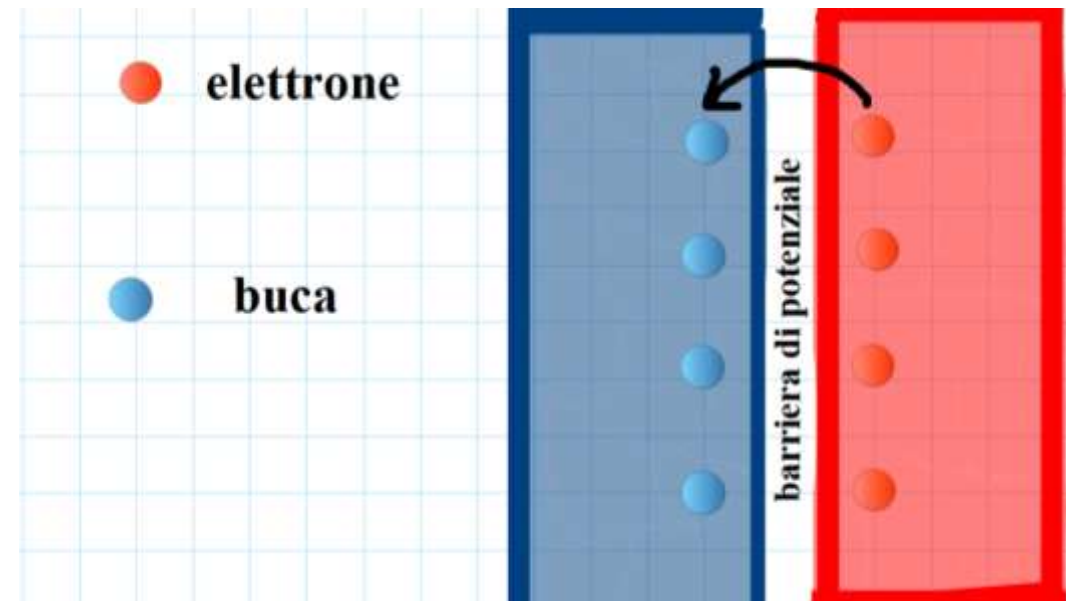
Saltare un ostacolo? No, passarci attraverso!
Un'onda può!

Onda - particella e barriera di potenziale: l'effetto "tunnel"

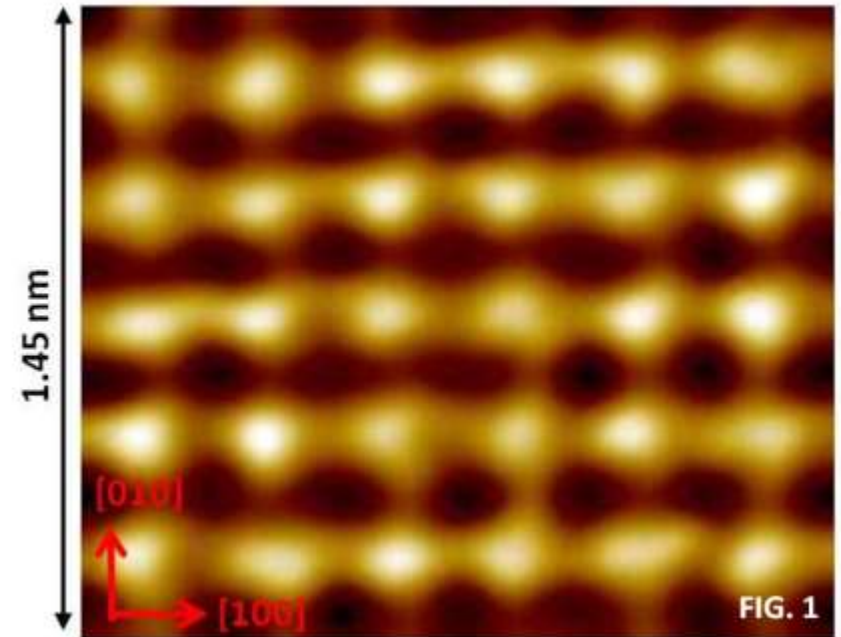
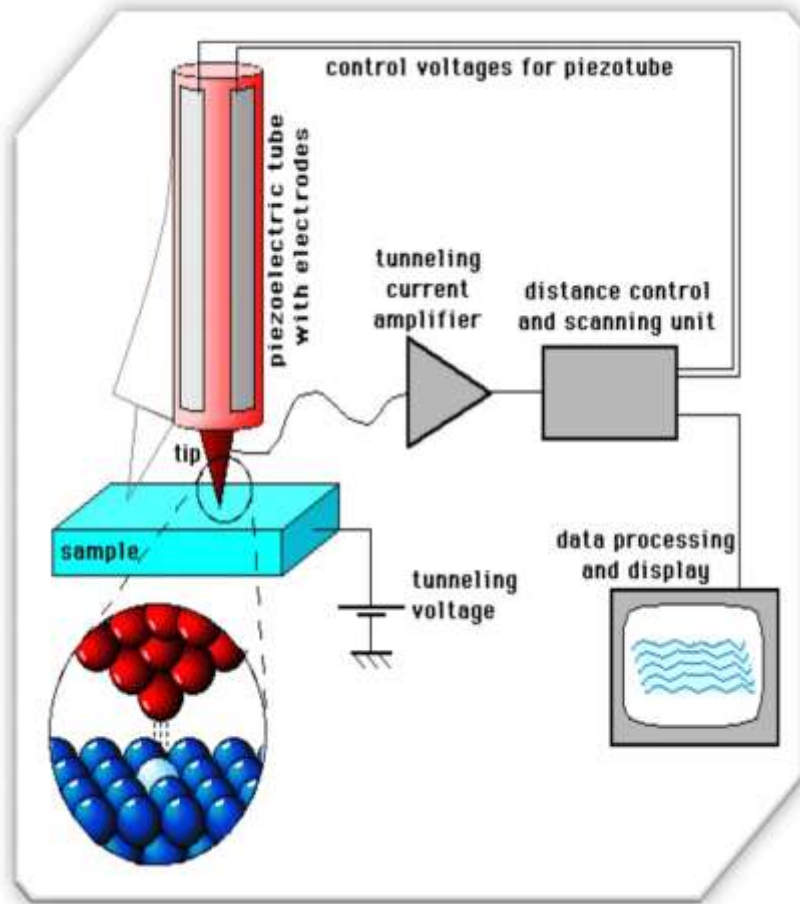


Applicazione: i potenziali di contatto

- L'effetto volta e la pila
- Le giunzioni a semiconduttori alla base della tecnologia digitale



I microscopi STM (Scanning Tunneling Microscope): per osservare la disposizione degli atomi nelle molecole! (G. Binnig e H. Rohrer, premio Nobel 1986)



In Astrofisica

Perché negli interni stellari le temperature sono più basse di quelle che richiederebbe la barriera di potenziale della repulsione coulombiana per l'innesco della fusione dell'idrogeno?

$$E_{cin} + E_p = 0$$

$$\frac{3}{2} k T = \frac{e^2}{r}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-16} \frac{\text{erg}}{^\circ\text{K}} \Rightarrow T \approx 10^9 \text{ } ^\circ\text{K}$$

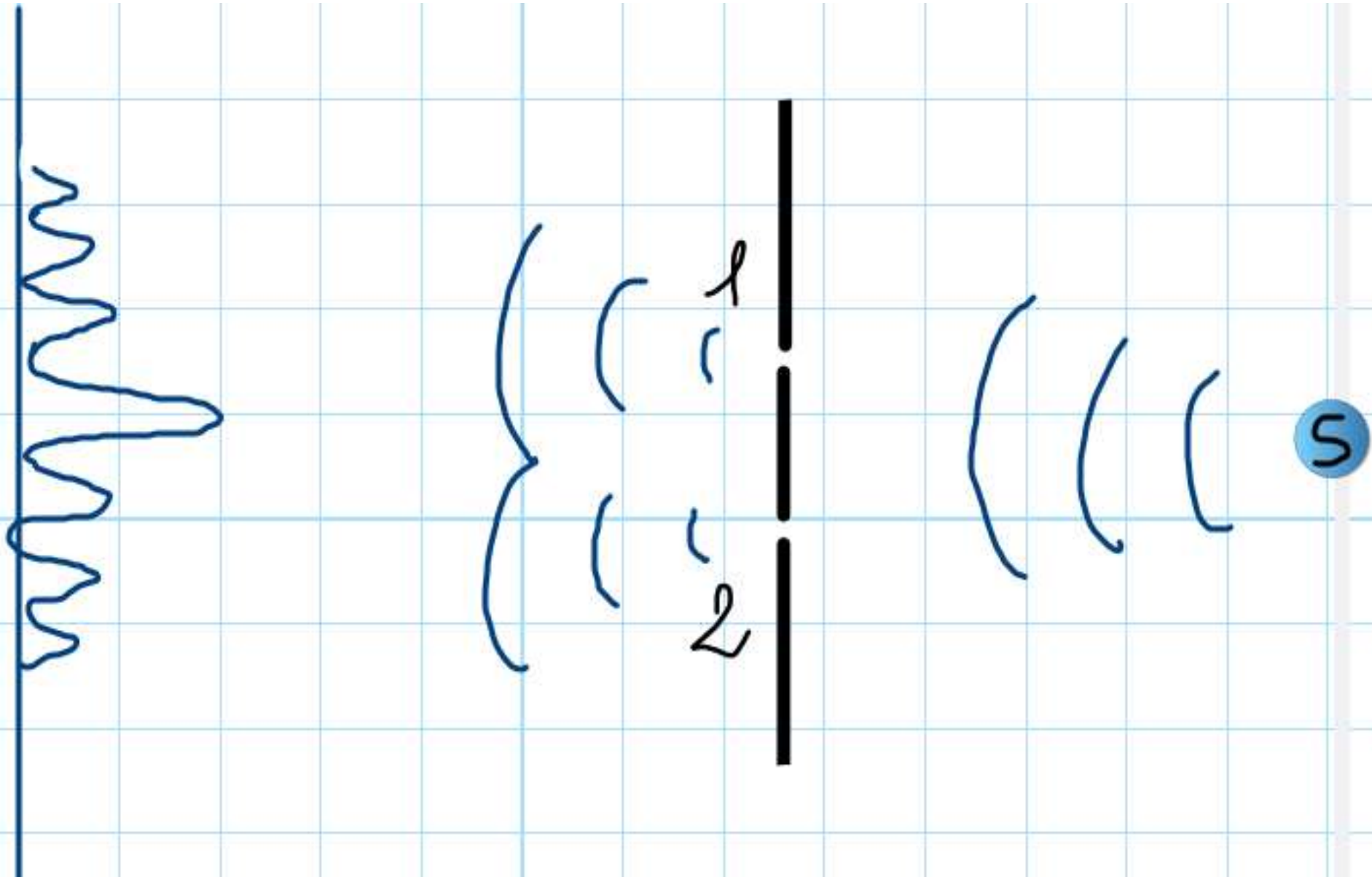
$$r = 10^{-13} \text{ cm}$$

$$e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ u.e.s.}$$

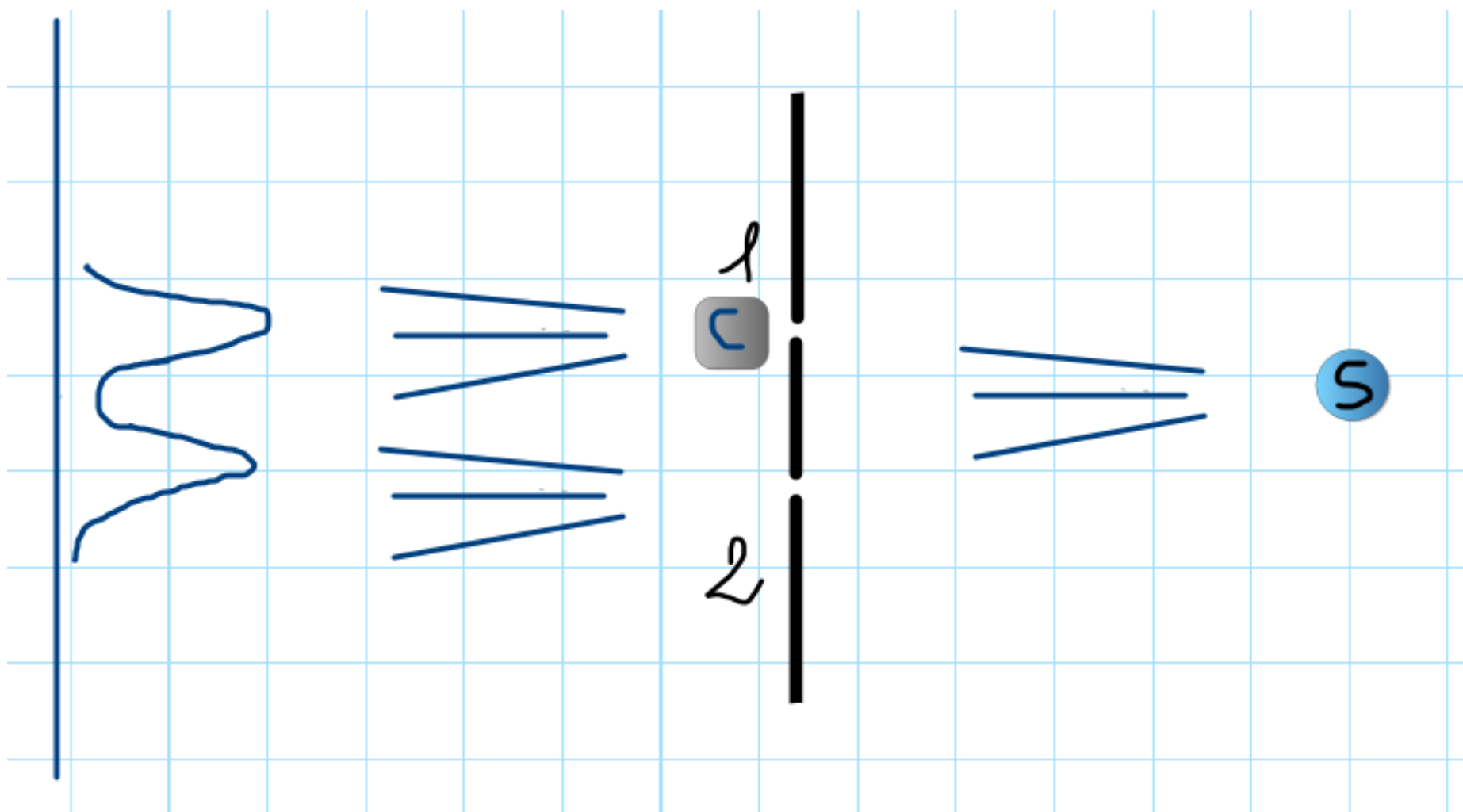
Stranezze

La situazione: una sorgente luminosa qualunque invia un fotone alla volta verso due fenditure. Inizialmente rinunciamo a sapere da che parte è passato il fotone e otteniamo ...

... una figura di interferenza!



Ora applico un contatore ad una fenditura (ad esempio la 1), ma a questo punto ottengo la figura prodotta da due fasci distinti di corpuscoli ...



Prima della misura (posizionale) ...

$$|\psi\rangle = A|\psi_1\rangle + B|\psi_2\rangle$$

$$\begin{aligned}\langle\psi|\psi\rangle &= \langle A\psi_1 + B\psi_2 | A\psi_1 + B\psi_2 \rangle = \\ &= A^2 \underbrace{\langle\psi_1|\psi_1\rangle}_{1''} + B^2 \underbrace{\langle\psi_2|\psi_2\rangle}_{1''} + AB \cdot (\underbrace{\langle\psi_1|\psi_2\rangle}_{0''} + \underbrace{\langle\psi_2|\psi_1\rangle}_{0''})\end{aligned}$$

$$\langle\psi|\psi\rangle = A^2 + B^2$$

$$\langle \psi | \psi \rangle = A^2 + B^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$

(STATI EQUIPROBABILI)

$$A = B = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

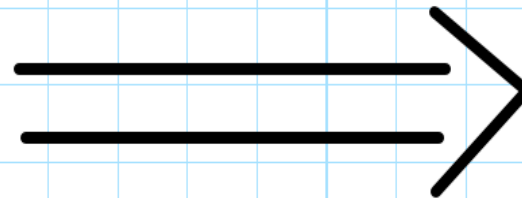
$\frac{1}{2}$ = PROBABILITÀ CHE PASSI PER UNA
QUALSIASI DELLE 2 FENDITURE.

Schema del processo di misurazione

$$A|\psi_1\rangle + B|\psi_2\rangle$$

**non so per dove
passa il fotone**

**misurazione
posizionale**



$$|\psi_1\rangle$$

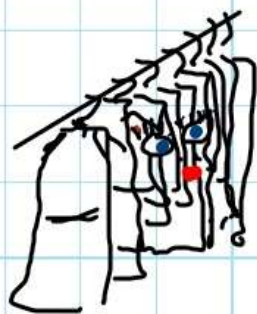
(passa per 1)

$$|\psi_2\rangle$$

(passa per 2)

misura = scelta

"RIDUZIONE DEL PACCHETTO"



PRIMA



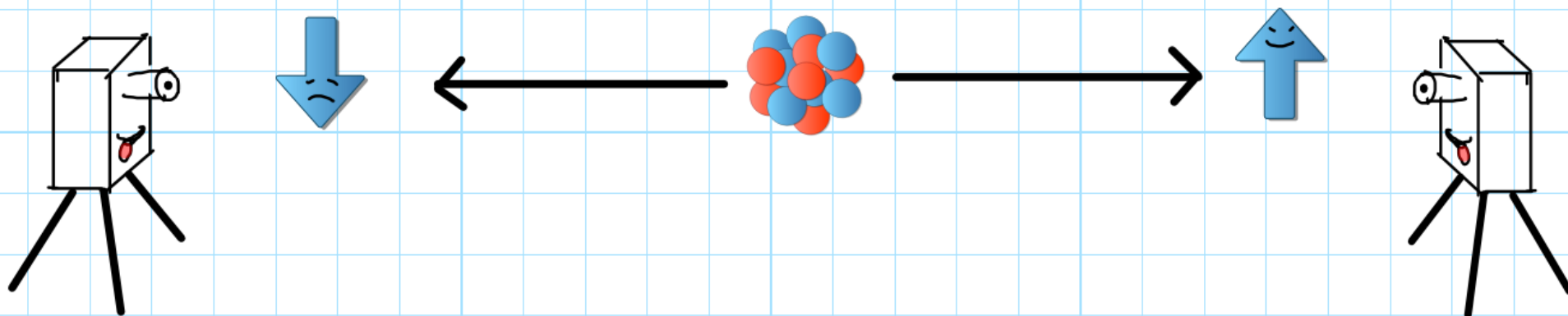
DOPO

CHE COSA È SUCCESSO?

HO CAMBIATO QUALCOSA IN (1),
E NELLO STESSO ISTANTE ANCHE IN
(2) ???
...

... O IL FOTONE È UN
BURLONE?

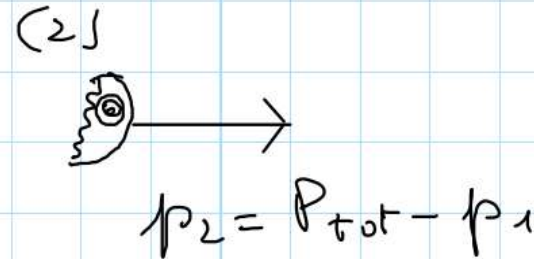
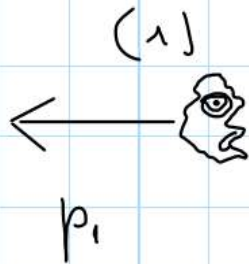
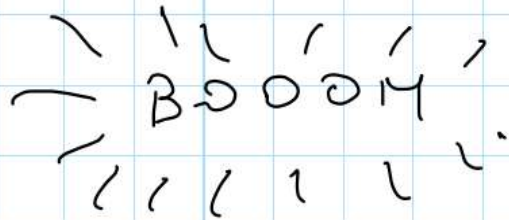
Entanglement quantistico (telepatia, teletrasporto, telemenesochè?!)



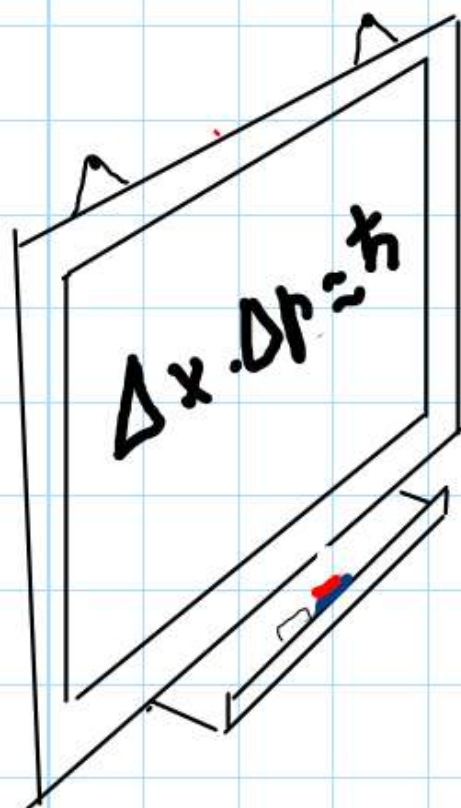
1936: ESPERIMENTO IDEALE DI EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN.



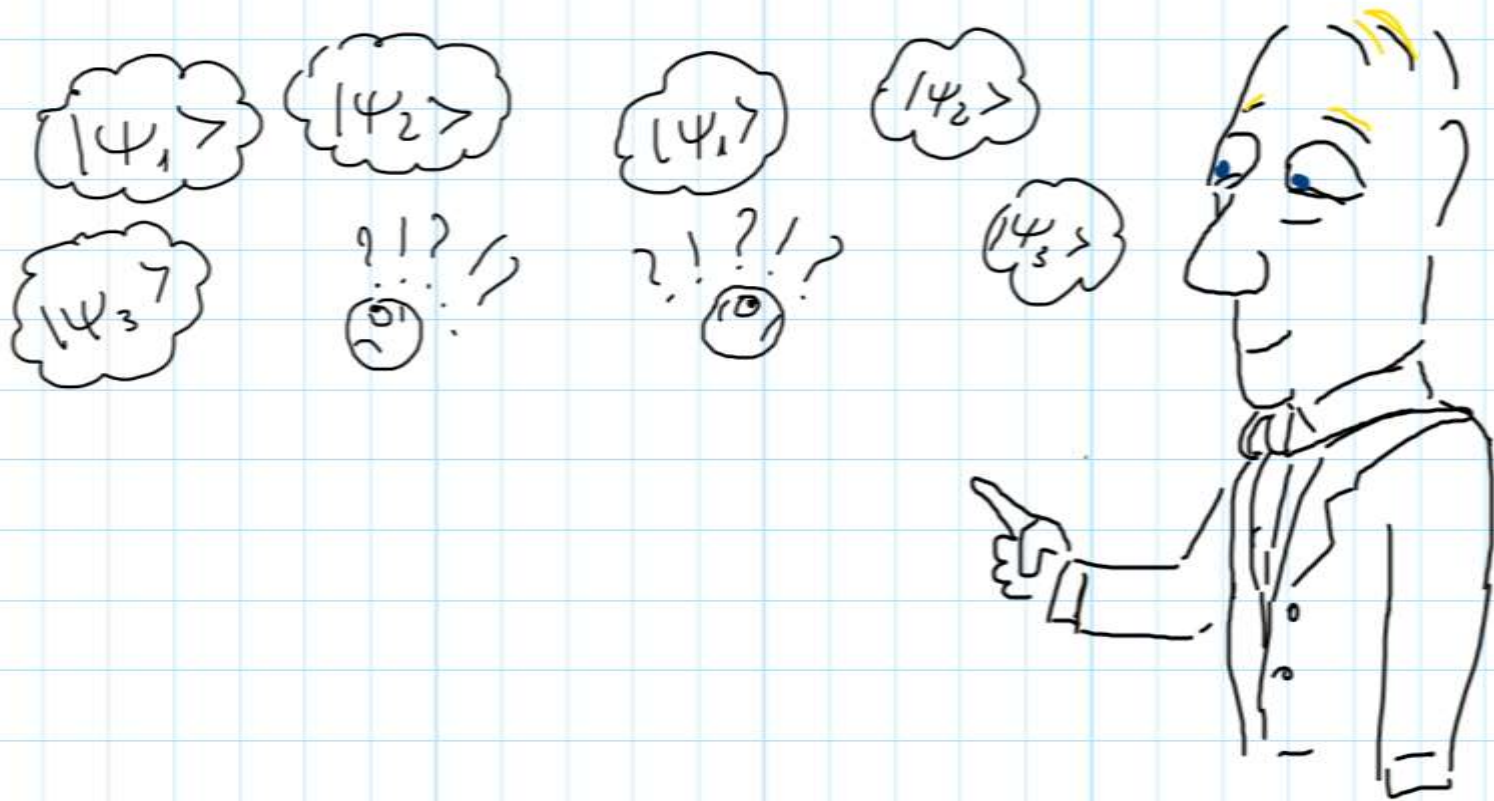
$$P_{tot} = \text{costante}$$



SE MISURO X_2
DIRETTAMENTE...



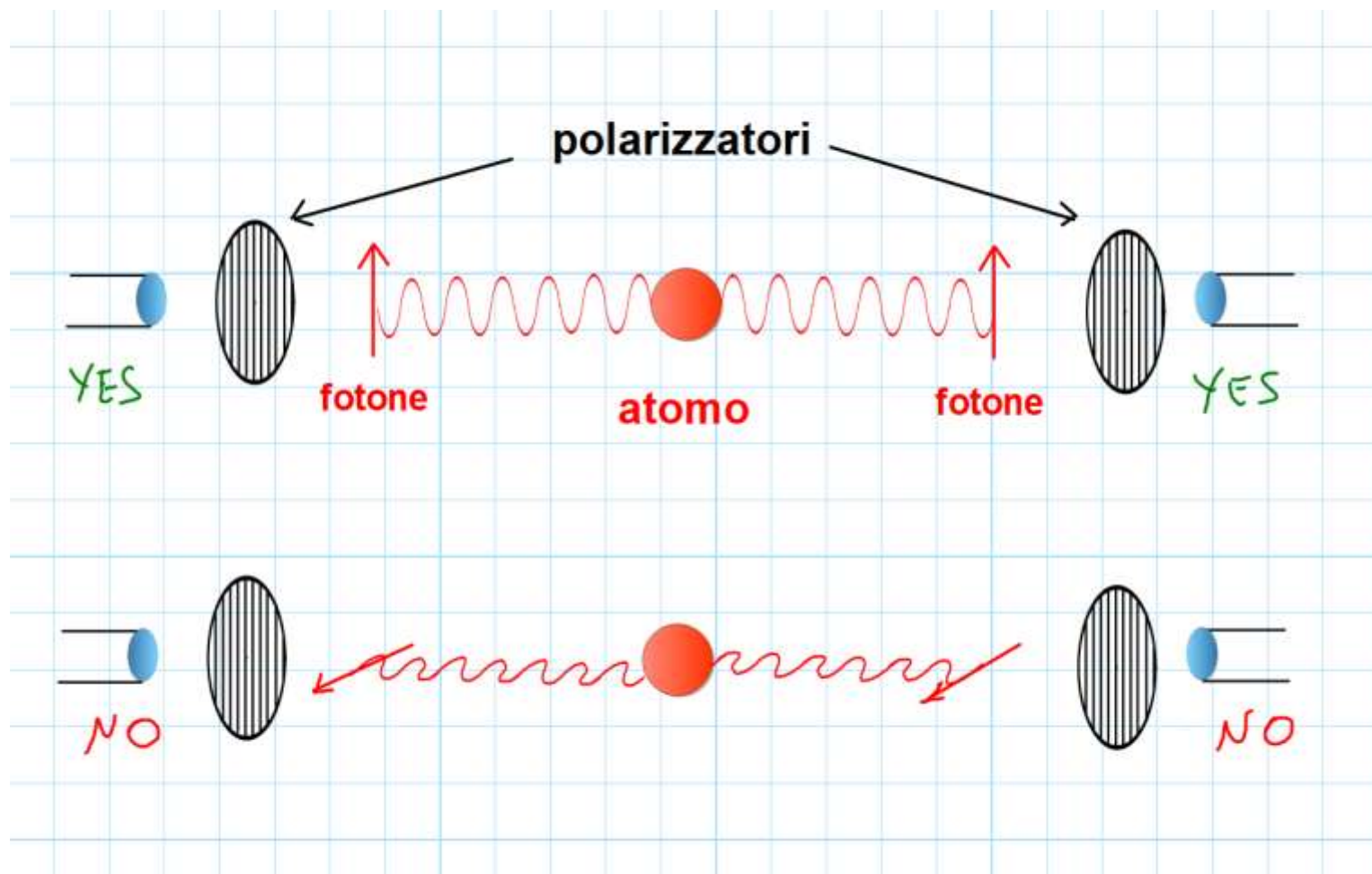
La risposta di Niels Bohr: la misura di ogni particella è un processo “casuale”



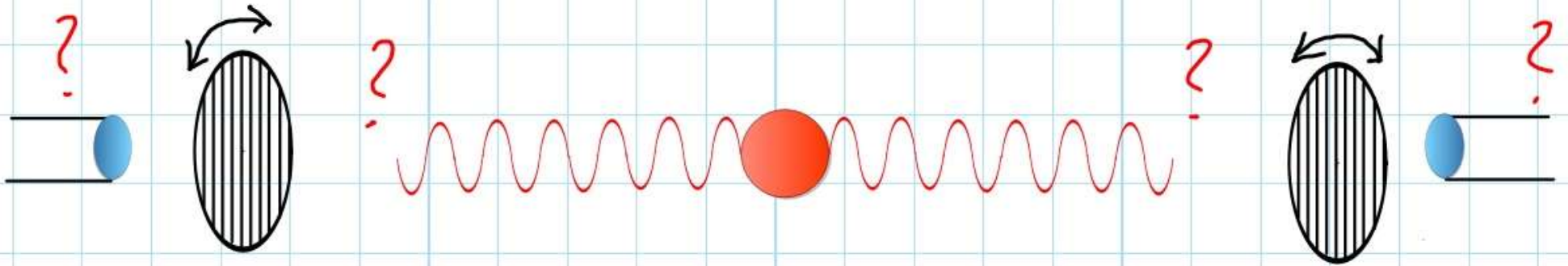
Eppure c'è qualche correlazione tra i risultati delle due parti? E se c'è che cosa significa?

Ma perché Einstein fa una cappella così grande?
Non è mica perchè ha capito male ... anzi, forse
ha capito troppo bene!

Nuovi esperimenti EPR



e se si ruotano a caso i polarizzatori?



Vediamo cosa salta fuori ...

Ipotesi semplificativa

Facciamo finta che esistano solo due stati:
verticale e orizzontale.

Tutti i casi possibili: 50% concordanze

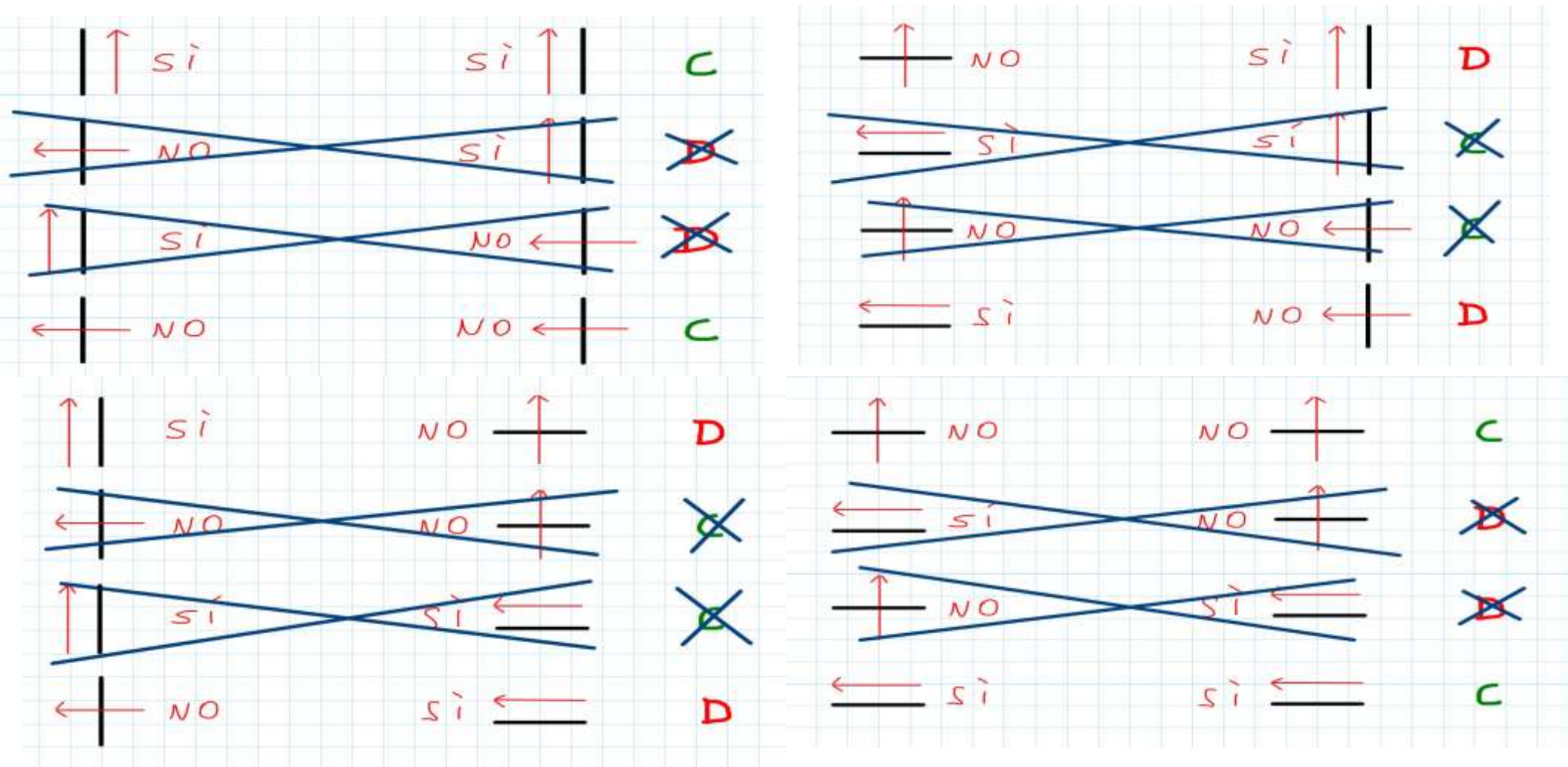
 sì	sì 	C
 NO	sì 	D
 sì	NO 	D
 NO	NO 	C

 NO	sì 	D
 sì	sì 	C
 NO	NO 	C
 sì	NO 	D

 sì	NO 	D
 NO	NO 	C
 sí	sì 	C
 NO	sì 	D

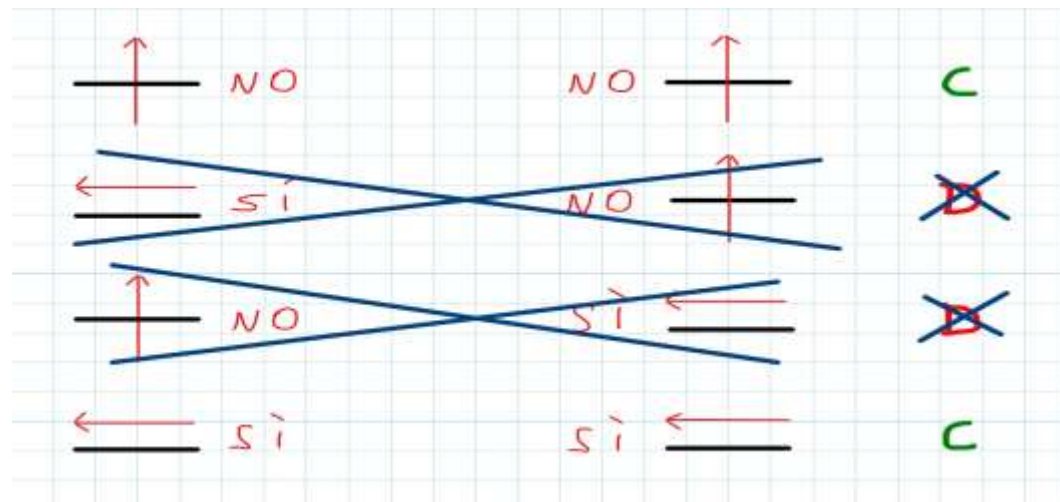
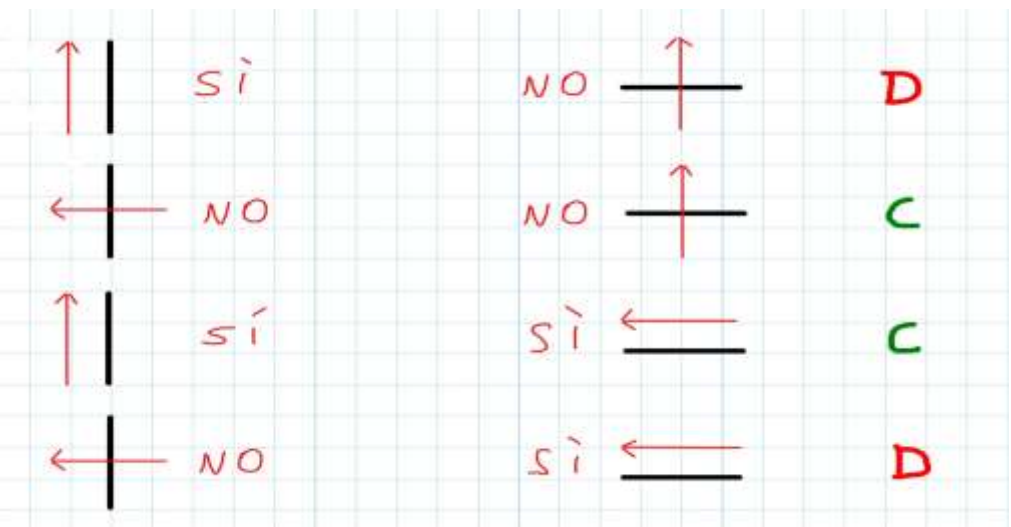
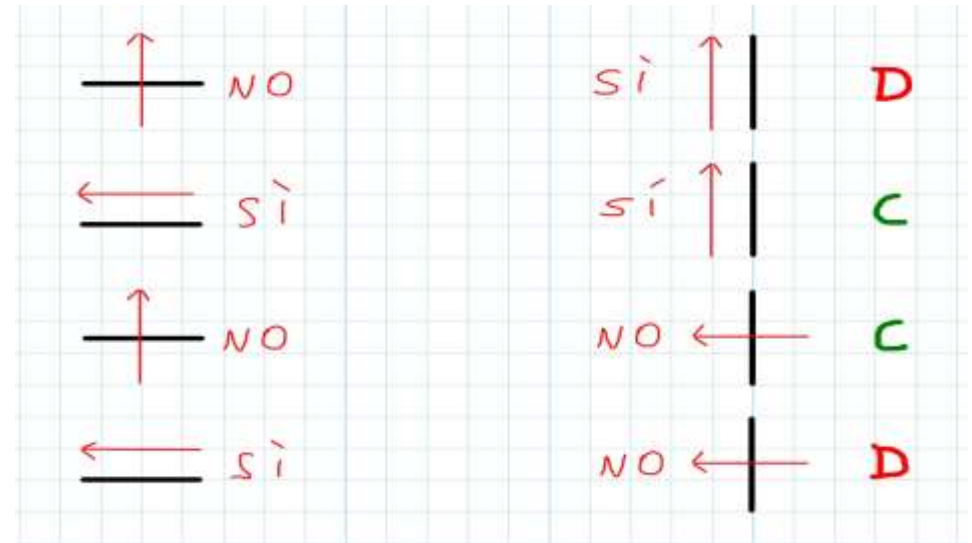
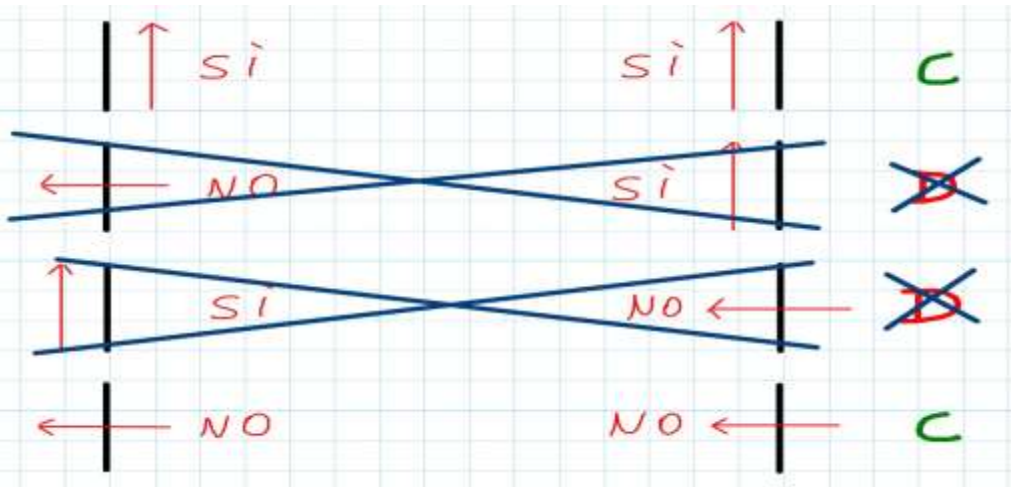
 NO	NO 	C
 sí	NO 	D
 NO	sì 	D
 sì	sì 	C

Tutti i casi possibili se i fotoni sono accoppiati a due a due
 (correlazione dovuta al fatto che i fotoni hanno uno stato
 “preparato” all'inizio e indipendente dalla misura): ancora
 50% di concordanze



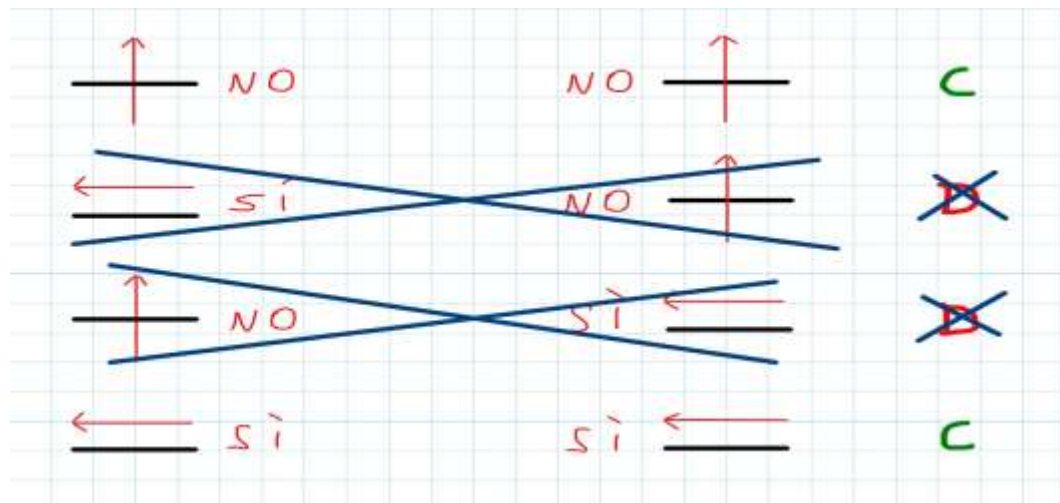
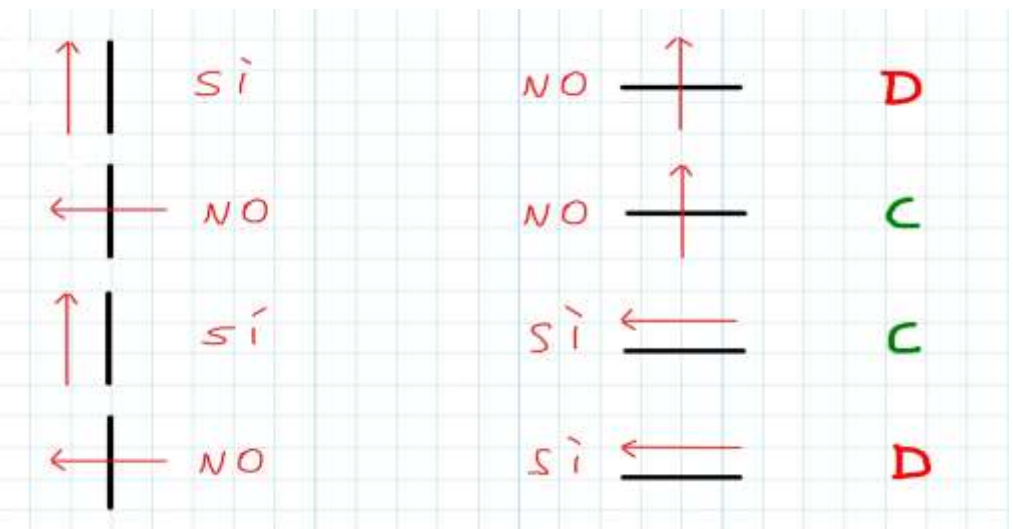
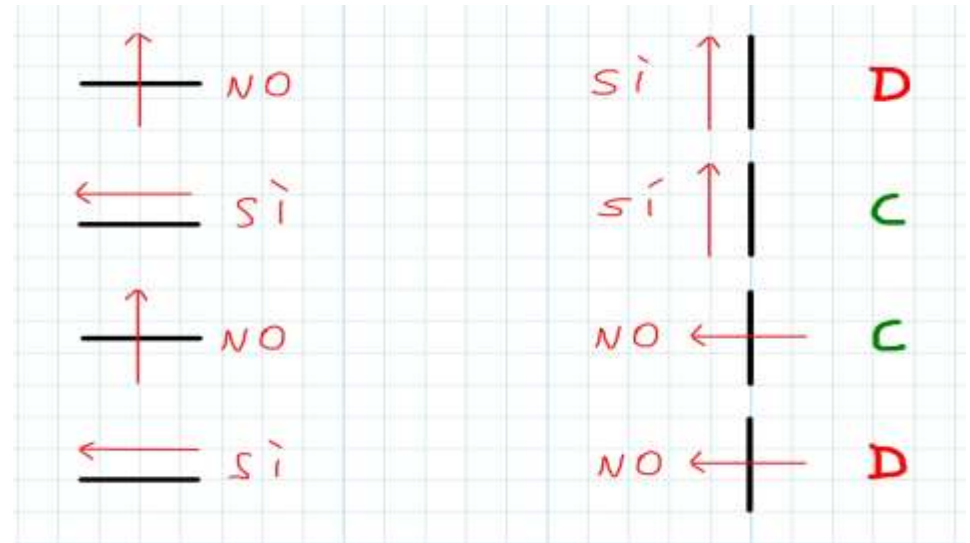
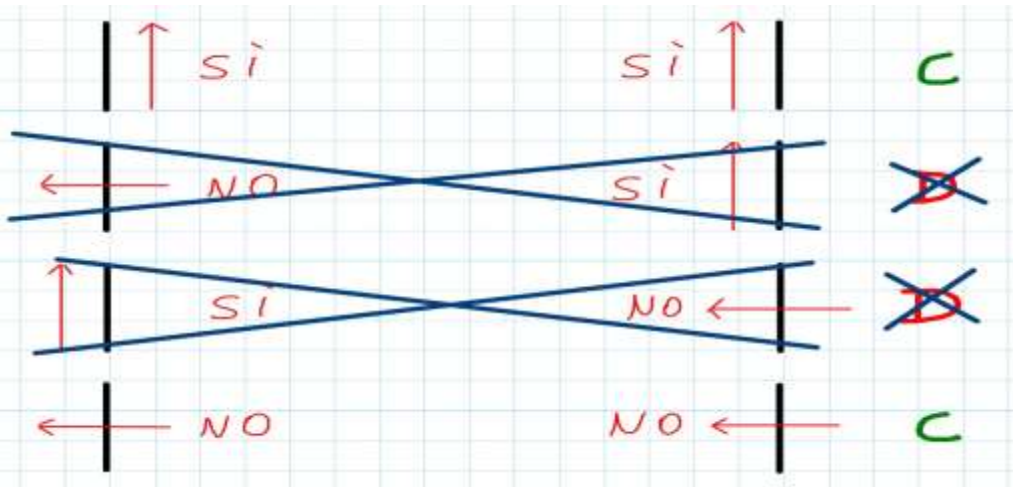
Così avrebbe ragione Einstein: una teoria delle variabili nascoste si può (e si deve) cercare.

Più del 50% di concordanze invece significa che ...



... i fotoni sono telepatici!

Più del 50% di concordanze invece significa che ...



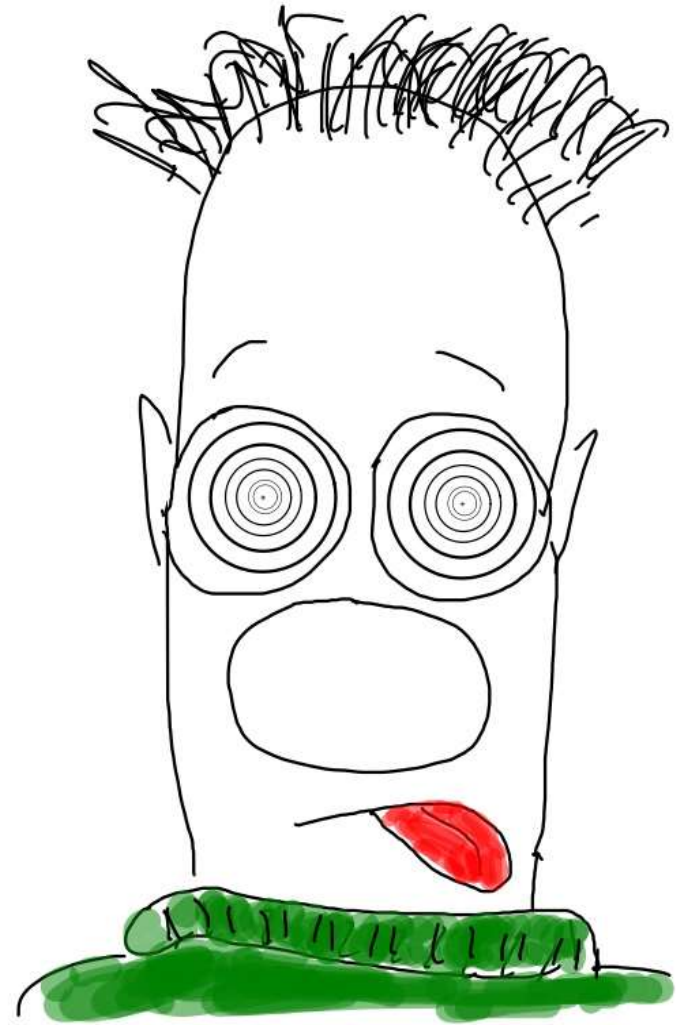
... i fotoni sono telepatici!

Un po' un casino, eh?

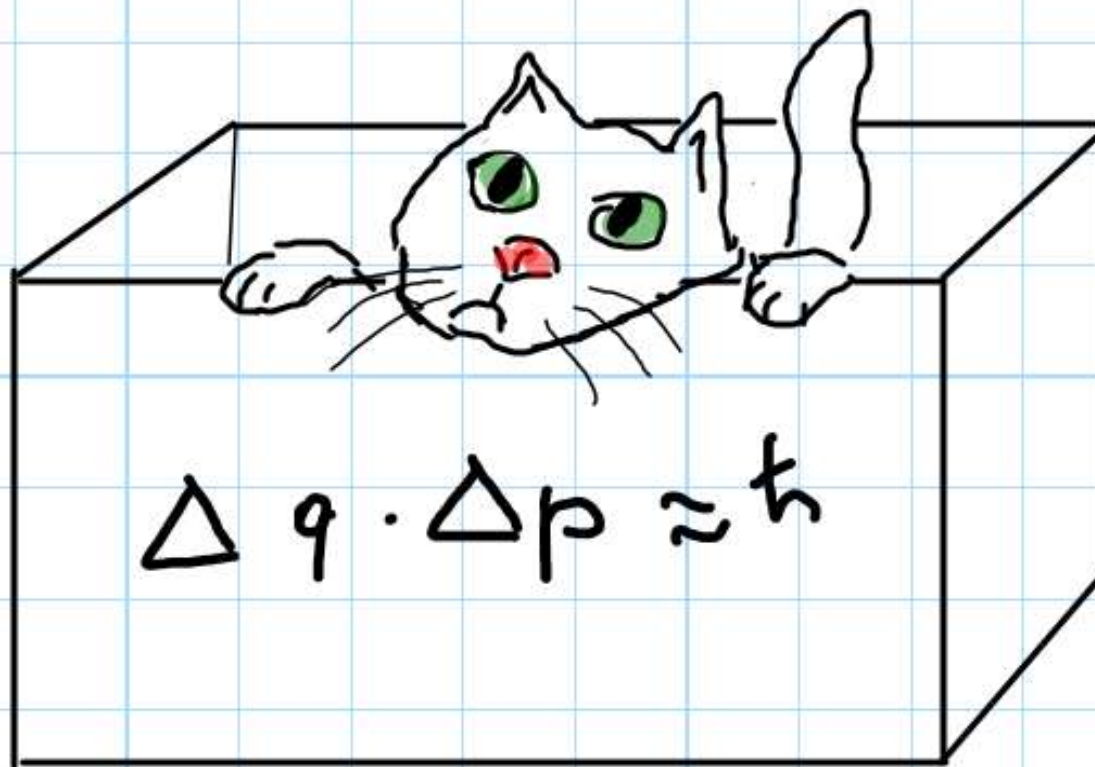
In effetti il dibattito è fra:

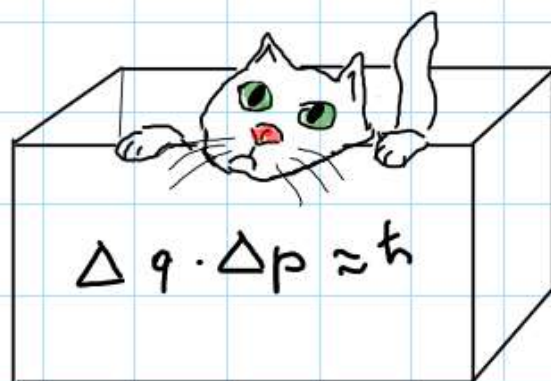
1) coloro che ritengono che la meccanica ondulatoria descriva solo il comportamento statistico e non quello individuale dei un corpuscolo, per il quale serve una teoria deterministica che ne definisca lo stato attraverso un opportuno sistema di parametri fisici, chiamati “variabili nascoste”.

2) l'ortodossia che ritiene che essa esprima tutto ciò che possiamo sapere del mondo subatomico e che pertanto dobbiamo accettarne i paradossi come dazio da pagare alla nostra sfida ...



Il gatto e il problema delle scale di grandezze del mondo quantistico

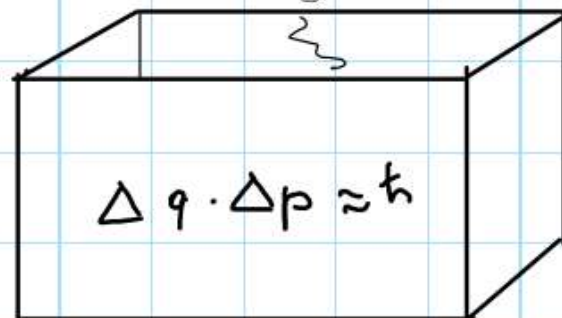




$|\psi_{\text{vivo}}\rangle$



$|\psi_1\rangle$



$|\psi_{\text{morto}}\rangle$



$|\psi_2\rangle$

...

MA PRIMA DELLA RIDUZIONE DEL PACCHETTO

...

$$|\psi_{12}\rangle = A|\psi_1\rangle + B|\psi_2\rangle$$



$$|\psi_{\text{VIVOMORTO}}\rangle = A|\psi_{\text{VIVO}}\rangle + B|\psi_{\text{MORTO}}\rangle$$



...

MA PRIMA DELLA RIDUZIONE DEL PACCHETTO

...

$$|\psi_{12}\rangle = A|\psi_1\rangle + B|\psi_2\rangle$$



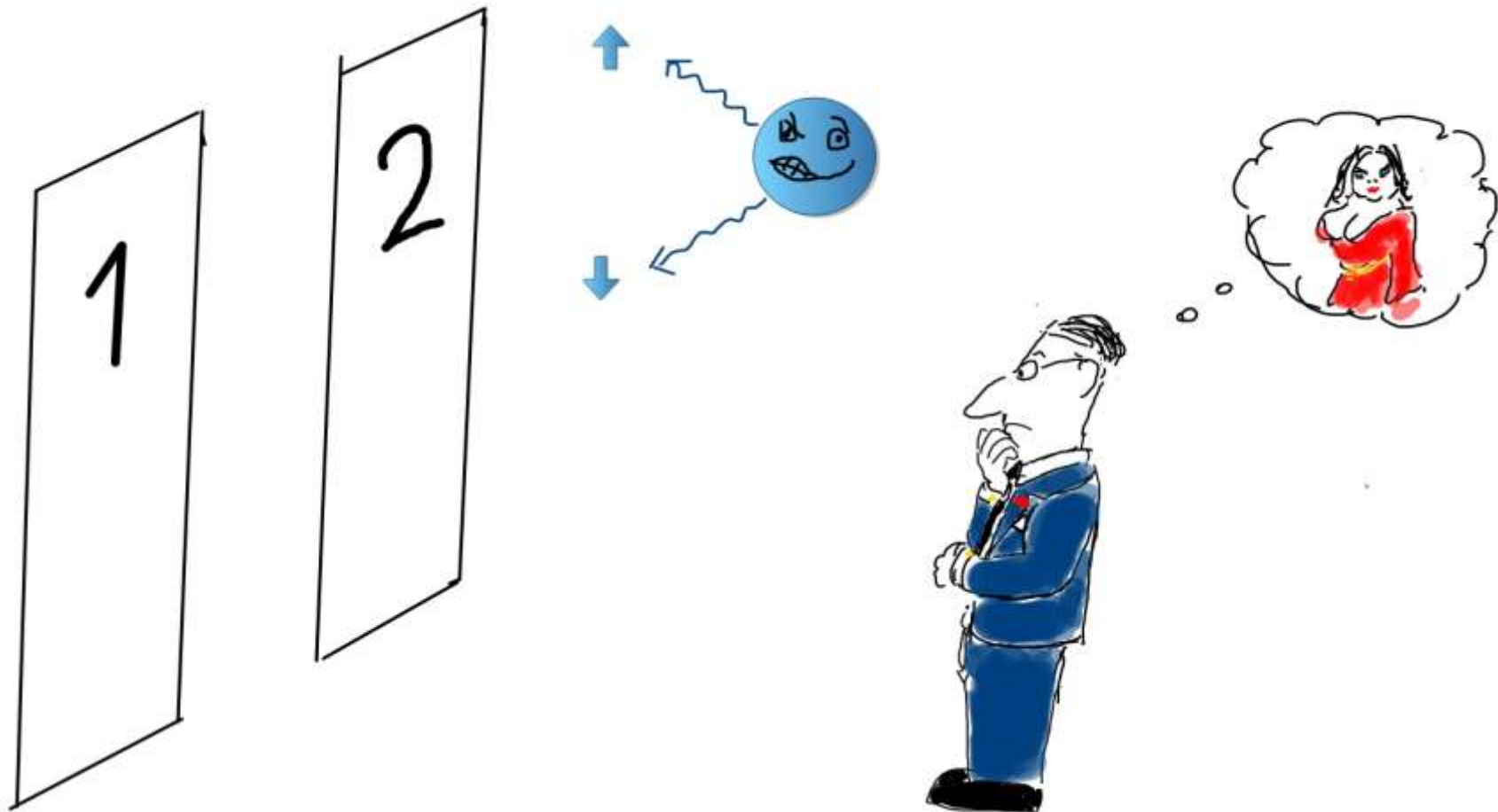
$$|\psi_{\text{VIVOMORTO}}\rangle = A|\psi_{\text{VIVO}}\rangle + B|\psi_{\text{MORTO}}\rangle$$



Ma a parte gli scherzi? Che cosa vuol dire l'esperimento ideale del gatto di Schroedinger?

- 1) Se la meccanica quantistica ammette il paradosso morto/vivo, o inferno/paradiso, non è che c'è qualcosa di incompleto? Schroedinger lo pensava ed era d'accordo con Einstein in ciò.
- 2) Ma se il mondo subatomico funziona in modo così strano, a quale scala di grandezza finiscono i suoi paradossi e comincia il “nostro mondo”?

Non mi piace questo esperimento, Professor
Schroedinger! Troppo macabro!
E se invece che col gatto (povero!) ...



... supponiamo che Dio abbia voluto “giocare a dadi” con Lei ...

Stato 1: Paradiso (secondo il suo ideale ...)



Stato 2: Inferno



Prima della misura: stato “incerto”



Riduzione del ... “pacchetto” ...



... nella peggiore delle ipotesi, ovviamente!

Appendice

STATISTICHE QUANTICHE

COMPORTAMENTO STATISTICO DI CAS DI
PARTICELLE QUANTISTICHE:

LO STATO DI UNA PARTICELLA È DEFINITO
DALLE GRANDEZZE:

- (1) POSIZIONE (x, y, z)
- (2) QUANTITÀ DI MOTO (p_x, p_y, p_z)

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE

$$\Delta x \Delta p_x \approx h$$

$$\Delta y \Delta p_y \approx h$$

$$\Delta z \Delta p_z \approx h$$



AD OGNI STATO DI

OGNI SINGOLA PARTICELLA È

ASSEGNATA UNA CELLA ELEMENTARE

$$\frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\text{VOLUME}} \cdot \frac{\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z}{\text{VOLUME NELLO SPAZIO DELLE QUANTITÀ DI MOTO}} \approx h^3$$

LO SCOPO DELLA STATISTICA È STUDIARE
LE DISTRIBUZIONI DI PARTICELLE
TRA GLI STATI DINAMICI POSSIBILI.

DUE POSSIBILITÀ

OGNI STATO PUÒ
ESSERE OCCUPATO
DA PIÙ PARTICELLE
(BOSE-EINSTEIN)

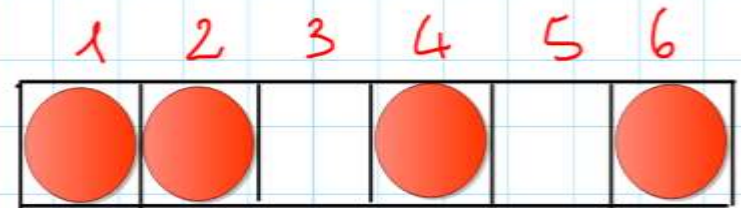


ES.:

1 a a a 2 a a 3 4 a ...

OGNI STATO
PUÒ ESSERE
OCCUPATO DA
UNA SOLA
PARTICELLA

(FERMI-DIRAC)



ES.:

1 a 2 a 3 4 5 a 6 a 7 ...

NUMERO DI POSSIBILITA' PER g STATI ED m PARTICELLE

$$N_{g^m} = \frac{g(m+g-1)!}{g! m!}$$

$\Downarrow$

$$\frac{m}{g} = \frac{1}{e^{\frac{E}{kT}} - 1}$$

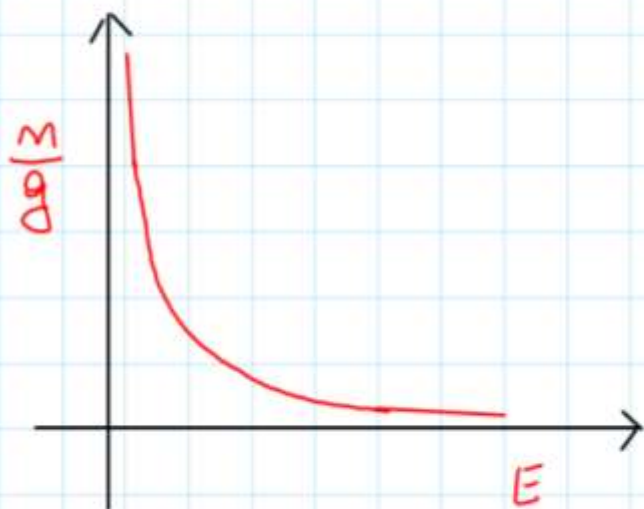
$$N_{g^m} = \frac{g!}{m! (g-m)!}$$

$\Downarrow$

$$\frac{m}{g} = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

$$\frac{\infty}{3} \xrightarrow{\frac{E}{kT} \rightarrow 0} \infty$$

$$\frac{3}{g} \left| \frac{E - E_F}{kT} \right| \rightarrow +\infty \begin{cases} E > E_F \rightarrow 0 \\ E = E_F \rightarrow 1/2 \\ E < E_F \rightarrow 1 \end{cases}$$



CHE COS'È E_F ?

"ENERGIA DI FERMI"