

Bertoldo in corte



LA MECCANICA QUANTISTICA VISTA DA UNO SPERIMENTALE - 2

Le regole di Bohr

1. Modello planetario alla Rutherford
2. Forza di legame elettrostatica
3. Orbite circolari, stazionarie: emissione solo nelle *transizioni*
4. Mom. angolare dell'elettrone multiplo di $h/2\pi$

Ultimo due punti: distacco dalla dinamica classica!

De Broglie

Stati stazionari: per ora restano un mistero

Mom. angolare: re-interpretazione !

Einstein 1905:

Fotone = particella cui è associata una lunghezza d'onda

de Broglie 1924:

Elettrone = particella cui è associata una lunghezza d'onda!

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \text{ lunghezza d'onda di de Broglie}$$

Proprietà corpuscolari della radiazione ↔ Proprietà ondulatorie della materia

Bohr re-interpretato

Ipotesi di de Broglie:

Il fotone ha proprietà corpuscolari, come l'elettrone

→ L'elettrone ha proprietà ondulatorie, come il fotone

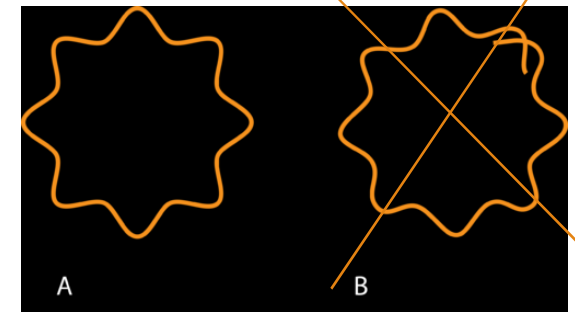
"ondulazione" che orbita intorno al nucleo: deve essere continua

→ Condizione di Bohr per la quantizzazione del mom. angolare

equivalente a richiedere che l'orbita elettronica sia uguale

a un numero intero di lunghezze d'onda:

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv} \rightarrow r = n \frac{h}{2\pi mv} = \frac{n\hbar}{mv}$$



L'elettrone ondulatorio

L'elettrone **ha** proprietà ondulatorie!

Si possono osservare fenomeni di diffrazione di un fascio di elettroni da parte di un cristallo, come per i raggi X

Ipotesi di de Broglie:

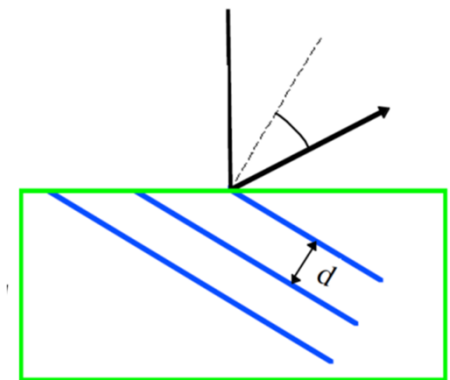
$$E = \frac{p^2}{2m} = 54 \text{ eV} \rightarrow p = \sqrt{2mE}$$

$$\rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{6,6310^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,110^{-31} \cdot 54 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} = 0,166 \text{ nm}$$

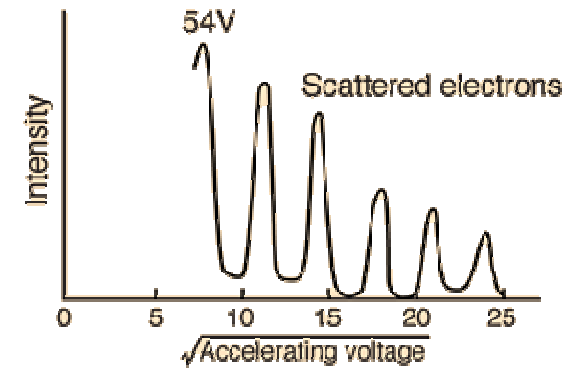
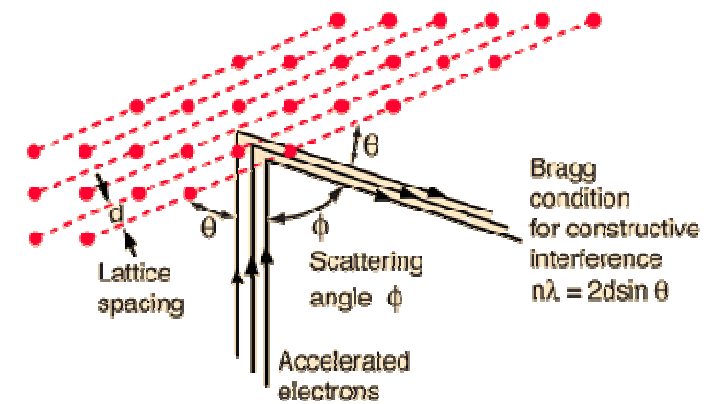
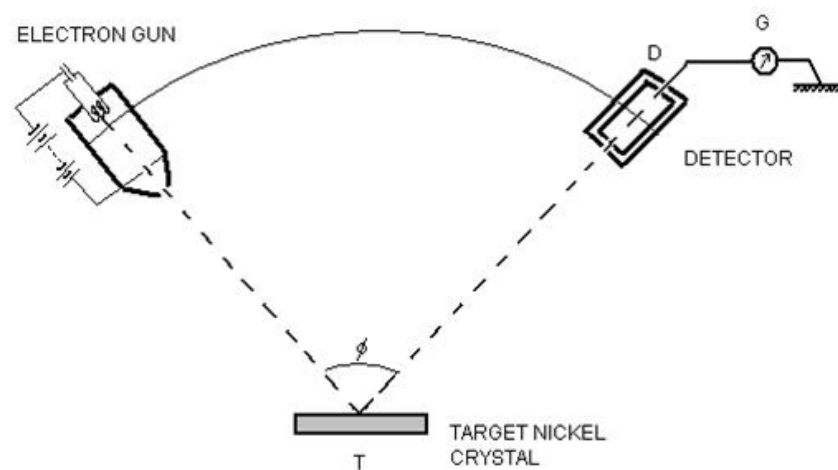
Dalla misura:

$$\lambda = 2d \sin \theta = 2 \cdot 0,091 \sin 65^\circ = 0,182 \cdot 0,905 = 0,165 \text{ nm} !!$$

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

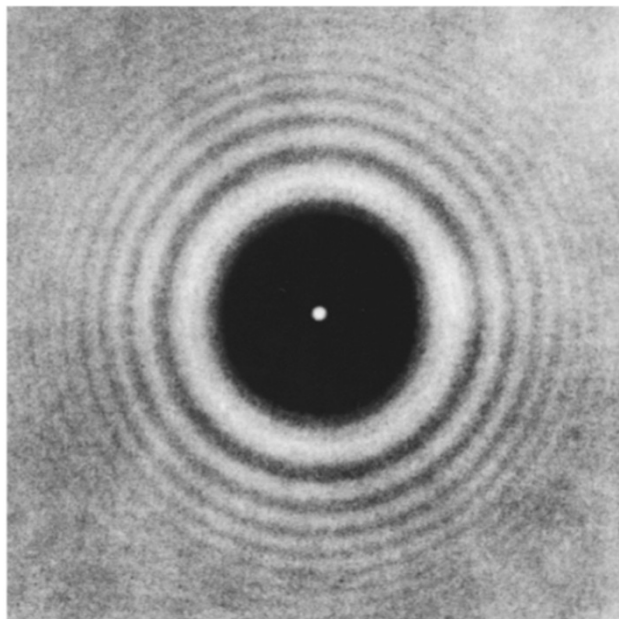


Davisson & Germer



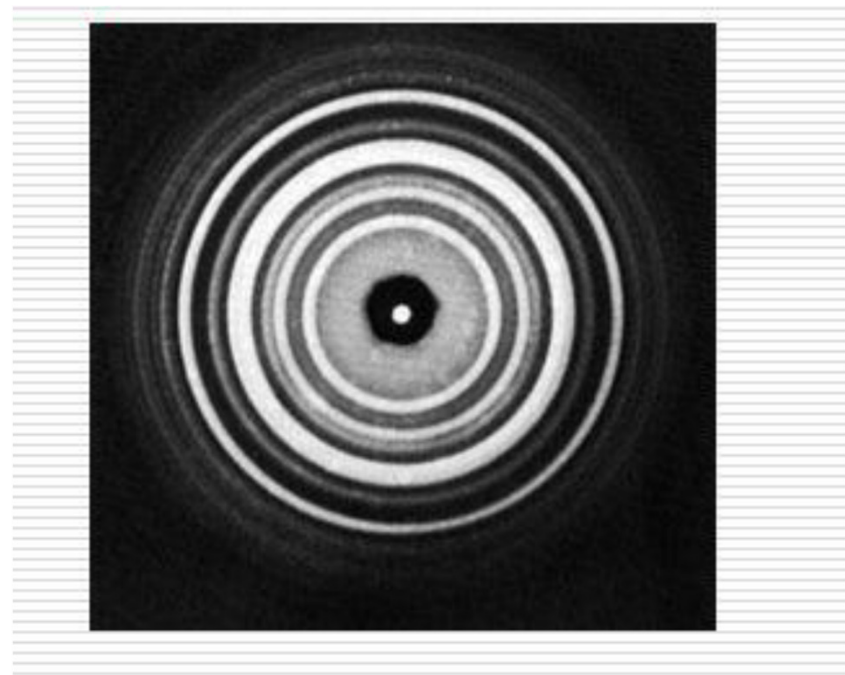
Diffrazione!

Luce



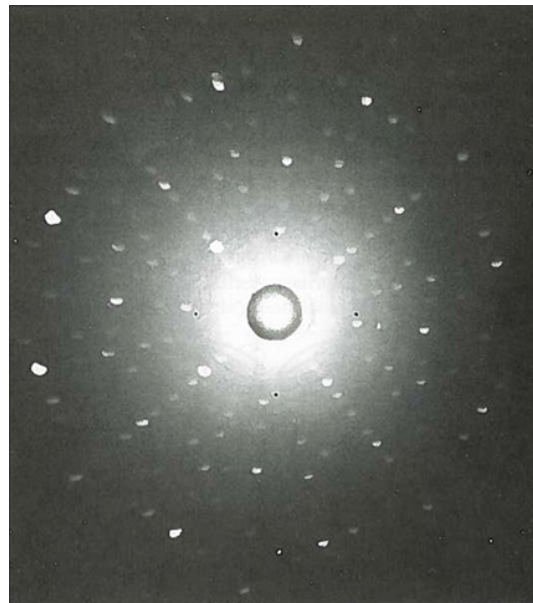
Diffrazione da foro circolare

Elettroni



Dualismo onda-particella

Raggi X



(a)

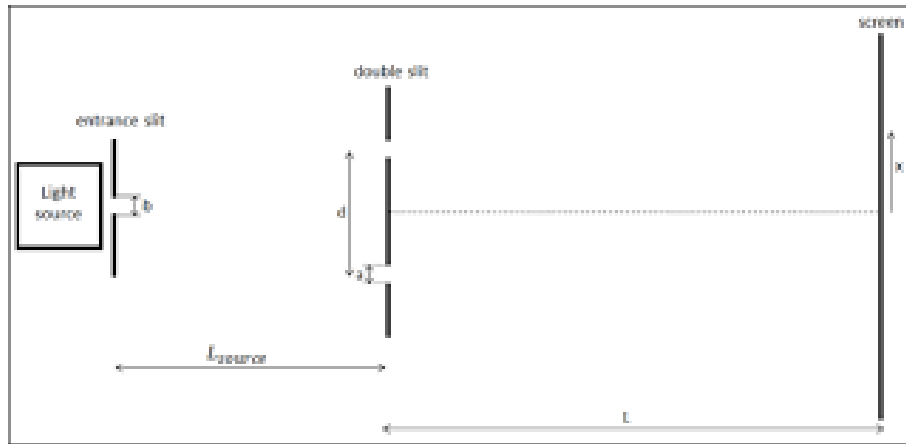
Elettroni



(b)

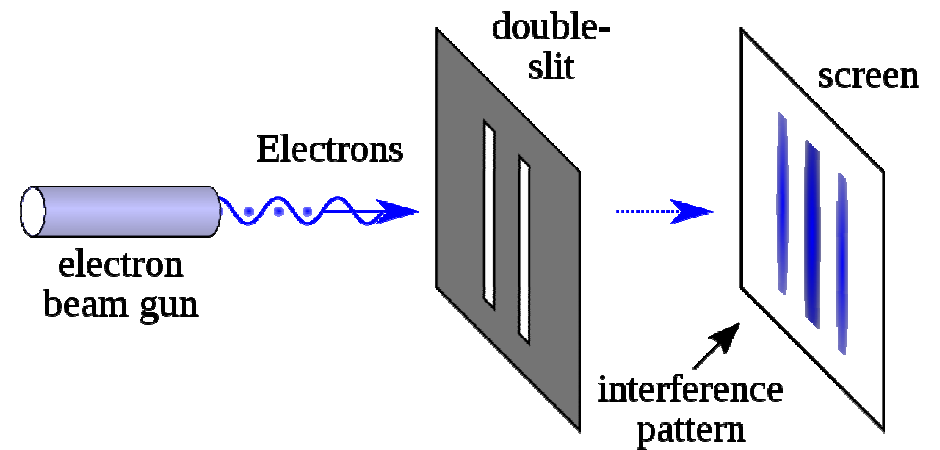
Diffrazione dallo stesso cristallo

Doppia fenditura – Il ritorno

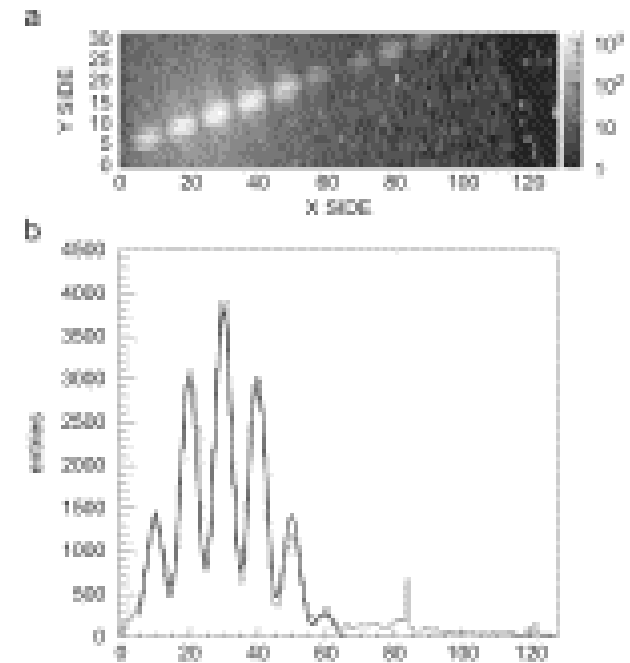
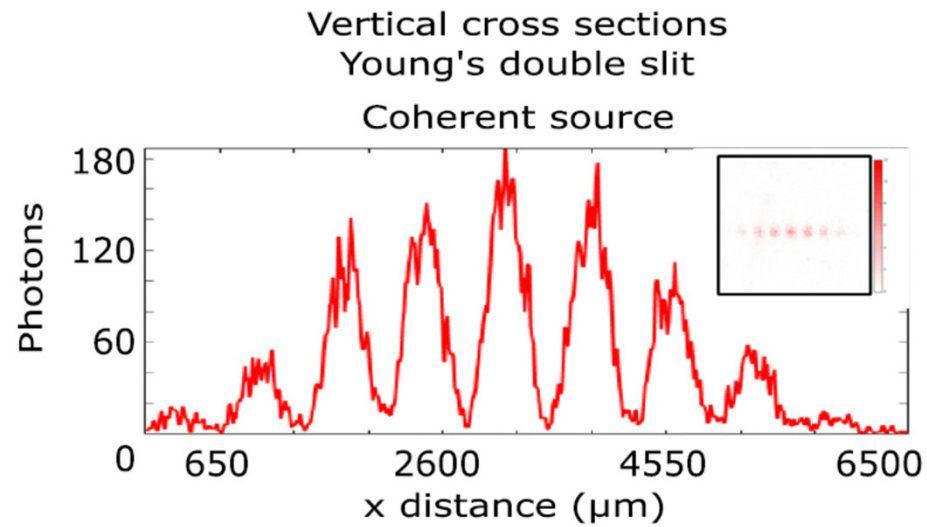


Elettroni →

← Fotoni



Frequenza conteggi



Personalità multiple

La natura ondulatoria del campo elettromagnetico non può spiegare lo spettro del corpo nero o l'effetto fotoelettrico

La natura particellare dell'elettrone non può spiegare la diffrazione degli elettroni o l'esperimento della doppia fenditura

La natura ha bisogno di uno *psichiatra* (e forse anche noi...) ?

Descrizione ondulatoria

Necessario rendere conto del comportamento ondulatorio di sistemi fisici superficialmente corpuscolari, p es elettrone

Analogia con sistemi fisici superficialmente ondulatori, come il campo elettromagnetico

Tuttavia: Il campo elettromagnetico è un ente fisico
A cosa corrisponde l' «onda» associata ad un elettrone?

Questione provvisoriamente accantonata: prima, proprietà delle onde

Sovrapposizione

In una dimensione:

$$y(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$$

Somma di due onde a frequenza poco diversa:

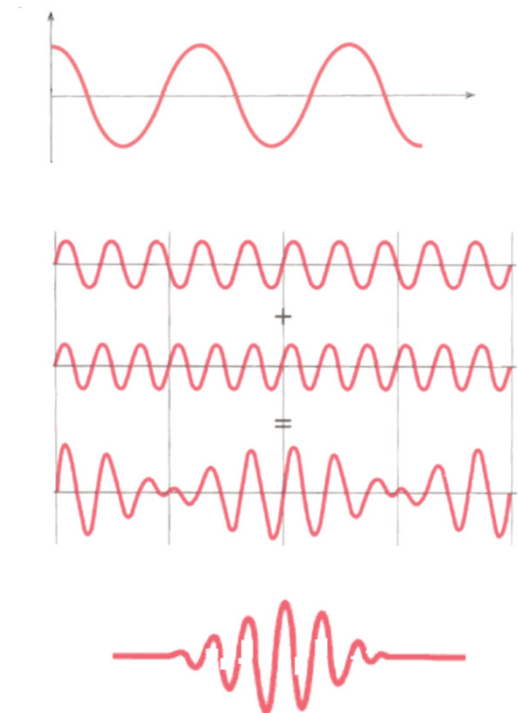
$$y_1(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$$

$$y_2(x, t) = A \cos\left[(\omega + \Delta\omega)t - (k + \Delta k)x\right]$$

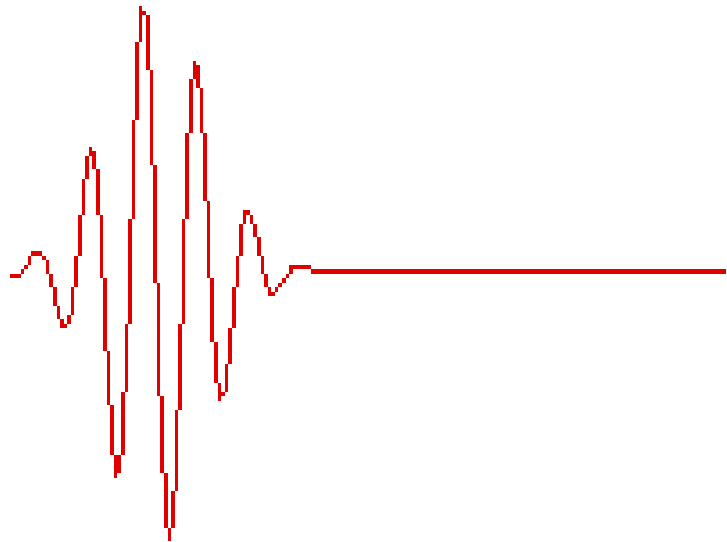
$$y_S(x, t) = A \cos\left[\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}\right)t - \left(k + \frac{\Delta k}{2}\right)x\right] \cos\left[\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right]$$

Somma di molte onde:

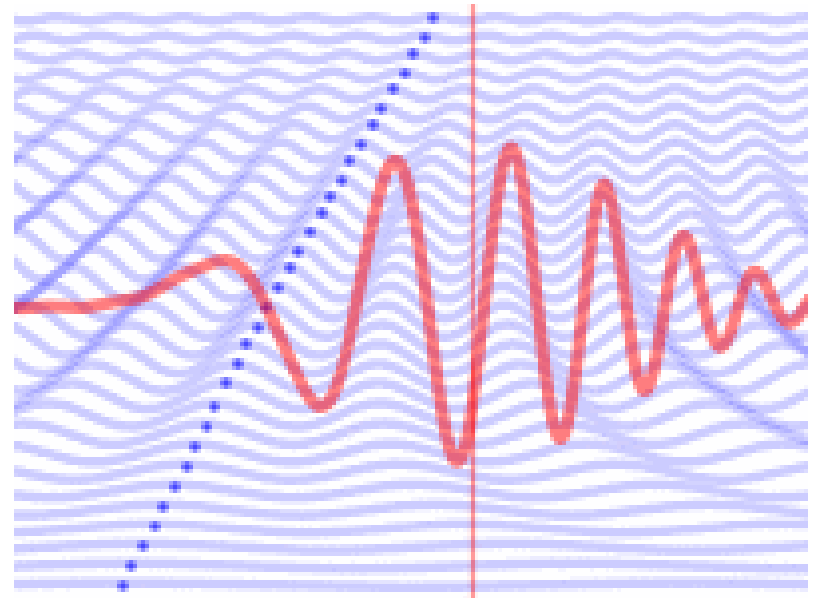
Pacchetto d'onde



Pacchetti mobili



Non dispersivo



Dispersivo

Velocità delle onde

Velocità di fase: propagazione della 'portante'

$$v_f = \lambda\nu = \frac{\omega}{k} \frac{2\pi}{2\pi} = \frac{\omega}{k}$$

Velocità di gruppo: propagazione della 'modulazione'

$$v_g = \frac{\frac{\Delta\omega}{2}}{\frac{\Delta k}{2}} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$$

Con la somma di molte onde: propagazione del 'pacchetto'

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \quad v_g \text{ identificata con la velocità della particella}$$

Velocità di gruppo

Luce *nel vuoto*: la velocità di fase *non* dipende da λ

$$\lambda\nu = c \rightarrow \frac{\omega}{2\pi} \frac{2\pi}{k} = c = v_f \rightarrow \omega = kc \rightarrow \frac{d\omega}{dk} = c \rightarrow v_g = v_f$$

Onde di de Broglie: la velocità di fase *deve* dipendere da λ
altrimenti tutte le particelle si muoverebbero con la stessa velocità

Situazione simile alla propagazione della luce in un mezzo trasparente:
l'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda,
e i diversi colori viaggiano a velocità diverse

Mattoni da costruzione...

Con quali 'mattoni' si costruisce il pacchetto d'onde?

Forma più generale del mattone:

$$\psi(x, t) = A[\cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t)]$$

sin e cos funzioni indipendenti

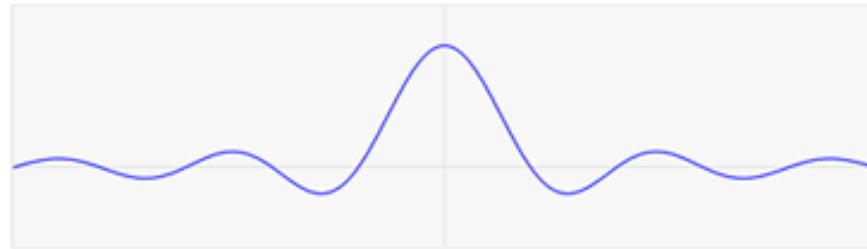
ψ in generale complessa - altrimenti il mattone non è abbastanza 'universale'

Formula di Eulero:

$$\cos x + i \sin x = e^{ix} \rightarrow \psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}, \text{ nota come } \textit{onda piana}$$

Pacchetto d'onde: si ottiene sommando molte, al limite infinite onde piane

...e la costruzione di un pacchetto



1ucasvb.tumblr.com

Elettroni ondulatori ?

Ma cosa vuol dire che la materia ha proprietà ondulatorie?
Esistono «onde materiali» come esistono le onde elettromagnetiche?

Emergono difficoltà interpretative:

Che onda è mai quella che descrive un sistema di due, tre, ... elettroni?
Situazione un po' diversa da quella dei fotoni, peraltro dubbia anch'essa

Ma allora, qual è il significato delle onde di de Broglie?

Problemi interpretativi

Interpretazione originale di Schrodinger:

$e|\psi|^2 =$ densità volumetrica di carica elettrica

Due obiezioni decisive da Born e Heisenberg:

1) $e|\psi|^2 dV =$ carica 'infinitesima' nel volume dV

Invece si osservano *sempre* $\pm e, \pm 2e, \pm 3e, \dots$

2) $\psi = \psi(x, y, z)$ per 1 elettrone

$\psi = \psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$ per 2 elettroni

.....

Invece $e|\psi|^2(x, y, z)$ sempre funzione solo di x, y, z

Born

Interpretazione statistica di Born:

$|\psi(x, y, z)|^2$ *densità di probabilità* di osservare l'elettrone in x, y, z

$\rightarrow |\psi(x, y, z)|^2 dV$ probabilità di trovare l'elettrone in dV

Sommando su tutto lo spazio:

$$\int_{\text{spazio}} |\psi(x, y, z)|^2 dV = 1, \text{ normalizzazione}$$

$\psi(x, y, z)$ ampiezza di probabilità \equiv funzione d'onda

Onde molto particolari, diverse da quelle classiche!

Onde e particelle

Riconsiderando la funzione d'onda dell'onda piana:

$$\psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)} \rightarrow |\psi(x, t)|^2 = |Ae^{i(kx - \omega t)}|^2 = |A|^2$$

→ Sommando su tutto lo spazio si ottiene ∞ ...

Evidentemente un 'caso limite' non fisico

Ogni caso reale descritto da un pacchetto d'onde

Contiene contributi da diversi numeri d'onda = impulsi

Più o meno localizzato

Due casi opposti

Pacchetto d'onde 'stretto':
Posizione ben definita
Numero d'onda poco definito
(←frequenza poco nota)

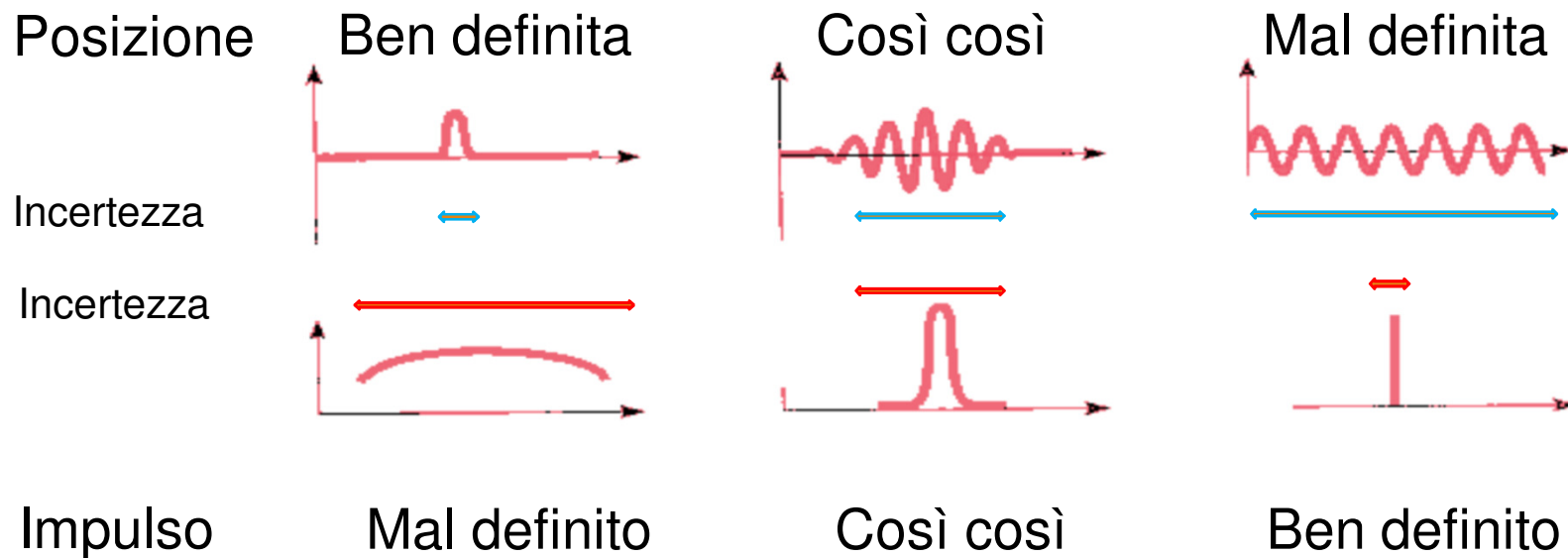


Pacchetto d'onde 'largo':
Posizione mal definita
Numero d'onda ben definito
(←frequenza ben nota)



Incertezze ondulatorie

Per una particella , o pacchetto d'onde: proprietà universale



Relazione di indeterminazione

Caso migliore possibile per posizione e impulso:
Funzione 'gaussiana' per entrambi

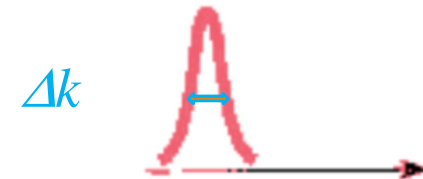
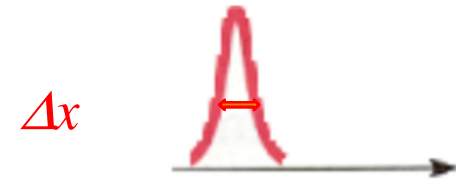
Per una 'gaussiana':

$$\Delta x \Delta k \geq \frac{1}{2}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi p}{h} = \frac{p}{\hbar} \rightarrow \Delta k = \frac{\Delta p}{\hbar}$$

$$\rightarrow \Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

valida per *qualsiasi* pacchetto d'onde, o particella



Incertezza fondamentale

Relazione di indeterminazione: limite alla misura contemporanea di x , p
Proprietà fondamentale delle grandezze

Posizione, Impulso

associate a ogni pacchetto d'onde, quindi a ogni particella

Non ha a che fare con errori nella nostra misura delle grandezze

Niente di straordinario per una perturbazione ondulatoria...
...assolutamente straordinario per una particella

Altre incertezze

Relazione di indeterminazione:

Valida anche per la misura contemporanea di energia e tempo:

Quanto tempo occorre per misurare una frequenza?

Grossolanamente: almeno un periodo $\rightarrow \Delta t \geq T = \frac{1}{\nu}$

Con un solo periodo $\nu \sim \Delta\nu$

$$\Delta E = h\Delta\nu$$

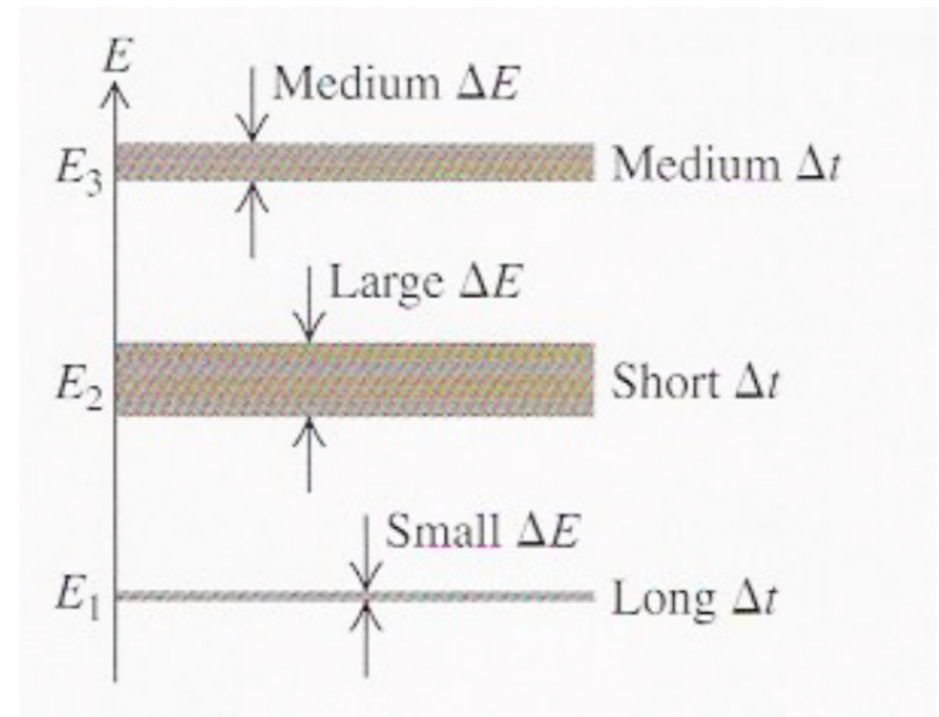
$$\rightarrow \Delta t \geq \frac{h}{\Delta E} \rightarrow \Delta E \Delta t \geq h, \text{ espressione approssimata (corretta: } \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \text{)}$$

Stati instabili

Nella maggior parte dei casi,
stati quantistici = instabili
→Evolgono verso altri stati

Es: Atomo in stato eccitato

Tempo caratteristico: Δt
→Indeterminazione dell'energia ΔE



Stati & Osservabili

Ogni sistema fisico si trova ad ogni istante in uno *stato dinamico*

Classicamente: descritto da coordinate e impulsi delle componenti

Quantisticamente: descritto dalla funzione d'onda

In ogni stato, sono definiti i valori delle *osservabili*

Classicamente: *Tutte* le grandezze, funzioni di coordinate e impulsi

Quantisticamente: *Alcune* grandezze, definite dalla funzione d'onda

Altre grandezze non hanno valore definito

Osservabili quantistiche

Problema principale:

Qual è la definizione quantistica di grandezza fisica?

Questione non banale:

Non tutte le coordinate e gli impulsi hanno valore definito in un dato stato

→ Definizione diversa da quella classica

→ Definizione quantistica: deve fare riferimento alla funzione d'onda

Valori misurati

Qual è il valore di un'osservabile in ogni dato stato del sistema descritto dalla funzione d'onda $\psi(x)$?

$\psi(x) \equiv$ ampiezza di probabilità:

Se misuriamo più volte l'osservabile posizione x nello stato ψ , ogni volta troviamo un valore diverso, casuale in un dato intervallo di variazione, secondo la distribuzione probabilistica $|\psi(x)|^2$!

Osservabili \equiv Operatori

In generale:

*Ogni osservabile è rappresentata da un operatore,
che agisce sulle funzioni d'onda*

Operatore (Definizione per i non matematici ;-)):

*'Macchina del caffè' matematica, in cui si inserisce una funzione (moneta)
ed esce un'altra funzione (caffè)*

Valori medi - Posizione

$|\psi(x)|^2 = \psi^*(x)\psi(x) = P(x)$ densità di probabilità

Osservabile x : operatore 'moltiplicazione per x '

Dalla definizione di media: $\langle x \rangle = \sum_i x_i P(x_i)$

$$\rightarrow \langle x \rangle = \int_{x \min}^{x \max} x P(x) dx = \int_{x \min}^{x \max} x |\psi(x)|^2 dx = \int_{x \min}^{x \max} x \psi(x) \psi^*(x) dx = \int_{x \min}^{x \max} \psi(x) x \psi^*(x) dx$$

Per un'osservabile generica funzione di x :

$$\langle G(x) \rangle = \int_{x \min}^{x \max} \psi(x) G(x) \psi^*(x) dx$$

Si ricordi che, per qualunque numero complesso $\psi = a + ib$:

$$|\psi|^2 = (\operatorname{Re}\psi)^2 + (\operatorname{Im}\psi)^2 = a^2 + b^2$$

$$|\psi|^2 = (a + ib)(a - ib) = \psi\psi^*$$

Valori medi - Impulso

Come calcolare il valore medio dell'osservabile impulso?

In una dimensione: $\psi(x, t) = e^{i(kx - \omega t)} = e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$

Derivando rispetto a x :

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} \right) = \frac{ip}{\hbar} e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} = \frac{ip}{\hbar} \psi$$

...ma certo non rigorosamente!
Il meno che si possa dire...

'Formalmente'...: $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{ip}{\hbar} \rightarrow p = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$, *operatore impulso*

$$\rightarrow \langle p \rangle = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \psi^*(x) \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \right) \psi(x) dx, \text{ valore medio dell'impulso}$$

Definizione derivata
per ψ = onda piana,
ma valida in generale

Valori medi - Energia

En. cinetica:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} \rightarrow E_k = \frac{1}{2m} \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

En. potenziale:

$$V(x)$$

Entrambe operatori \rightarrow Operatore en. totale:

$$E = E_k + V(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)$$

$$\rightarrow \langle E \rangle = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \psi^*(x) \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right) \psi(x) dx, \text{ valore medio dell'energia}$$

Relazione fra stati e osservabili

Proprietà delle osservabili:

Per ogni osservabile, c'è un insieme di stati nei quali l'osservabile stessa ha valore definito – *Autostati e Autovalori*

Stati a energia definita particolarmente importanti:

Gli autostati dell'energia sono stazionari

In realtà:

Stato fondamentale = Stabile

Stati eccitati = Instabili

Applicazioni

Problema tipico:

Data la forma dell'operatore energia totale, trovarne autostati e autovalori

Matematicamente ben definito, non sempre facile.... ;-):

Trovare soluzioni dell'*equazione di Schrodinger*

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

Risultato estremamente generale:

Trovati stati stazionari ed energie associate, ogni altro stato può essere espresso come loro combinazione

Atomo di idrogeno

Uno dei sistemi più semplici da trattare:
elettrone nel campo coulombiano del nucleo

Possibile trovare soluzioni analitiche

Risultati per autovalori e autostati

Ottimo accordo con le osservazioni

Piccole correzioni, specialmente magnetiche e relativistiche

Atomo di idrogeno - Autovalori

Insieme discreto di autovalori dell'energia
contraddistinti da diversi indici,

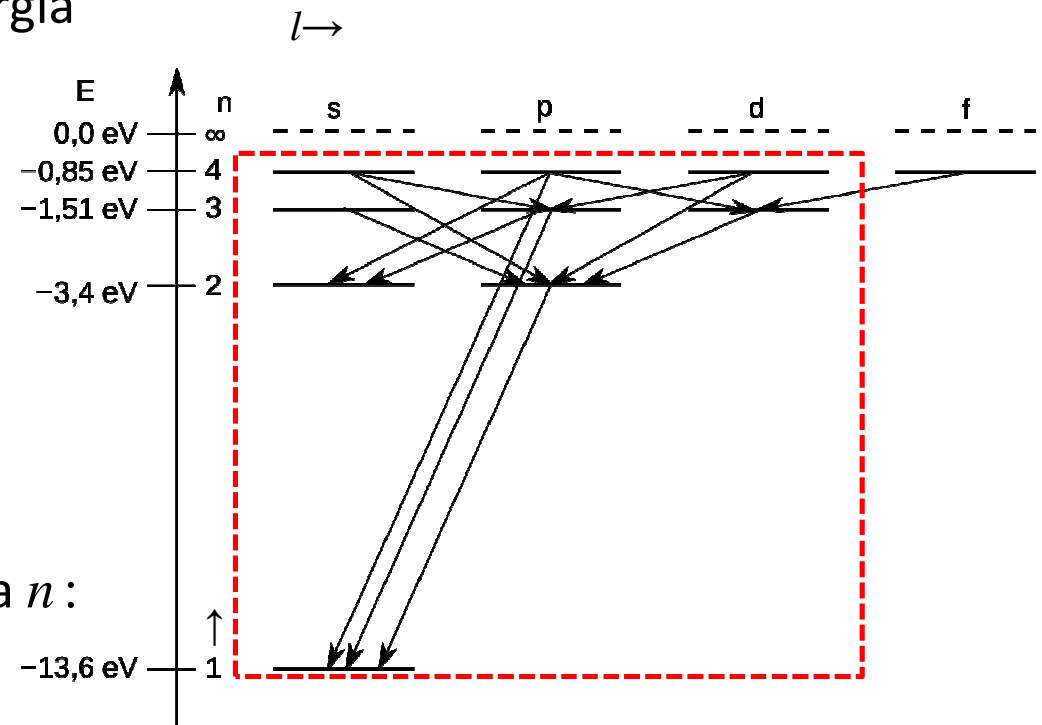
o *numeri quantici*:

n , n.q. principale

l , n.q. momento angolare

altri

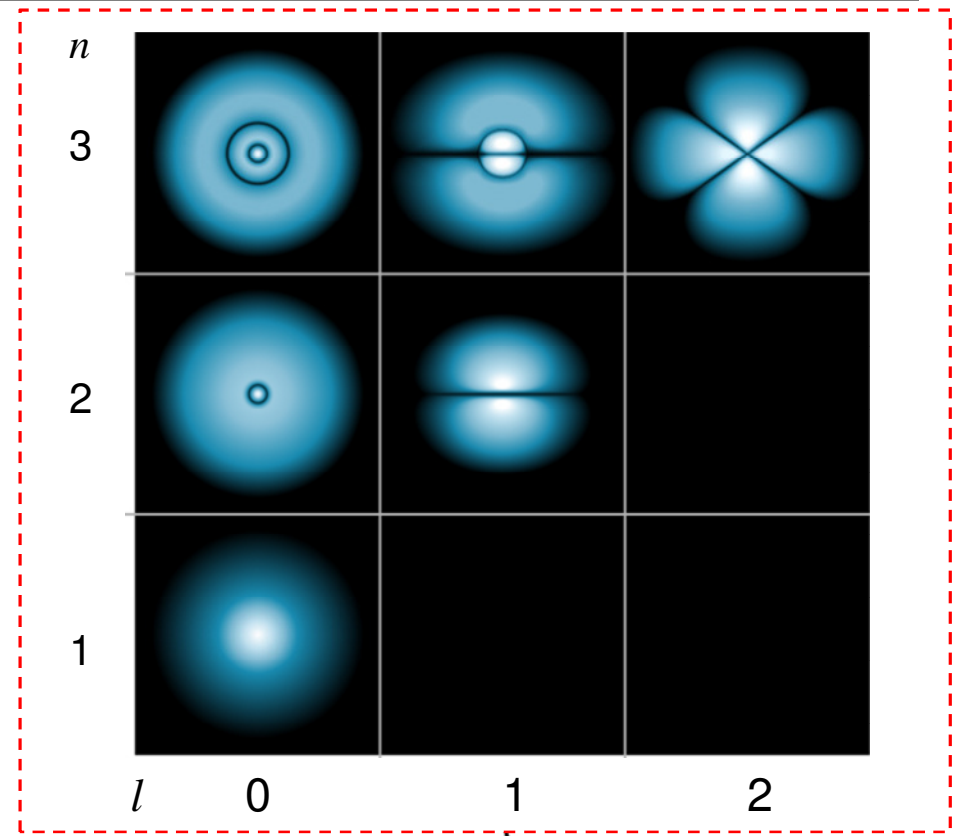
Trascurando piccoli effetti, le energie
degli stati stazionari dipendono solo da n :
proprietà del potenziale coulombiano



Atomo di idrogeno - Autofunzioni

Rappresentazione della densità di probabilità $|\psi|^2$ nella modalità 'nuvola trasparente'

Stati corrispondenti agli autovalori mostrati prima



Densità vs distanza dal nucleo

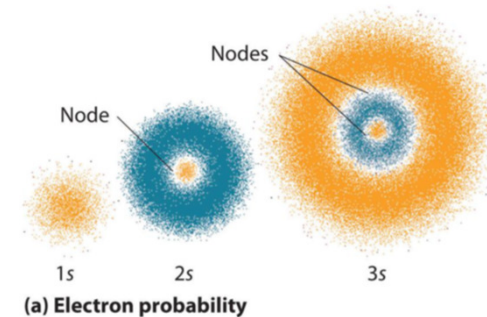
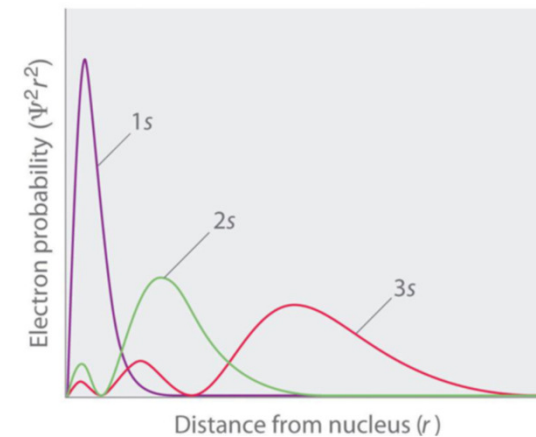
Funzioni delle 3 coordinate: $\psi(x, y, z)$

Meglio espresse come funzioni della distanza e di due angoli:

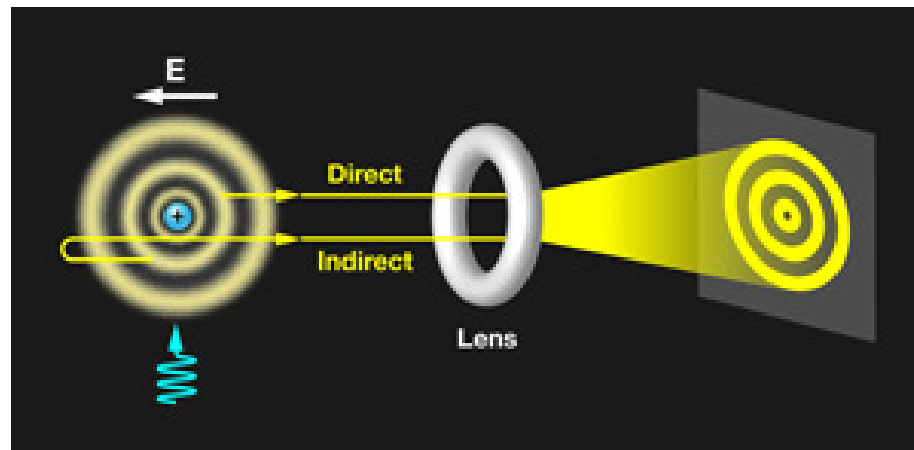
$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)Y(\theta, \varphi)$$

Come esempio:

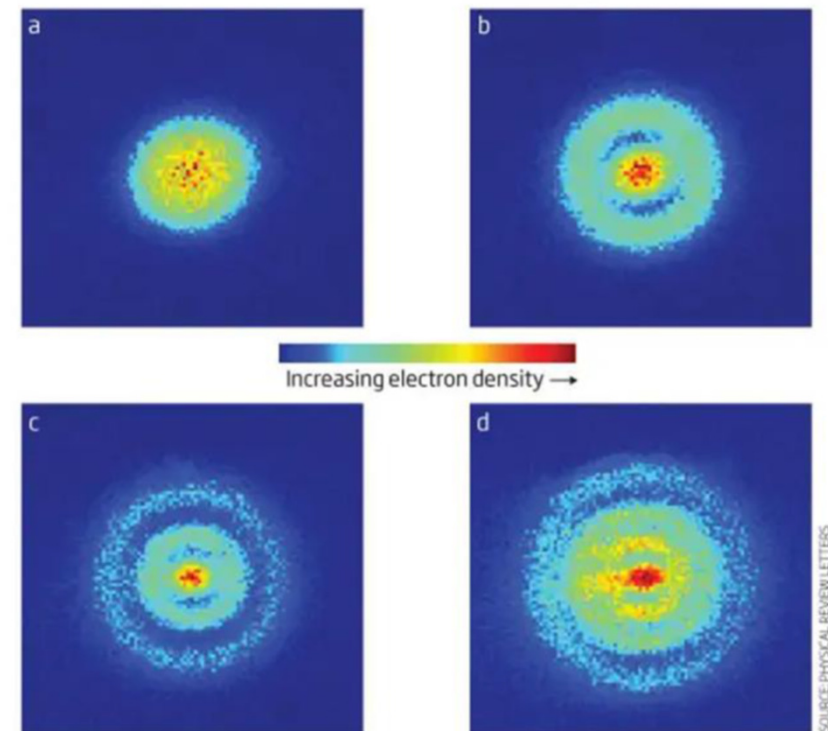
densità di probabilità in funzione della distanza per gli stati $n = 1, 2, 3$ con $l = 0$



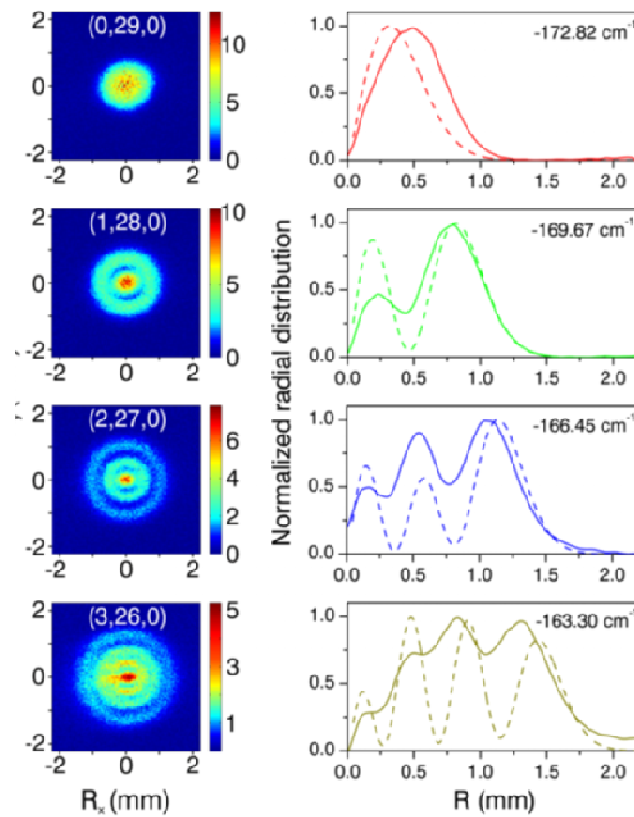
Sorridi, H , sei su Candid Camera!



Atomi di H in un forte campo elettrico
Fotoionizzazione con impulso laser
Elettroni liberati raccolti in due percorsi
Interferenza
Ingrandimento con 'lente elettrostatica'



Teoria ed esperimento

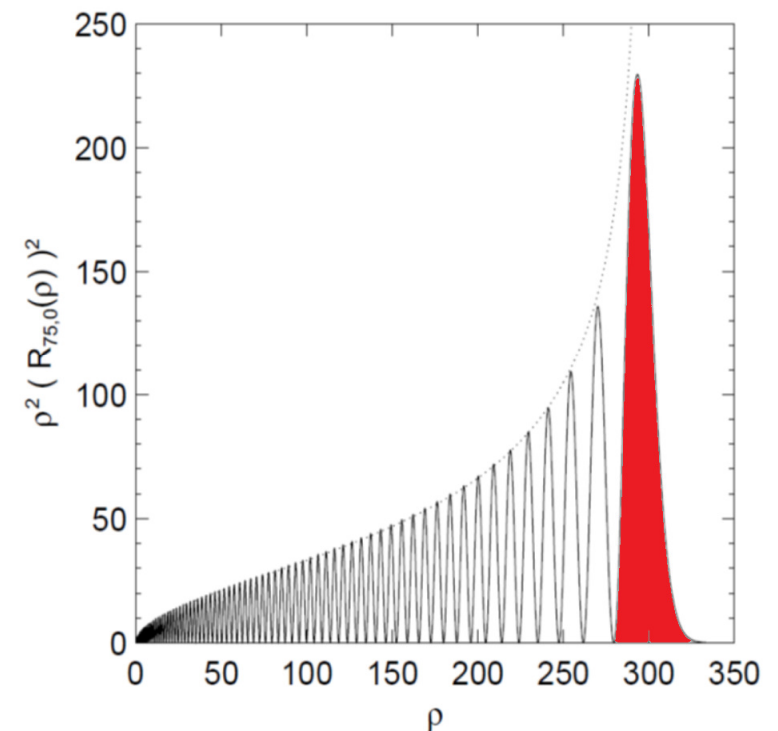
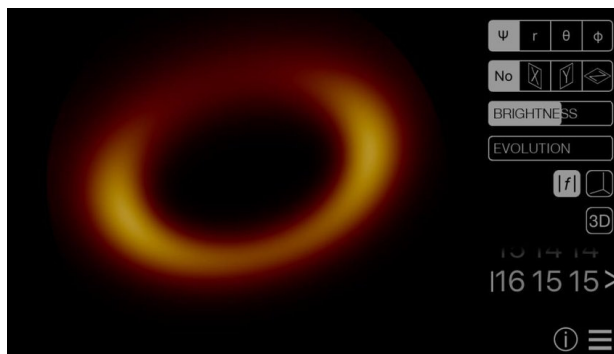


Limite classico - 1

Densità di probabilità radiale per $n=75$:
Forte concentrazione attorno a $r = 300$,
corrispondente all'orbita classica

Per grandi numeri quantici, l'elettrone
si comporta in modo \approx classico

$n = 16$



Limite classico - 2

Frequenza della transizione $n \rightarrow n-1$: $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 2a_0 h} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n-1)^2} \right)$

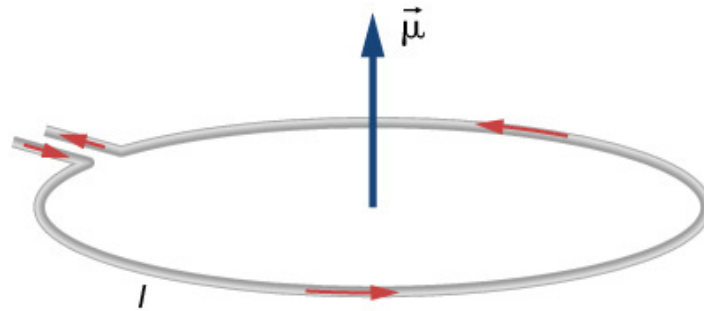
$$\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n-1)^2} = \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2 - 2n + 1} \sim \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2 - 2n} \sim \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2} \frac{1}{1 - \frac{2n}{n^2}} \sim \frac{1}{n^2} \left(1 - 1 + \frac{2}{n} \right) = \frac{2}{n^3}, \quad n \gg 1$$

$$\rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 2a_0 h} \frac{2}{n^3} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_0 h n^3} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} 2\pi \hbar n^3} = \frac{me^4}{32\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3 n^3}$$

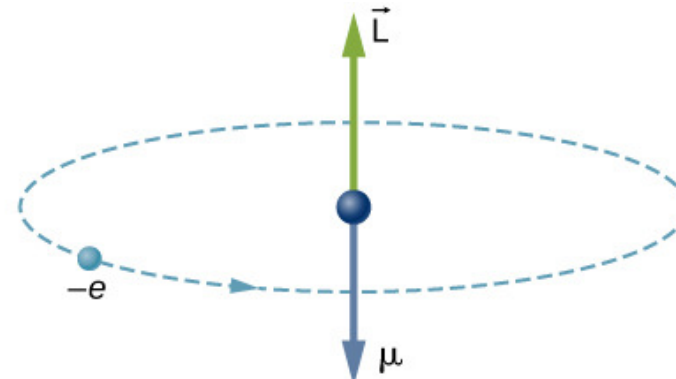
Frequenza di rivoluzione: $\nu_{class} = \frac{1}{T} = \frac{v_n}{2\pi r_n} = \frac{\frac{1}{2\pi} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 n \hbar}}{2\pi \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} n^2} \rightarrow \nu_{class} = \frac{me^4}{32\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3 n^3}$

Atomi magnetici

Usando il modello di Bohr: orbita elettronica equivalente a spira di corrente
Momento di dipolo magnetico 'orbitale' \propto momento angolare orbitale
 \rightarrow multiplo di \hbar



Corrente in una spira

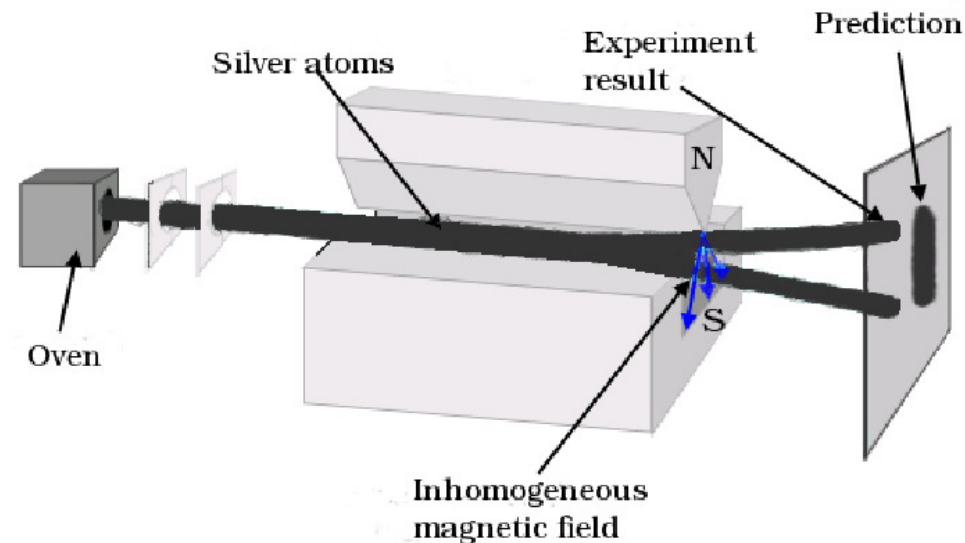


Atomo di H

Stern & Gerlach

Misura delle proprietà magnetiche degli atomi

‘Fascio atomico’: forno ad alta temperatura contenente vapori di argento



Campo magnetico inhomogeneo: Forza netta verticale sull'atomo in transito

Quantizzazione spaziale

$F \propto \boldsymbol{\mu} \cdot \frac{d\mathbf{B}}{dz}$, $\boldsymbol{\mu}$ momento di dipolo magnetico dell'atomo

Classicamente, $\boldsymbol{\mu}$ è orientato casualmente rispetto a $\frac{d\mathbf{B}}{dz}$

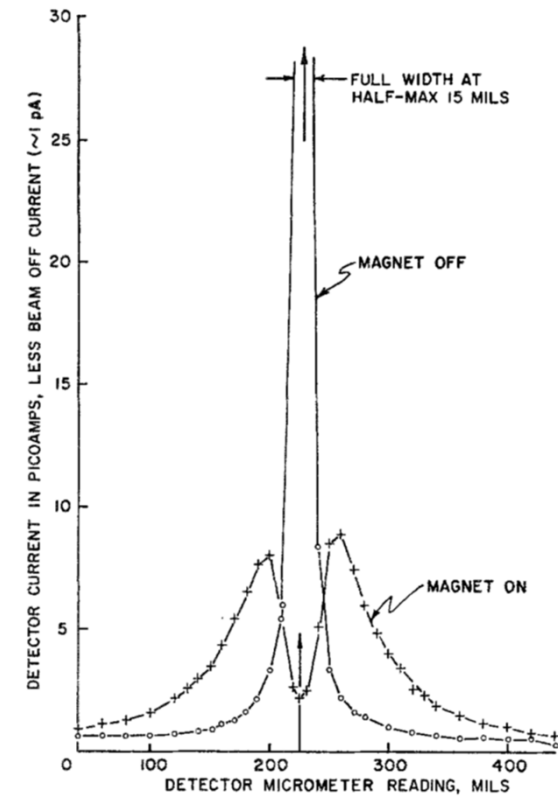
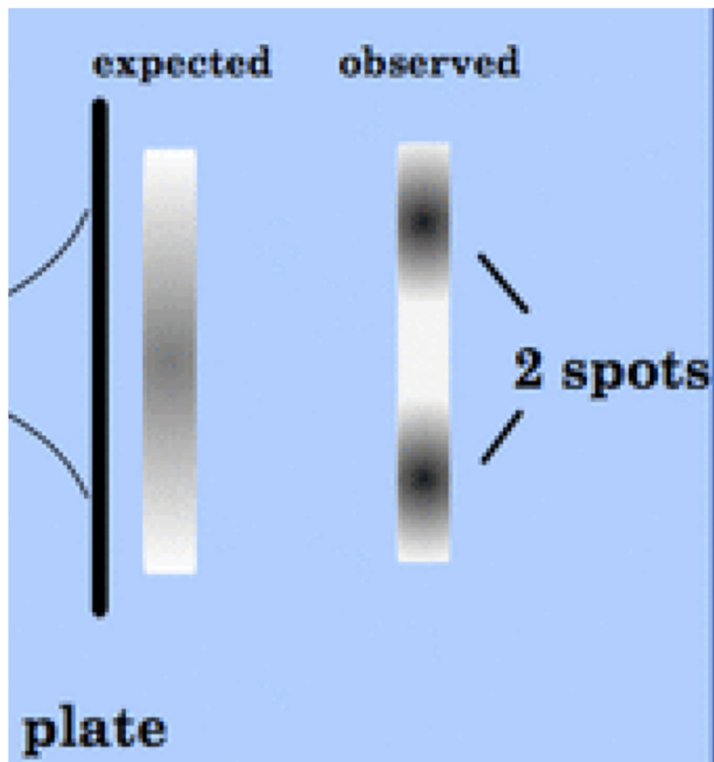
→ La forza va da $-F_{\max}$ a $+F_{\max}$ con continuità

→ Lo spostamento verticale idem, fra $-z_{\max}$ e $+z_{\max}$

Invece si osservano due macchie ben separate!

→ Lungo la direzione di $\frac{d\mathbf{B}}{dz}$, $\boldsymbol{\mu}$ ha solo le proiezioni $\pm \mu$

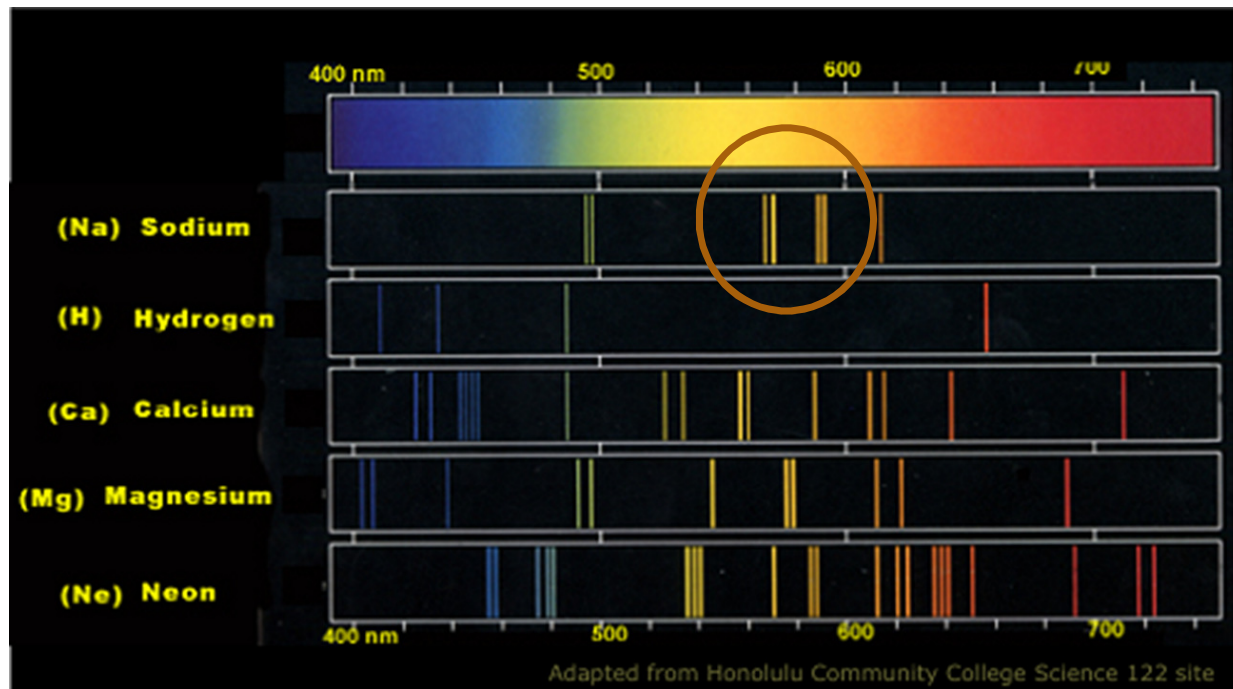
Risultati



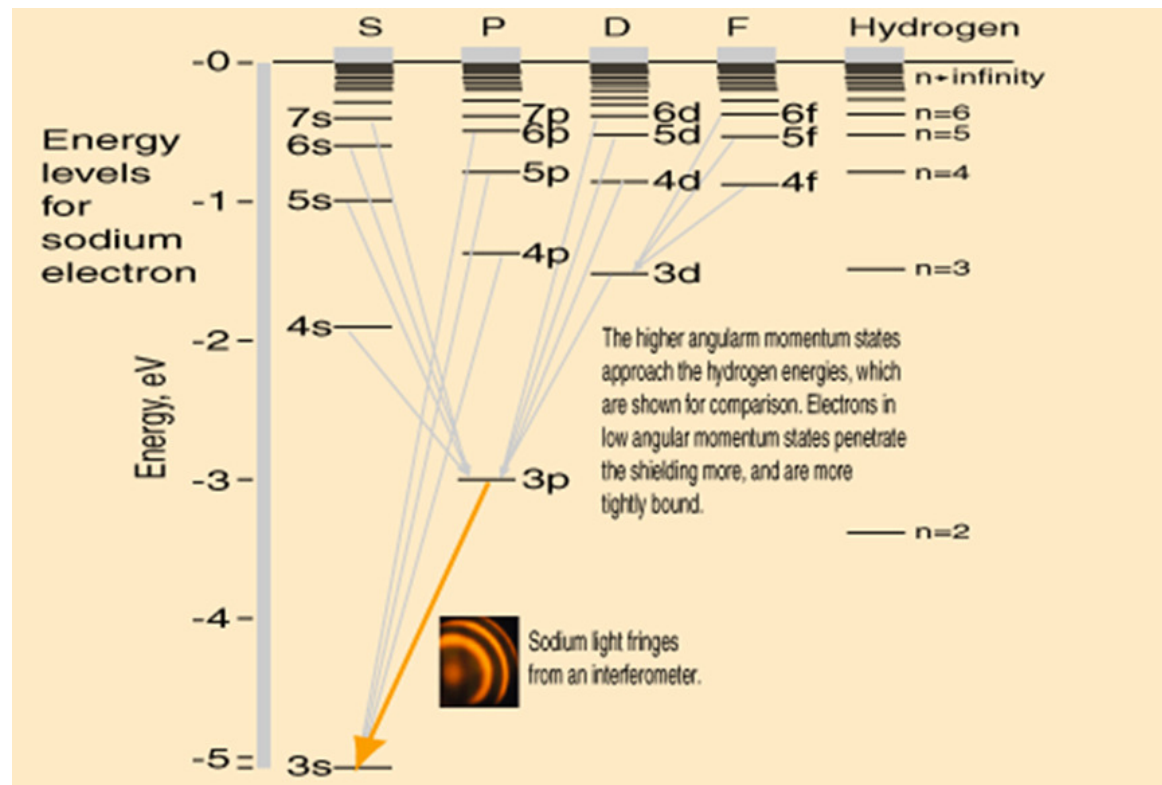
Atomi complessi

Estensione al caso di atomi con più elettroni

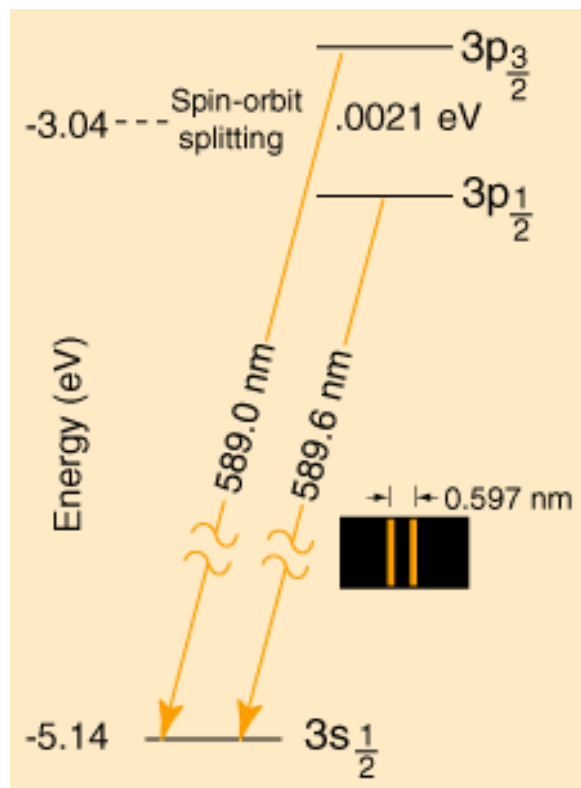
Principi identici : Complicazione dei calcoli: + Qualche novità...



Sodio vs Idrogeno



Struttura fine e sdoppiamento



I livelli con $n = 3$, $l=0$, 1 hanno energia diversa
Possibile spiegarlo tenendo conto delle forze magnetiche che agiscono sull'elettrone esterno

Ma risulta incomprensibile lo *sdoppiamento* di una riga spettrale, detta 'la riga D'

Fra i livelli 3,1 e 3,0 si osservano *due* transizioni, con lunghezza d'onda leggermente diversa

Spin

Si interpreta l'osservazione come dovuta a

'un moto aggiuntivo di rotazione dell'elettrone attorno al suo asse'

tipo pianeta

→ L'elettrone ha *spin*, ossia momento angolare intrinseco, uguale a $\hbar/2$

Ad esso è associato un momento magnetico intrinseco

Tutte le particelle che hanno spin semi-intero si chiamano *fermioni*

Tutte le particelle che hanno spin intero si chiamano *bosoni*

Componenti litigiose

Spin: Momento angolare intrinseco delle particelle

Momento angolare: Vettore

Elettrone: spin $\frac{\hbar}{2}$, $\mathbf{s} = (s_x, s_y, s_z)$

Misura componenti dello spin: Sempre $\pm \frac{\hbar}{2}$

Proprietà caratteristica:

come posizione e impulso, le tre componenti *non* sono compatibili

Gemelli identici

Tutti gli atomi in un dato stato quantico sono *identici*

Ragione: lo stato quantico descrive la realtà al livello fondamentale

→ Due atomi di idrogeno nello stato fondamentale non hanno altre caratteristiche che possano differenziarli

Per i gemelli identici, vale un principio fondamentale:

La funzione d'onda di un insieme di fermioni identici cambia segno se due qualsiasi si scambiano la posizione

Principio di esclusione di Pauli

Applicazione: Coppia di elettroni in un atomo

Funzione d'onda dipende dalle coordinate dei due:

$$\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2) = -\psi(x_2, y_2, z_2, x_1, y_1, z_1), \text{ fermioni identici}$$

Se $x_1, y_1, z_1 = x_2, y_2, z_2$ - ossia i due elettroni sono nella stessa posizione

$$\rightarrow \psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2) = -\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2) = 0$$

Principio di Pauli:

Due elettroni di un atomo non possono avere la stessa funzione d'onda (inclusa la parte dello stato di spin)

Mendeleev spiegato

MQ applicata agli atomi:
Interpretazione e spiegazione

quantitativa

della tavola periodica

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H	He																
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
Lanthanide Series		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Actinide Series		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	