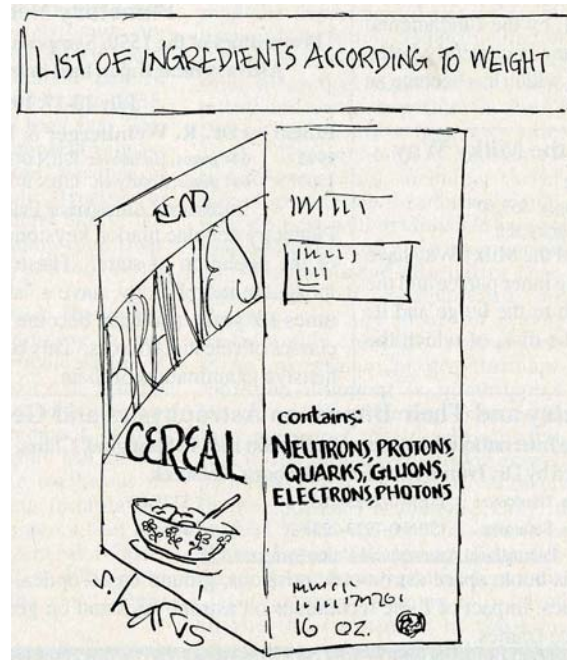


# Microfisica



Corso di Fisica per CTF  
AA 2006/07



# I limiti della fisica classica

---

- “normalmente” / macroscopicamente:
  - $c = 2.998 \cdot 10^8$  m/s velocità (celerity) della luce nel vuoto risulta molto grande rispetto alle velocità ordinarie – altrimenti  $\Rightarrow$  **relatività (ristretta e generale)**
  - $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Js costante di Planck risulta molto piccola rispetto alle quantità ordinarie con essa omogenee – altrimenti  $\Rightarrow$  **meccanica quantica**
- quando le dimensioni cominciano a diventare comparabili con quelle atomiche, queste due condizioni possono non essere più soddisfatte – qui ci occuperemo ~sempre del 2° caso, nel senso che considereremo  $v \ll c$



# Fenomeni non spiegabili dalla meccanica ed e.m. classici (fine '800, inizi '900)

---

- relatività dei sistemi di riferimento inerziali per  $v_{\text{relativa}}$  grande;  $v_{\text{segnale}} \leq c \Rightarrow$  **meccanica relativistica**
- comportamento a piccole distanze (dimensioni atomiche)
  - stabilità degli atomi
  - uguaglianza delle configurazioni per atomi della stessa specie
  - emissione ed assorbimento della radiazione e.m. (in particolare, spettri di righe)
  - spettro del corpo nero
  - calori specifici di gas e solidi
  - effetto fotoelettrico ed effetto Compton
  - radioattività

$\Rightarrow$  **meccanica quantistica**



# Dimensioni atomiche

---

- vari metodi per stimarle, ad es.
  - olio ( $C_{57}H_{104}O_8$ ) su acqua  $\rightarrow$  strato monomolecolare per via della tensione superficiale – pur senza arrivarci si può comunque ottenere: dimensioni molecolari  $< 10 \text{ \AA}$
  - teoria cinetica dei gas
    - diffusione
    - covolume  $b$ , eq. di Van der Waals  $(p+a/V^2)(V-b) = nRT$

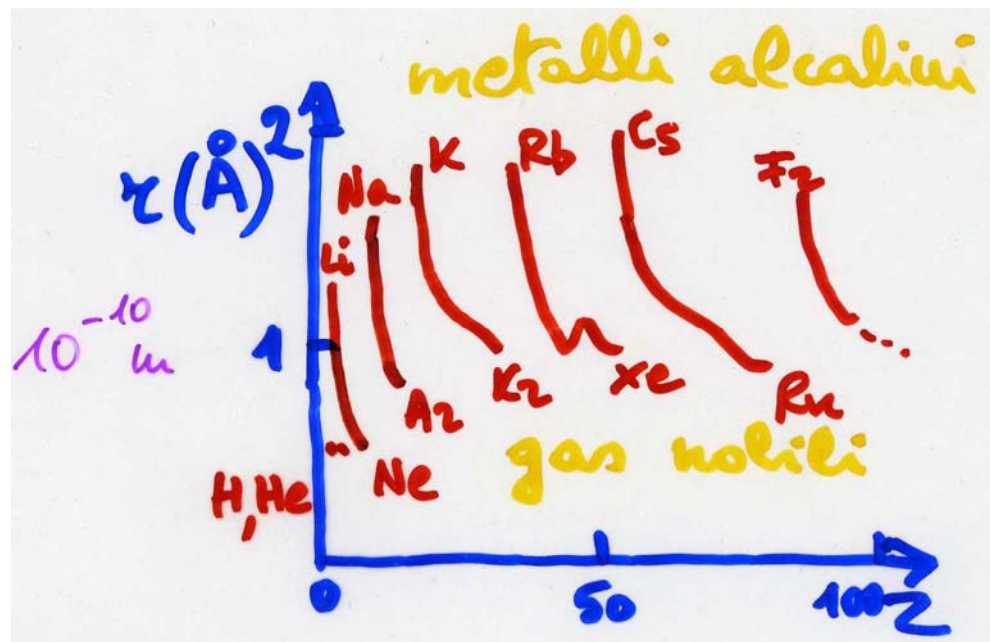
dimensioni atomiche  $\approx 1 \text{ \AA}$

- solido cristallino o microcristallino: pensiamo gli atomi come sferette o cubetti attaccati

$$N_A V_{\text{atom.}} = M/\rho = MV/m \qquad V_{\text{atom.}} = 4\pi r^3/3$$

con  $M$  mole;  $r \approx 1.6 \text{ \AA}$  (Ag),  $1.4 \text{ \AA}$  (Fe) dipende poco dalla massa atomica per elementi diversi

# Dimensioni atomiche

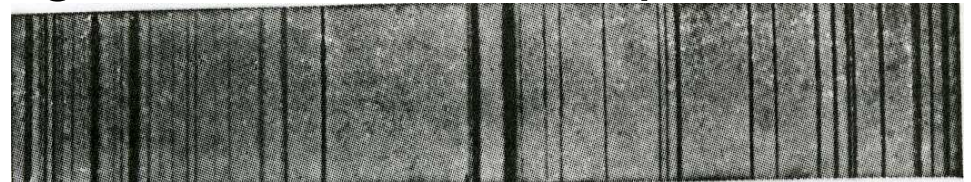


- tutti gli elementi esistono in forme di massa diversa, separabili ad es. con uno spettrometro di massa, gli isotopi (con uguali proprietà chimiche e uguale  $r$ , che non dipende dalla massa atomica per uno stesso elemento)



# Stabilità e uguaglianza degli atomi, spettri di righe

- classicamente: una carica accelerata emette onde e.m. perdendo energia: se si considera un  $e^-$  che gira intorno ad un p, esso è soggetto ad  $a_c = v^2/r$  e si può stimare che dovrebbe 'cadere' sul p entro  $10^{-10}$  s – invece gli atomi sono stabili
- classicamente:  $e^-$  e p sono tenuti insieme dalla forza di Coulomb, r ed energia del sistema sono arbitrari – invece alla stessa T gli atomi mostrano r ed energie simili
- se si fa passare la luce per es. attraverso un gas si osservano righe discrete di assorbimento, in corrispondenza di certe lunghezze d'onda, sempre le stesse per un stesso gas





# Spettro del corpo nero e quanti di energia

---

- $\forall$  corpo emette onde e.m. (alla sua temp.  $T$ ) – classic.: ciò origina dalle vibrazioni di cariche dovute all'agitazione termica; non si riesce però a spiegare lo spettro e la potenza irradiata (leggi di Wien e di Stefan-Boltzmann, v. Termodinamica)
- Planck (1900) avanza un'ipotesi ad hoc per spiegare lo spettro del corpo nero: gli oscillatori emettono o assorbono solo quantità discrete di energia

$$E = h\nu$$

**quanti di energia** o **fotoni**, con  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Js, costante di Planck (ricavabile ad es. dalla forma dello spettro)

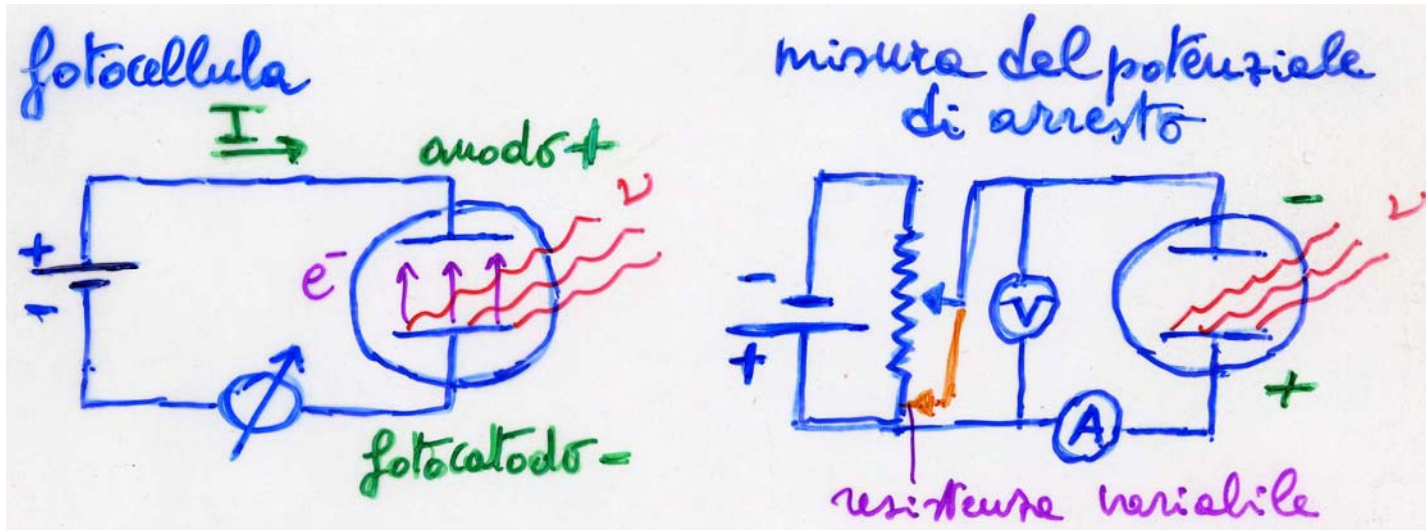
- $\Rightarrow$  la luce sembra comportarsi come una particella (**quando interagisce con la materia**)





# Effetto fotoelettrico

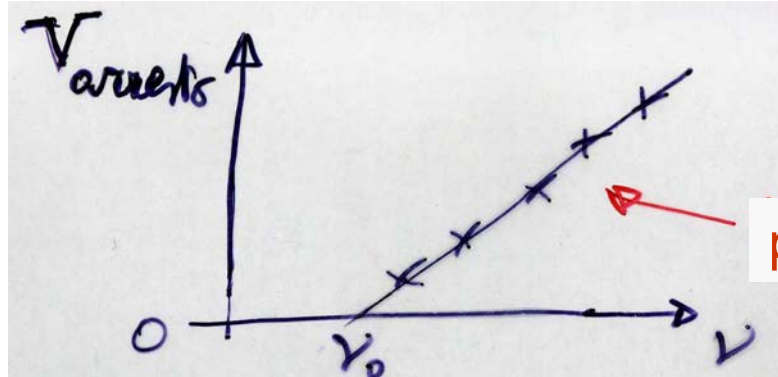
- fatti sperimentali:
  - in alcuni materiali, ad es. metalli, la luce visibile può strappare  $e^-$ ;  $\exists$  una  $\nu$  di soglia,  $\nu > \nu_0$  ( $\nabla$  Intensità)
  - controcampo: blocca il passaggio degli  $e^-$  nel circuito esterno (potenziale d'arresto  $\approx 1$  V)  $\rightarrow K_{\max} \approx 1$  eV ( $\nabla$  Intensità)
  - l'emissione è immediata
  - per  $\nu (> \nu_0)$  fissa,  $N_e$  emessi  $\propto$  Intensità della luce





## Effetto fotoelettrico (2)

- misurando il pot. d'arresto con luce di varia  $\nu$  si ha



- $\Rightarrow E_e \in (0, K_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2)$  con  
 $\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_a = \text{cost}(\nu - \nu_0) = h(\nu - \nu_0)$
- introducendo i fotoni ( $E = h\nu$ , Einstein, 1905) si spiegano i fatti sperimentali: **un  $e^-$  interagisce con un fotone**, nessun ritardo,  $h\nu$  è la max energia che l' $e^-$  può avere, dedotto il lavoro di estrazione  $\Rightarrow$  altra evidenza che la luce si comporta come una particella (quando interagisce con la materia)



## Effetto fotoelettrico (3)

- in formule

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - \Phi$$

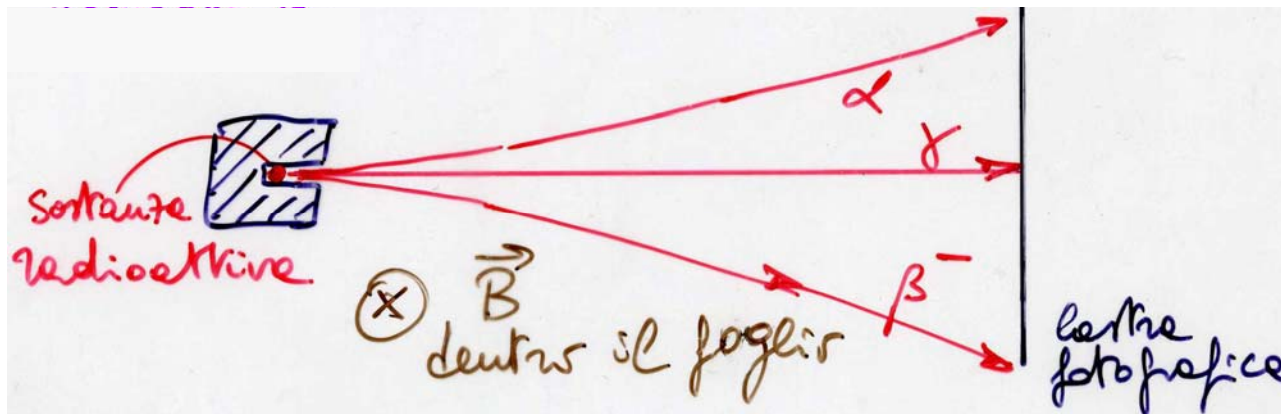
con  $\Phi = h\nu_0 = hc/\lambda_0$       lavoro di estrazione

- classicamente: non si può capire la soglia (hp. processo multiplo), si prevede quindi un ritardo,  $\nu$  è irrilevante mentre l'en. degli  $e^-$  è legata ad  $I_{\text{luce}}$
- es. voglio un fotoelettrone da 1 eV dal Cs ( $\Phi_{\text{Cs}} = 1.8 \text{ eV}$ ), qual'è  $\lambda_{\max}$  ( $\nu_{\min}$ )?  
 $E_{\min} = \Phi + (mv^2/2) = (1.8 + 1) \text{ eV} = 4.49 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
 $\lambda_{\max} = hc/E_{\min} = 1.99 \cdot 10^{-25} \text{ Jm} / 4.49 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 443 \text{ nm}$  (violetto)
- applicazioni: dalle cellule fotoelettriche (apriporta) ai fotomoltiplicatori



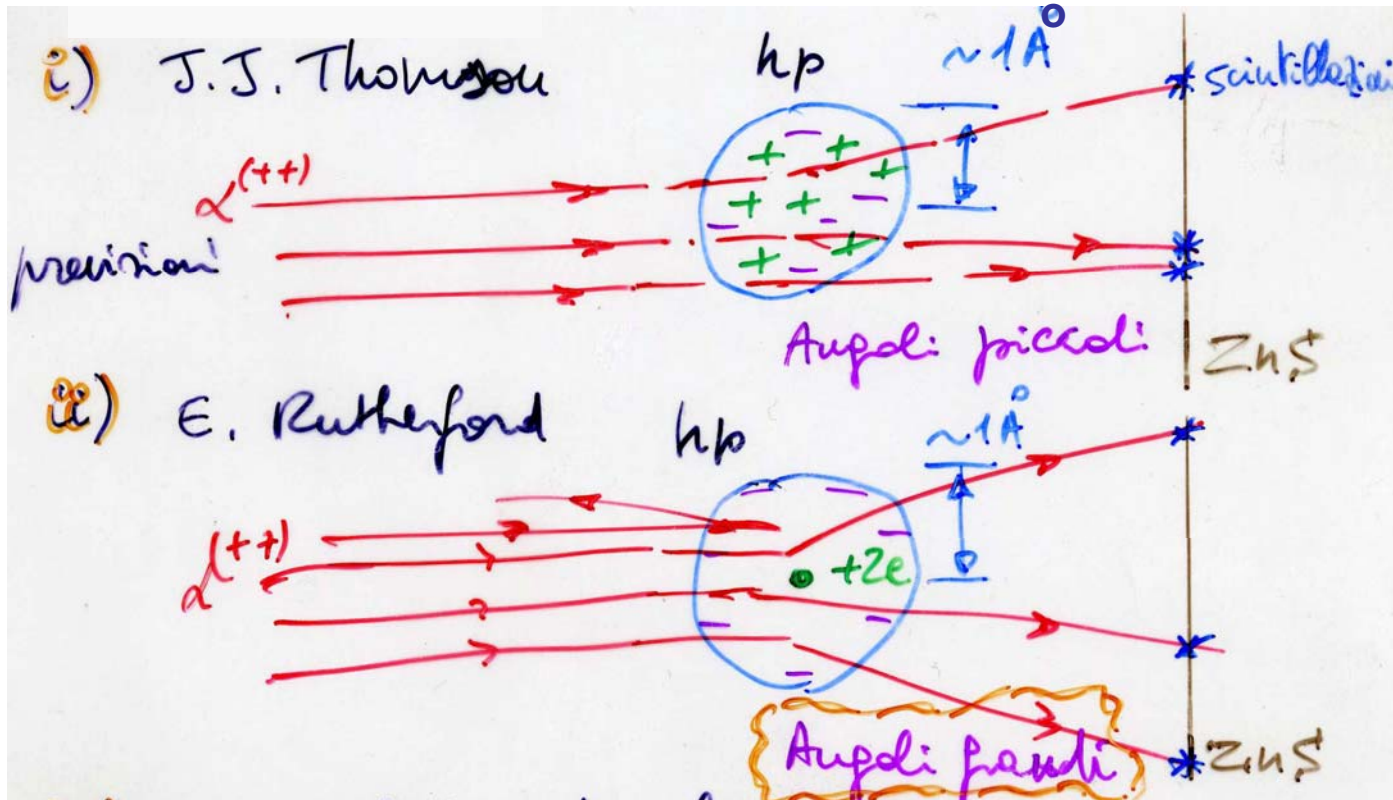
# Radioattività

- alcune sostanze naturali (ad es. U, Th ... ) emettono radiazioni  $\alpha$  ( $\equiv \text{He}^{++}$ ), oltre a  $\beta^-$  ( $\equiv e^-$ ) e  $\gamma$  (neutre) – alcune sostanze prodotte artificialmente con acceleratori emettono radiazioni  $\beta^+$  ( $\equiv e^+$ )
- la scoperta della r. fu fortuita (Becquerel, 1896)
- le  $\alpha$  sono assorbite rapidamente nella materia, mentre i  $\beta$  penetrano più profondamente (i  $\gamma$  ancora di più)
- $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  sono separabili con un campo magnetico



# Modelli atomici

- dopo la scoperta dell'e<sup>-</sup> (J.J. Thomson) sono stati proposti vari modelli atomici fra cui

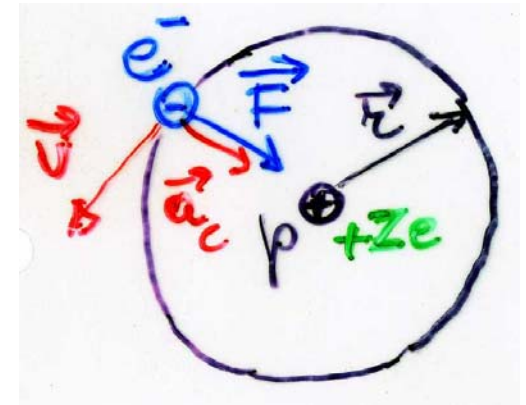


- sperimentalmente ha ragione Rutherford (1911)  $\Rightarrow$  modello planetario



# L'atomo di Rutherford-Bohr

- ogni atomo, neutro, ha da 1 a 92 (114)  $e^-$  ( $Z$ )
- raggio atomico  $\sim 10^{-10}$  m = 1 Å
- raggio nucleo  $\sim 10^{-15}$  m = 1 fm; carica  $+Ze$ , massa  $\approx Am_p$
- atomo di H o  $\nabla$  ( $Z-1$ ) ionizzato,  $m_e/m_p = 1/1836.15 \ll 1$   
→ si può assumere  $m_p = \infty$ , p fermo ed  $e^-$  che ruota intorno (errore piccolo); forza: elettrica fra p ed  $e^-$ , attrattiva; modello planetario classico, orbite circolari (per semplicità)
- $mv^2/r = 1/(4\pi\epsilon_0)Ze^2/r^2$
- $E_0 = \frac{1}{2}mv^2 - 1/(4\pi\epsilon_0)Ze^2/r$   
energia di legame =  $-E_0$





# I postulati di Bohr

- Bohr (1913), modello semiclassico:

1.  $\exists$  stati energetici ben precisi (stazionari) dell'e<sup>-</sup> con energia  $E_n$ : emissione o assorbimento di radiazione / luce corrispondono a transizioni fra uno stato e l'altro, fra un **livello energetico** ed un altro

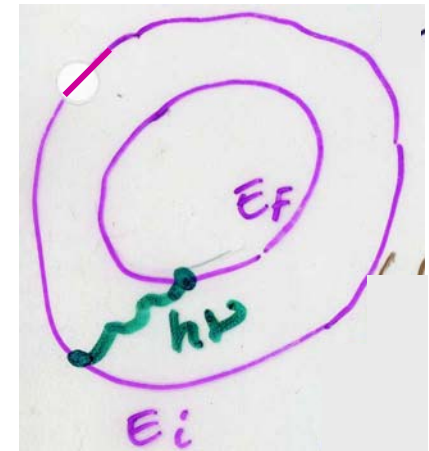
2. frequenza della radiazione emessa o assorbita

$$\nu = |E_i - E_f|/h$$

(h è la cost. di Planck): corrisponde all'interazione con un fotone,  $E = h\nu$

3. quantizzazione del momento angolare ( $\vec{\ell} = \vec{r} \wedge \vec{q} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$ )

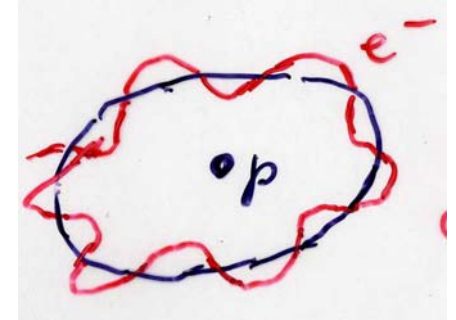
$$mvr = nh/2\pi \quad (\text{orbite circolari}) \quad n = 1,2,3 \dots \quad \text{intero}$$





# Modello di Bohr

- il 3° postulato corrisponde a considerare gli  $e^-$  come onde con  $\lambda = h/q$  (De Broglie, 1926): le onde elettroniche interferiranno distruttivamente a meno di non avere onde stazionarie  
 $2\pi r = n\lambda = nh/(mv)$



- dai 3 postulati segue:

–  $r_n = n^2 a_0 / Z$        $n = 1, 2, 3 \dots$     numero quantico

–  $E_n = -E_1 Z^2 / n^2$

–  $\nu = |E_i - E_f| / h = c R_\infty Z^2 |1/n_f^2 - 1/n_i^2|$

con  $a_0 = 0.0529 \text{ nm}$     raggio di Bohr

$E_1 = 13.6 \text{ eV}$     energia di legame dello stato più basso  
(stato fondamentale)

$R_\infty = 1.097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$     costante di Rydberg





# La matematica del modello di Bohr (\*)

- partendo da  $F = ma$

$$1/(4\pi\epsilon_0)Ze^2/r^2 = mv^2/r \quad (\text{moltiplico per } mr^3)$$

$$1/(4\pi\epsilon_0)Ze^2r = (mvr)^2 = (nh/2\pi)^2 \quad (\text{usando 3° Bohr})$$

$$\rightarrow r_n = n^2 h^2\epsilon_0/(\pi mZe^2) [= n^2a_0/Z]$$

- semplificando  $r$  in  $F = ma$

$$1/(4\pi\epsilon_0)Ze^2/r = mv^2$$

da cui ho per l'energia totale

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{1}{2}mv^2 - 1/(4\pi\epsilon_0)Ze^2/r = 1/(8\pi\epsilon_0)Ze^2/r - 1/(4\pi\epsilon_0)Ze^2/r \\ &= -1/(8\pi\epsilon_0)Ze^2/r \end{aligned}$$

$$\rightarrow E_n = -1/n^2 mZ^2e^4/(8h^2\epsilon_0^2) = [-E_1Z^2/n^2]$$

NB  $E_0$  è negativa, cioè devo fornire en. per separare  $e^-$  e  $p$



## Modello di Bohr (2)

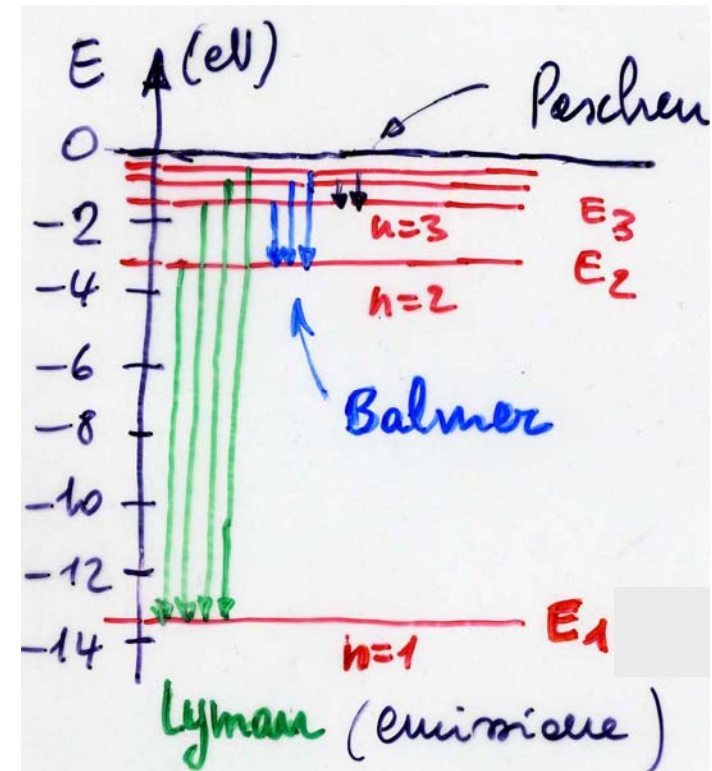
---

- si giustifica (per hp.) la stabilità degli atomi – non possono avere energia inferiore a quella dello stato fondamentale
- si trovano le energie di legame corrette (verificabili anche con gli spettri di righe dei raggi X, v. oltre)
- si spiegano le righe di assorbimento e emissione dovute ai salti quantici fra un livello energetico ed un altro con assorbimento o emissione di un fotone – riproducendo i dati degli spettroscopisti (serie di Balmer etc.)
- il modello può essere esteso per spiegare situazioni più complicate, ma sono presenti inconsistenze e alla fine è stato rimpiazzato dalla meccanica quantistica



# Livelli energetici

- i livelli energetici dell'atomo di H o di quelli idrogenoidi sono separati per  $n$  piccolo e si addensano per  $n \nearrow$  poichè  $E_n \propto 1/n^2$
- in generale i livelli energetici di un  $\nabla$  e<sup>-</sup> in un  $\nabla$  atomo sono rappresentati con linee orizzontali indipendentemente dal modello
- le linee verticali rappresentano le transizioni radiative (fotone) fra un livello ed un altro
- fra livelli energetici molto vicini sono possibili anche transizioni non radiative ad es. per urto fra atomi vicini





# Onde di materia

- l'idea di De Broglie (tesi, 1924) è che luce e materia abbiano proprietà sia ondulatorie (onde di probabilità di presenza) che corpuscolari

- eq. di De Broglie

- $v \cong E/h$

- $\lambda = h/q = h/(mv)$

- $v$  e  $\lambda$  proprietà ondulatorie,  $E$  e  $q$  corpuscolari

es.1 palla da baseball:  $m = 150$  g,  $v = 50$  m/s,  $d = 5$  cm

$$\lambda = h/(mv) = 6.63 \cdot 10^{-34} / (0.15 \cdot 50) = 8.84 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

**molto piccola**,  $\lambda$  irrilevante:  $\lambda/d \sim 2 \cdot 10^{-33}$

es.2  $e^-$  nell'atomo di H:  $v = c/137 = 2.19 \cdot 10^6$  m/s

$$\lambda = h/(mv) = 6.63 \cdot 10^{-34} / (9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 2.19 \cdot 10^6) = 0.332 \text{ nm} =$$

**$2\pi a_0$ !** **grande**, lunghezza circonfer. orbita di Bohr



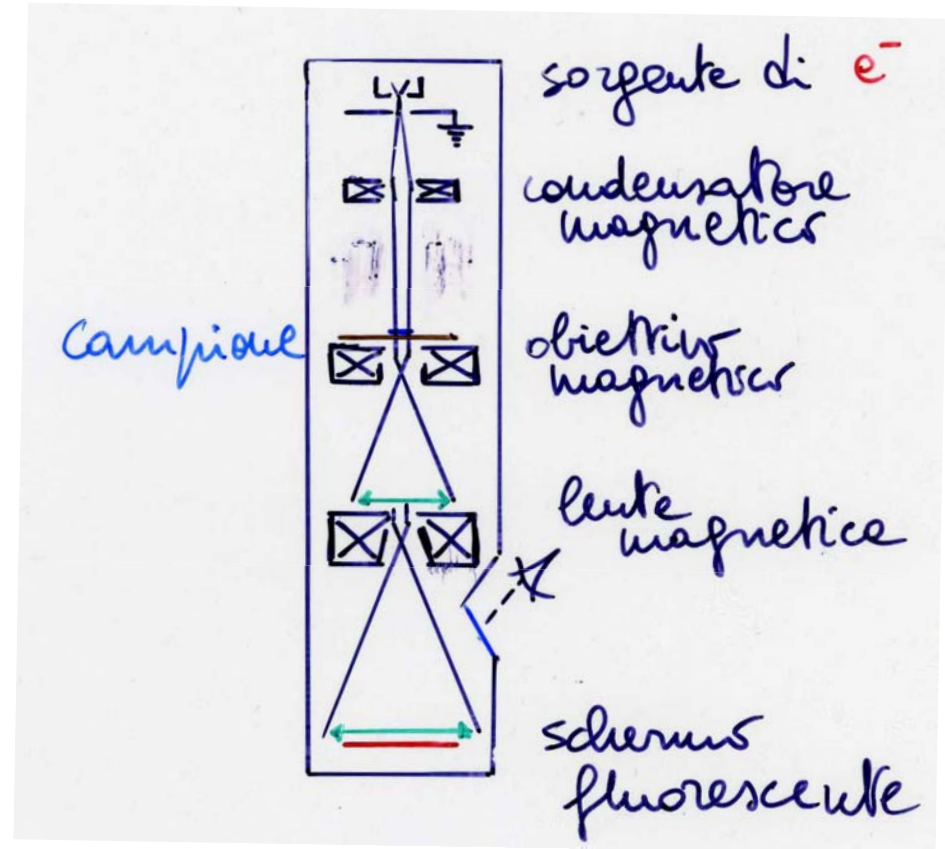
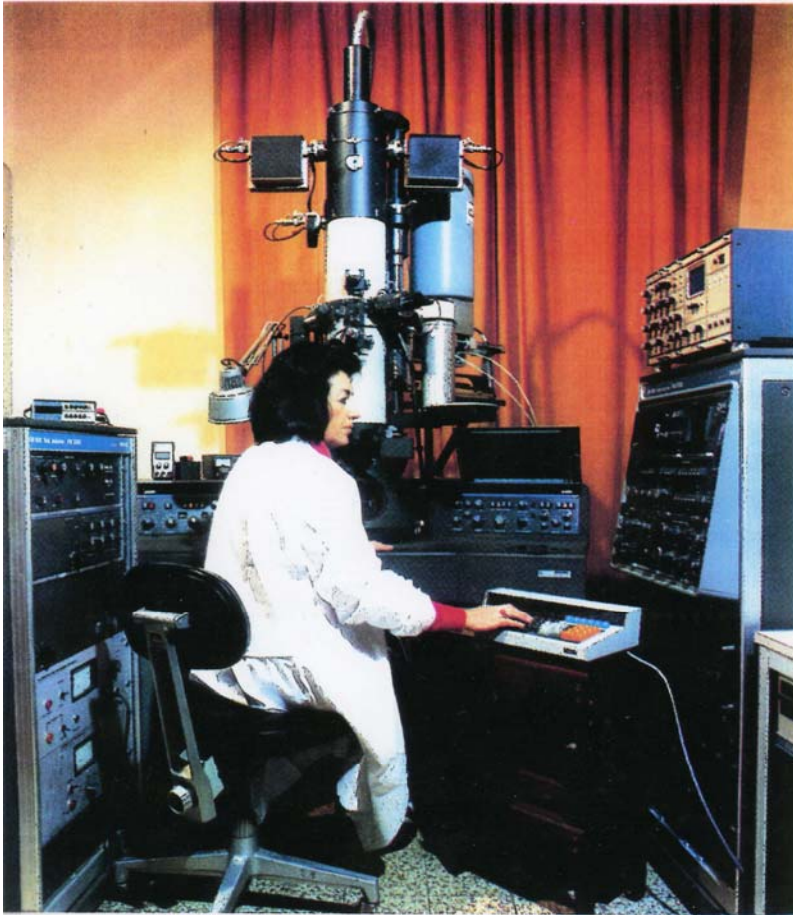
## Onde di materia (2)

---

- conseguenze dell'hp. di De Broglie
  - diffrazione degli  $e^-$ ,  $\lambda$  piccola,  
 $K = \frac{1}{2}mv^2 = q^2/(2m) = eV \quad \rightarrow \quad q = \sqrt{(2meV)}$   
 $\lambda = h/q = h/\sqrt{(2meV)} = 1.226 \text{ nm}/\sqrt{K(\text{in eV})}$   
 $K = 100 \text{ eV} \quad \lambda = 1.2 \text{ \AA} \rightarrow$  serve un reticolo con un passo di 1-2  $\text{\AA}$  (cristallo di Ni, Davisson e Germer, G. P. Thomson)
  - tutte le particelle (p,n, $\alpha$  etc.) hanno proprietà ondulatorie  $\rightarrow$  se ne può studiare / usare la diffrazione con reticoli opportuni
  - microscopio elettronico

# Microscopio elettronico

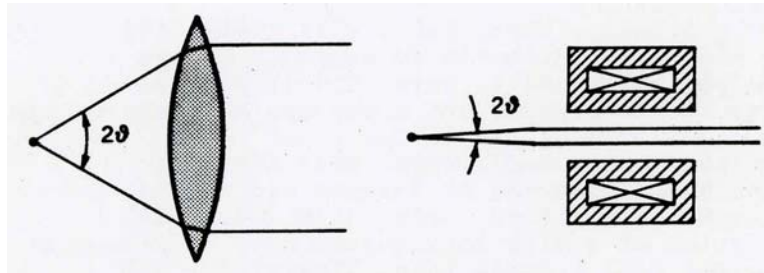
m.e. a trasmissione





## Microscopio elettronico (2)

- a trasmissione (attraverso il campione) oppure a scansione (il fascio di  $e^-$  è diffuso dal campione)
- con  $K = 100 \text{ keV}$        $\lambda = 0.004 \text{ nm} \sim 10^{-5} \lambda_{\text{visibile}}$
- ci si potrebbe aspettare un guadagno in ingrandimento rispetto al m. ottico ad es. di  $\lambda_{\text{vis}}/\lambda_e \sim 10^5$ , in effetti si guadagna molto meno, perchè l'apertura numerica [cfr  $d_{\text{min}} = 0.61\lambda/(n\sin\theta)$ ] è molto più piccola



→ ingrand. m.e./ingrand. m.o.  $\sim 1000$

- con particolari microscopi a scansione a effetto tunnel (STM) o a forza atomica (AFM) si arriva alle dimensioni atomiche





# Dualismo onda-corpuscolo

---

riassumendo

- tutte le radiazioni, sia materiali [con massa a riposo  $m_0 \neq 0$ ,  $m = m_0/\sqrt{(1-v^2/c^2)}$ ] che luminose (in generale onde e.m. di  $\forall v$ , con massa a riposo nulla) hanno una dualità di comportamento
- per la propagazione, trasporto di energia, si comportano come un'onda classica → interferenza, diffrazione
- nell'interazione fra loro, scambio di energia, si comportano come una particella classica



# Principio d'indeterminazione

- per localizzare un  $e^-$  possiamo usare ad es. onde e.m. di lunghezza d'onda  $\lambda$
- la precisione della misura sarà  $\Delta x \sim \lambda$  e se  $\lambda \rightarrow 0$  anche  $\Delta x \rightarrow 0$
- classic.: onda e.m. (trasporta  $E, \mathbf{q}$ ), basta però ridurre l'intensità per non "disturbare" l' $e^-$
- quantistic.: ci vuole almeno 1 fotone con  $E = h\nu$  e  $q = h/\lambda$ , quindi  $\Delta x$  non può essere ridotto a piacere senza aumentare l'incertezza su  $q_x$



$$\Delta x \Delta q_x \geq h/(2\pi)$$

(Heisenberg, 1927) conseguenza della definizione operativa di grandezza fisica, misura



# Meccanica ondulatoria

---

- se uso l'hp di De Broglie la lunghezza d'onda dell'e<sup>-</sup> sarà  
 $\lambda(r) = h/q = h/\sqrt{(2mK)} = h/\sqrt{(E_0 - W(r))}$   
→ funzione d'onda  $\psi(r)$
- $\psi$  è l'ampiezza di probabilità di presenza
- $|\psi|^2$  è la probabilità (per unità di volume)
- la  $\psi$  può essere trovata risolvendo l'eq. di Schrödinger
- non si può più dire che l'e<sup>-</sup> gira intorno al p nell'atomo di H, vi sarà una prob. di trovarlo vicino / lontano dal p data da  $|\psi|^2$ : per lo stato fondamentale il massimo di  $P(r)$  si ha per  $r = a_0 = 0.0529$  nm raggio di Bohr
- come nel modello di Bohr,  $n = 1, 2, 3 \dots \infty$ , numero quantico principale (radiale), etichetta i livelli energetici



# Numeri quantici

- oltre a dipendere da  $r$ , la  $\psi$  può dipendere dagli angoli e da variabili interne
- si trova che vi sono 4 numeri quantici che identificano un livello energetico
  - $n = 1, 2, 3 \dots \infty$  principale (radiale)
  - $\ell = 0, 1, 2 \dots n-1$  secondario o azimutale (dipend. angolare di  $\psi$ ) legato al mom. ang. orbitale  $mvr$
  - $m = -\ell, -\ell+1, \dots +\ell$  magnetico (quantizzazione spaziale, rispetto ad una direzione  $B_z$ )
  - $m_s = -1/2, +1/2$  di spin elettronico (momento angolare intrinseco)
- $\rightarrow |\Psi_{n,\ell,m,m_s}|^2$

principio di esclusione di Pauli: non possono esserci  $2e^-$  con n. quantici uguali in un atomo



# Livelli energetici

---

- atomo di H e atomi idrogenoidi: si ritrovano gli stessi livelli del modello di Bohr tenendo conto delle estensioni a orbite non circolari etc.
- atomi con molti  $e^-$ :
  - attrazione  $e^-$ -nucleo e repulsione  $e^-e^-$
  - i liv. en. sono arrangiati in gruppi (strati) con en. simili
  - nello stato fondamentale gli  $e^-$  occupano i più bassi livelli possibili
  - c'è una dipendenza da  $\ell$ , E minima per  $\ell=0$
  - non c'è dipendenza da  $m$ , a meno di non essere in **B**
  - c'è una (piccola) dipendenza da  $m_s$  (struttura fine delle righe)
- la frequenza delle righe è la stessa del modello di Bohr
- differenza: ad es. stato fondamentale dell'H  
 $n=1, \ell=0, m=0$  invece di  $n=1, \ell=1$  (Bohr)



# Notazione spettroscopica

- $l = 0, 1, 2, 3, 4$

s p d f g

sharp, principal, diffuse, fundamental e poi in ordine alfabetico!

- strati elettronici

$n = 1, 2, 3, 4, 5$

K L M N O in ordine alfabetico

- $K_\alpha$ ,  $K_\beta$  etc. indica le righe prodotte da transizioni  $n=2 \rightarrow n=1$  (L $\rightarrow$ K),  $n=3 \rightarrow n=1$  (M $\rightarrow$ K) etc. notazione usata per le righe dei raggi X, Z grande

- es.  $n=1, l=0$  elettrone 1s  
 $n=1, l=2$  elettrone 3d etc.



# Transizioni allo strato K

- in generale ( $n_1 = 1, n_2 = n$ )  
 $h\nu = E_i - E_f = E_1 Z^2 (1/1^2 - 1/n^2)$   
 $\lambda = hc/(h\nu)$

		$K_\alpha(n=2)$	n grande
H(Z=1)	$\lambda$	122	91.1 nm
	$h\nu$	10.2	13.6 eV
Cu(Z=29)	$\lambda$	0.145	0.109 nm
	$h\nu$	8.58	11.4 keV
U(Z=92)	$\lambda$	0.0144	0.0108 nm
	$h\nu$	86.3	115 keV



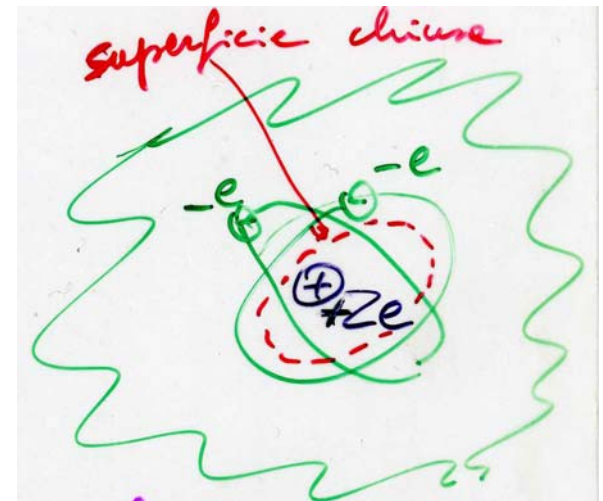


# Energia di legame degli elettroni interni

- consideriamo lo strato K, per il principio di Pauli ( $n=1, \ell=0$ ) ci sono solo  $2e^-$ : possiamo ignorare gli  $e^-$  più esterni (teorema di Gauss), un  $e^-$  vedrà la carica  $+Ze$  del nucleo schermata dall'altro (sempre per il teorema di Gauss e per simmetria)

$$Z_{\text{eff}} \sim Z - 0.5 \quad (\text{stati } 1s)$$

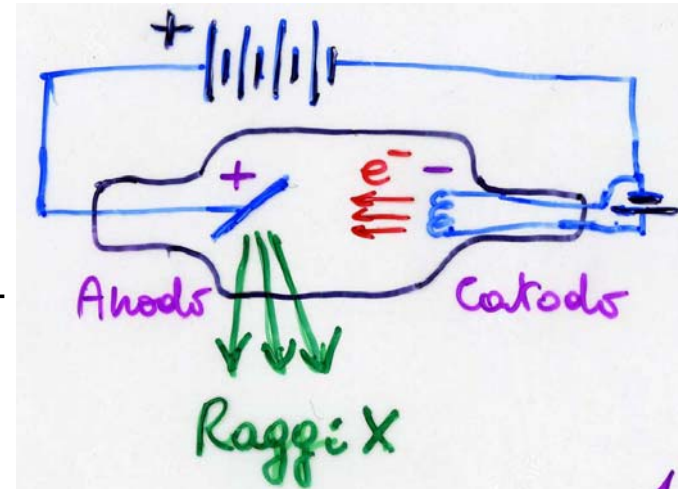
un effetto quasi trascurabile



- Cu ( $Z=29$ )     $Z_{\text{eff}} = 28.5$      $E_1 = 11 \text{ keV}$
- U ( $Z=92$ )        $91.5$         $114 \text{ keV}$     grande

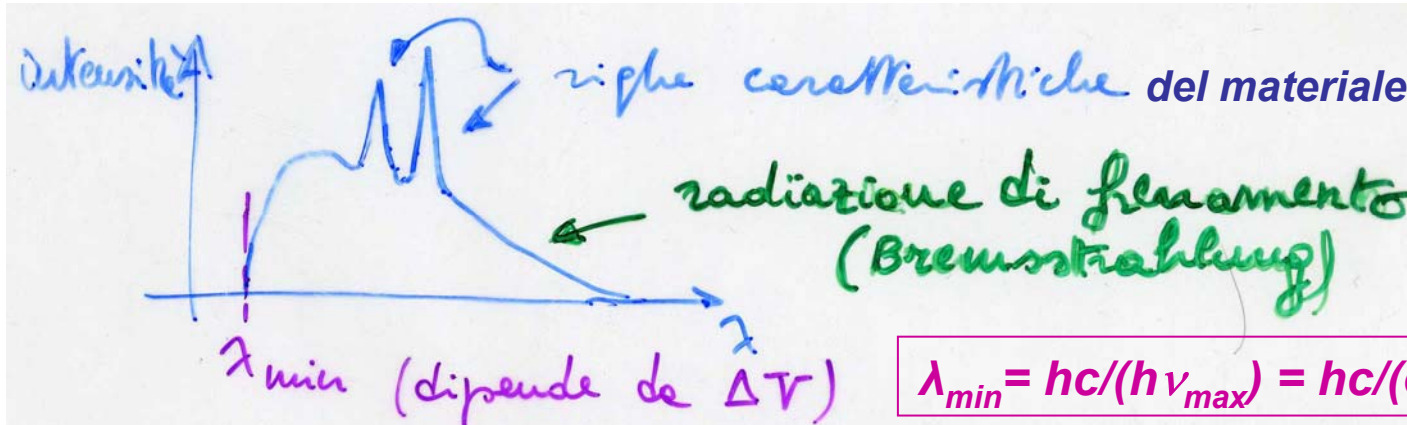
# Raggi X

- scoperta (Röntgen, 1896), radiazione uscente dal tubo a raggi catodici; diffrazione da cristalli, von Laue (th.), Friedrich e Knipping (sper.)
- si tratta di fotoni con grande frequenza (energia) e  $\lambda_X$  paragonabile a quella degli  $e^-$

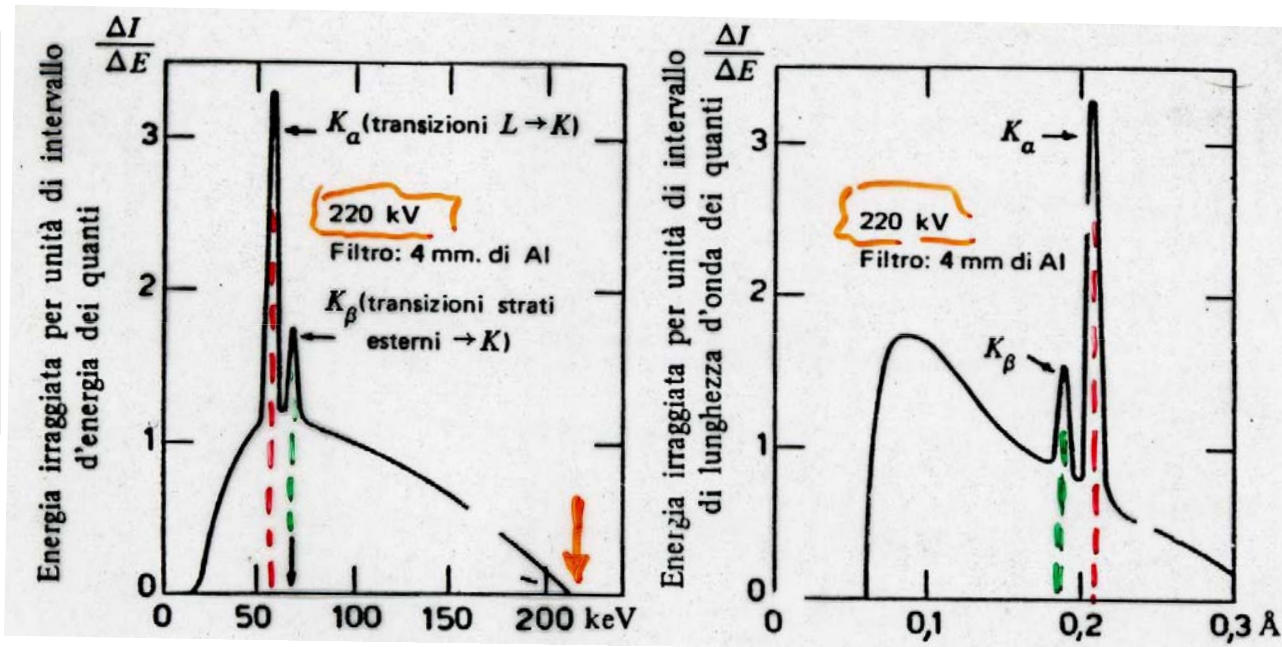


- tipicamente  $\Delta V = 50(200)$  kV fino a 4 MV,  $i = 20$  mA
- globalmente  $E_X \sim 1\%$  (99% va a riscaldare l'anodo)
- lo spettro mostra un continuo (bremsstrahlung o radiazione di frenamento) ed alcune righe ( $K_\alpha$  e  $K_\beta$ )
- $\lambda_X = \lambda_X(\Delta V, \text{materiale anodo})$

# Raggi X (2)



anodo  
di W  
 $E(K_\alpha) =$   
 $= 55.9 \text{ keV}$   
 $E(K_\beta) =$   
 $= 66.2 \text{ keV}$





## Raggi X (2)

---

- problemi
  - non si possono usare lenti ( $n \sim 1$  per tutti i materiali), è possibile usare specchi fino a una certa energia e cristalli piegati, rischi da radiazioni
- applicazioni
  - utilizzando la  $K_\alpha$  di diversi elementi, Moseley 1913, stabilì una relazione lineare fra  $\sqrt{1/\lambda}$  e  $Z$  che permise di individuare gli elementi mancanti della tavola periodica [Tc( $Z=43$ ), Pm( $Z=61$ ), Hf( $Z=72$ ), Re( $Z=75$ )]
  - radiografie e immagini per diagnostica ed altro, mezzi di contrasto: ossa Ca( $Z=20$ ), arterie (I,  $Z=53$  iniettato), apparato digerente Ba ( $Z=56$ ); TAC; distruzione di tessuti tumorali; diffr.: struttura di molecole organiche complesse

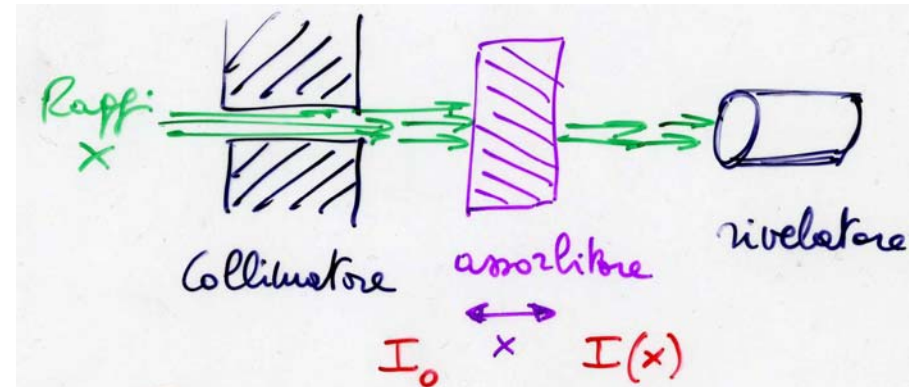


# Assorbimento dei raggi X

- i raggi X sono assorbiti nella materia per effetto fotoelettrico, effetto Compton e, per  $E > 1.02$  MeV, produzione di coppie  $e^+e^-$
- la legge dell'assorbimento è esponenziale

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$

con  $\mu$  coefficiente di assorbimento che dipende dal materiale e dall'en. degli X



- $\mu_{\text{H}_2\text{O}} \sim 1 \text{ cm}^{-1}$  per X da 10 keV (dopo 1 cm di  $\text{H}_2\text{O}$  l'intensità si riduce ad  $1/e = 1/2.72 = 37\%$ ; dopo 2 a  $1/e^2 = 13.5\%$  etc. )  
 $\mu_{\text{Cu}} \sim 1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$   
 $\mu_{\text{O,gas}} \sim 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$

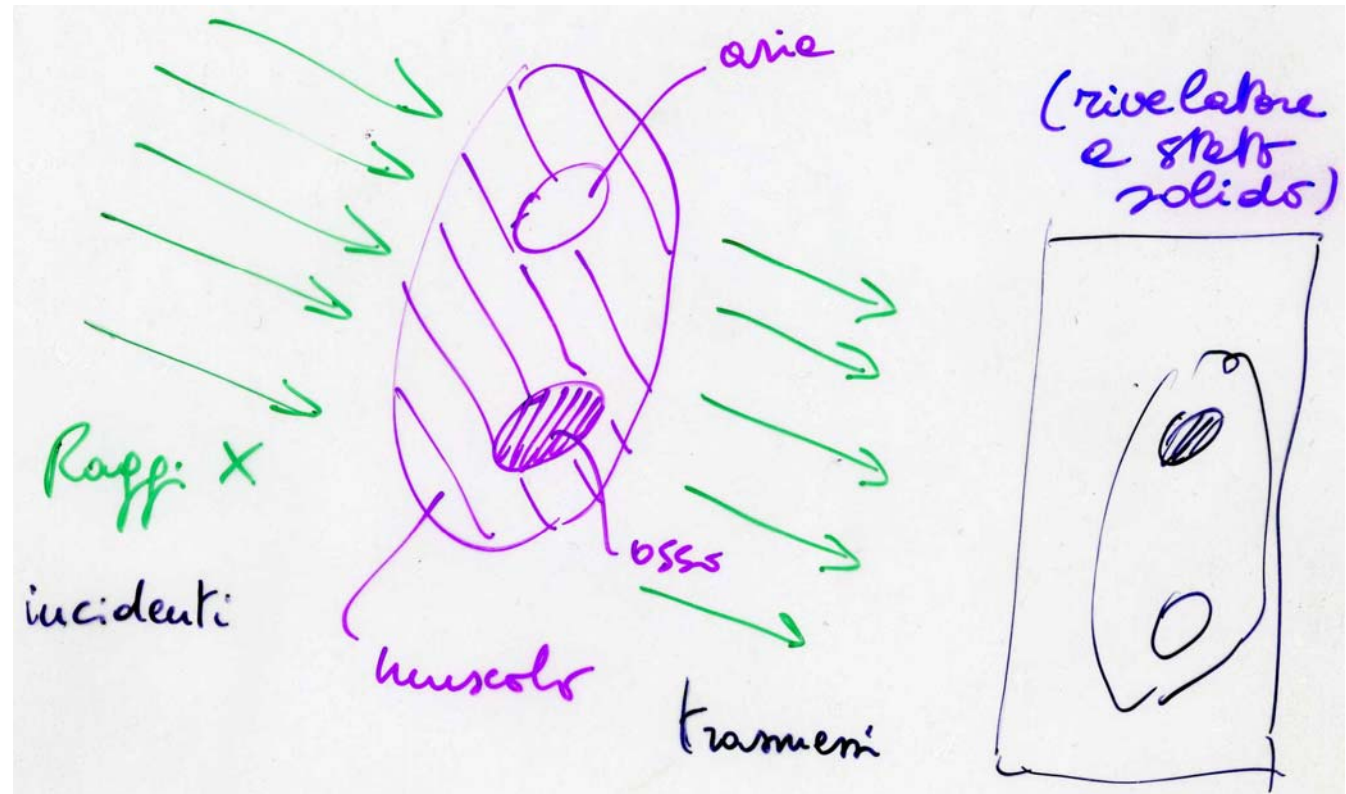


# Assorbimento dei raggi X (2)

- la differenza di assorbimento è usata per ottenere l'immagine:  $\mu$  dipende da  $Z$  del materiale (oltre ad  $E_x$ )



una delle prime immagini ottenute da Röntgen



lastra fotografica



---

# Fine della microfisica