

L'atomo di Bohr e i raggi X

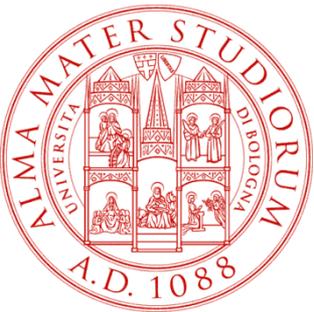
Corsi laboratorio per le scuole superiori
gennaio 2019

Prof. Federico Boscherini

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Bologna

federico.boscherini@unibo.it

www.unibo.it/docenti/federico.boscherini

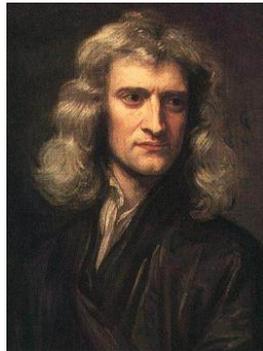
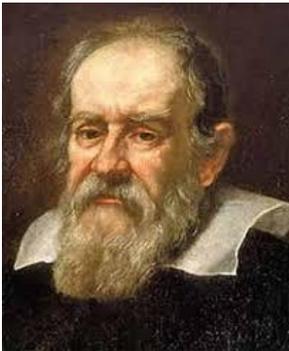


Contenuto della lezione

- Cenni ai limiti della fisica classica
- I primi modelli dell'atomo e gli spettri atomici
- Il modello di Bohr
- Gli spettri a raggi X e la legge di Moseley
- Descrizione dell'esperimento

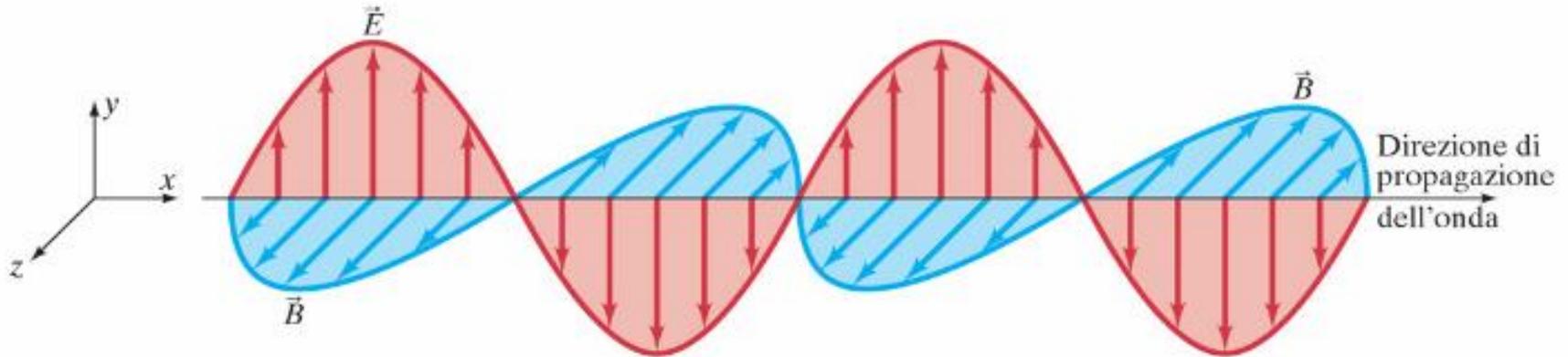
I limiti della fisica classica

- La “fisica classica” descrive egregiamente fenomeni del mondo macroscopico
 - Dinamica: leggi del moto (Galileo / Newton)
 - Elettromagnetismo: equazioni di Maxwell



- Tra fine 19° ed inizio 20° secolo: scoperte di fenomeni non spiegabili con le leggi della fisica classica

La radiazione EM

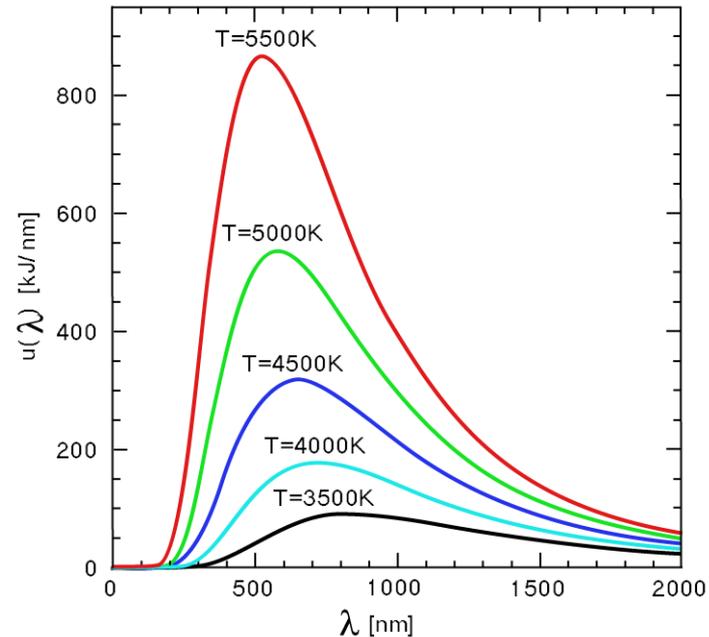


- La descrizione classica della radiazione elettromagnetica è in termini ondulatori
- Caratteristiche delle onde: ampiezza, lunghezza d'onda (λ), frequenza (ν), velocità (v)

$$\lambda \nu = v$$

La radiazione di “corpo nero”

- È la distribuzione in funzione della lunghezza d'onda della radiazione emessa da un corpo incandescente



L'ipotesi di Planck

- Lo spettro del corpo nero non si può spiegare nell'ambito della fisica classica
- Planck (1900): la radiazione può essere emessa solo in “quanti” di energia $E = h\nu$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

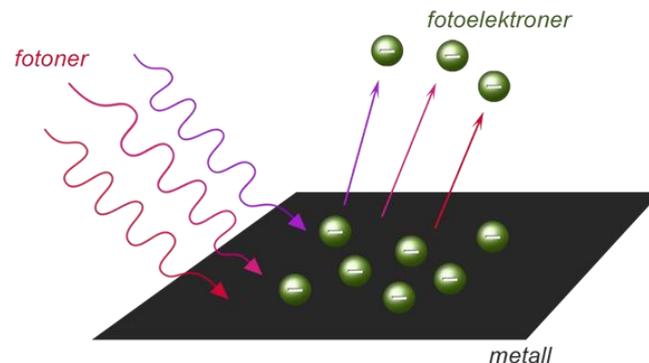
ν è la frequenza



- Ipotesi rivoluzionaria, buon accordo con il dato sperimentale; all'inizio considerata solo un “artificio matematico”

L'effetto fotoelettrico

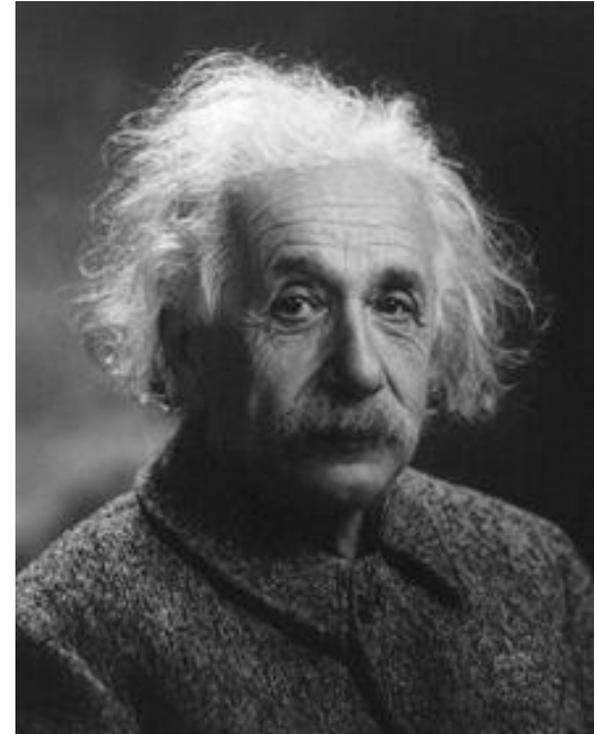
- Quando un metallo viene illuminato con radiazione ultravioletta vengono emessi elettroni
- Le caratteristiche di emissione (esperimenti di Lenard, 1902) non si possono spiegare in ambito classico



- Aspetti “anomali”
 - ⇒ Esiste una frequenza minima, sotto la quale non vi è emissione
 - ⇒ L'energia cinetica degli elettroni dipende dalla frequenza della radiazione

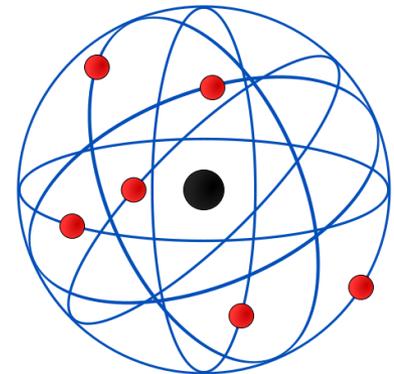
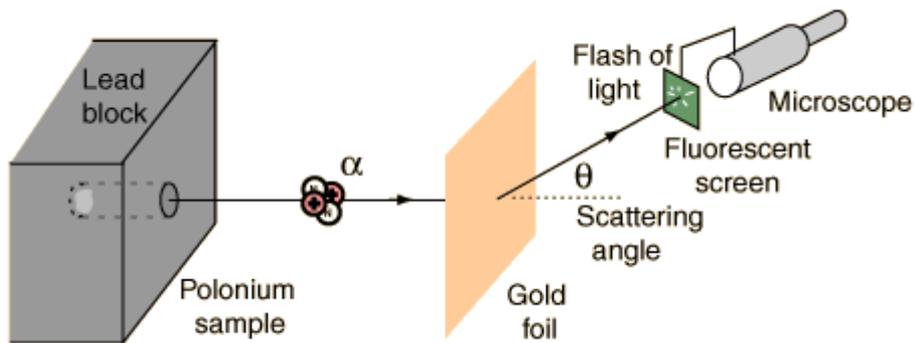
La spiegazione di Einstein

- Einstein (1905): la radiazione è composta da “quanti” (i fotoni) di energia $E = h\nu$
- Alla base della moderna descrizione della radiazione in termini di dualismo onda - particella

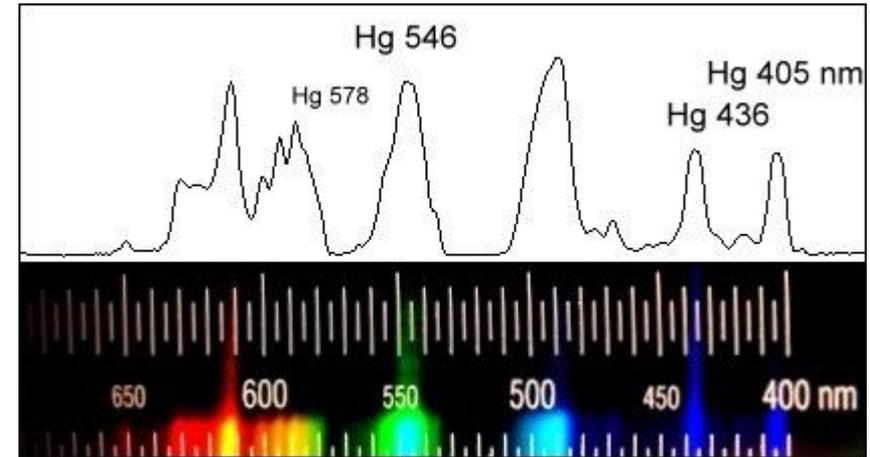
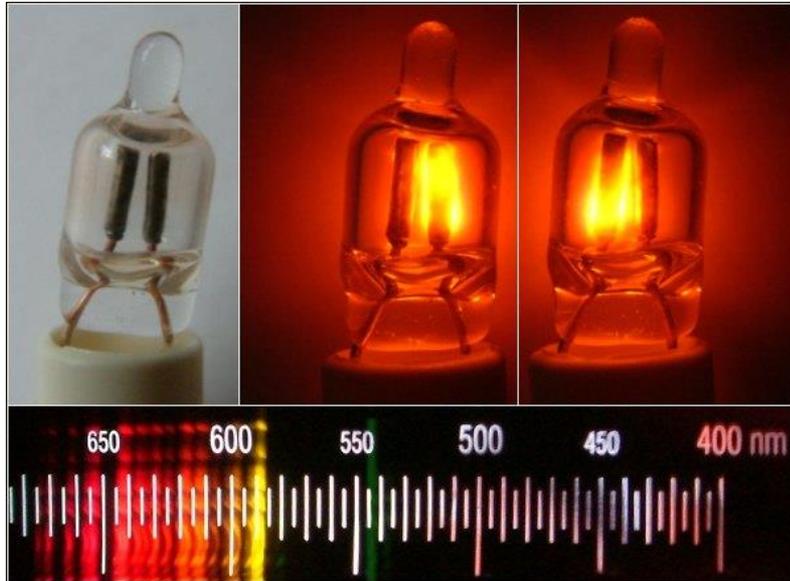


I primi modelli atomici

- Gli esperimenti di Rutherford (1911) di diffusione di particelle α portarono a formulare il modello nucleare dell'atomo
- Nucleo carico +, dimensioni ridottissime e massa elevata
- Elettroni carichi -, orbitanti intorno al nucleo



Gli spettri atomici



- Fine 19° secolo, Balmer, Lyman e altri: studio dell'emissione di radiazione da parte di atomi in lampade a scarica in funzione della lunghezza d'onda

Spettri atomici: gli esperimenti

- L'emissione di radiazione avviene a un numero limitato di lunghezze d'onda ben definite, che si possono raggruppare in serie

- Serie di Lyman (UV) $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 2, 3, \dots$

- Serie di Balmer (visibile) $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, \dots$

- Serie di Paschen (IR) $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 4, 5, \dots$

$R = 1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$: costante di Rydberg

La teoria di Bohr: ipotesi



- Gli elettroni orbitano intorno al nucleo su orbite circolari, gli “stati stazionari”
- Solo alcune orbite sono permesse, sono quelle per cui

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

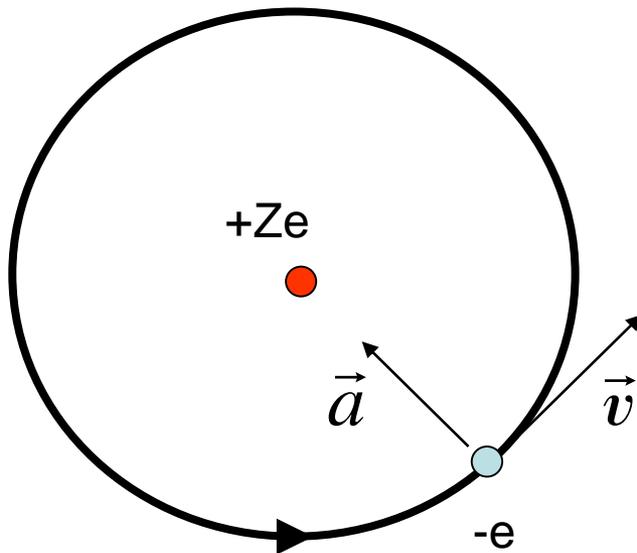
m = massa, v = velocità, r = raggio orbita

- Negli stati stazionari gli elettroni non emettono radiazione
- Viene emessa radiazione quando un elettrone “salta” da uno stato all’altro. La radiazione ha una frequenza data da

$$h\nu = E_{iniz} - E_{fin}$$

Impostazione del problema

- Moto circolare uniforme di un elettrone di massa m sotto l'azione della forza di Coulomb dovuta all'attrazione del nucleo di carica $+Z$



Forza = massa \times acc.

$$\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

The equation is annotated with colored arrows: a red arrow points to the left-hand side, a cyan arrow points to the mass m , and a blue arrow points to the right-hand side.

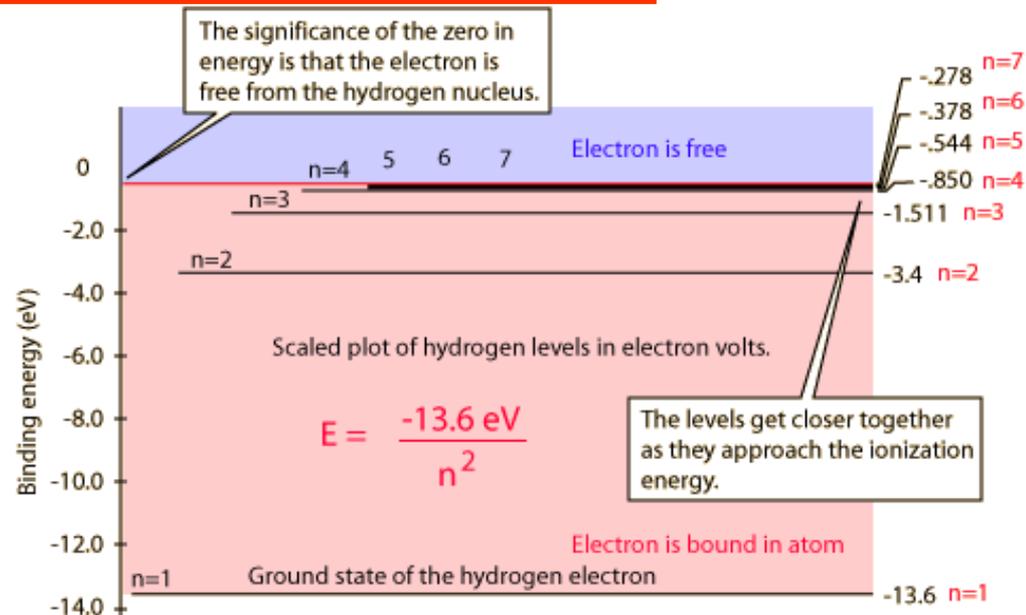
Energie degli stati stazionari

- Si dimostra che

$$E_n = -\frac{1}{2} \alpha^2 mc^2 Z^2 \times \frac{1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

dove

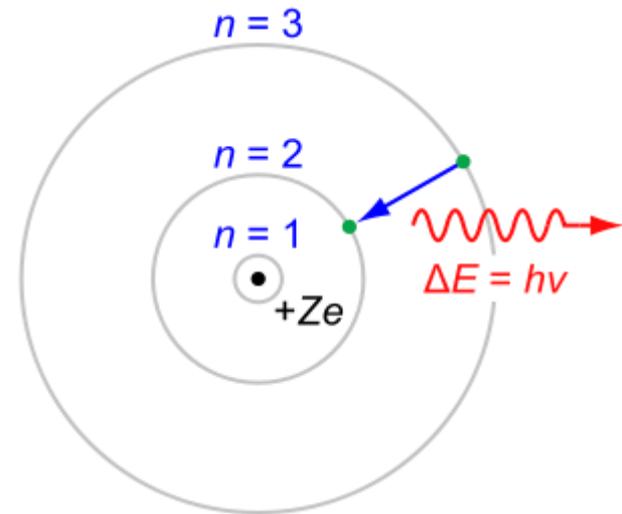
$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{h}{2\pi}\right)c}$$
$$= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$$



Conseguenze del modello di Bohr

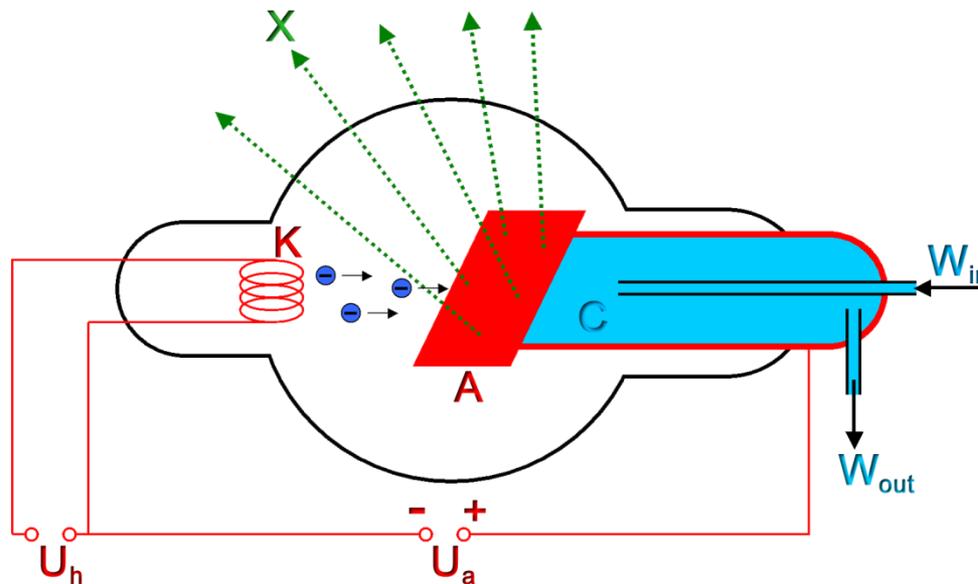
- Il modello prevede la presenza di righe negli spettri atomici e ne calcola correttamente le frequenze.
- E.g.: se l'elettrone "salta" dallo stato $n = 3$ a quello $n = 2$ la lunghezza d'onda emessa sarà

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{mc^2 \alpha^2 Z^2}{2hc} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$$

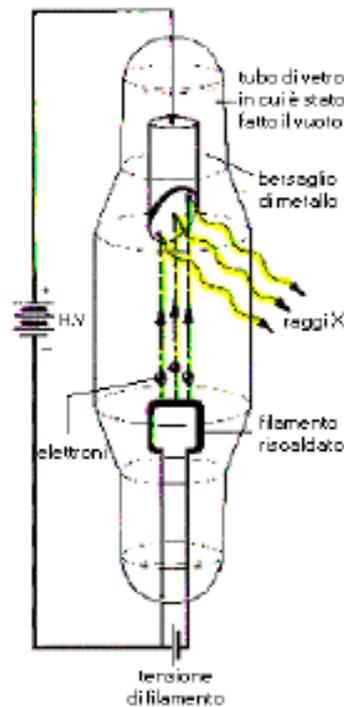


Moseley e gli spettri a raggi X

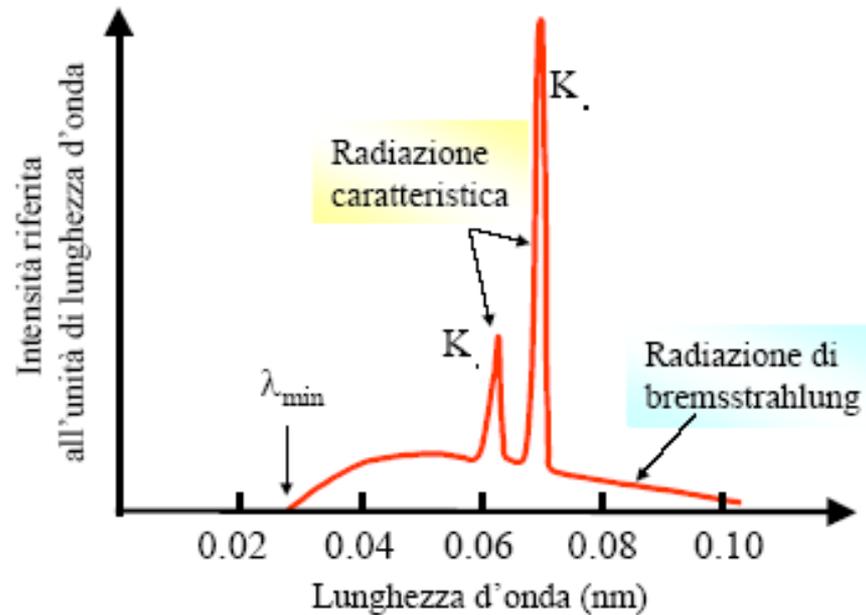
- Moseley (1914) misurò sistematicamente spettri della radiazione emessa dagli elementi quando “bombardati” da elettroni energetici



Spettri a raggi X

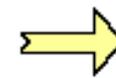


Tubo di raggi X



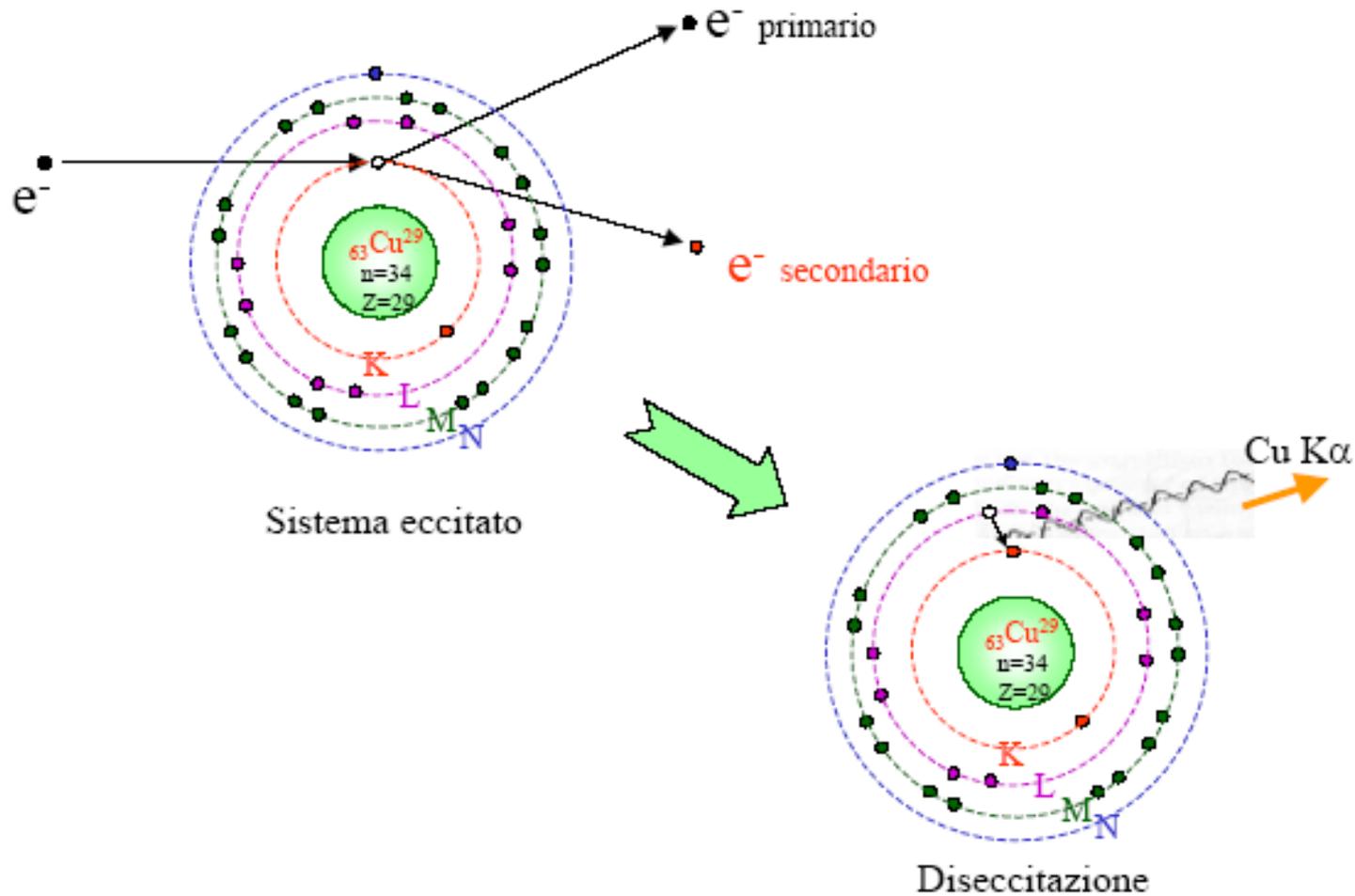
$$E_e = eV$$

$$E_e = \frac{hc}{\lambda_0}$$



$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV} = \frac{12.39}{V}$$

La “radiazione caratteristica”



La “legge di Moseley”

- Moseley trovò che

$$\sqrt{E} = C(Z - \sigma)$$

dove

- Z è il numero atomico
 - E è l'energia dei fotoni emessi
 - C è una costante
 - σ è compresa tra 1 e 2
- La legge di Moseley dimostrò l'importanza del numero atomico nei modelli atomici



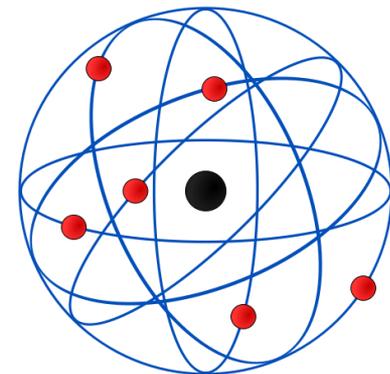
Previsioni del modello di Bohr

Atomi idrogenoidi (solo 1 elettrone), transizione da $n = 1$ a $n = 2$:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \frac{mc^2\alpha^2Z^2}{2}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) = \frac{3}{8}mc^2\alpha^2Z^2$$

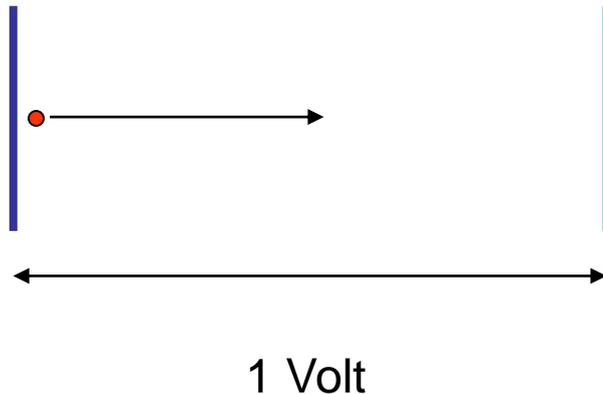
Atomi con più elettroni: correzione a Z per effetto di “schermo”

$$E = \frac{3}{8}mc^2\alpha^2(Z - \sigma)^2$$



L'unità di misura di energia "eV"

- 1 eV ("elettron volt") è l'energia cinetica acquistata da un elettrone quando viene accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt



$$E(\text{eV}) = E(\text{J})/e$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- È l'unità di misura più comune per descrivere i fenomeni atomici

La legge di Moseley in eV

$$\begin{aligned}\sqrt{E(eV)} &= \sqrt{\frac{3mc^2\alpha^2}{8e}}(Z - \sigma) \\ &= 3.200(Z - \sigma)\end{aligned}$$

Schema dell'esperimento

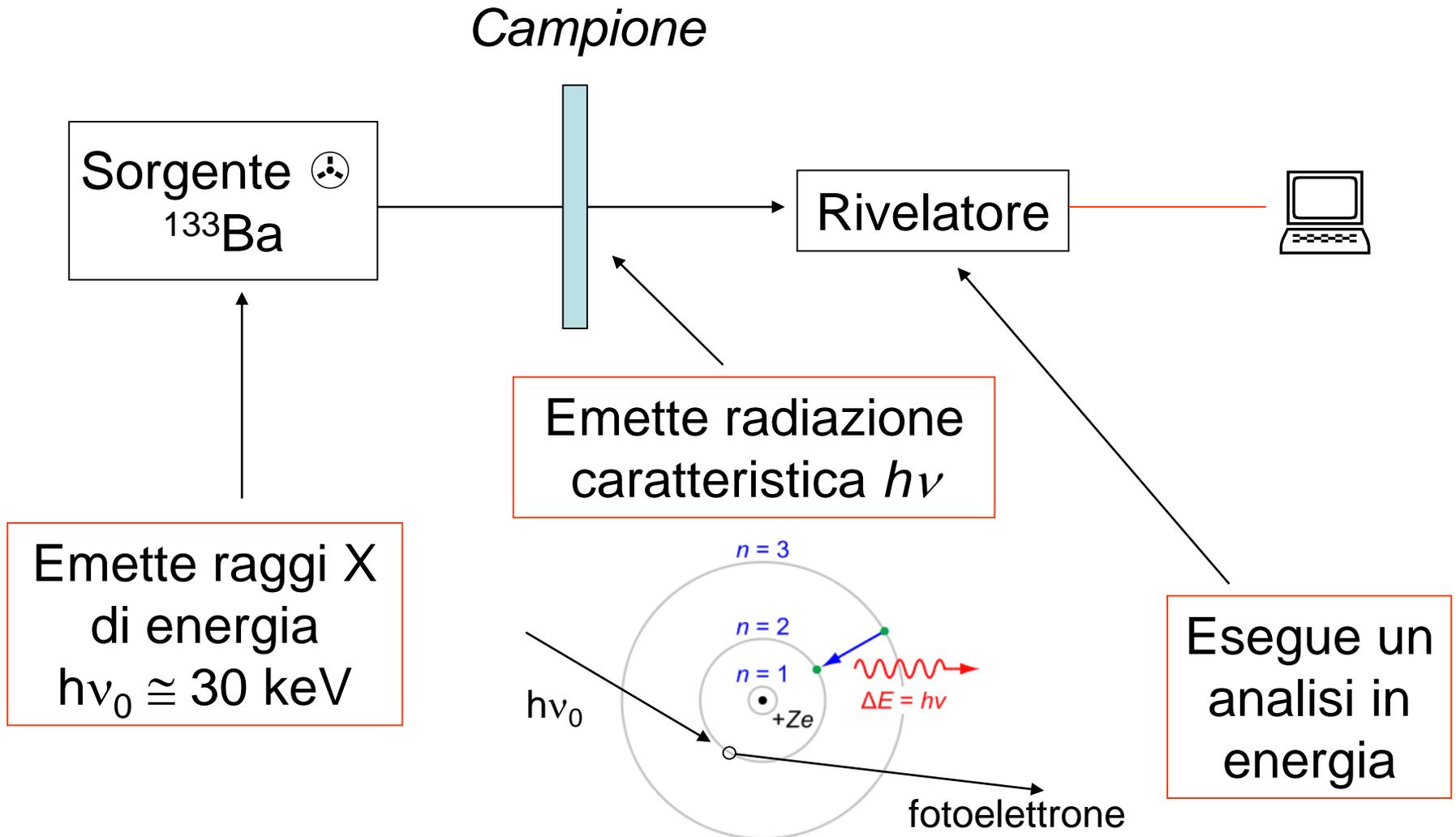
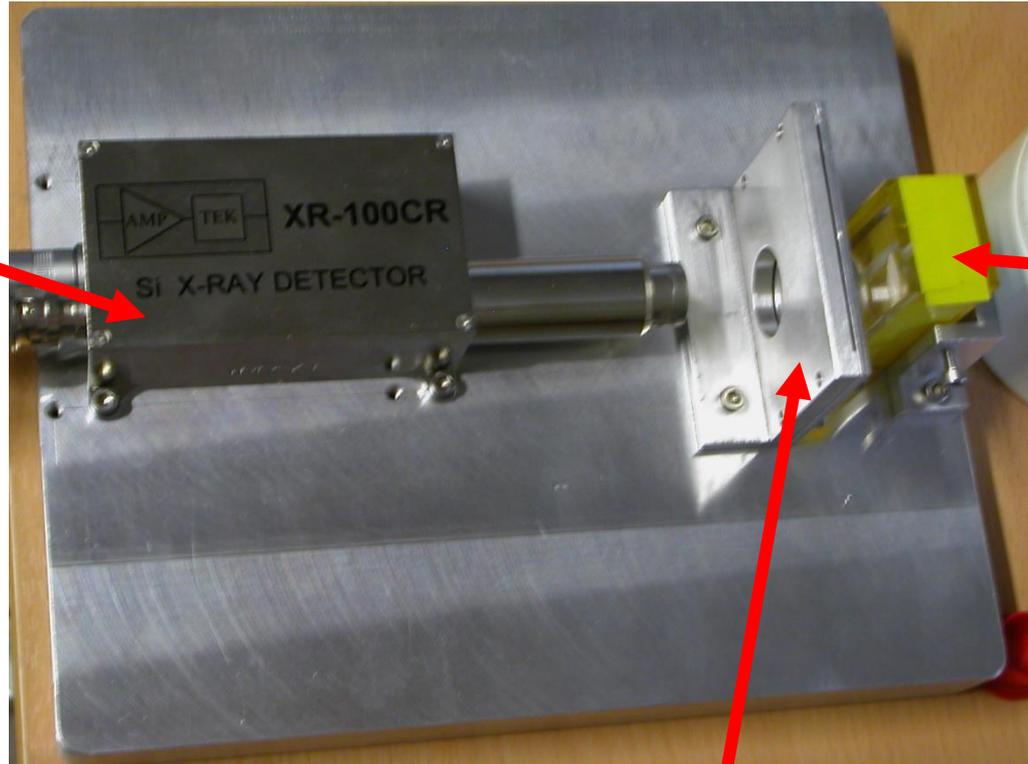


Foto apparato sperimentale

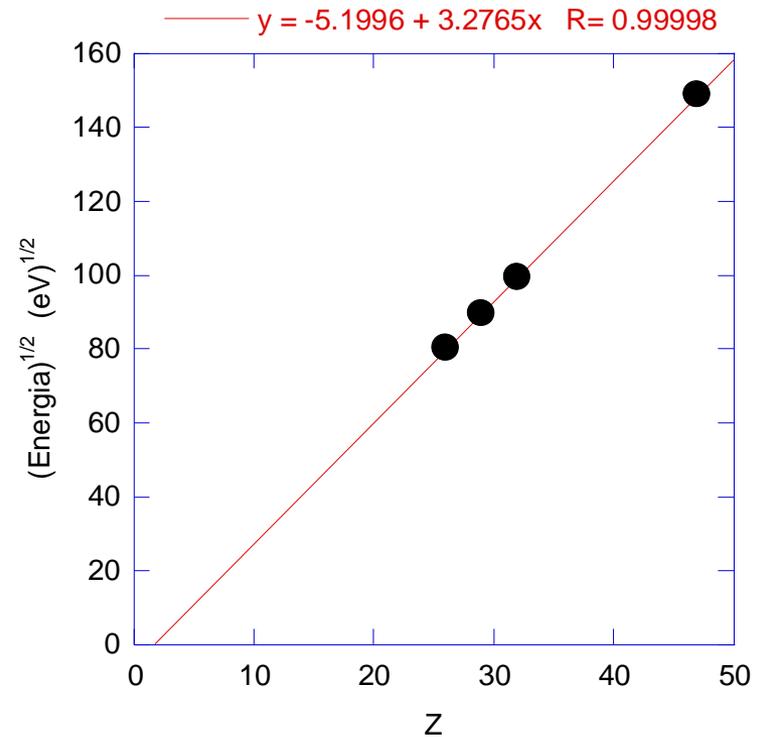
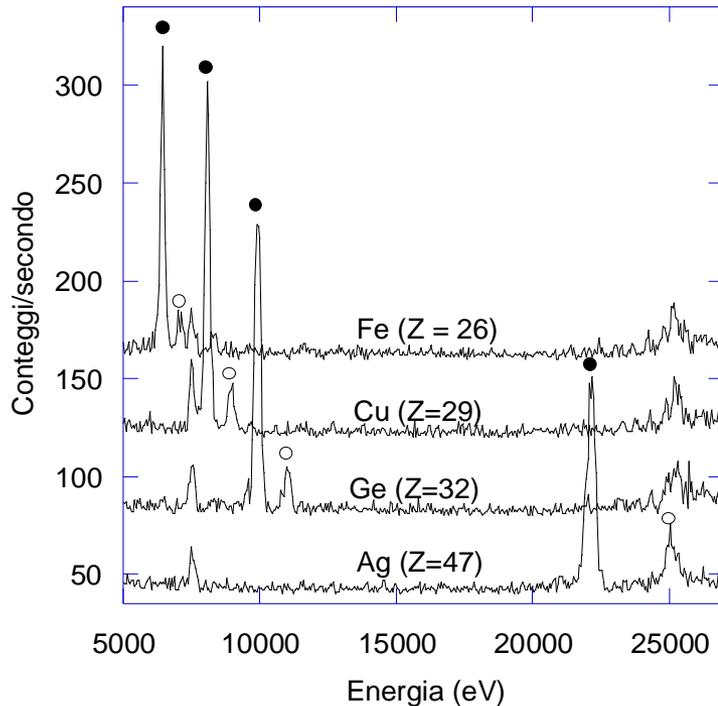


Rivelatore

Sorgente

Porta-campione

Dati sperimentali ed elaborazioni



- Buon accordo con la previsione del modello di Bohr 😊

Limiti del modello di Bohr ☹️

- L'assunzione che negli stati stazionari gli elettroni non emettono radiazione non ha reale giustificazione
- Non è possibile trattare atomi con più di 1 elettrone, molecole, solidi
- Soluzione: meccanica quantistica!