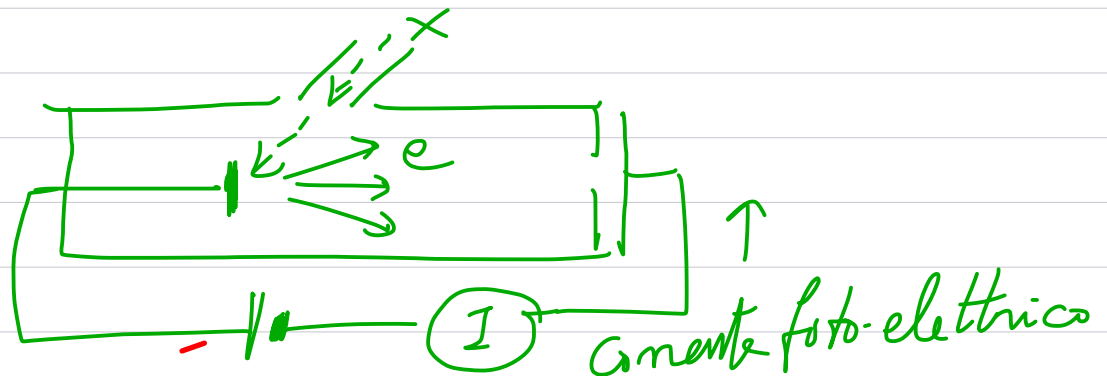


Effetto fotoelettrico / Atomi di Bohr / Bohr-Sommerfeld

Ispirati dal quanto di luce (Planck) $\rightarrow$ evidenze dirette?

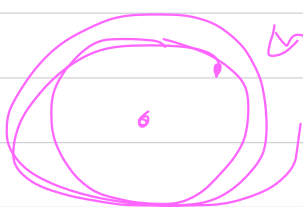
Si: Effetto fotoelettrico (Einstein '05)

- Effetto fotoelettrico (Hertz (1887)
Lenard (1900)
Einstein (1905))



- (1) Energia di singoli elettroni e è indip. dall'intensità di luce
- (2) Intensità $I \rightarrow$ aumento di # di elettroni (I)
- (3) Energia di singoli elettroni (V_{max}) dipende da ν
(1). $\lambda \downarrow \Rightarrow E_e \uparrow$
- (4) La corrente foto-elettrica si accende all'istante

Grassa difficoltà nel spiegare (1) ~ (4)
in Fisica Classica.



oscillazione forzata $\Rightarrow$
l'elettrone aumenta gradualmente
l'energia, finché $\Delta E > |E_{st. leg.}|$

1 lampada
1 candela



3m

1 cm²

$$\sim 1 \text{ erg/cm}^2/\text{sec}$$

Luce gialla $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ $\rightarrow$

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{18}}{5 \cdot 10^{-5}}$$

$$= 0.5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

$$h\nu \sim 6 \cdot 10^{-27} \cdot 0,5 \cdot 10^{15} = 3 \cdot 10^{-12}$$

erg. $\leftrightarrow$ OK con
Lernend (Elektronen)

ma un atomo è più piccolo

$$1 \text{ erg/sec} \cdot 10^{16} \sim 10^{-16} \text{ erg/sec}$$

10 cm

Per ottenere l'energia sufficiente ($\sim 10^{12}$ erg)

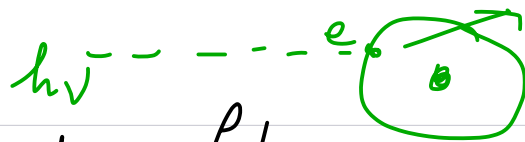
assumendo che l'atomo assorbe tutta l'energia,

occorre $t \sim \frac{10^{-12}}{10^{-16}} \sim 10^4 \text{ sec} \sim 3 \text{ ore} !$

mentre la corrente fotoelettrica si accende
immediatamente.

Einstein:

Un elettrone riceve tutta l'energia di un fotone



Se $\Delta E = h\nu$ è suff. grande $\rightarrow$ ionizzazione

$$E_e = h\nu - W \rightarrow \text{energia di legame (dip. dalla sostanza)}$$

Eventi puntiformi (interaz. local. spazio-temporale)

(1) Energia di singol. elettroni è indip. dall'intensità di luce (# di fotoni) ✓ OK

(2) Intensità $\uparrow \rightarrow$ aumento d. # d. elettroni (I) # di fotoni OK

(3) Energia di singol. elettroni (V_{max}) dipende da ν

$$(1). \lambda \downarrow \Rightarrow E_e \uparrow$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{OK!}$$

(4) La corrente foto-elettrica si accende all'istante

OK!

Millikan (1916)

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - I$$

$$h = \frac{d(eV)}{d\nu} = e \cdot \frac{dV}{d\nu}$$

$$= e \cdot \frac{3V}{(121-48) \cdot 10^{13}/\text{sec}} = eV \cdot 4 \cdot 10^{-15} \text{ sec}$$



$$\text{ma } 1 \text{ eV} \sim 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

$$\therefore h \simeq 6.4 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$$

!

Modello atomico di Bohr (1913)

Linee spettrali:

Gas eccitati $\Rightarrow$ luce con frequenze ($1/\lambda$) caratteristiche (lampade "al sodio" con luce arancione)

Balmer (1885)

H (idrogeno)

$$\lambda = 6562.8, 4861.3, 4340.5, 4101.7 \quad (\text{\AA})$$

rosso viola

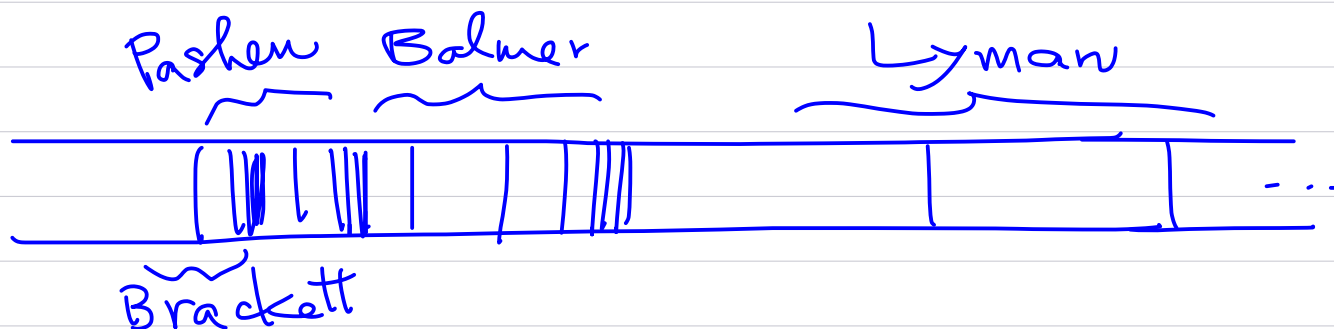
$$\Rightarrow \lambda_n = \frac{n^2}{n^2 - 4} \lambda_0 \quad \lambda_0 = 3645 \text{ \AA}$$

con $n = 3, 4, 5, 6$

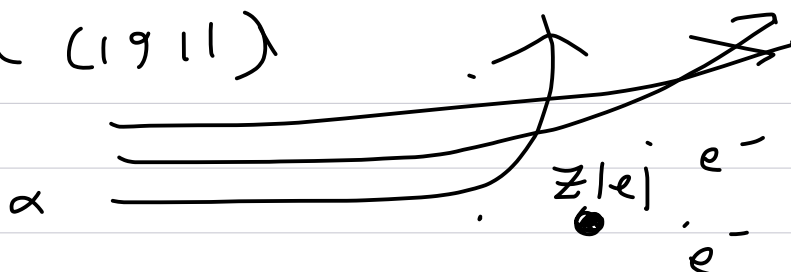
Rydberg

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{\lambda} = \frac{R}{(m+a)^2} - \frac{R}{(n+b)^2} \quad \begin{matrix} m, n \\ = \text{interi} \end{matrix}$$

con $R = \text{costante universale} = \text{cost. di Rydberg}$
 $= 109737 \text{ cm}^{-1}$ dip. dell'elemento



Rutherford (1911)



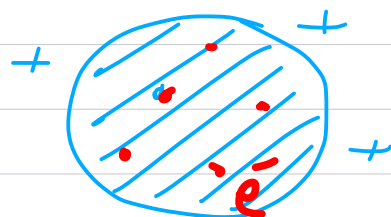
(Nagadka)
1904

La diffusione di α a grande angolo.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{cost.}}{\sin^4 \theta/2} \right)$$

Incompatibile con il modello di J.J. Thomson

ma $\exists$ la difficoltà "teorica"
(stabilità) $\Rightarrow$

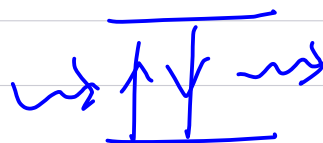


Bohr (1913):

(1) Valori possibili per l'energia di legame atomico
 $= E_1, E_2, E_3, \dots$ (quantizzazione)

(2) Un elettrone in uno di questi "stati stazionari"
 non emette luce. ($\leftarrow$ stabilità)

(3) Un elettrone emette luce, q. ero compie una
 transizione quantistica $\leftarrow$ Einstein



con $h\nu = E_n - E_m \leftarrow$ Ritz, Ritz, !

(4) L' elettrone, in uno stato stazionario, si muove
 secondo la M.C. (??!) $\rightarrow$ μ_{Bohr}

$$\mu_{Bohr} = \frac{h^2}{me^2} \rightarrow = e\hbar/2mc$$

(5) $n \gg 1 \rightarrow MQ \approx M.C.$ (PRINCIPIO
 CORRISPONDENZA)

Bohr: Determinaz. dello spettro di H.

$$E_n = -\frac{c}{n^2} \quad (\text{Balmer, Lyberg, ... formula empirica})$$

$$\Rightarrow E_{n+l} - E_n = -c \left(\frac{1}{(n+l)^2} - \frac{1}{n^2} \right) \underset{n \gg l}{\approx} \frac{2c}{n^3} \cdot l \quad \left(\begin{matrix} l=1,2,3 \\ \vdots \end{matrix} \right)$$

$$\text{ma } n = \left(-\frac{c}{E_n} \right)^{1/2} \Rightarrow$$

$$h\nu = E_{n+l} - E_n = 2c^{-1/2} (-E_n)^{3/2} \cdot l \quad (*)$$

$$\text{M.C.} \Rightarrow m r \dot{\theta}^2 = \frac{e^2}{r^2} \rightarrow \text{Kepler.}$$

$$\dot{\theta} = \omega = \left(\frac{e^2}{m r^3} \right)^{1/2}$$

$$\text{ma il teo viriale} \Rightarrow E = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{r} \approx -\frac{e^2}{2r}$$

$$\therefore r = -\frac{e^2}{2E}$$

$$\omega = 2\pi\nu \quad \therefore h\nu = \frac{h}{2\pi} \cdot \left(\frac{e^2}{m r} \right)^{1/2} \left(-\frac{2E}{e^2} \right)^{3/2} \rightarrow \text{armoniche!}$$

$$= \frac{h}{2\pi} (-2E)^{3/2} \cdot \left(\frac{1}{m e^4} \right)^{1/2} \cdot l \quad (**)$$

$$(*) = (**) \Rightarrow 2c^{-1/2} = \frac{h}{2\pi} \frac{2^{3/2}}{(m e^4)^{1/2}}$$

$$\therefore c = \frac{m e^4 (2\pi)^2}{2 h^2} = \frac{m e^4}{2 h^2} \quad \left(k \equiv \frac{h}{2\pi} \right)$$

$$\therefore E_n = -\frac{m e^4}{2 h^2 n^2} \quad (n=1,2,3,\dots)$$

Livelli di Bohr (atomo di idrogeno)

N.B. Il raccordo MQ = M.C. è usato per $n \gg 1$ ma il risultato è valido $\forall n$!!!

$$r_B = \frac{\hbar^2}{me^2} \text{ (raggio di Bohr)}$$

$$\approx 0.5 \text{ \AA}$$

$$E_n = - \frac{e^2}{2n^2 r_B} \quad \left(V_{\text{Coul.}} = - \frac{e^2}{r} \right)$$

$$\frac{v}{c} = \frac{R}{m^2} - \frac{R}{n^2}$$

$$h\nu = h \left(\frac{cR}{m^2} - \frac{cR}{n^2} \right) \therefore hcR = \frac{e^2}{2r_B}$$

$$R = \frac{e^2}{2r_B} \frac{1}{hc} = \frac{1}{4\pi r_B} \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{4\pi \cdot 0.5 \cdot 10^8} \cdot \frac{1}{137}$$

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \text{ (cost. di struttura fine)}$$

$$\therefore R = 109729 \text{ cm}^{-1}$$

Esperimenti di Franck-Hertz (Lecture online)!

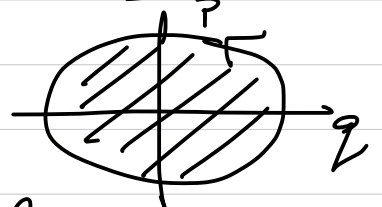
Quantizzazione di Bohr-Sommerfeld.

- Quantizz. Energia EM $\Rightarrow$ Planck $E = h\nu$
- Quantizz. i livelli di energia atomico
 $\Rightarrow$ Bohr, $E_n = -\frac{e^2}{2a_0 n^2}$

$\Rightarrow$ Regola di quantizzazione "universale" ?

$$\oint dq p = n h \quad (n=1, 2, \dots)$$

$\searrow$ moto periodico
classico $p = p(q)$



$\Rightarrow$ • $H = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{r} \Rightarrow$ OK con E_n Bohr

• HO $H = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2}{2} q^2 \Rightarrow E_n = n\omega\hbar$
OK con Planck (!!)

N.B.

$$E_n^{MQ} = \omega\hbar \left(n + \frac{1}{2}\right) \Rightarrow \text{dopo}$$

• $\oint dq p$ e' invariante adiabatica

$$H = H(p, q; \lambda) \quad \leftarrow \text{parametro esterno}$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \oint dq p = 0 \quad !!$$

