

# L'esperimento di Franck ed Hertz

18 Febbraio 2016

# Indice

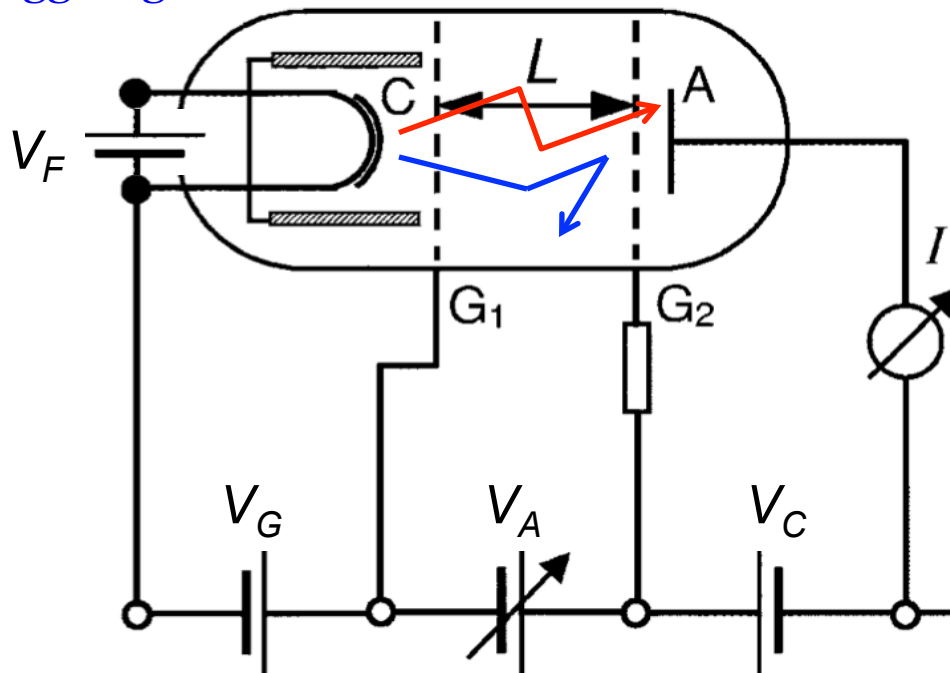
- **L'esperienza**
  - Metodo sperimentale
  - Evidenze
  - Interpretazione in termine della teoria di Bohr
  - Verifiche spettroscopiche
- **Misura in laboratorio**
  - Apparato sperimentale
  - Verifiche qualitative
  - Acquisizione dati ed analisi
  - Effetti sistematici e valutazione errori

# Generalità

- Significato storico
  - dimostrazione chiave del comportamento **quantistico** degli atomi secondo il **modello di Bohr**
  - metodo **non ottico** (a differenza dei precedenti)
  - risultati pubblicati nel **1914** (e premiati con il Nobel nel 1925)
- In cosa consiste l'esperimento
  - urti **anelastici** di **elettroni** con atomi di gas
    - ➔ perdita di energia degli elettroni incidenti ed **eccitazione** degli atomi
  - per effetto dello **spettro discreto** dei livelli atomici, l'energia trasferita in questi urti deve essere pari all'**energia minima di eccitazione** (ovvero alla differenza di energia tra due livelli)
    - ➔ solo elettroni con **energia cinetica non inferiore** a questa possono trasferire una parte  $\Delta E$  della loro energia nella collisione
$$\frac{1}{2}mv^2 \geq \Delta E = E_n - E_{n-1}$$
  - equivalentemente, elettroni di **energia inferiore** possono dar luogo a soli **urti elastici** con gli atomi ➔ perdita di energia trascurabile

# L'apparato sperimentale

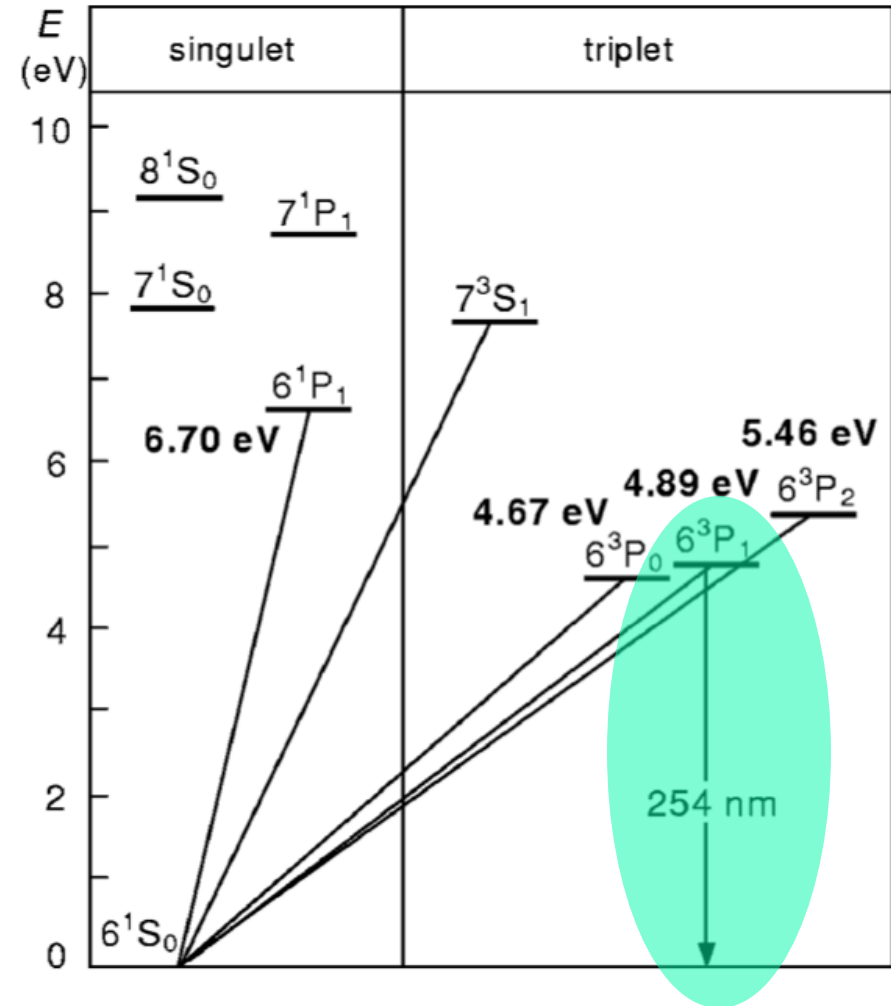
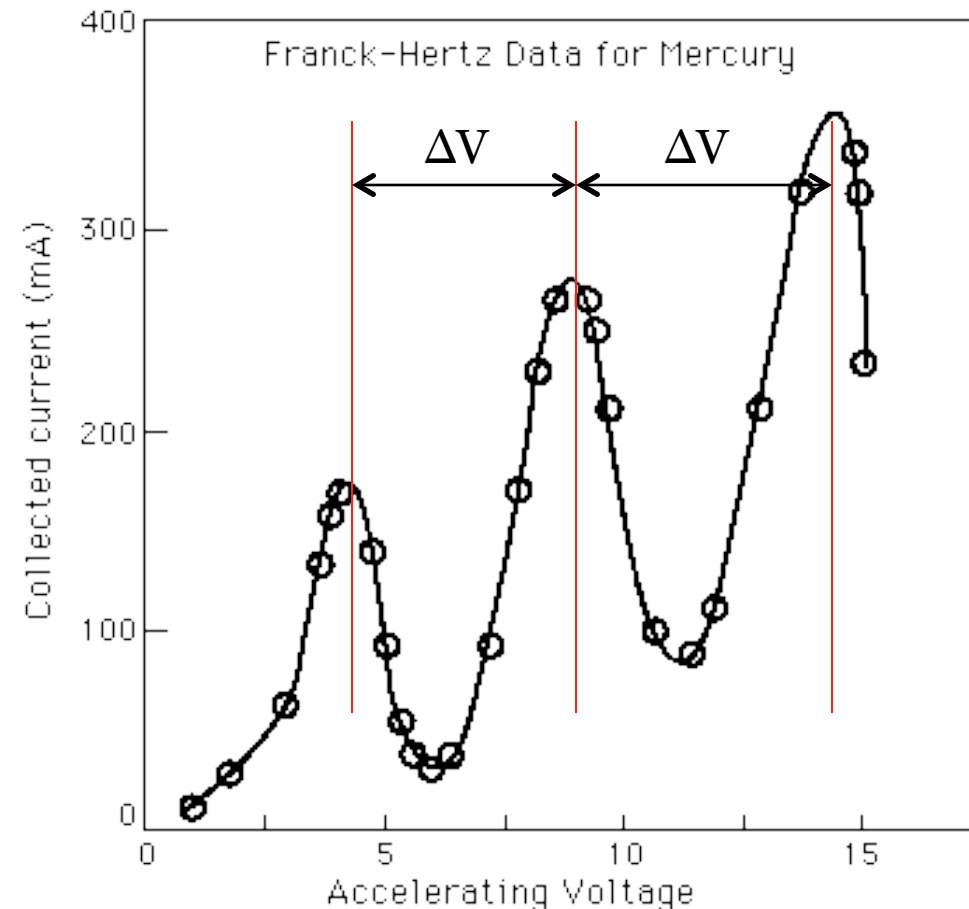
- Uso di un **tetrodo** riempito di gas (**Hg** o **Ne**) a bassa pressione ( $\sim 10$  **mBar**)
- Elettroni emessi da un **catodo** per **effetto termoionico**, flusso controllato dalla tensione ai capi del **filamento** ( $V_F$ ) e dalla tensione di **griglia**  $G_1$  ( $V_G$ )
- L'energia acquisita dall'elettrone dipende dalla **tensione di accelerazione** ( $V_A$ ) tra le due griglie
- Tra  $G_2$  e l' **anodo** **A** si stabilisce una piccola **d.d.p. frenante** ( $V_C$ ) di modo che gli elettroni soggetti a **collisioni inelastiche** (con perdita totale dell'energia) non raggiungano l'anodo



Gli elettroni raccolti sull' anodo vengono contati misurando la corrente in funzione della tensione acceleratrice

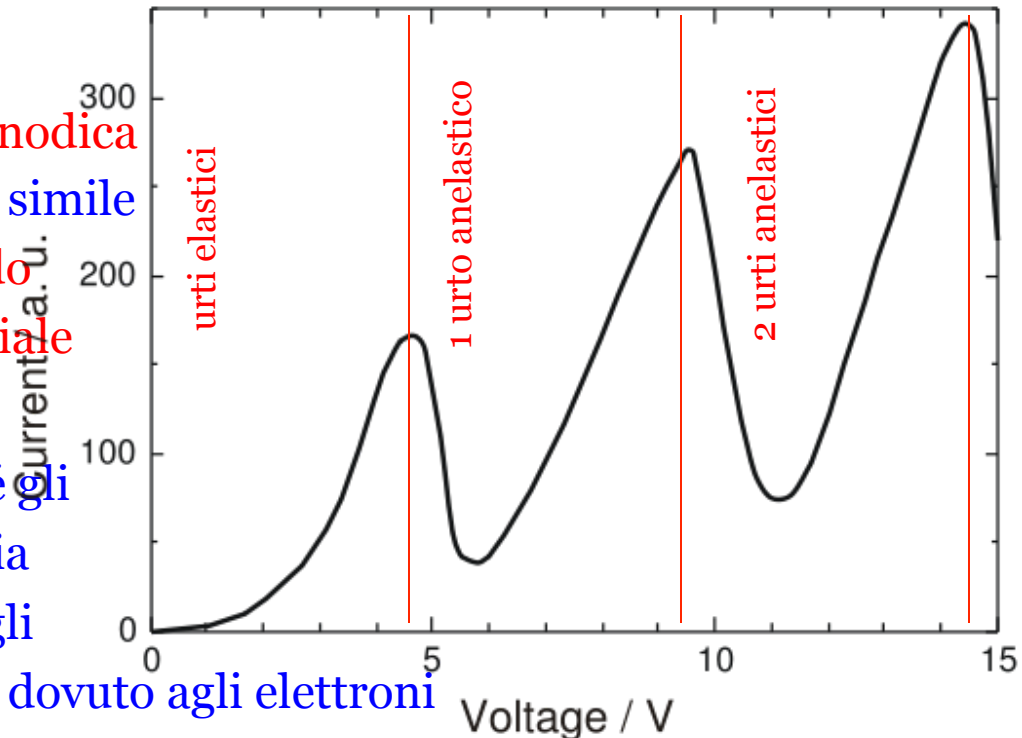
# Misura dell'eccitazione su Hg

Evidenza di uno spettro discreto con energia di eccitazione minima pari a  $\Delta E = 4.89 \text{ eV}$  (corrispondente alla transizione  $6^3P_1 \rightarrow 6^1S_0$ )



# Interpretazione (1)

- Regime “elastico”
  - Finché  $V_A < \Delta E/e$ , la corrente anodica cresce con una legge di potenza simile a quella ( $I \propto V_A^{3/2}$ ) di un diodo a vuoto in regime di carica spaziale
- 1<sup>a</sup> eccitazione
  - La corrente diminuisce allorché gli elettroni raggiungono un'energia cinetica sufficiente ad eccitare gli atomi del gas → primo minimo dovuto agli elettroni accelerati fino all'energia di eccitazione a ridosso di  $G_2$
  - Aumentando ulteriormente  $V_A$ , la zona di eccitazione nel gas si sposta gradualmente verso  $G_1$  → incremento dello spazio per gli elettroni per guadagnare energia cinetica e superare la barriera di potenziale  $G_2$ -A → la corrente riprende a crescere



# Interpretazione (2)

- **Dumping**

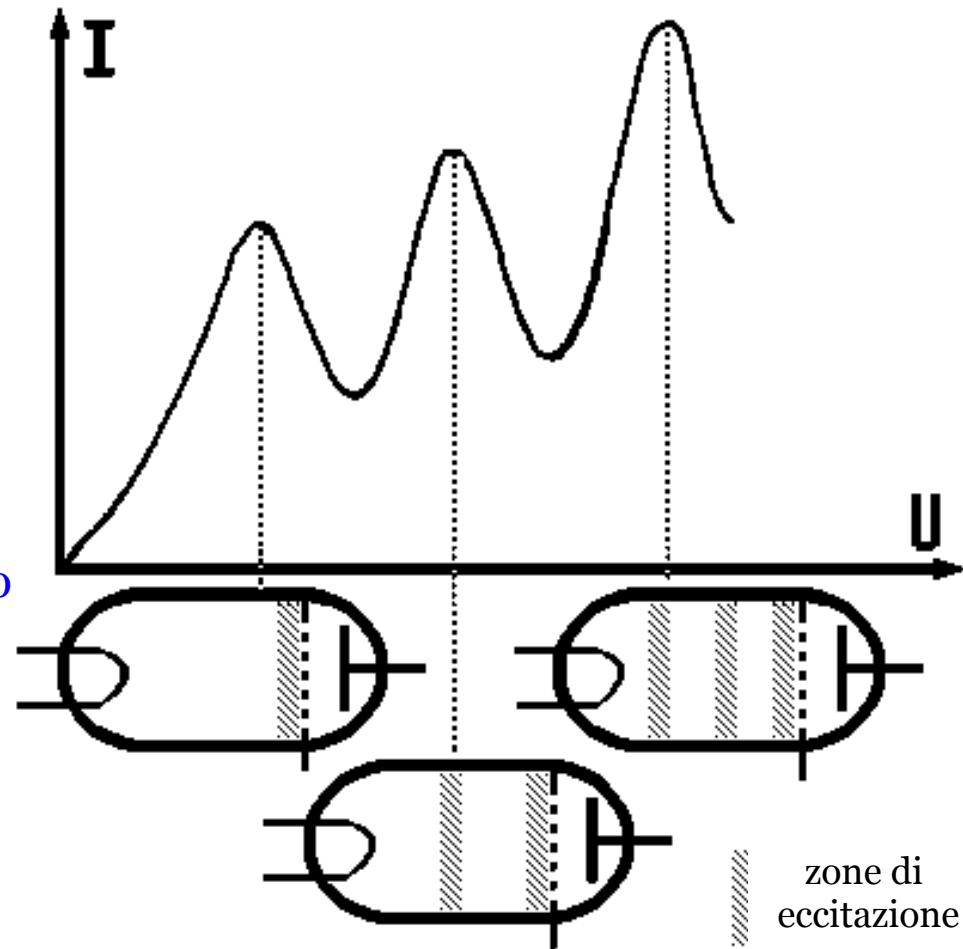
- Un ulteriore progressivo incremento di tensione determina un aumento della corrente anodica finché la tensione di accelerazione non è pari a  $2\Delta E/e$ , allorché essa presenta una **nuova discontinuità**

→ **2<sup>a</sup> eccitazione**

- dovuta agli elettroni che acquistano in prossimità di  $G_2$  sufficiente energia cinetica per subire un **secondo urto elastico**

...

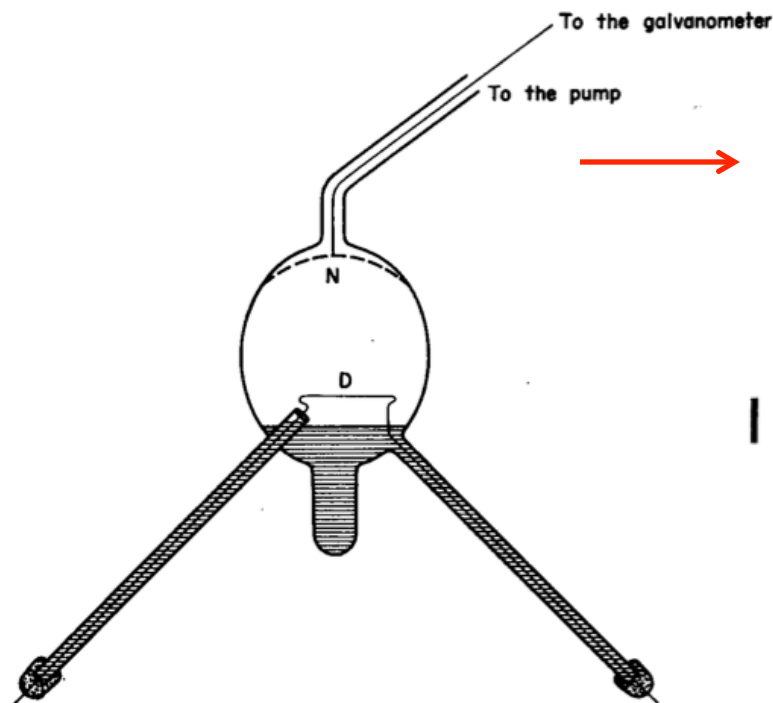
→ **n-esima eccitazione**



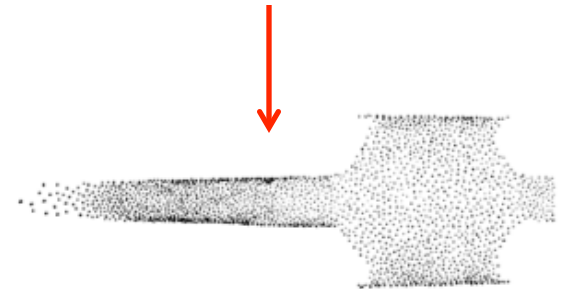
# Verifica spettroscopica

- Per confermare l'ipotesi, Franck ed Hertz verificarono che gli atomi eccitati dagli urti anelastici con gli elettroni si **diseccitassero** emettendo fotoni di **lunghezza d'onda** corrispondente al **salto di livello**

$$\lambda = \frac{\hbar c}{\Delta E} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{4.9 \text{ eV}} = 254 \text{ nm}$$



spettro di “calor rosso” filamento



spettro lampada ad arco di Hg (rif.)



# Effetti sistematici

- Separazione massimi corrente

- e' apprezzabile (ordine ~ 1%) un incremento (quasi lineare) di  $\Delta E$  in funzione dell'ordine  $n$  e della densità del gas
- dovuto al fatto che, raggiunta l'energia di eccitazione, l'elettrone percorre in media un tratto pari al libero cammino medio  $\lambda$  prima di urtare un atomo, così acquistando un'ulteriore energia cinetica  $\delta_1$

→ possibilità di eccitare stati di energia più elevata

$$E_1 = E_A + \delta_1$$

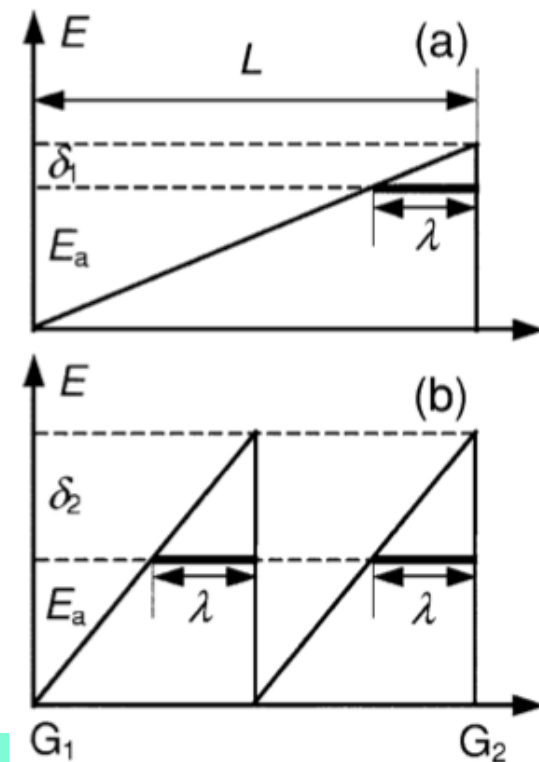
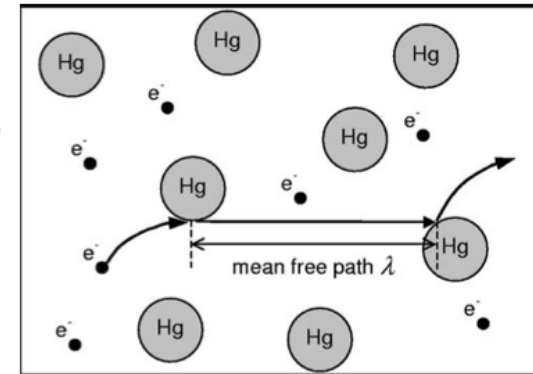
- per effetto del maggior campo elettrico, gli elettroni soggetti a 2 urti guadagnano una maggiore energia  $\delta_2$  (circa doppia di  $\delta_1$ ) lungo lo stesso cammino medio
- in generale, se  $\delta_n \ll E_A$ , risulta

$$\delta_n = n \frac{\lambda}{L} E_A \Rightarrow \Delta E_n = E_n - E_{n-1} = \left[ 1 + \frac{\lambda}{L} (2n - 1) \right] E_A$$

(più il gas è rarefatto, più l'effetto è visibile)

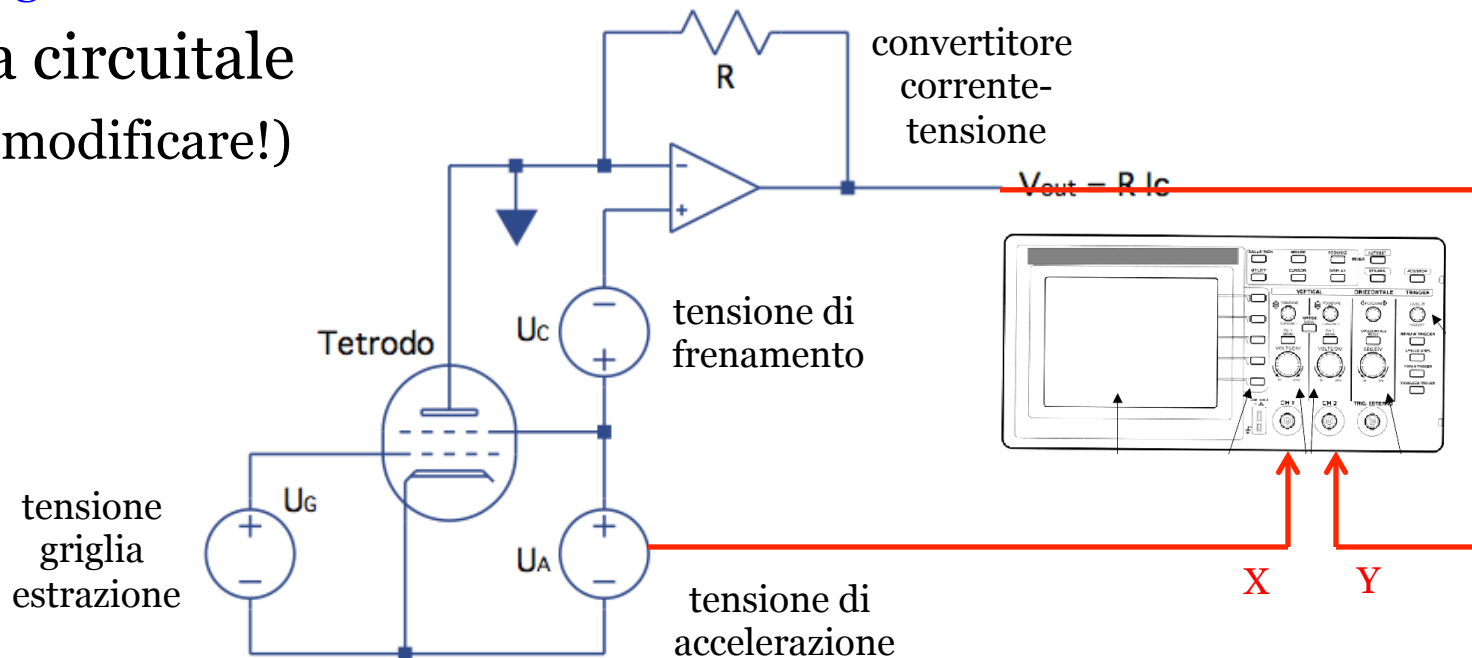
→ procedura più corretta:

- estrarre le tensioni corrispondenti ai massimi di corrente
- per ogni coppia di max. contigui calcolare  $\Delta E$
- interpolare  $\Delta E_n$  vs.  $n$  a partire da  $n=2$
- estrapolare a  $n=0.5$  per ottenere  $E_A$



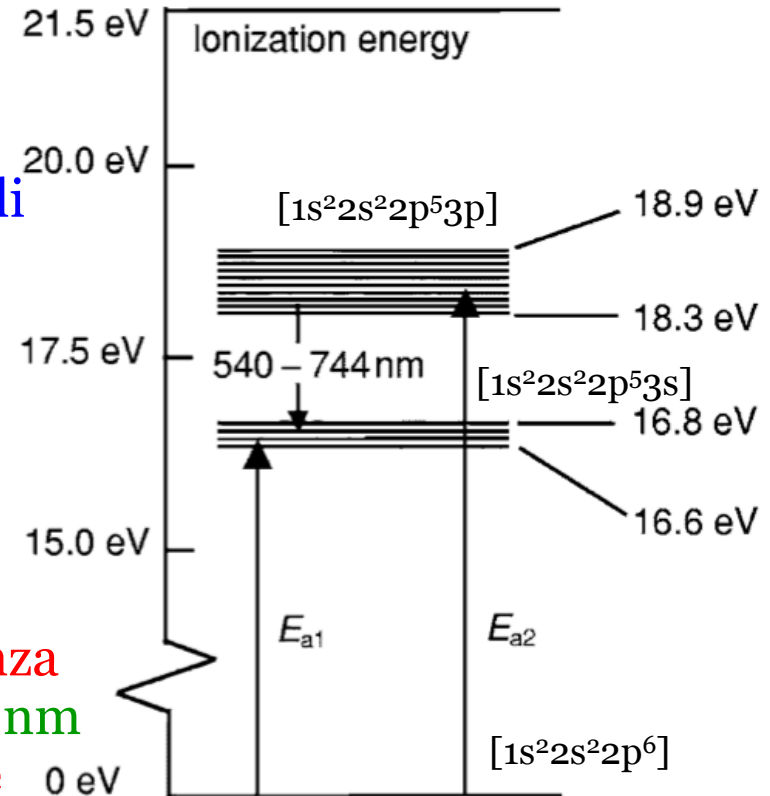
# La nostra esperienza

- Obiettivo
  - Riproposizione **esperimento F&H in Neon**
- Materiale a disposizione
  - tetrodo a neon mod. **ELWE U8482230**
  - sistema integrato di alimentazione e convertitore corrente-tensione
  - oscillografo
- Schema circuitale  
(da non modificare!)



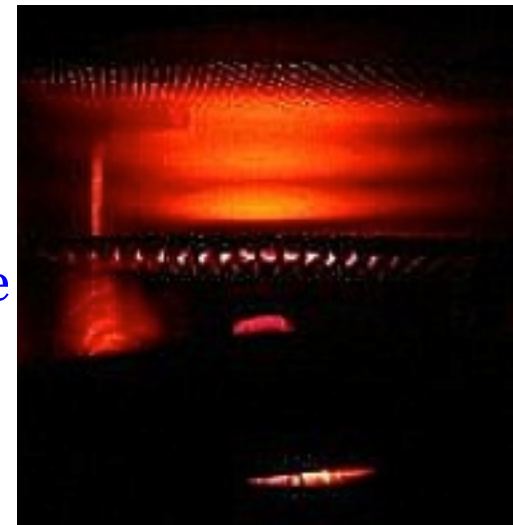
# Eccitazione di livelli in Ne

- svantaggi (rispetto al Hg)
  - livelli di eccitazione più elevati ( $E_{A1} = 16.7 \text{ eV}$ ,  $E_{A2} = 18.6 \text{ eV}$ )
  - a parità di tensione di accelerazione minor numero di eccitazioni osservabili
- vantaggi
  - gas a temperatura ambiente  
→ riscaldamento non necessario
  - minore dipendenza dalla temperatura dei parametri del gas (tipo  $\lambda$ )
  - possibile osservazione della fluorescenza nelle zone di eccitazione da 540 a 744 nm (color arancio) dovuta alla transizione spontanea dai livelli  $E_{A2}$  ad  $E_{A1}$



# Metodo operativo (1)

- Accensione
  - Assicurarsi prima che tutte le **tensioni** siano **spente**, quindi accendere l'alimentatore
  - regolare la tensione  $V_F$  fino ad **8V** circa ed attendere che il filamento si scaldi ( $\sim$  alla temperatura del **calor rosso**)
  - con selezione della **modalità manuale**, portare  $V_A$  a circa **70 V**
  - Regolare la tensione  $V_G$  finché non si osservi la luce di fluorescenza
- Osservazioni qualitative
  - Osservare la struttura della **fluorescenza** variando con continuità la tensione di accelerazione a partire da 0
  - Regolare la tensione di frenamento fino ad ottenere la massima nitidezza delle bande di fluorescenza
  - Riportare i valori di  $V_A$  corrispondenti alla comparsa delle **prime 3 bande di fluorescenza**



# Metodo operativo (2)

- Osservazioni qualitative(2)
  - Selezionare l'opzione di generazione della tensione di rampa
  - con l'oscillografo in modalità XY, osservare la curva corrente-tensione
  - Regolare il guadagno dell'amplificatore in modo da non saturarne l'uscita
  - Osservare la variazione della curva  $I_C$ - $V_A$  al variare della tensione di frenamento (in particolare, cosa succede per  $V_C = 0$ ?)
  - Regolare infine  $V_C$  così da avere  $I_C = 0$  in corrispondenza dei minimi
- Osservazioni quantitative
  - Disattivare la modalità `XY dell'oscillografo e, con trigger su  $V_A$ , acquisire le due tracce
  - Confrontare i picchi di corrente con i valori di tensione precedentemente annotati
  - Calcolare le differenze di picchi contigui ed utilizzare la procedura descritta per ottenere  $E_A$  e  $\lambda$