

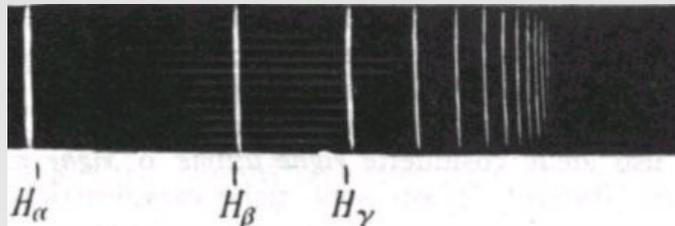
L'esperimento di Franck-Hertz

STAGES ESTIVI
(20 – 24 Giugno 2011)
LNF

MATTEO MASCOLO
Università di Roma Tor Vergata

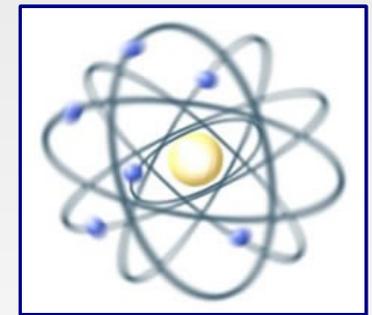
Un po di storia...(e poca davvero)

- Johann Balmer (1884) studia le righe di assorbimento dell'atomo di idrogeno, notandone una disposizione discreta e ben precisa...

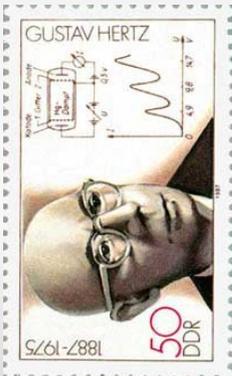


$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

- Bohr, Max Planck e Albert Einstein elaborano teorie che prevedono la quantizzazione degli orbitali elettronici, gettando le basi della meccanica quantistica



- Nel 1914 Franck e Hertz forniscono la definitiva dimostrazione sperimentale dell'esistenza dei livelli discreti di energia negli atomi, vincendo per questo il **Premio Nobel per la Fisica** nell'anno 1925.



Le basi dell'esperimento

Un fascio di elettroni di energia nota e regolabile viene fatto incidere su molecole di un **gas rarefatto** (gas ad alta T e bassa P, che si comporta quasi come un gas ideale in cui ogni molecola è indipendente dalle altre)

Ogni e^- può interagire con le molecole del gas in due modi differenti:

URTI ELASTICI → non alterano l'energia degli e^- , né inducono transizioni nelle molecole del gas.

URTI ANELASTICI → gli e^- incidenti perdono energia trasferendola alle molecole del gas, portandole in uno stato eccitato

- Eccitazione "Atomica" → gli e^- di atomi del gas vengono trasferiti su orbitali di energia maggiore
- Eccitazione dei Nuclei → protoni e neutroni dei nuclei vengono indotti in stati di energia maggiore
- Eccitazione Molecolare → Oltre alle variazioni di e^- p ed n può variare l'energia dell'intera molecola (variano i modi di vibrazione e rotazione)

N.B. = In tutti i casi agli atomi/molecole del gas possono assorbire solo quantità discrete energia (indipendentemente dal modo di trasferimento!!)

Scopo dell'esperimento

Gli scopi principali dell'esperimento condotto da Franck e Hertz erano i seguenti:

- ✓ Vedere se l'eccitazione di atomi e molecole può avvenire tramite bombardamento di elettroni
- ✓ Dimostrare la discretizzazione dei livelli energetici degli atomi/molecole
- ✓ Verificare se i livelli osservati coincidono con quelli ricavati dalla spettroscopia

Si fa incidere un fascio di e^- di energia regolabile (vedremo come) su un vapore di mercurio (Hg)

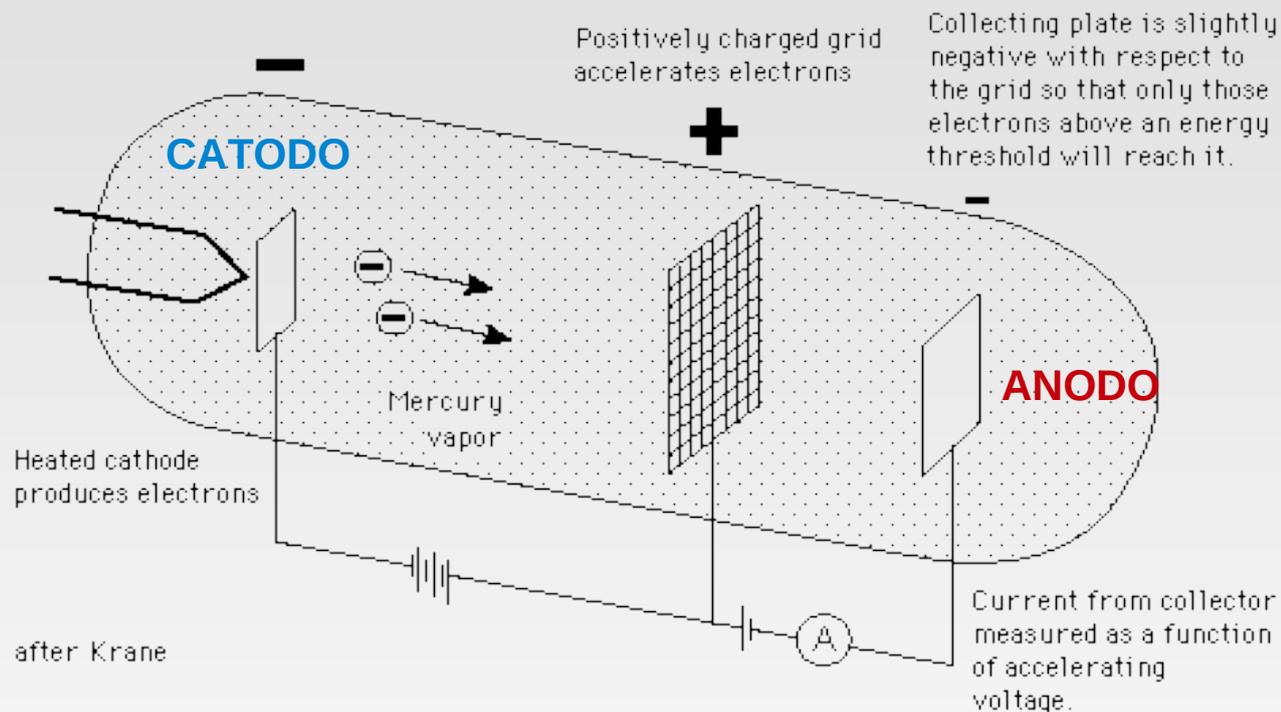


Si "contano" quindi gli e^- che hanno subito scattering anelastici al variare dell'energia iniziale ovvero quelli che hanno interagito eccitando le molecole del gas!!

?? CHE CI ASPETTIAMO ??

L'apparato sperimentale (1/3)

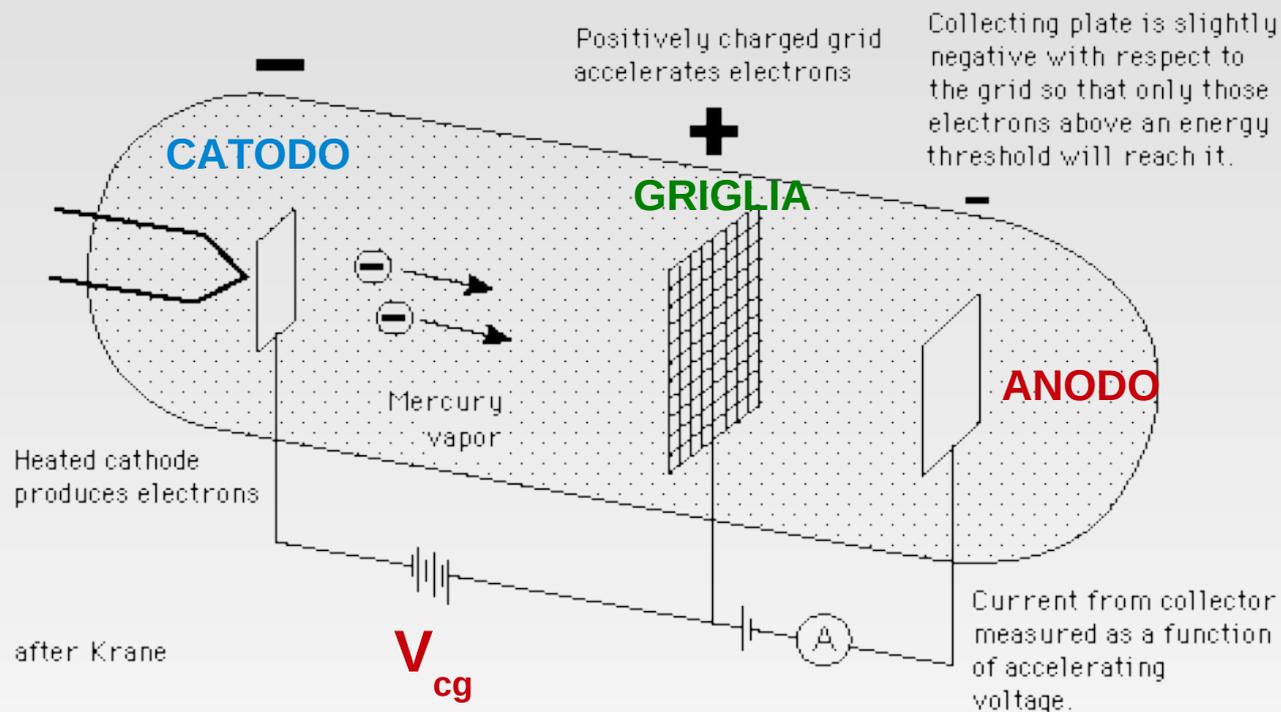
Gli e- da accelerare vengono emessi per emissione termoionica da un filo riscaldato. Lo stesso filamento è anche portato ad una tensione negativa. Esso viene detto: **CATODO**.



Gli elettroni emessi vengono accelerati verso una griglia positiva (per effetto del campo elettrico che si crea tra il catodo e la griglia). Al di là della griglia c'è un piatto collettore (ad una tensione leggermente negativa rispetto a quella di griglia) che consente di raccogliere gli e- che la attraversano (chiamiamo tale estremo **ANODO**). L'intero sistema è immerso in una ampolla (**valvola elettronica**) contenente un gas atomico rarefatto di mercurio (tipicamente Hg o Ne)

L'apparato sperimentale (2/3)

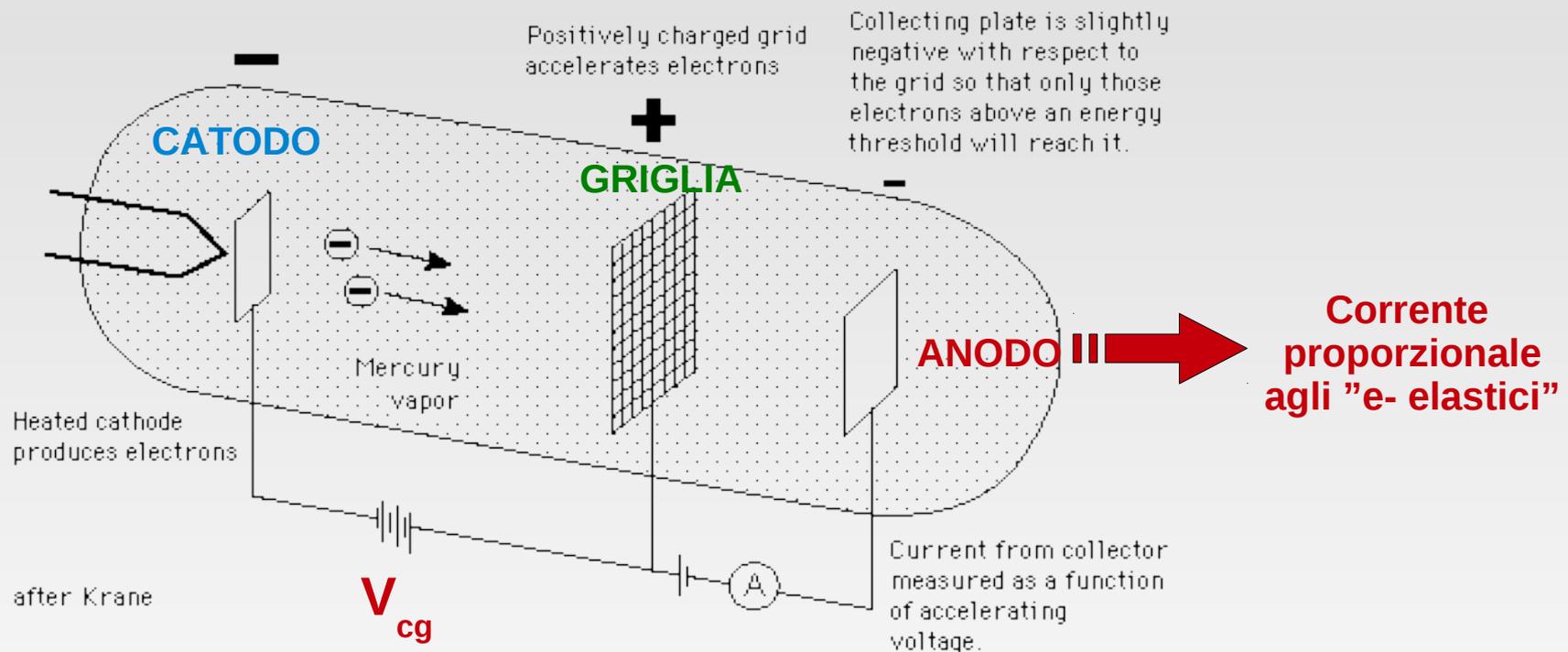
Al variare della tensione tra catodo e griglia (V_{cg}), si varia il campo tra i due terminali, ovvero la massima accelerazione imprimibile agli e- e, dunque, **l'energia massima** che essi possono trasportare.



Il "contropotenziale" tra griglia a anodo (dove vengono raccolti gli elettroni accelerati) fa sì che **NON** tutti gli elettroni emessi raggiungano il collettore. Il campo tra griglia e anodo infatti è molto minore di quello tra catodo e griglia, quindi anche se la griglia è positiva gli e- hanno tipicamente una velocità sufficiente ad attraversarla. **Con l'anodo a tensione negativa siamo sicuri che anche gli e- che hanno perso poca energia vengano fermati dalla griglia!**

L'apparato sperimentale (3/3)

Ecco come vengono "contati" gli e- che subiscono scattering anelastico sugli atomi di Hg: si legge la corrente anodica (proporzionale agli elettroni che scatteranno solo elasticamente)



Gli "e- inelastici" hanno eccitato atomi di Hg quindi hanno perso energia e vengono catturati dalla griglia.

?? CHE CI ASPETTIAMO ??

Procedura sperimentale

Si fissa l'energia massima degli e- emessi al catodo variando la tensione V_{cg} . Il contropotenziale viene lasciato invece fisso. Se non succede nulla, gli elettroni subiscono solo collisioni elastiche, arrivando all'anodo.

$$V = RI$$

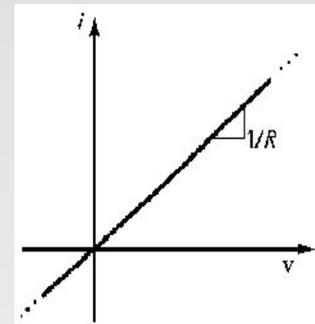
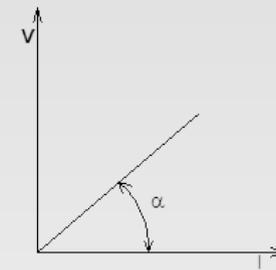
LEGGE DI OHM
(Aumenta V, aumenta I)



Se non succede
NULLA

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

**Numero di cariche
al secondo**



All'aumentare della tensione, aumenta il numero di elettroni che arrivano all'anodo, ovvero la corrente anodica. In realtà all'aumentare della tensione aumenta l'energia degli elettroni, secondo la semplice legge :

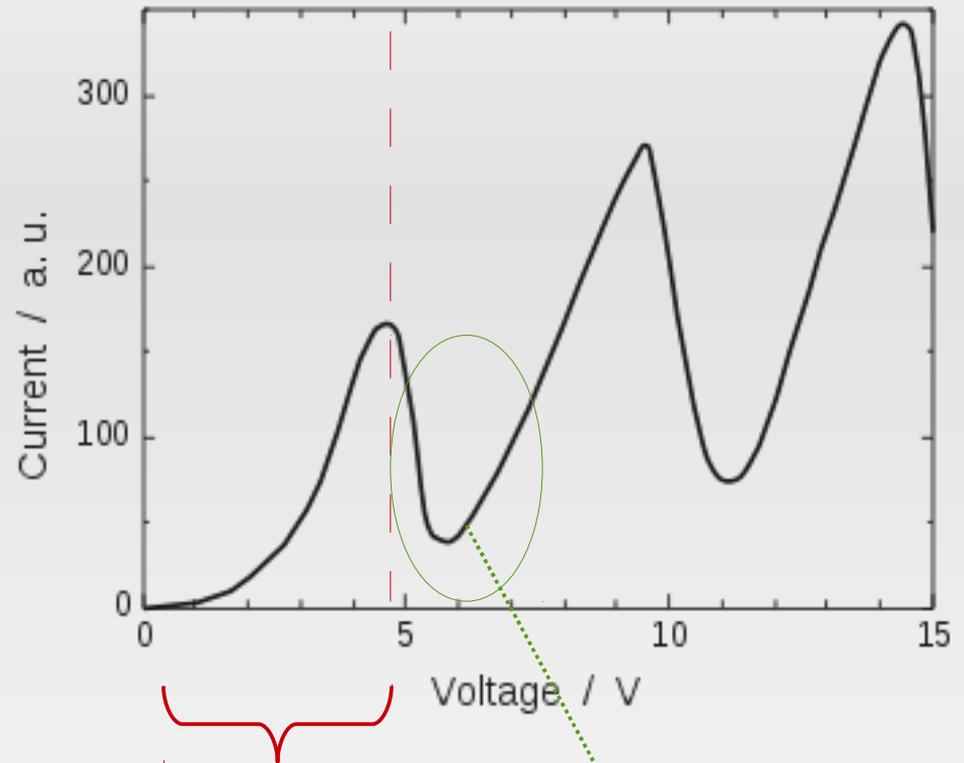
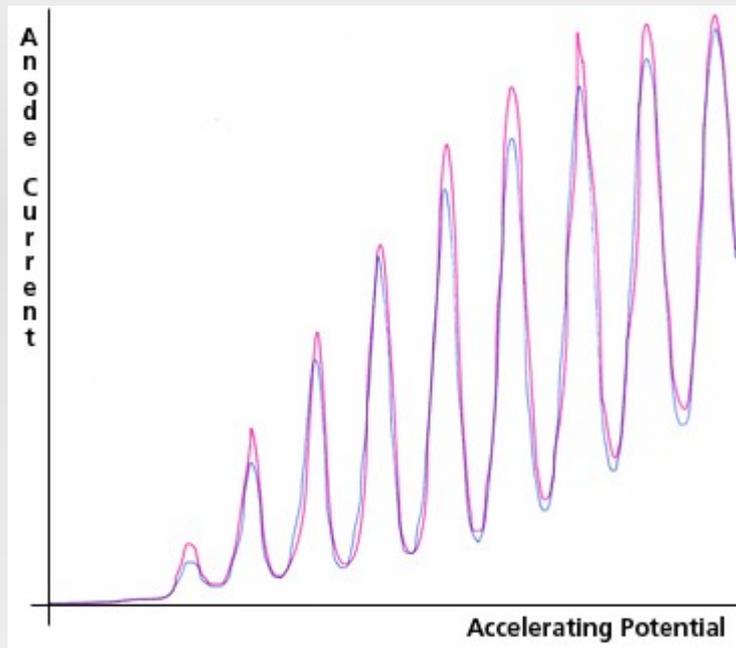
$$E_e = e V_{cg}$$

Quando l'energia è tale da implicare collisioni inelastiche, gli elettroni cedono energia all'Hg, e vengono bloccati sulla griglia. La corrente allora non aumenta più secondo la legge di Ohm e subisce un brusco calo!



**Se la corrente diminuisce per multipli di questa tensione particolare:
abbiamo dimostrato sperimentalmente la quantizzazione dei livelli!!**

Risultati sperimentali (1/3)



La corrente
anodica
aumenta



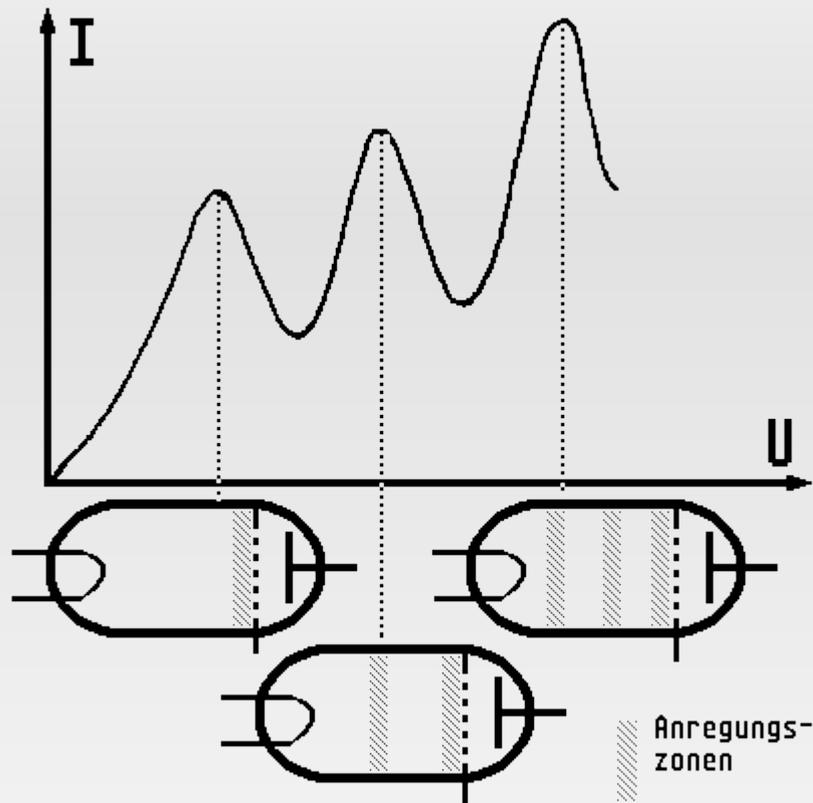
Energia cinetica degli elettroni non
sufficiente ad eccitare atomi di Hg

A ridosso della griglia gli e- raggiungono una
energia cinetica sufficiente ad eccitare il 1° livello
degli atomi del gas (portando un e- su un
orbitale di energia superiore).



Solo la "componente
elastica"
degli e- arriva sull'anodo!!!

Risultati sperimentali (2/3)



Il primo minimo di corrente è legato agli elettroni che acquistano l'energia sufficiente all'eccitazione a ridosso della griglia anodica.

Aumentando la tensione ulteriormente, gli e- raggiungono molto prima l'energia di eccitazione del gas quindi hanno ancora molto più spazio a disposizione per essere nuovamente accelerati dal campo nella valvola, tanto che riescono nuovamente ad oltrepassare la griglia.



La corrente aumenta nuovamente!!!

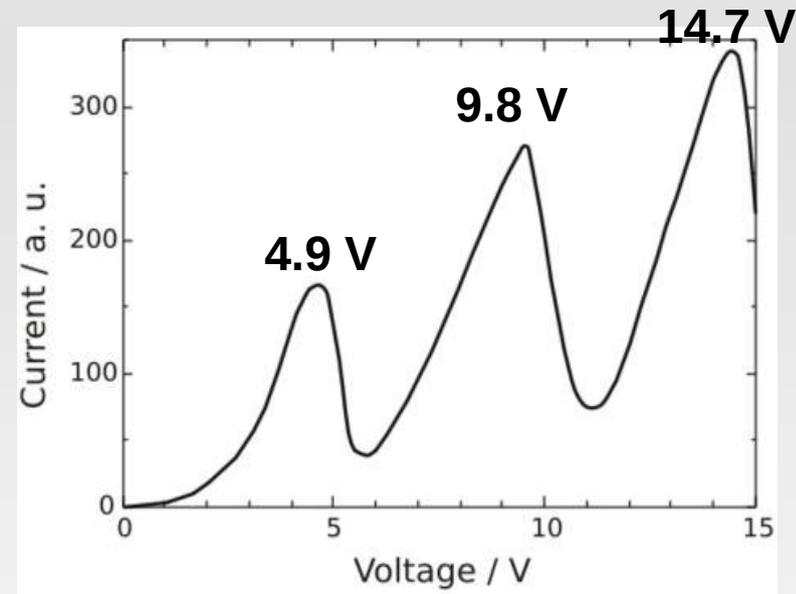
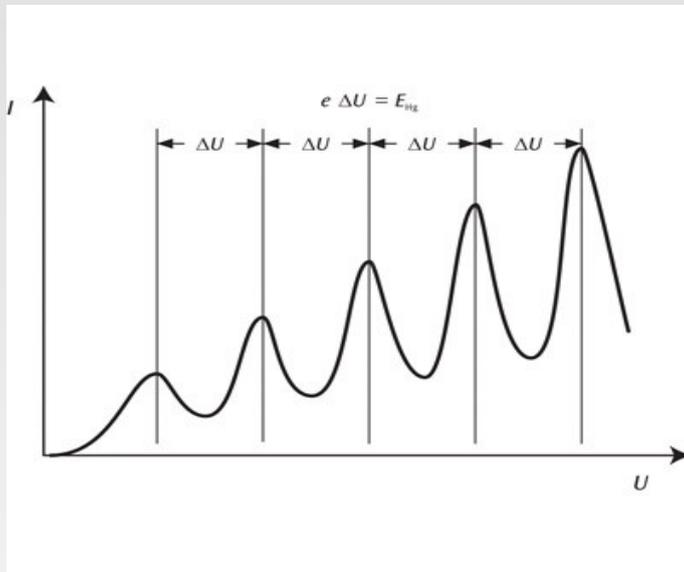
Continuando ad aumentare la tensione applicata si arriva al punto che gli e- subiscono 2 urti anelastici nel gas, uno a metà del cammino nel gas, l'altro alla fine. Come prima, conseguenza di questa situazione è che gli e- non hanno energia sufficiente a arrivare sul catodo



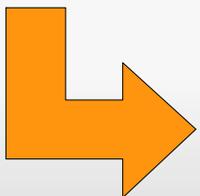
Nuovo DUMPING della corrente!!
(così impariamo anche qualche parola fashion da fisico)

Risultati sperimentali (3/3)

Se andiamo a guardare i valori di tensione che corrispondono all'inizio dei DUMPING di corrente anodica vediamo che essi sono tutti equispaziati !!



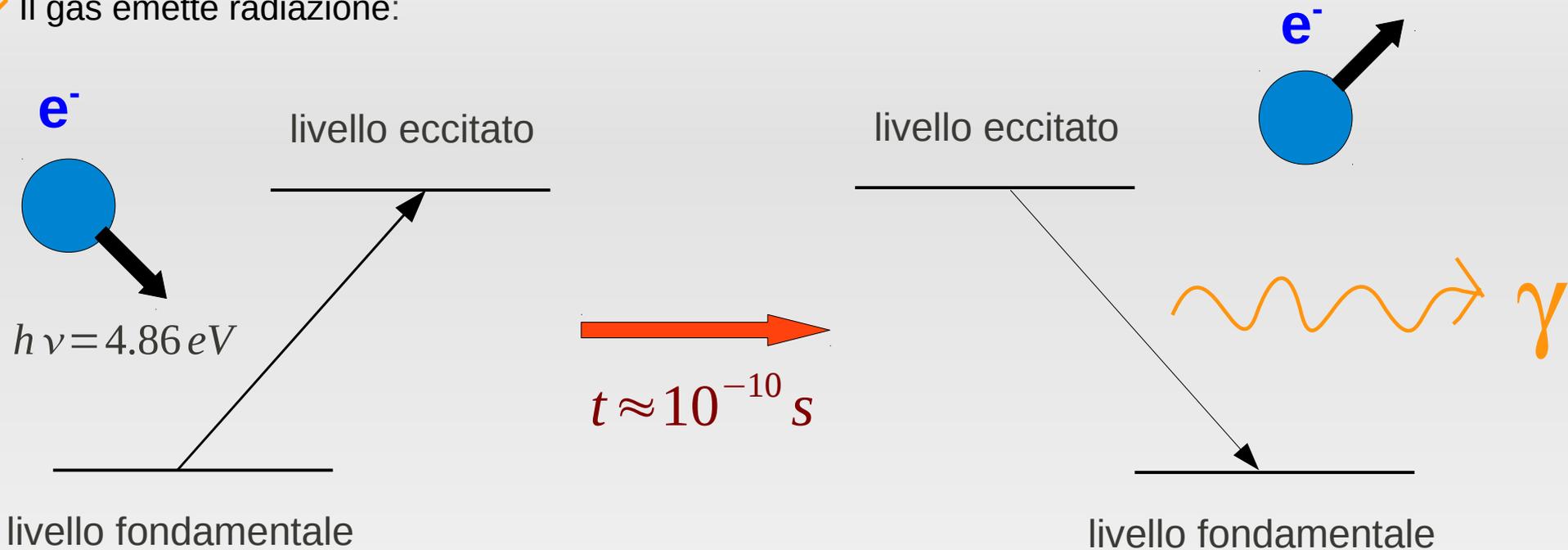
La realtà è un pò più complessa di così...dopo il primo minimo gli e- riaccelerati potrebbero avere un'energia sufficiente a eccitare il **II° livello** degli atomi di Hg. Questo dipende da molti fattori tra cui: tipologia di gas usato, T e P del gas etc..



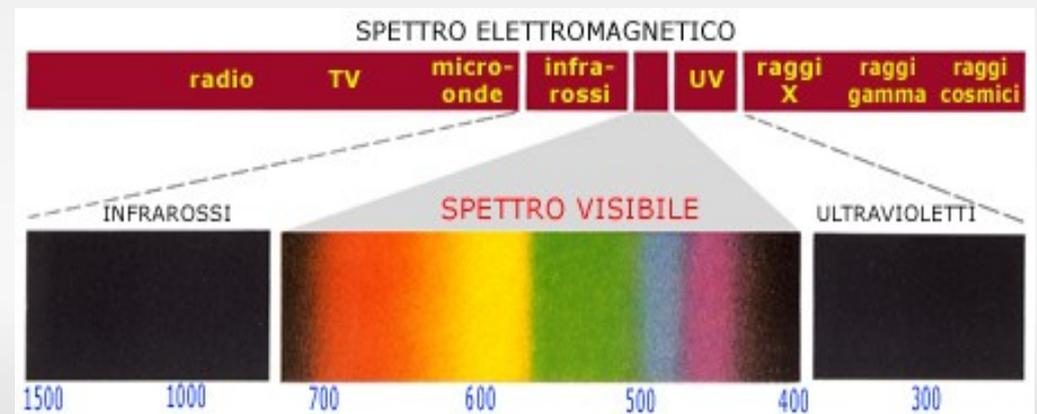
In ogni caso: è molto probabile che un e- "riaccelerato" incontri un atomo di gas prima di raggiungere un'energia compatibile con il II° livello. In pratica si vedono solo i minimi legati allo scattering sul **I° livello**.

Osservazioni (1/2)

- ✓ Il gas emette radiazione:

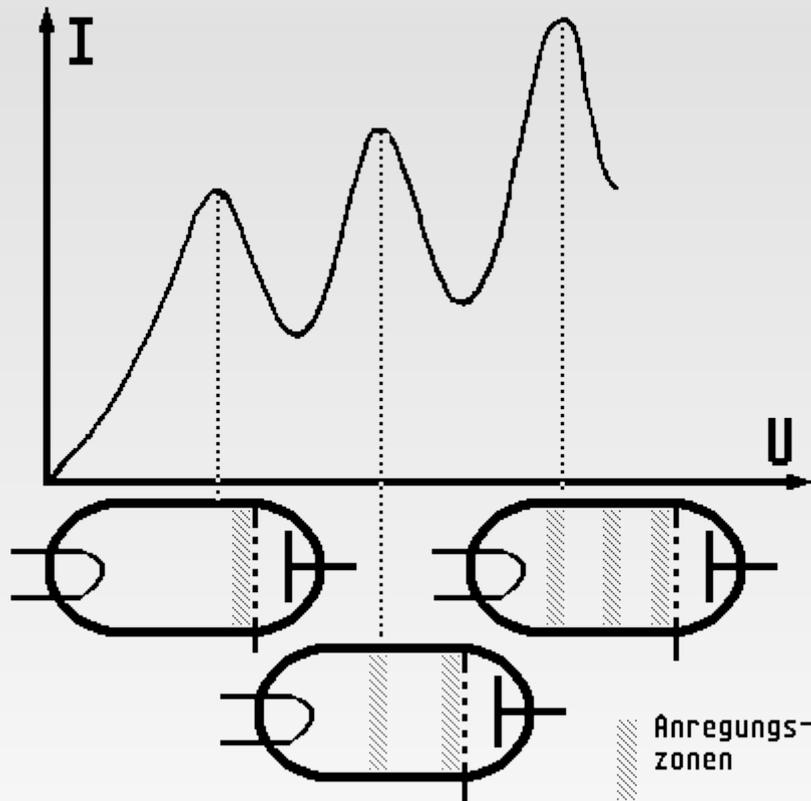


- ✓ Nel caso del Hg i fotoni emessi hanno $\lambda = 253,6 \text{ nm}$ → "Far UV" (UVB, UVC)
- ✓ Nel caso di gas Neon i fotoni emessi hanno lunghezze d'onda nel visibile (arancione, giallo) ovvero $\lambda = 600 \text{ nm}$.



Osservazioni (2/2)

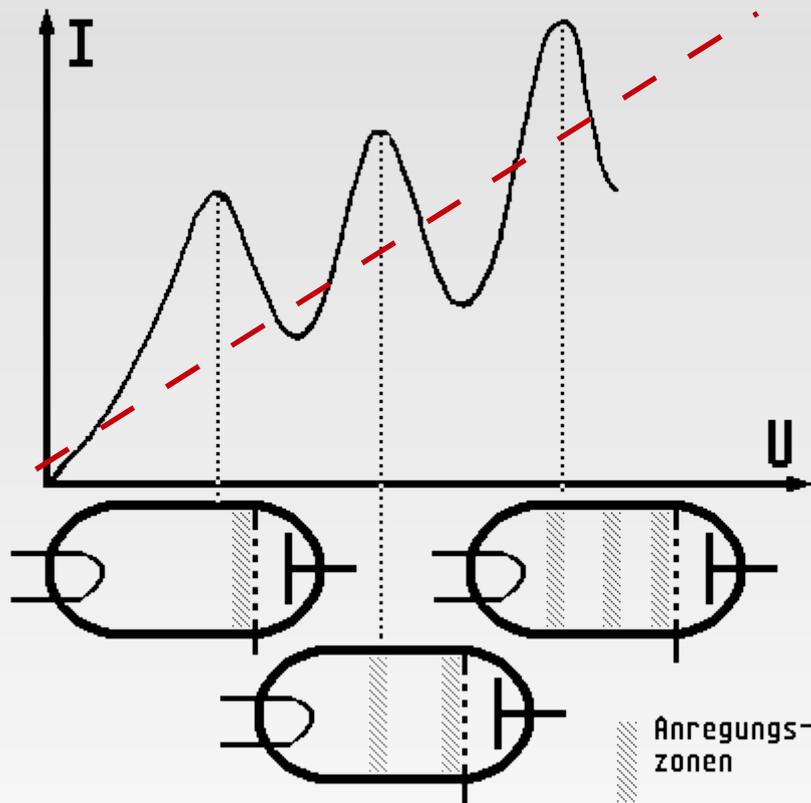
- ✓ Il tempo di rilassamento degli atomi è molto piccolo, quindi gli essi emettono fotoni praticamente lì dove vengono eccitati. Per questo nel tubo di Franck-Hertz si possono spesso distinguere i piani in cui gli e- subiscono scattering anelastico.



- ✓ "Mediamente" la corrente di anodo aumenta, nonostante i minimi che si formano aumentando la tensione. L'aumento è legato alla componente elastica degli elettroni che aumentano progressivamente la loro energia cinetica

Osservazioni (2/2)

- ✓ Il tempo di rilassamento degli atomi è molto piccolo, quindi gli essi emettono fotoni praticamente lì dove vengono eccitati. Per questo nel tubo di Franck-Hertz si possono spesso distinguere i piani in cui gli e- subiscono scattering anelastico.

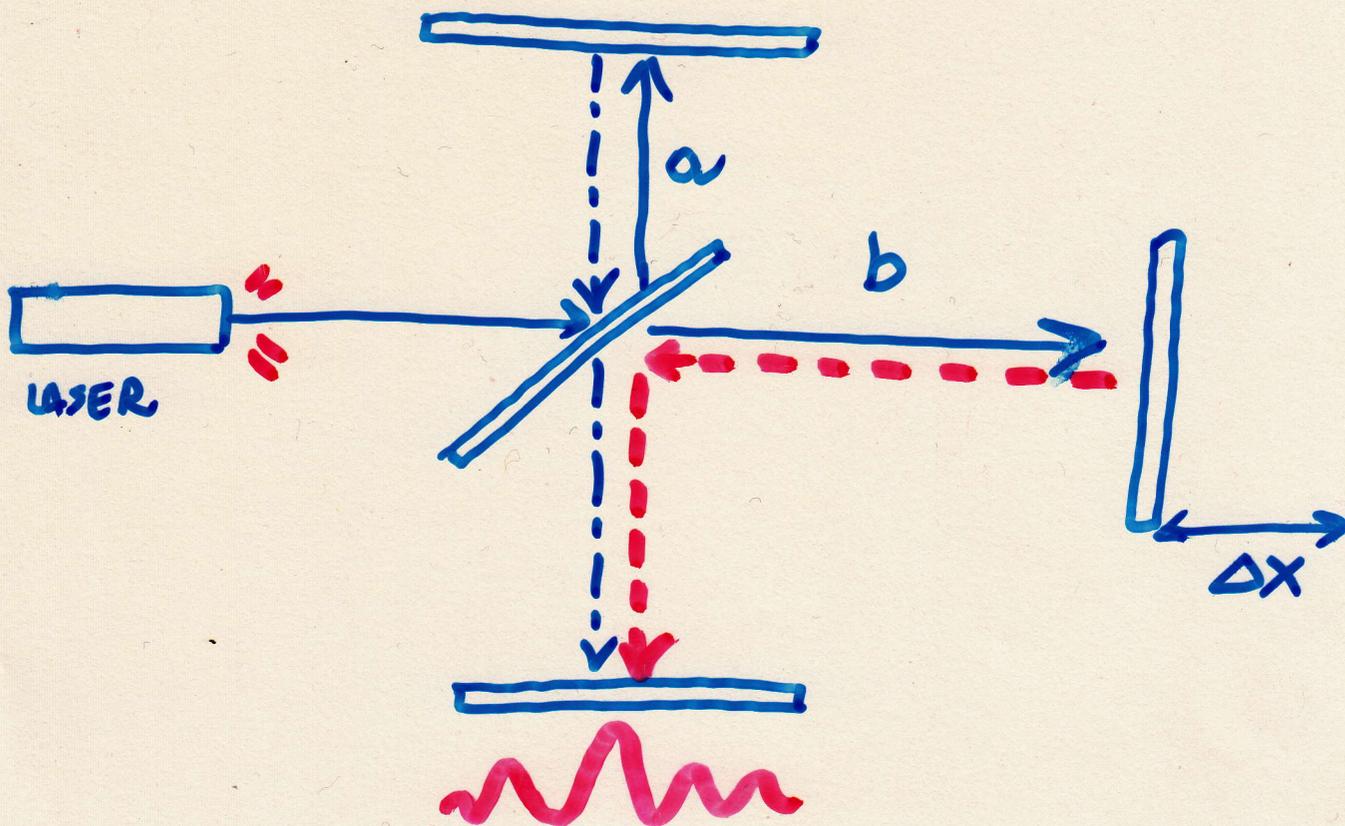


- ✓ "Mediamente" la corrente di anodo aumenta, nonostante i minimi che si formano aumentando la tensione. L'aumento è legato alla componente elastica degli elettroni che aumentano progressivamente la loro energia cinetica

Conclusioni

- L'eccitazione di atomi/molecole può avvenire tramite il bombardamento con un fascio di e-
- Gli e- cedono agli atomi/molecole solo "quanti" discreti di fissata energia: i livelli energetici degli atomi sono quindi quantizzati (conferma della teoria di Bohr e Planck)
- I livelli energetici degli atomi sono in perfetto accordo con i corrispondenti valori previsti dalle teorie spettroscopiche

INTERFEROMETRO



$a = b \rightarrow$ INTERFERENZA COSTRUTTIVA

SE $b \rightarrow b + \Delta x$: b RITARDA DI $\Delta t = \frac{2\Delta x}{c}$

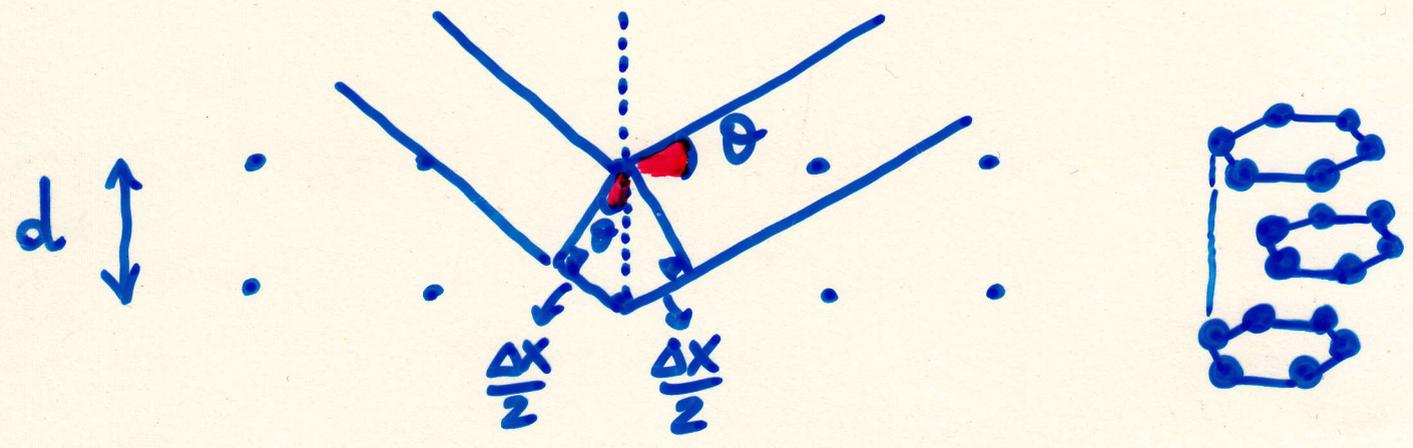
$\Delta t = T$ NUOVO MAX : $\Delta x = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{cT}{2}$

$c = \lambda\nu \rightarrow \Delta x = \frac{\lambda\nu T}{2} = \frac{\lambda\nu}{2\nu} = \frac{\lambda}{2}$

$\Delta x = \frac{m\lambda}{2} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \lambda = \frac{2\Delta x}{m} \\ \frac{E_\lambda}{\lambda} = \frac{E_{\Delta x}}{\Delta x} + \frac{E_m}{m} \end{array} \right.$

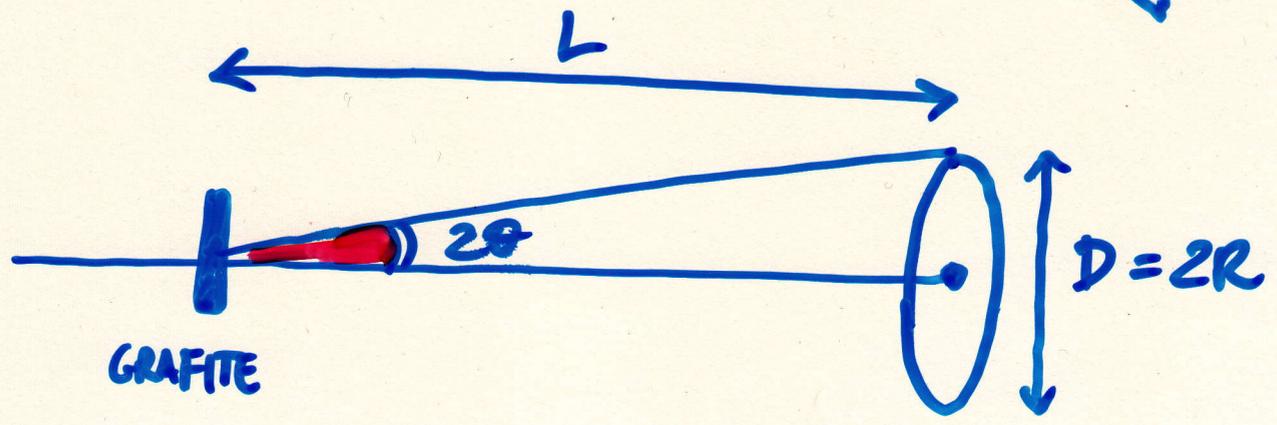
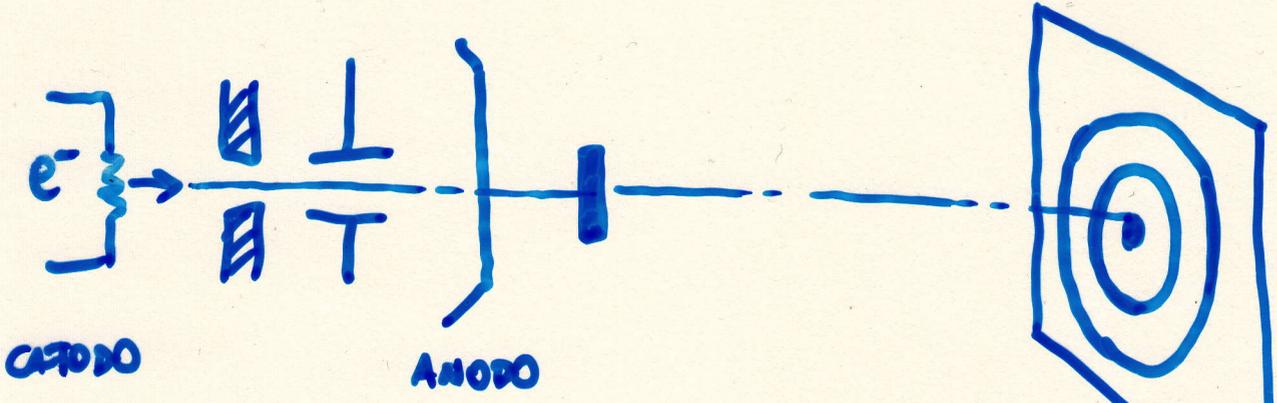
TUBO DI DIFFRAZIONE PER e^-

LA GRAFITE INFLUENZA GLI e^- CONE 2 FENDITURE
(DIFFRAZIONE ALLA BRAGG)

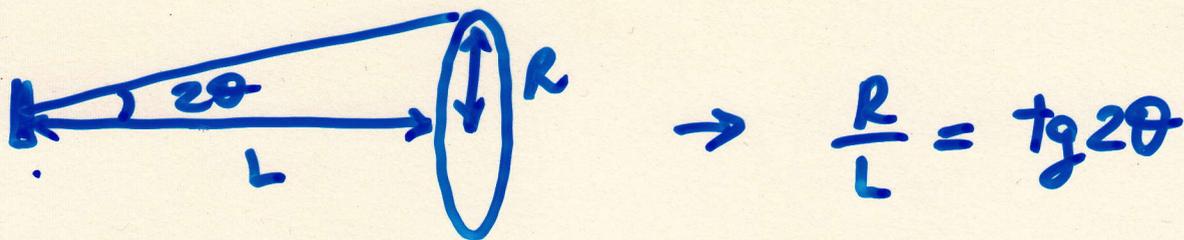


$$d \sin \theta = \frac{\Delta x}{2} \rightarrow \Delta x = 2d \sin \theta$$

SE $\Delta x = n\lambda \rightarrow$ INTERFERENZA COSTRUTTIVA $\rightarrow 2d \sin \theta = n\lambda$



$$n = 1 \rightarrow 2d \sin\theta = \lambda$$



$$\rightarrow \frac{R}{L} = \tan 2\theta$$

SE $\theta \neq 0 \rightarrow \tan 2\theta = \frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta} \approx \frac{2 \sin \theta}{\cos \theta} \approx 2 \sin \theta$

QUINDI:

$$2d \sin \theta = d \tan 2\theta = d \frac{R}{L} = \lambda$$

$$d = \lambda \frac{L}{R}$$

e $\lambda = ? \rightarrow \lambda_{e^-} = \frac{h}{p}$ LUNGHEZZA D'ONDA DI DE BROGLIE

MA $E_{e^-} = eV = \frac{p^2}{2m_{e^-}} \rightarrow p = \sqrt{2m_{e^-} eV}$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_{e^-} eV}}$$

$$= \frac{[J][s]}{[C]^{1/2} [kg]^{1/2} [V]^{1/2}}$$

$$[J][s] = [kg][m]^2 [s]^{-1}$$

$$[V] = [kg][m]^2 [s]^{-3} [A]^{-1}$$

$$[C] = [A] \cdot [s]$$

$$\lambda = [m]$$

$$h = 6,626068 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$m_{e^-} = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1,60217653 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$V = \text{in volt}$$