

Esperimento di Franck-Hertz con il mercurio

Registrazione con l'oscilloscopio, con il registratore XY e punto per punto

Obiettivi dell'esperimento

- Registrare la curva Franck-Hertz per il mercurio.
- Misurare l'emissione discontinua di energia dovuta agli urti anelastici degli elettroni liberi
- Interpretare i risultati della misura, nell'ipotesi che l'assorbimento di energia da parte degli atomi di mercurio sia di tipo discreto.

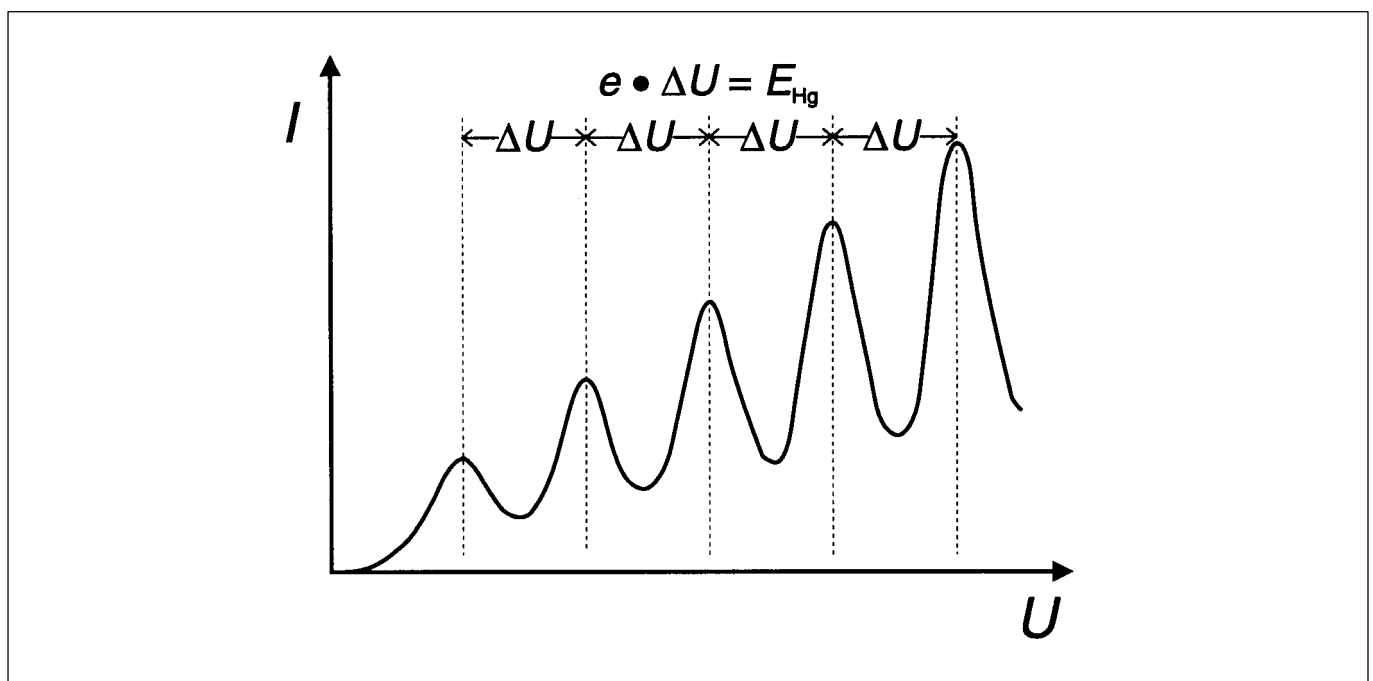
Principio fisico

Nel 1914, James Franck e Gustav Hertz scoprirono che gli elettroni, quando attraversano i vapori di mercurio, subiscono una perdita di energia secondo "livelli" discreti e che a tale perdita di energia corrisponde una emissione di radiazioni ultraviolette ($\lambda = 254 \text{ nm}$) da parte del mercurio.

Pochi mesi più tardi Niels Bohr si accorse che questo fenomeno era una chiara conferma della validità del suo modello atomico. L'esperimento di Franck-Hertz rappresenta, pertanto, un classico esperimento che conferma la validità della teoria quantistica.

In un tubo di vetro sotto il vuoto, vengono immessi atomi dei vapori di mercurio ad una pressione di circa 15 hPa, mantenuta costante tramite un controllo di temperatura. Questo esperimento serve ad analizzare la perdita di energia degli elettroni liberi dovuta alla diffusione ed agli urti anelastici che eccitano gli atomi di mercurio.

Andamento della corrente di collettore in funzione della tensione di accelerazione nell'esperimento di Franck-Hertz con il mercurio (andamento qualitativo)



Apparecchiature

1 Tubo di Franck-Hertz, Hg	555 85
1 Connettore per tubo di Franck-Hertz a più poli	555 861
1 Forno elettrico, 220 V	555 81
1 Alimentatore per tubo di Franck-Hertz	555 88
1 Sensore di temperatura, NiCr-Ni	666 193

Per ottimizzare la curva di Franck-Hertz si raccomanda:

1 Oscilloscopio a doppia traccia 303	575 211
2 Cavi schermati BNC/4 mm	575 24

Per registrare la curva di Franck-Hertz si raccomanda:

1 Registratore XY-Yt SR 720	575 663
Cavi di collegamento	

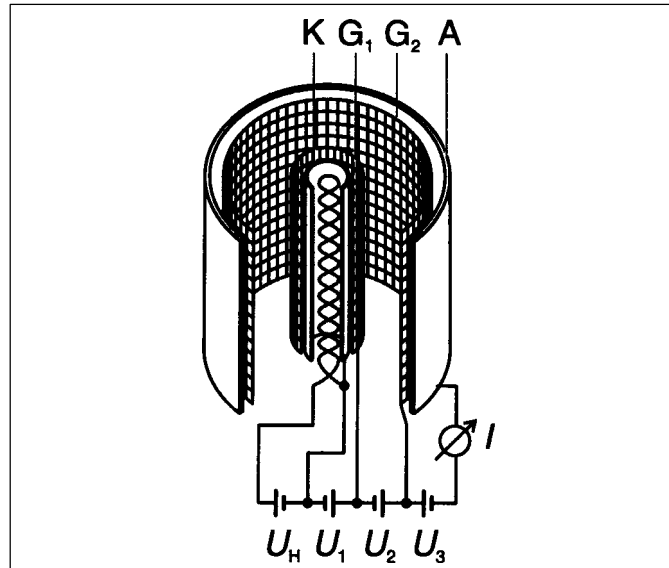


Fig. 1: Rappresentazione schematica del tubo di Franck-Hertz a vapori di mercurio

Il tubo di vetro contiene quattro elettrodi cilindrici (vedere Fig. 1). Il catodo K è circondato dalla griglia di controllo G_1 posta ad una distanza di qualche decimo di millimetro, dalla griglia di accelerazione G_2 posta ad una distanza maggiore ed infine dal collettore A che circonda i tre elettrodi precedenti. Per evitare differenze di potenziale lungo la superficie K, si utilizza un catodo a riscaldamento indiretto.

Gli elettroni, emessi dal catodo per effetto termoelettrico, vanno a formare una carica spaziale e da questa vengono attratti dalla tensione di controllo U_1 applicata tra la griglia G_1 ed il catodo K. Se si trascura l'inevitabile perdita di elettroni che si verifica quando essi attraversano la griglia G_2 , la corrente risulta praticamente indipendente dalla tensione di accelerazione U_2 applicata tra le griglie G_1 e G_2 . Tra la griglia G_2 ed il collettore A è applicata una tensione U_3 minore di U_2 che esercita un'azione frenante sugli elettroni, per cui solo quelli che hanno acquistato una sufficiente energia cinetica possono raggiungere il collettore e contribuire alla circolazione di corrente.

Nel corso di questo esperimento, si misura la corrente di collettore I_A al variare della tensione di accelerazione U_2 da 0 a 30 V, mentre la tensione di controllo U_1 e la tensione frenante U_3 rimangono costanti. Inizialmente la corrente I_A aumenta come in un comune tetodo e raggiunge un valore massimo quando, in prossimità della griglia G_2 , gli elettroni hanno acquistato una energia cinetica sufficiente ad eccitare per collisione gli atomi di mercurio ($E_{Hg} = 4.9$ eV). Dopo la collisione, poiché gli elettroni non riescono più a vincere l'azione frenante della tensione U_3 , la corrente diminuisce drasticamente.

Se la tensione di accelerazione U_2 aumenta, gli elettroni raggiungono l'energia necessaria per eccitare gli atomi di mercurio ad una distanza sempre minore dalla griglia G_1 e maggiore dalla griglia G_2 . In questo caso, dopo la prima collisione, gli elettroni vengono accelerati nuovamente per cui, se la tensione di accelerazione è sufficientemente elevata, essi ricevono dal campo elettrico l'energia necessaria per eccitare altri atomi di mercurio. Tutto questo comporta che, in corrispondenza di una tensione U_2 maggiore della precedente, la corrente I_A presenta un altro massimo.

Osservazione preliminare

La curva di Franck-Hertz si può ricavare anche manualmente. Per una rapida visualizzazione, ad esempio per ottimizzare i parametri sperimentali, si consiglia di utilizzare un oscilloscopio a doppia traccia. In questo caso, per stabilizzare l'immagine sull'oscilloscopio, la tensione di accelerazione deve variare con una frequenza sufficientemente elevata, per cui comincia a farsi sentire l'effetto capacitivo del tubo di Franck-Hertz. La corrente necessaria per invertire la carica sugli elettrodi, provoca un leggero slittamento ed una piccola distorsione della curva di Franck-Hertz.

Se, invece, si vuole registrare la curva di Franck-Hertz è preferibile utilizzare un registratore XY.

a) Procedimento manuale:

- Predisporre il funzionamento manuale ruotando il selettore in posizione MAN ed aumentare lentamente la tensione U_2 da 0 V a 30 V.
- Leggere i valori della tensione U_2 e della corrente I_A sul display; in corrispondenza di ciascun valore di tensione, abilitare alternativamente la lettura delle due grandezze mediante l'apposito selettore.

b) Rappresentazione sull'oscilloscopio:

- Collegare l'uscita $U_2/10$ al canale II dell'oscilloscopio (0.5 V/DIV) e l'uscita U_A al canale I (2 V/DIV). Utilizzare l'oscilloscopio in modalità XY.
- Selezionare il funzionamento a "dente di sega" sull'alimentatore del tubo di Franck-Hertz.
- Predisporre la posizione Y della traccia in modo da visualizzare completamente la parte superiore della curva.

c) Registrazione con il registratore XY:

- Collegare l'uscita $U_2/10$ all'ingresso X del registratore XY (0.2 V/cm CAL) e l'uscita U_A all'ingresso Y (1 V/cm CAL).
- Ruotare il selettore dell'alimentatore in posizione RESET.
- Regolare l'azzeramento degli assi X ed Y del registratore ed abbassare leggermente la punta della penna per contrassegnare tale posizione sul foglio di carta.
- Per registrare la curva, ruotare il selettore in posizione "Rampa" ed abbassare la penna di registrazione.
- Terminata la registrazione, sollevare la penna e tornare nuovamente in condizione RESET.

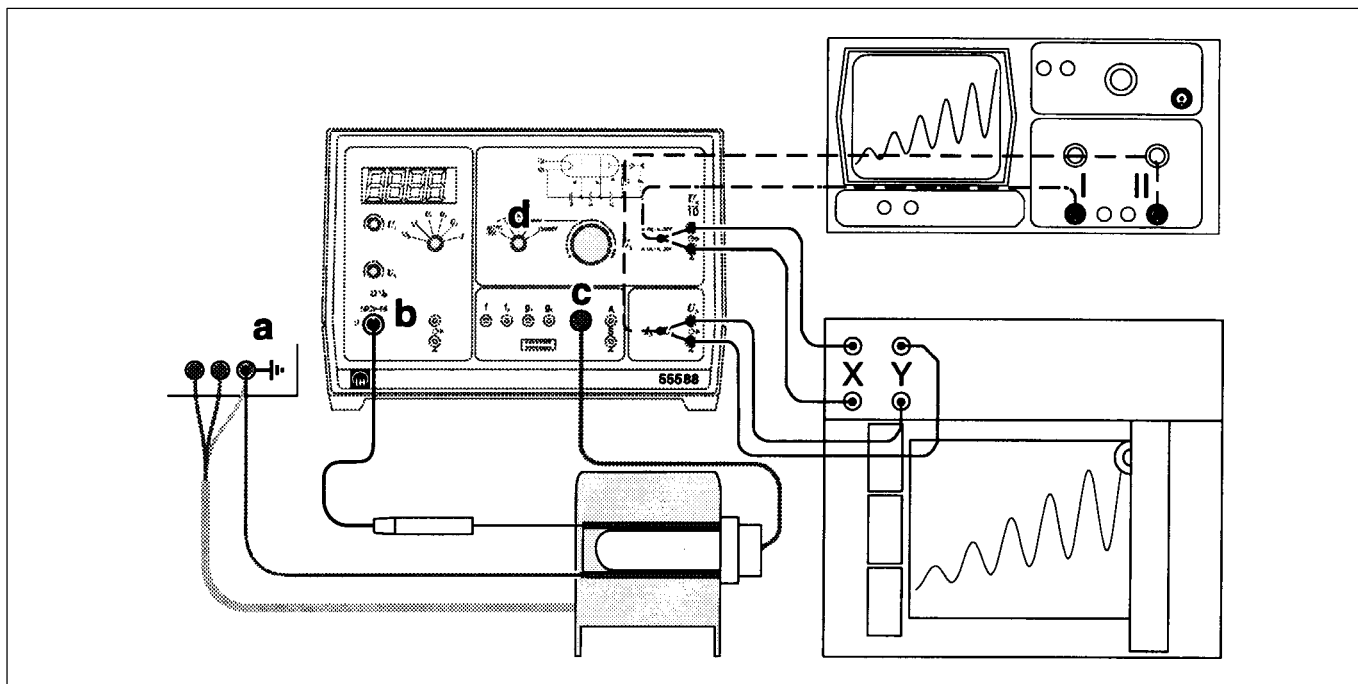


Fig. 2: Schema di montaggio dell'esperimento di Franck-Hertz con il mercurio

Configurazione del sistema di misura

La fig. 2 mostra lo schema di montaggio dell'esperimento.

Fase iniziale:

- Assicurarsi che l'interruttore dell'alimentatore del tubo di Franck-Hertz sia aperto.
- Collegare il forno di riscaldamento ai morsetti da 4 mm a norma di sicurezza (a) che si trovano sul pannello posteriore dell'alimentatore.
- Collegare lo schermo di rame alla boccola giallo-verde a norma di sicurezza con una spina da 4 mm (serve a schermare il tubo di Franck-Hertz dalle interferenze dei campi esterni).
- Inserire il connettore DIN del sensore di temperatura nella boccola (b) dell'alimentatore ed il connettore DIN del tubo di Franck-Hertz nella boccola (c).

Riscaldamento:

Nota:

Se la superficie di scambio termico del sensore di temperatura è insufficiente, il valore ottenuto dalla misura risulta inferiore alla temperatura effettivamente presente nel forno, per cui si rischia di surriscaldare il tubo.

- Inserire completamente il sensore di temperatura nell'apposito foro cieco del forno di riscaldamento e far scorrere il tubo di Franck-Hertz assieme al suo schermo di rame all'interno del forno.
- Ruotare il selettore (d) in posizione RESET e chiudere l'interruttore dell'alimentatore (dopo qualche secondo, il LED che indica la presenza dei vapori di mercurio (Hg) passa da verde a rosso).
- Questo sta ad indicare che la temperatura è al di sotto del valore $\vartheta_S = 180^\circ\text{C}$, perciò bisogna attendere che la temperatura raggiunga il valore di normale funzionamento (il LED indicatore passa da rosso a verde; la temperatura prima raggiunge un massimo poi diminuisce fino al valore finale).

Se l'indicazione del display comincia a lampeggiare:

- Vuol dire che la misura della temperatura è stata predisposta in modo errato (vedere foglio istruzioni).

Ottimizzazione della curva di Franck-Hertz:

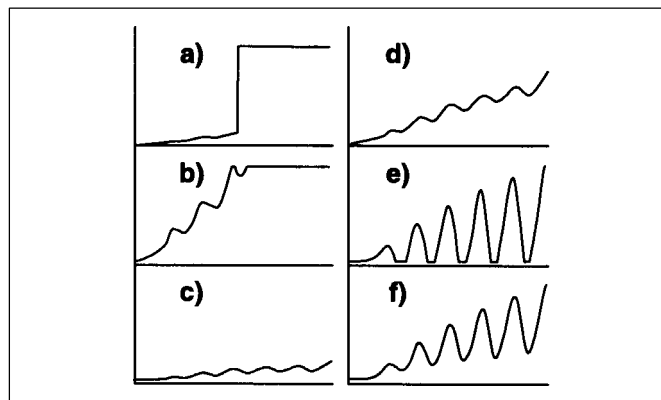
- Applicare una tensione di controllo $U_1 = 1.5\text{ V}$, una tensione frenante $U_3 = 1.5\text{ V}$ e registrare la curva di Franck-Hertz con questi valori (vedere Osservazione preliminare).

a) Ottimizzazione della temperatura ϑ

Se la curva aumenta bruscamente (vedere Fig. 3a) ed attraverso l'apertura del forno si può vedere la scarica del gas contenuto nel tubo di Franck-Hertz (fiamma blu):

- Ruotare immediatamente il selettore in posizione RESET ed attendere che la temperatura raggiunga il valore di normale funzionamento.
- Eventualmente, con la vite di regolazione del potenziometro, aumentare il valore ϑ_S della temperatura (per esempio di 5°C) ed aspettare qualche minuto in modo che il sistema possa raggiungere il nuovo equilibrio termico.

Fig. 3: Andamenti da utilizzare per la scelta dei parametri J , U_1 ed U_3 durante l'ottimizzazione della curva di Franck-Hertz



b) Ottimizzazione della tensione U_1 :

Un aumento della tensione di controllo U_1 , comporta una maggiore corrente dovuta all'emissione elettronica.

Se la curva aumenta troppo rapidamente e la parte superiore viene tagliata (Fig. 3b) perché l'amplificatore di misura della corrente raggiunge il livello di saturazione con valori inferiori ad $U_3 = 30$ V:

- Diminuire U_1 in modo che la curva abbia una pendenza simile a quella mostrata in Fig. 3d.

Se la curva è troppo piatta, cioè se la corrente di collettore I_A risulta sempre inferiore a 5 nA (vedere Fig. 3c):

- Aumentare U_1 (massimo 4.8 V) in modo che la curva abbia una pendenza simile a quella mostrata in Fig. 3d.

Dopo l'aumento di U_1 , se la curva è ancora piatta:

- Mediante la vite di regolazione del potenziometro, ridurre il valore ϑ_S della temperatura del forno.

c) Ottimizzazione della tensione U_3 :

Un aumento della tensione frenante U_3 rende più evidenti i massimi e i minimi della curva, contemporaneamente si ha una diminuzione della corrente di collettore.

Se i massimi ed i minimi della curva sono poco definiti (vedere Fig. 3d):

- Aumentare alternativamente prima la tensione frenante U_3 (massimo 4.5 V) e successivamente la tensione di controllo U_1 fino ad ottenere l'andamento mostrato in Fig. 3f.

Se i minimi della curva vengono tagliati in corrispondenza del limite inferiore (vedere Fig. 3e):

- Diminuire alternativamente prima la tensione frenante U_3 (massimo 4.5 V) e successivamente la tensione di controllo U_1 fino ad ottenere l'andamento mostrato in Fig. 3f.

Esecuzione dell'esperimento

- Registrare la curva di Franck-Hertz (vedere Osservazione preliminare)
- Per visualizzare meglio la presenza del primo massimo, aumentare la sensibilità dell'ingresso Y e ripetere la registrazione

Esempio di misura e relative valutazioni

$$\begin{aligned} U_1 &= 1.58 \text{ V} \\ U_3 &= 3.95 \text{ V} \\ \vartheta_S &= 180 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Dalla Fig. 4, si deduce che l'intervallo tra due massimi successivi risulta mediamente:

$$\Delta U_2 = 5.1 \text{ V}$$

A questo valore corrisponde un trasferimento di energia pari a $\Delta E = 5.1$ eV

Questo risultato è confrontabile con il valore standard

$$E_{\text{Hg}} = 4.9 \text{ eV}$$

e rappresenta l'energia necessaria per trasferire gli atomi di mercurio dal livello di terra $^1\text{S}_0$ al primo livello $^3\text{P}_1$.

L'energia cinetica degli elettroni in corrispondenza della griglia G_2 , si può calcolare in questo modo:

$$E_{\text{cin}} = (U_1 + U_2)$$

Secondo questa relazione, il primo massimo della corrente di collettore si dovrebbe avere quando $U_1 + U_2 = 4.9$ V, mentre sperimentalmente si trova $U_1 + U_2 = 8.1$ V. La differenza tra i due valori rappresenta l'effettivo potenziale di contatto tra il catodo K e la griglia G_2 .

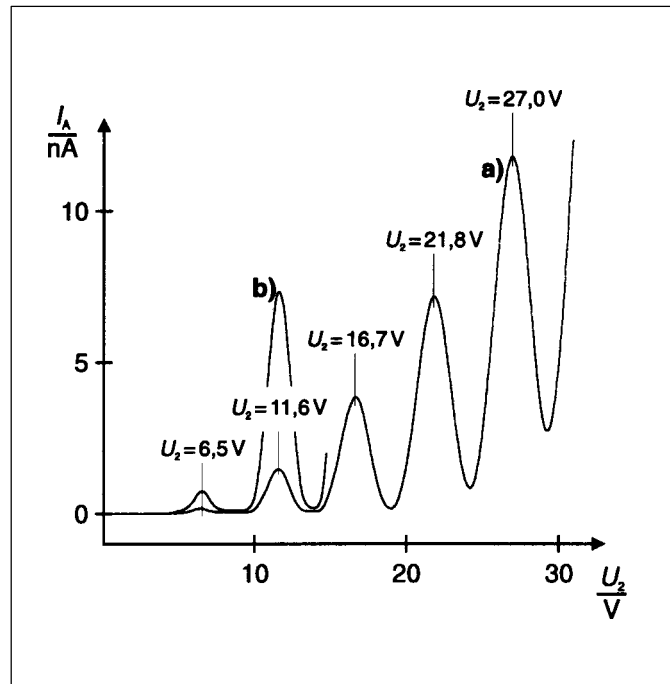


Fig. 4: a) Curva di Franck-Hertz per il mercurio (ricavata con il registratore XY)
b) Tratto di curva con i valori delle ordinate aumentati di cinque volte

Informazioni supplementari

L'effettivo potenziale di contatto dipende da numerosi fattori, ma in questo caso si prende in considerazione solo quello più importante e cioè il diverso lavoro di estrazione delle cariche dovuto ai materiali del catodo e della griglia.

In questo caso, assumono un ruolo molto importante sia gli elettroni emessi dagli ossidi depositati sul catodo sia le cariche dovute ai vapori di mercurio che avvolgono la griglia. La velocità iniziale degli elettroni emessi dal catodo dipende dalla temperatura del catodo.