



A.A.  
2008-2009

# *Programma di incentivazione delle Lauree Scientifiche*

**LABORATORIO DI FISICA**

**ESPERIMENTO DI FRANCK-HERTZ  
CON IL MERCURIO**

**UNIVERSITÀ DI PERUGIA  
DIPARTIMENTO DI FISICA**



# **INDICE**

	<i>Pag.</i>
<i>Introduzione</i>	<b>2</b>
<b>1</b> <i>Nozioni di Fisica di base</i>	<b>3</b>
1.1 <i>Le origini della Meccanica Quantistica e il modello di Bohr</i>	<b>3</b>
1.2 <i>Il Mercurio</i>	<b>5</b>
1.3 <i>Emissione degli elettroni da un catodo riscaldato</i>	<b>5</b>
1.4 <i>Le valvole termoioniche</i>	<b>7</b>
1.5 <i>Gli urti e l'eccitazione atomica</i>	<b>9</b>
<b>2</b> <i>L'esperimento di Frank-Hertz</i>	<b>10</b>
2.1 <i>Il metodo di Franck-Hertz</i>	<b>10</b>
2.2 <i>Il principio fisico</i>	<b>11</b>
<b>3</b> <i>La misura</i>	<b>12</b>
3.1 <i>La strumentazione</i>	<b>12</b>
3.2 <i>Come si prepara l'esperimento</i>	<b>14</b>
3.3 <i>Osservazione preliminare</i>	<b>15</b>
3.4 <i>La misura</i>	<b>16</b>
3.5 <i>Ottimizzazione della curva di Franck-Hertz</i>	<b>17</b>
3.6 <i>Esempio di interpretazione dei risultati</i>	<b>19</b>

## INTRODUZIONE

Nel 1914 James Franck e Gustav Hertz scoprirono che gli elettroni, quando attraversano vapori di mercurio, subiscono una perdita di energia secondo *livelli* discreti, e che a tale perdita di energia corrisponde una emissione di radiazioni ultraviolette (lunghezza d'onda  $\lambda=254$  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. Per questo ai due fisici fu conferito il premio Nobel nel 1925.

Scopo di questa esperienza è la registrazione della curva di Franck ed Hertz per il mercurio, la misura dell'emissione discontinua di energia dovuta agli urti anelastici degli elettroni liberi. I risultati della misura dovranno poi essere interpretati nell'ipotesi che l'assorbimento di energia da parte degli atomi di mercurio sia di tipo discreto.

Per la comprensione dell'esperimento sono necessari alcuni concetti di Fisica Moderna ed alcuni elementi di elettronica che verranno brevemente presentati nel primo capitolo, in particolare il modello atomico di Bohr, l'emissione termoionica e i principi di funzionamento delle valvole (diodo, triodo, ec).

## **1.1. Le origini della Meccanica Quantistica e il modello di Bohr**

L'idea che gli elettroni si muovano lungo orbite all'interno di un atomo fu suggerita per la prima volta nel 1904. Nel periodo circa dal 1913 al 1926 si pensava che gli elettroni si muovessero intorno al nucleo in maniera simile ai pianeti intorno al sole. A quel tempo la teoria dell'elettromagnetismo era già ben sviluppata e si sapeva che una carica elettrica accelerata (quindi anche se soggetta all'accelerazione centripeta del moto circolare) perde energia per irraggiamento; L'emissione di una radiazione durante la rotazione degli elettroni intorno al nucleo portava alla conseguenza teorica per la quale l'elettrone avrebbe dovuto perdere gradualmente energia fino a collassare sul nucleo con un movimento a spirale, cosa che in realtà non aveva luogo. Spiegare questo enigma fu uno tra i motivi principali che diedero impulso allo sviluppo della Meccanica Quantistica.

Inizialmente si postulò l'esistenza di un'infinità discreta, di un numero finito di orbite possibile, senza che vi fosse un modello fisico, in grado di giustificare questo assunto. Bohr fornì una spiegazione in base al dualismo onda-particella: due onde in fase si sommano, mentre due onde fuori fase si annullano. I movimenti di elettroni lungo orbite fuori fase, cresta d'onda contro ventre, sarebbero distrutti dal fenomeno dell'interferenza. Per cui, possono avere luogo solo movimenti a lunghezza d'onda in fase, che definiscono gli orbitali, e, per essere in fase, sono multipli interi di un valore base, la costante di Planck.

Il **modello atomico** proposto da Niels Bohr nel 1913 è la più famosa applicazione della quantizzazione dell'energia, che, insieme all'equazione di Schrödinger e alle spiegazioni teoriche sulla radiazione di corpo nero, sull'effetto fotoelettrico e sullo scattering Compton sono la base della Meccanica Quantistica. Il modello, proposto inizialmente per l'atomo di idrogeno, ottenne degli eccellenti risultati, coincidenti, entro il margine degli errori, con lo spettro sperimentale

Le orbite, o più precisamente gli orbitali sono quindi in numero finito, e vengono indicati con le lettere s, p, d, f, g, h, ..... (oppure i numeri  $l=0, 1, 2, \dots$ ) e altri due indici n ed m (si veda la Fig. 1.1). Gli elettroni vanno ad occupare questi *orbitali*, a coppie di *spin* opposto, a partire dal più interno  $1s_0$ . Le perdite di energie sono *quantizzate* e corrispondono al salto di un elettrone da un'orbitale a energia maggiore ad uno di energia minore, con emissione di energia. Viceversa,

se ad un elettrone viene fornita energia sufficiente, questo può saltare ad un orbitale di energia maggiore (assorbimento di energia).











	$s$ ( $l=0$ )	$p$ ( $l=1$ )	$d$ ( $l=2$ )	$f$ ( $l=3$ )
$n=1$				
$n=2$				
$n=3$				
$n=4$				

Fig. 1.1 Gli orbitali  $n=1,2,3,4$

## 1.2. Il mercurio

Il mercurio (simbolo Hg) è uno dei 6 elementi che sono liquidi a temperatura ambiente o vicino ad essa. L'atomo di mercurio contiene 80 elettroni, suddivisi in 6 orbite, con numero di elettroni rispettivamente 2, 8, 18, 32, 18, 2 ; 78 sono elettroni *legati* e si trovano in livelli di energia tutti pieni. Nello stato fondamentale gli altri due elettroni si trovano nello stato 6s.

Le regole della Meccanica Quantistica permettono di calcolare quali transizioni di livello sono ammesse e quale è la probabilità che una transizione avvenga. Ricordiamo che i livelli atomici vengono indicati con le lettere S ( momento angolare totale  $J=0$  ), P ( $J=1$  ), D ( $J=2$ ) e che lo *spin* dell'elettrone vale  $S=\frac{1}{2}$  e che si può accoppiare con  $S=0,1$  risultando in uno stato rispettivamente di singoletto  $^1S, ^1P, ^1D$ , ecc o di tripletto  $^3S, ^3P, ^3D$ , ecc (perché ci sono tre stati possibili, -1, 0, 1) . Risulta che l'unica transizione possibile è quella  $^3P_1 \rightarrow ^1S_0$  che corrisponde alla linea spettrale 253,7nm I

Nel tubo di Franck-Hertz, al crescere della temperatura, una goccia di mercurio evapora parzialmente. Questo sistema bi-fase liquido vapore è descritto dalla equazione di Clausius-Clapeyron :

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{(V_v - V_l)T}$$

dove p indica la pressione, T la temperatura,  $\lambda$  l'energia di evaporazione e  $V_v$  and  $V_l$  i volumi rispettivamente della fase liquida e di quella gassosa.

Utilizzando i valori del mercurio, risolvendo questa equazione si ottiene:

$$\lg p = 10,55 - \frac{3333}{T} - 0,86 \cdot \lg T$$

Dove il logaritmo è in base naturale (numero e), la temperature T è in gradi assoluti Kelvin e la pressione p in Torr (1 Torr = 133,33 Newton/m<sup>2</sup>).

### 1.3. Emissione degli elettroni da un catodo riscaldato

L'effetto dell'emissione, detta anche *termoionica*, di elettroni da parte di metalli portati all'incandescenza, era già stato scoperto in Inghilterra nel 1873, e fu quindi studiato attentamente dall'inglese Owen Richardson (1879-1959) che per questo ricevette nel 1928 il Premio Nobel

Per questo effetto un filamento di metallo può emettere elettroni se riscaldato. Gli atomi dei metalli posseggono ciascuno uno o più elettroni liberi di muoversi, cioè non costretti su un'orbita intorno al nucleo, come tutti gli altri. Se agli estremi del metallo viene applicata una differenza di potenziale, questi elettroni si muovono in direzione opposta al campo elettrico e costituiscono una corrente elettrica. Per questo i metalli sono definiti *conduttori* e questi elettroni si chiamano *di conduzione*, ovvero si dice che si trovano nella *banda di conduzione*

In condizioni normali questi elettroni, non possono uscire dal metallo perché trattenuti dalla forza di Coulomb esercitata dagli ioni positivi del reticolo circostante (un atomo a cui manca uno o più elettroni è uno ione positivo).

Per essere emessi dal metallo gli elettroni di conduzione devono quindi superare una *barriera* costituita da una differenza di potenziale  $W$  dell'ordine di qualche elettron-volt (eV). Il processo di riscaldamento fornisce energia termica sufficiente (ad alcuni elettroni per uscire dal metallo). Questa emissione si chiama *termoionica* e la frazione di elettroni che fuoriescono dal filamento di metallo è regolata dal fattore esponenziale, detto di Boltzmann,  $e^{-\frac{W}{k_B T}}$ . Quando si applica una d.d.p.  $U_B$  per allontanare gli elettroni dal metallo, si ha  $E = W - eU_B$  ( $e$  è la carica dell'elettrone). Si può dimostrare che il flusso emesso segue la legge di Richardson

$$j = CT^2 e^{-\frac{W - eU_B}{k_B T}}$$

Dove  $C$  indica una costante che dipende dal materiale.

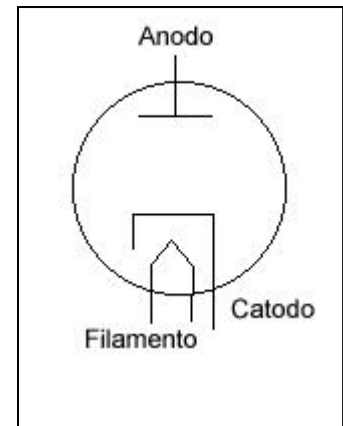
## 1.4 Le valvole termoioniche e il tetrodo

Fu un altro inglese, John Ambrose Fleming (1849-1945) che inventò il diodo nel 1904 ed un inventore americano, Lee DeForest (1873-1961) ad inventare il triodo nel 1906. Guglielmo Marconi (1874-1937) fu tra i primi a riconoscere l'importanza dei tubi termoionici ed a farne uso nei suoi apparati rice-trasmettenti

Il tubo termoionico è costruttivamente simile alla comunissima lampadina, ovvero non è altro che un involucro di vetro nel quale è praticato il vuoto, contenente un filamento metallico che viene portato all'incandescenza (tra i 1000 ed i 3000 gradi centigradi) facendogli passare attraverso una corrente elettrica. A differenza della lampadina però contiene uno o più elementi metallici (a forma di griglia o di schermi), collegabili dall'esterno. Il filamento metallico è chiamato catodo, mentre l'elemento metallico più esterno è chiamato anodo. Eventuali elementi intermedi sono chiamati griglie di controllo.

Il tubo termoionico è stato il primo componente elettronico "attivo", cioè in grado di innalzare la potenza di un segnale posto al suo ingresso, grazie ad una fonte esterna di energia. La corrente passa fra due elettrodi: l'anodo ed il catodo, a seconda della tensione a cui sono posti e a seconda della tensione delle eventuali griglie frapposte ai due.

Il catodo è costituito da un filamento riscaldato ad alta temperatura (in tutto e per tutto simile a quello delle lampadine), inserito all'interno di un tubetto in lega di nichel rivestito di elementi che favoriscono l'emissione elettronica. Il catodo emette quindi elettroni, che sono cariche elettriche elementari di segno negativo. Se il catodo è polarizzato negativamente rispetto all'anodo, ovvero

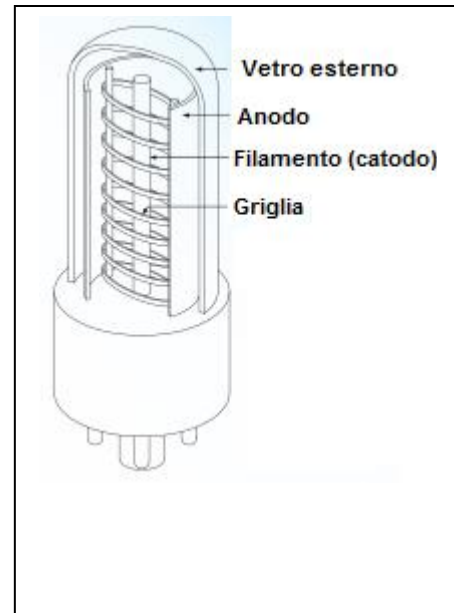


se è collegato al polo negativo di una batteria e l'anodo a quello positivo, si stabilirà un flusso di elettroni, ovvero una corrente elettrica, tra il catodo e l'anodo (questo perché gli elettroni negativi vengono attratti dall'anodo). Se la polarizzazione è quella contraria, invece, nessuna corrente elettrica passerà tra catodo ed anodo, perché in tal caso l'anodo respingerà gli elettroni. Il risultato è quello di un dispositivo in grado di far passare solo la corrente in un senso, detto **diodo** (Fig. 1.1).

Se tra catodo ed anodo viene posta una griglia metallica, è intuitivo che se questa è polarizzata positivamente rispetto al catodo, ma meno dell'anodo, gli elettroni emessi dal catodo vi



saranno attratti e quindi passeranno attraverso le maglie della griglia per raggiungere l'anodo. Contrariamente, se la griglia è polarizzata negativamente, questa respingerà parte degli elettroni verso il catodo: maggiore la carica negativa della griglia, minore quindi la corrente sull'anodo, fino al punto in cui tutti gli elettroni emessi dal catodo vengono respinti dalla griglia e la corrente sull'anodo si azzerà. Pertanto applicando una tensione variabile tra catodo e griglia, si otterrà un passaggio di corrente tra catodo ed anodo che seguirà, amplificandolo, l'andamento del segnale alla griglia. La griglia di chiama quindi "di controllo" e l'effetto risultante è quello di un'amplificazione di corrente, ed un tubo termoionico siffatto si dice **triodo** (Fig. 1.2).



L'aggiunta di una seconda griglia (detta di schermo) posta tra la griglia di controllo e l'anodo permette di eliminare la tendenza del triodo a "oscillare" a causa della capacità parassita tra anodo e griglia (che costituiscono un condensatore cilindrico). A questa griglia di schermo viene applicata una tensione leggermente inferiore a quella dell'anodo; un tubo di questo tipo prende il nome di tetrodo, ed è quello utilizzato in questa esperienza.

Il triodo e le sue varianti (tetrodo, pentodo, eptodo, ecc. così chiamati all'aumentare delle griglie di controllo) sono stati i primi dispositivi elettronici fondamentali per l'amplificazione dei segnali elettrici, agli albori dell'elettronica, compiendo quelle funzioni oggi quasi interamente realizzate dai transistori.

## 1.5 Gli urti e l'eccitazione atomica

In un tubo termoionico gli elettroni possono interagire con gli atomi del gas con urti elastici o anelastici. Ricordiamo brevemente le definizioni per questi due tipi di urto:

Urto elastico: è una collisione in cui l'energia cinetica totale dei due corpi interessati si conserva, cioè quella dopo la collisione è uguale a quella precedente l'urto. Per avere un urto elastico bisogna quindi che non ci sia conversione di parte dell'energia cinetica in altre forme di energia. Nell'urto elastico di un elettrone con un atomo, che è molto più pesante (ricordiamo che l'elettrone ha una massa circa 2000 volte minore di quella del protone, e quindi dell'atomo di idrogeno che è il più leggero), non c'è trasferimento di energia, in quanto questo è proporzionale al rapporto tra le masse; in pratica, l'elettrone cambia direzione senza cambiare il valore del suo momento. Vedremo quindi che questo tipo di urto è influente nell'esperimento che ci interessa.

Urto anelastico: è l'urto in cui l'energia meccanica totale non si conserva, ma si trasforma in altri tipi di energia (in Meccanica ad esempio, di solito si trasforma in calore, a seguito dell'attrito tra i due corpi collidenti). Il processo a cui siamo interessati in questa esperienza è proprio l'urto anelastico in cui l'elettrone cede una parte della sua energia ad un atomo di mercurio; questa energia si trasforma in energia di eccitazione e l'atomo fa una transizione ad uno stato quantico di energia maggiore (stato eccitato). Secondo le regole della Meccanica Quantistica, la cessione di energia può quindi avvenire solo se è pari alla differenza di energia tra l'orbitale in cui si trova l'elettrone e uno successivo.

Lo stato eccitato è di solito temporaneo, dopo un certo tempo l'atomo si diseccita, emettendo energia sotto forma di radiazione; un atomo di mercurio, ad esempio, da uno stato eccitato torna allo stato fondamentale emettendo radiazione alla lunghezza d'onda di 235.6 nm, che corrisponde ad un'energia di:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{235,6 \cdot 10^{-9}} = 8,44 \cdot 10^{-19} J$$

cioè circa 5 eV.

### 2.1 Il metodo di Franck-Hertz

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; esso combina quindi la fisica delle collisioni con la spettroscopia ottica. Franck and Hertz usarono un tubo a vuoto a tre elettrodi, un triodo, consistenti in un catodo (K), un anodo (A) ed una griglia (G) interposta tra loro. La figura 2.1 ne mostra lo schema. Il tubo è riempito di vapore di mercurio a bassa pressione (circa 10-2 mbar) mantenuta costante tramite un controllo di temperatura. Gli elettroni emessi dal catodo riscaldato sono accelerati tra C e G da una differenza di potenziale  $U = U_B$ , quindi ricevono un'energia pari a  $eU_B$ ; la griglia ha una struttura tale da permettere ad un gran numero di elettroni di attraversarla (altrimenti sarebbero tutti catturati dalla griglia). Al di là della griglia si trova il collettore, tenuto a tensione leggermente inferiore.

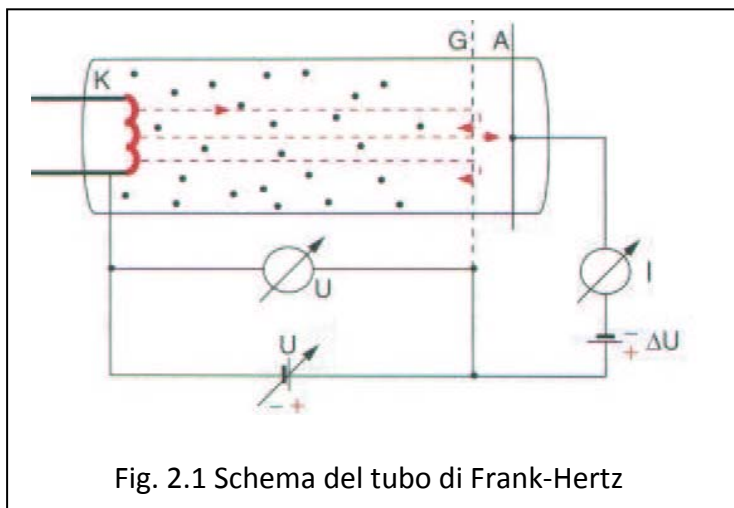


Fig. 2.1 Schema del tubo di Frank-Hertz

Un contro-voltaggio  $\Delta U \approx E_G$  viene applicato tra G ed A, il che significa che A è carico negativamente rispetto a G, pertanto solo elettroni con energia maggiore di  $eU_G$  possono raggiungere l'anodo e produrre corrente. Se non ci fosse contro-voltaggio applicato, tutti gli elettroni raggiungerebbero l'anodo e non si potrebbe misurare nessuna modulazione della corrente. La figura 2.2 mostra una tipica misura della corrente anodica in funzione del potenziale accelerante: appena  $U_B$  supera  $U_G$  la corrente aumenta al crescere di  $U_B$ , ma quando raggiunge il valore  $U_B \approx 4.9$  eV decresce di colpo, poi riprende a crescere fino a che  $U_B \approx 2 \times 4.9$  eV, quindi l'oscillazione si ripete.

## 2.2 Il principio fisico

Misurando la corrente sul collettore si osserva che quando il potenziale accelerante raggiunge 4.9 Volt la corrente diminuisce rapidamente, indicando l'improvviso sorgere di un fenomeno che priva gli elettroni di sufficiente energia per cui non possano più raggiungere il collettore. Questa diminuzione è attribuita a collisioni anelastiche tra gli elettroni accelerate e gli elettroni atomici del mercurio. L'improvviso apparire del fenomeno porta a ritenere che gli elettroni del mercurio non possono accettare trasferimento di energia finché questa raggiunga la soglia per innalzarli ad un livello eccitato. Questo stato eccitato di 4.9 Volt corrisponde ad una riga nello spettro di emissione ultravioletta del mercurio a 254 nm (un fotone di 4.9eV). La corrente raccolta ha delle brusche diminuzioni in corrispondenza di multipli di 4.9 volts poiché un elettrone accelerato che perde 4.9 eV di energia in una collisione può essere ri-accelerato e produrre un'altra collisione a 4.9 volts, e così via.

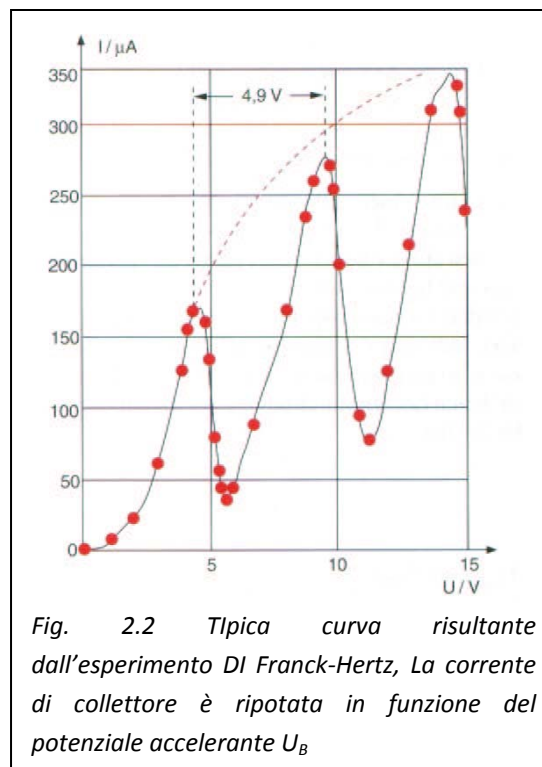
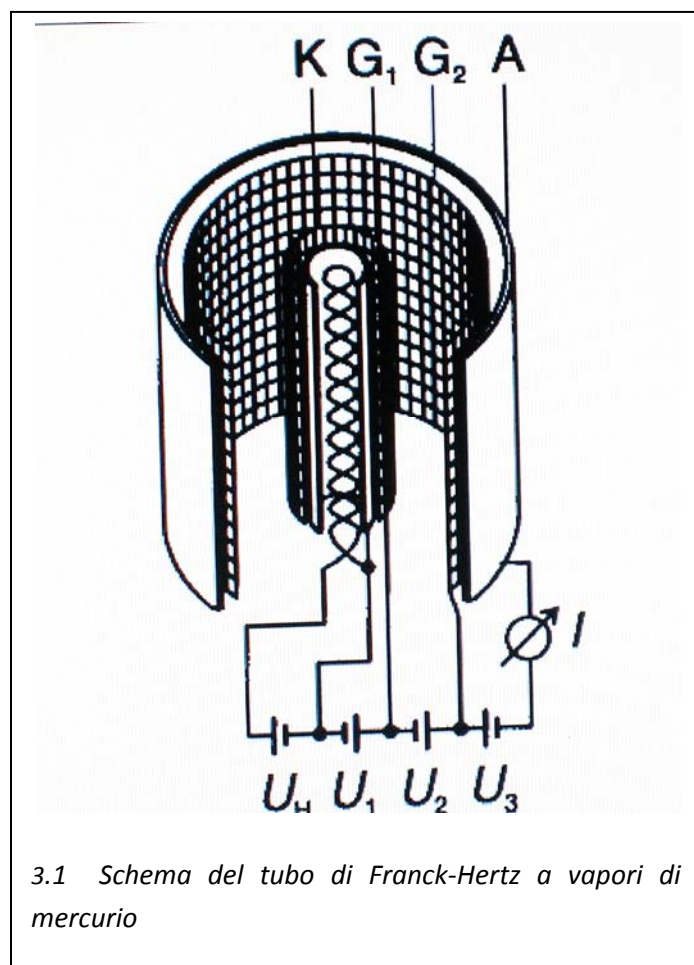


Fig. 2.2 Tipica curva risultante dall'esperimento DI Franck-Hertz, La corrente di collettore è riportata in funzione del potenziale accelerante  $U_B$

La interpretazione di questa osservazione è consistente con l'ipotesi che gli elettroni di circa 5eV di energia cinetica urtano anelasticamente gli atomi di mercurio e quindi trasferiscono la loro energia per una eccitazione discreta.

### 3.1 La strumentazione

Il tubo di vetro è un tetrodo, esso contiene quattro elettrodi cilindrici (vedere Fig. 2.1). Il catodo K, contenente il filamento caldo, 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



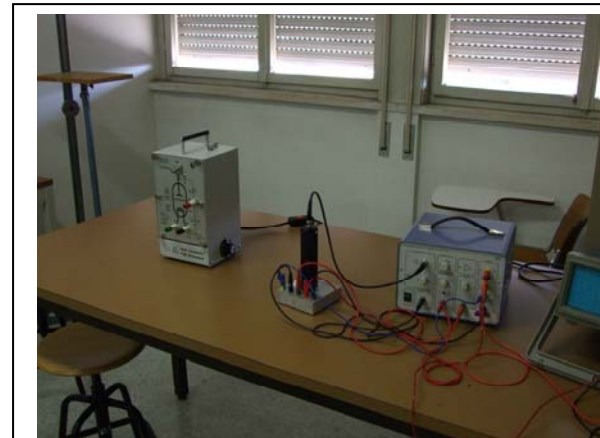
3.1 Schema del tubo di Franck-Hertz a vapori di mercurio

maggiore ed infine dal collettore A che circonda i tre elettrodi precedenti. Per evitare che ci siano 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  $G_1$  e 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 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  $U_2$  e di segno opposto, 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 della corrente.

La strumentazione è completata da un dispositivo per il riscaldamento da connettere al filamento, un alimentatore per fornire le tensioni agli elettrodi, un sensore di temperatura, un oscillografo per registrare la corrente, i cavi di collegamento. L'andamento della corrente può essere registrato su carta con un plotter collegato all'oscillografo.

Una visione di insieme della strumentazione è mostrata in Fig.3.3, mentre la Fig. 3.4 mostra il pannello di controllo dell'alimentazione.



13

## 3.2 Come si prepara l'esperimento

Per preparare la misura i passi da seguire sono:

- Assicurarsi che l'interruttore dell'alimentazione del tetrodo sia aperto.
- Collegare il forno di riscaldamento ai morsetti da 4mm 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 4mm (serve a schermare il tubo dalle interferenze dei campi elettromagnetici esterni).
- Inserire il connettore DIN del sensore di temperatura nella boccola **(b)** dell'alimentatore ed il connettore DIN del tubo nella boccola **(c)**

Per il riscaldamento:

Bisogna prestare attenzione al fatto che 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 forno. Le operazioni da fare sono:

- 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 180°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.

### 3.3 Osservazione preliminare

La curva di Franck-Hertz si può ricavare anche manualmente. Per una rapida visualizzazione, ad esempio per ottimizzare i parametri sperimentali, si può utilizzare un oscillografo a doppia traccia, se invece si vuole registrare la curva su carta è preferibile utilizzare un plotter XY.

#### **Procedimento manuale:**

- Predisporre il funzionamento manuale ruotando il selettore in posizione MAN ed aumentare 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.

#### **Rappresentazione sull'oscillografo:**

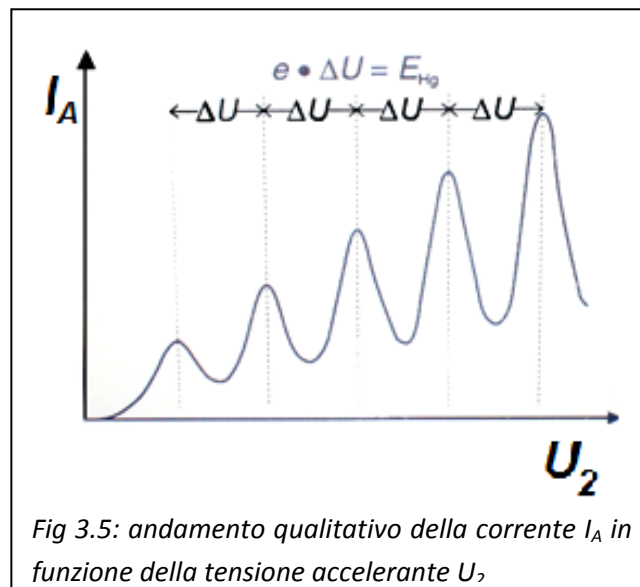
- a) Collegare l'uscita  $U_2/10$  al canale II dell'oscilloscopio (0.5 V/DIV) e l'uscita  $U_A$  al canale I (2V/DIV). Utilizzare l'oscilloscopio in modalità XY



### 3.4 La misura

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 Volt, 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 tetrodo e raggiunge un valore massimo quando, in prossimità della griglia  $G_2$ , gli elettroni hanno acquistato un'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 l'accelerazione è sufficientemente elevata, essi ricevono dal campo elettrico l'energia necessaria per eccitare altri atomi di mercurio. Tutto questo comporta che a una tensione  $U_2$  maggiore della precedente, la corrente  $I_A$  presenta un altro massimo. L'andamento qualitativo della corrente  $I_A$  in funzione di  $U_2$  è quella della figura 3.5:



### 3.5 Ottimizzazione della curva di Franck-Hertz

Si inizia applicando una tensione di controllo  $U_1 = 1.5V$ , una tensione frenante  $U_3 = 1.5V$  e registrando la curva di Franck-Hertz con questi valori. Gli andamenti da utilizzare per la scelta dei parametri  $\theta_s$ ,  $U_1$  e  $U_3$  sono raffigurati nella Figura 3.6.

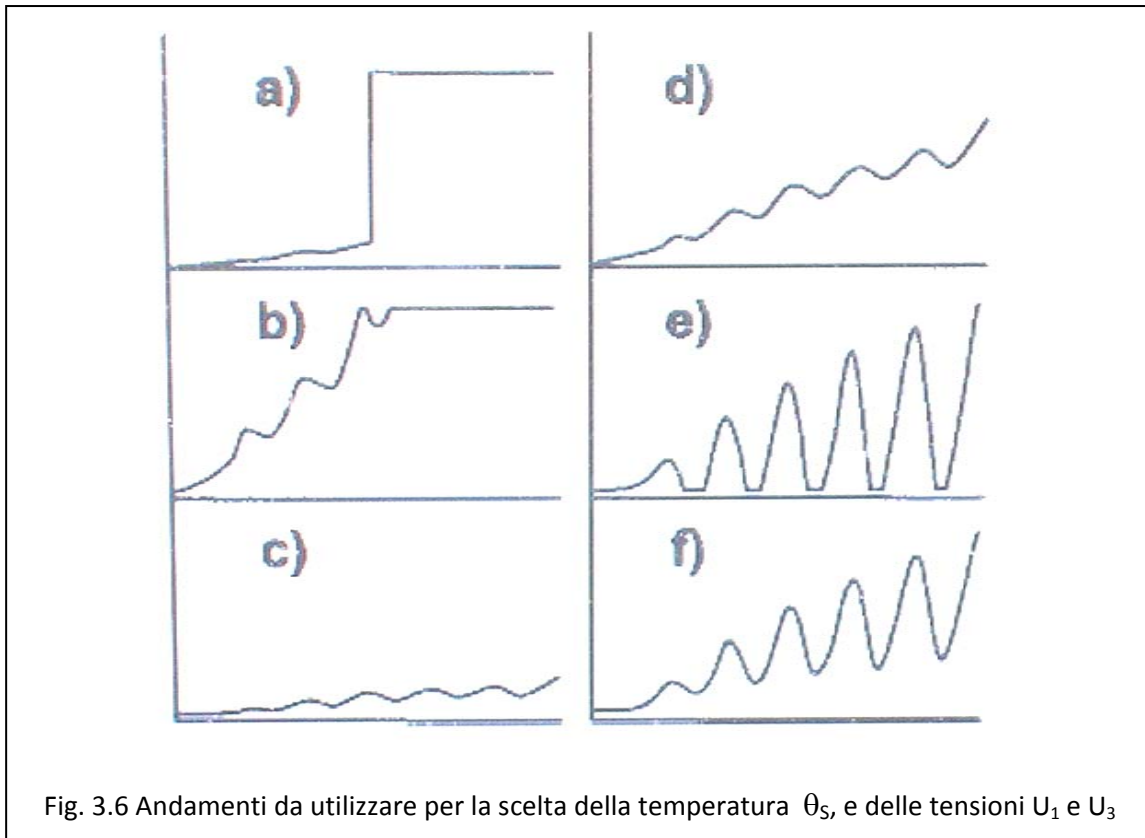


Fig. 3.6 Andamenti da utilizzare per la scelta della temperatura  $\theta_s$ , e delle tensioni  $U_1$  e  $U_3$

#### a) Ottimizzazione della temperatura

Se la curva aumenta bruscamente (vedere la curva a) nella Fig. 3.6) ed attraverso l'apertura del forno si può vedere la scarica del gas contenuto nel tubo:

- 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  $\theta_s$  della temperatura (per esempio di  $5^\circ C$ ) ed aspettare qualche minuto in modo che il sistema possa raggiungere l'equilibrio termico.

### 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 (vedere la curva b) nella Fig. 3.6) perché l'amplificazione della corrente raggiunge valori di saturazione con valori inferiori a 30 V diminuire  $U_1$  in modo che la curva abbia una pendenza simile a quella della curva d ) in Fig. 3.6
- Se la curva è troppo piatta, cioè se la corrente di collettore  $I_A$  risulta sempre inferiore a 5nA (vedere la curva c) nella Fig. 3.6), aumentare  $U_1$  (massimo 4.8V) in modo che la curva abbia una pendenza simile a quella della curva d ) in Fig. 3.6
- Dopo l'aumento di  $U_1$ , se la curva, se la curva è ancora piatta, ridurre la temperatura  $\theta_s$  del forno mediante la vite di regolazione del potenziometro.

### c) Ottimizzazione della tensione $U_3$

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

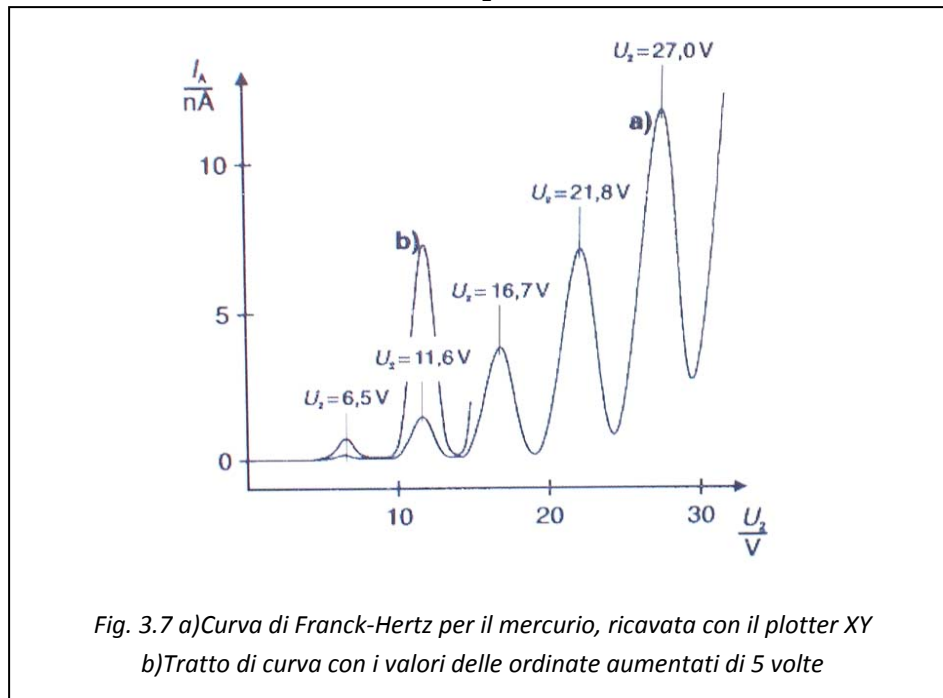
- Se i massimi e i minimi della curva sono poco definiti (vedere la curva d) nella Fig. 3.6) aumentare alternativamente la tensione frenante  $U_3$  (massimo 4.5V) e successivamente la tensione di controllo  $U_1$  fino ad ottenere l'andamento mostrato dalla curva f ) in Fig. 3.6
- Se i minimi della curva vengono tagliati in corrispondenza del limite inferiore (vedere la curva e) nella Fig. 3.6) diminuire alternativamente prima la tensione frenante  $U_3$  e successivamente la tensione di controllo  $U_1$  fino ad ottenere l'andamento mostrato dalla curva f ) in Fig. 3.6

### 3.6 Esempio di interpretazione dei risultati

La misura consiste nel determinare le distanze  $x$  tra i minimi (o massimi) della curva ottenuta; per visualizzare meglio il primo massimo aumentare la sensibilità dell'ingresso Y e ripetere la registrazione. Per esempio con i valori:

$$U_1 = 1.58 \text{ V}, U_3 = 3.95 \text{ V}, \theta_s = 180^\circ\text{C}$$

si ottiene un andamento come quello mostrato nella figura 3.7e 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 dagli elettroni agli atomi di mercurio pari a

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

Questo risultato è confrontabile con il valore standard di  $4.9 \text{ V}$  e rappresenta l'energia necessaria per trasferire gli atomi di mercurio dal livello fondamentale  $^1S_0$  al primo livello  $^3P_1$

L'energia cinetica degli elettroni in corrispondenza della griglia G2 si può calcolare come segue:

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

Secondo questa relazione, il primo massimo della corrente di collettore si dovrebbe avere quando  $U_1 + U_2 = 4.9 \text{ V}$ , mentre sperimentalmente si trova  $U_1 + U_2 = 8.1 \text{ V}$ ; la differenza tra i due valori rappresenta l'effettivo potenziale di contatto tra il catodo K e la griglia G2. 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 valore di estrazione delle cariche dovuto ai materiali del catodo e della griglia. In questo caso assumono un valore 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 stesso.