

Esperienza di Franck ed Hertz.

15 febbraio 2016

1 Materiale occorrente

- Tetrodo a gas neon ELWE U8482230
- Sistema di alimentazione e lettura di corrente ELWE
- Oscilloscopio

2 Obiettivo

Obiettivo dell'esperienza è dimostrare la struttura discreta dei livelli energetici dell'atomo di neon e di stimarne l'energia di eccitazione mediante lo studio degli effetti dissipativi negli urti anelastici di elettroni su atomi di neon.

3 Descrizione dell'apparato sperimentale e suo funzionamento.

L'esperimento utilizza un tubo elettronico riempito di gas neon a bassa pressione (circa 10 mBar) in cui sono disposti 4 elettrodi in una configurazione che viene genericamente denominata tetrodo a gas. I 4 elettrodi sono circolari piani e paralleli e sono chiamati rispettivamente catodo, griglia controllo, griglia anodo e collettore. Il catodo è posto a stretto contatto con un filamento riscaldante che per effetto Joule si porta al calor rosso. Per effetto termoionico il catodo emette elettroni di energia trascurabile rispetto alle altre energie in gioco. (La costante di Boltzmann vale circa $8.6 \cdot 10^{-5}$ eV/K. Al calor rosso, che è attorno ai 1000 K, $kT \sim 0.1$ eV). La griglia controllo e la griglia anodo sono due conduttori realizzati da una fitta rete di fili molto sottili tali da consentire il passaggio della quasi totalità degli elettroni emessi dal catodo ed allo stesso tempo di definire due piani equipotenziali. Il collettore, infine, è un conduttore circolare piano la cui funzione è raccogliere gli elettroni che su di esso arrivano e di definire un ulteriore piano equipotenziale.

Il tetrodo a gas è collegato a 4 generatori di tensione come in figura 1.

- U_F è la tensione applicata ai capi del filamento e ne regola la temperatura cui è proporzionale in ultima analisi la quantità di elettroni emessa dal catodo per unità di tempo (emissività).
- U_G è la differenza di potenziale applicata fra griglia controllo e griglia catodo allo scopo di stabilire un campo elettrico sulla superficie del catodo in modo da aumentarne l'emissività.
- U_A è la differenza di potenziale applicata fra catodo ed griglia anodo allo scopo di stabilire un campo elettrico accelerante per gli elettroni che emergono dalla griglia controllo verso la griglia anodo.
- U_E è la differenza di potenziale applicata fra griglia anodo e collettore allo scopo di stabilire un campo elettrico frenante per gli elettroni che emergono dall'anodo verso il collettore.

Il collettore è collegato al generatore di tensione mediante un amplificatore a transimpedenza che fornisce in uscita un segnale in tensione proporzionale alla corrente di collettore I_C .

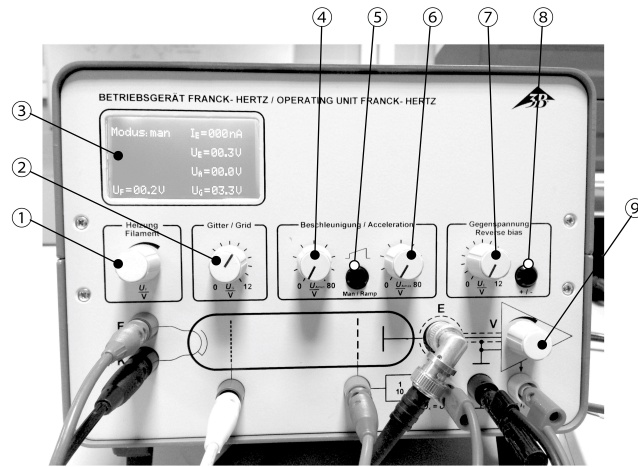
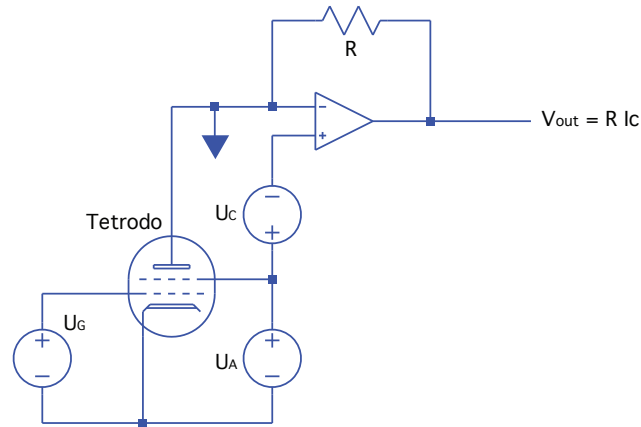


Figura 1: In alto: schema dell'apparato sperimentale per l'esperimento di Franck Hertz. In basso: sistema di alimentazione e misura.

1. Manopola multigiro di regolazione della tensione di filamento U_F .
2. Manopola di regolazione della tensione griglia di controllo U_G .
3. Schermo per la presentazione delle tensioni e della corrente di collettore.
4. Manopola di regolazione della tensione minima della griglia anodo.
5. Pulsante di commutazione fra modalità manuale e modalità rampa della tensione della griglia anodo U_A (controllare sullo schermo l'avvenuta commutazione da una modalità all'altra).
6. Manopola di regolazione della tensione della griglia anodo U_A se in modalità manuale o della tensione massima della griglia anodo se in modalità rampa.
7. Manopola di regolazione della tensione di collettore U_E .
8. Pulsante di commutazione della polarità della tensione di collettore U_E .
9. Guadagno dell'amplificatore transimpedenza.

4 Procedura operativa

4.1 Accensione del dispositivo

Per non danneggiare il tetrodo a gas è necessario seguire la seguente procedura di accensione:

1. Prima di accendere l'alimentatore girare tutte le manopole in verso antiorario fino a fondo corsa (ovvero come dicono gli anglosassoni *Fully Counter ClockWise* FCCW). In questa posizione tutte le differenze di potenziale sono poste a zero.
2. Accendere l'alimentatore tramite l'interruttore generale posto sul lato posteriore e ruotare la manopola multigioco che regola U_F fino a che il valore riportato sul display non indichi 8V. Aspettate una trentina di secondi fintanto che il filamento ed il catodo non raggiungano l'equilibrio termico.
3. Pigiare il pulsante di commutazione fra modalità manuale e modalità rampa della tensione della griglia anodo U_A . (Sinceratevi che sul display scompaia l'indicazione della rampa).
4. Ruotate la manopola di destra del gruppo U_A e portate la tensione U_A a 70 V. In questa configurazione, in assenza di neon nel tubo a gas, gli elettroni arriverebbero all'anodo con un'energia cinetica di 70 eV.
5. Ruotate lentamente la manopola U_G fin tanto che non si osservi una debole luce arancione all'interno del tetrodo a gas.

4.2 Osservazione degli effetti degli urti anelastici elettrone neon

1. Osservate il variare della struttura luminosa al variare di U_A ed al variare di U_G . Trascrivete le tensioni di U_A alle quali compare nelle immediate vicinanze della griglia anodo la prima banda luminosa poi la seconda e la terza.
2. Attivate il generatore di rampa per U_A schiacciando il pulsante 5 posto al centro delle due manopole che regolano U_A e portate U_A massimo al suo
3. Ponete l'oscilloscopio in modalità $X - Y$ ($X = U_G/10$, $Y \propto I_C$) con ed osservate la curva I_C U_A .
4. Regolate il guadagno dell'amplificatore a transimpedenza in modo da non saturarne l'uscita.
5. Agite sulla manopola del potenziale U_E per aumentare il campo frenante e notate il variare della curva I_c vs U_A al variare di U_E .
6. Regolate U_E ed il guadagno dell'amplificatore in modo che i minimi della curva I_c vs U_A si dispongano grosso modo sull'asse $I_C = 0$.
7. Regolate il valore minimo e massimo di U_A in modo da osservare quanti più minimi e massimi della curva I_c vs U_A regolando al tempo stesso il guadagno dell'amplificatore di corrente in modo da non saturare.
8. Disattivate la modalità $X - Y$ dell'oscilloscopio e tornate nella modalità due tracce triggerando sul fronte di salita di U_A ed acquisite le due tracce U_A e I_C per l'analisi dati successiva. Dovreste osservare delle curve simili a quelle riportate in figura 2.
9. Ripetete l'acquisizione descritta al punto precedente diminuendo il valore del potenziale U_E (ovvero diminuendo l'intensità del campo decelerante) fino al valore nullo.
10. Confrontate le tensioni a cui la corrente I_C è massima con le tensioni annotate al punto 1.
11. Analizzare i dati raccolti al punto 9 per determinare i valori di U_A a cui I_C è massimo e minimo a U_E fissato e mostrate mediante un grafico la loro variazione al variare di U_E .
12. Disattivate il generatore di rampa per il potenziale U_A schiacciando di nuovo il bottone nero posto al centro delle due manopole
13. Ruotare in senso antiorario fino alla posizione estrema (FCCW) nell'ordine U_E , U_G , U_A , U_F , spegnere il generatore e l'oscilloscopio.

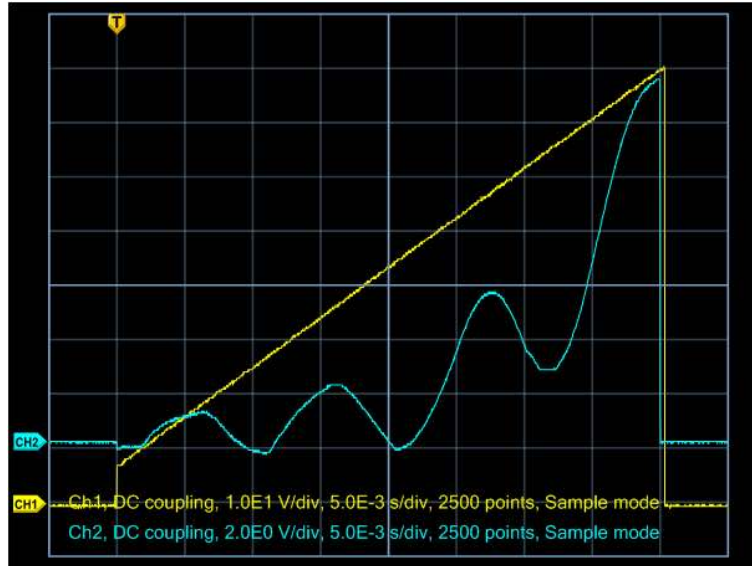


Figura 2: Esempio delle curve U_G (CH1) ed I_C/R (CH2) acquisite al termine dell'esperienza.

5 Interpretazione delle osservazioni

Il catodo riscaldato dal filamento emette elettroni per effetto termoionico. La temperatura del catodo ed il potenziale di griglia controllo U_G determinano, in prima approssimazione la corrente elettronica che fluisce dal catodo verso gli altri elettrodi.

La griglia controllo è fatta in modo tale da lasciar passare tra gli spazi liberi fra i fili della griglia la quasi totalità degli elettroni emessi dal catodo ed allo stesso tempo di fare in modo che il piano su cui essa giace si trovi con buona approssimazione a potenziale costante come se la griglia fosse un conduttore piano.

Nella regione di spazio fra griglia controllo e griglia anodo (la regione visibile nella finestra di osservazione) gli elettroni vengono accelerati dal campo accelerante associato alla differenza di potenziale $U_A - U_G$.

Anche l'anodo è realizzato in modo tale da definire un piano equipotenziale senza ostacolare il flusso degli elettroni. Gli elettroni che superano l'anodo vengono decelerati dal campo elettrico associato alla differenza di potenziale $U_E - U_A$ (ricordiamo che il catodo è a potenziale U_E più basso di U_A) e riescono a giungere sull'elettrodo collettore solo se la loro energia cinetica è superiore a $-e(U_E - U_A)$.

Quest'ultimo campo sarà chiamato in seguito campo analizzatore in quanto permette di stimare la velocità massima degli elettroni che giungono sul piano dell'anodo.

In assenza di collisioni anelastiche con il gas e trascurando l'energia persa dagli elettroni negli urti elastici con il neon, che ha una massa 4 ordini di grandezza maggiore di quella dell'elettrone, possiamo scrivere l'energia cinetica degli elettroni che giungono sul catodo come

$$K = eU_A - W$$

dove la carica dell'elettrone è $-e \sim -1.6 \cdot 10^{-19}$ C e W è il lavoro necessario per estrarre un elettrone dal catodo.

Ci aspettiamo dunque che all'aumentare di U_A aumenti l'energia cinetica degli elettroni che giungono sul piano anodico e dunque aumenti anche la frazione di elettroni in grado di superare il campo analizzatore e giungere sul collettore, in definitiva che a U_E fissato I_C aumenti all'aumentare di U_A .

Il carattere quantistico degli urti anelastici fra elettroni e atomi di gas modificano sostanzialmente questo quadro.

L'atomo di neon presenta uno spettro discreto di livelli energetici riportato schematicamente in figura 3.

Aumentando U_A al di sopra di una certa soglia gli elettroni acquistano un'energia cinetica sufficiente per eccitare gli atomi di neon prima ad uno dei 4 livelli energetici $1s$ e poi ad uno degli stati $2p$ riportati in figura 3 e perdere una frazione significativa della loro energia cinetica.

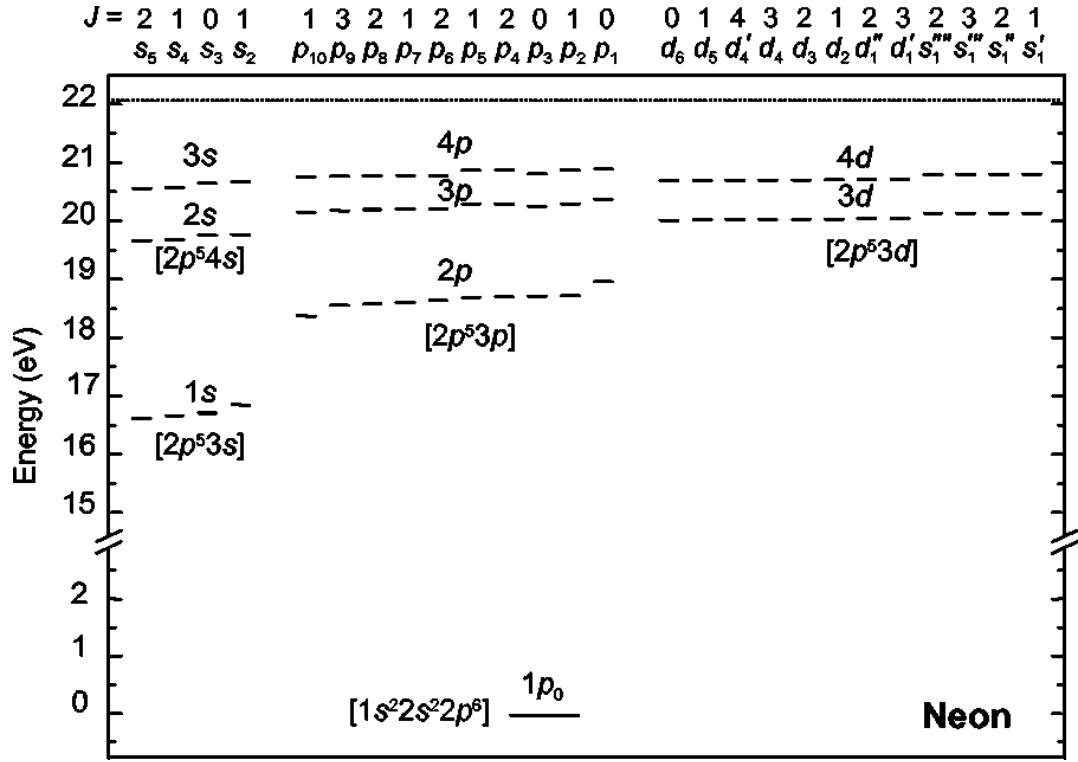


Figura 3: Diagramma dei livelli energetici del neon. Nello stato ad energia minima (stato fondamentale) i dieci elettroni dell'atomo di neon sono disposti nella configurazione caratteristica dei gas nobili $1s^2 2s^2 2p^6$ (ovvero due elettroni nello stato $1s$, due nello stato $2s$ e 6 nello stato $2p$). La differenza di energia fra lo stato fondamentale e lo stato eccitato è riportata in ordinata. Il primo gruppo di 4 livelli ($1s$) si trova ad ~ 16.7 eV sopra il livello fondamentale, il secondo gruppo ($2p$) formato da 10 livelli si trova fra 18.3 eV e 18.9 eV sopra il livello fondamentale (da J.E. Chilton et. al. Phys. Rev. A **61**, 052708).

Quest'ultimo fenomeno è associato all'emissione di luce da parte degli atomi di neon eccitati ai livelli $2p$ che quando si diseccitano al livello $1s$ emettono un fotone nella parte arancione dello spettro.

Guardando attentamente nei pressi dell'anodo (zona in cui la velocità degli elettroni è massima) mentre si aumenta lentamente U_A , si nota dapprima il formarsi di una regione luminosa (fenomeno che coincide grosso modo con il primo massimo di I_C) poi, aumentando ancora U_A , che la regione luminosa si sposta in basso verso la griglia di controllo. Allo stesso tempo I_C diminuisce (provate a dare una spiegazione quantitativa del perché). Aumentando ancora U_A la regione luminosa si distacca dall'anodo ed in questa configurazione, la I_C ha grosso modo un primo minimo segno che la massima frazione degli elettroni ha urtato anelasticamente un atomo ed ha perso troppa energia per eccitare di nuovo il neon. Aumentando ancora U_A la regione luminosa continua a spostarsi verso il basso e la I_C riprende a crescere fin tanto che una nuova luminescenza arancione compare nei pressi dell'anodo, segno che gli elettroni hanno di nuovo energia cinetica sufficiente ad eccitare gli atomi di neon. In questa configurazione la I_C presenta un secondo massimo. Aumentando ancora U_A si osserva un susseguirsi di nuovi massimi e minimi corrispondenti ad altrettante striature luminose di neon.

La spaziatura fra i valori di U_A per cui I_C è massima è approssimativamente pari all'energia necessaria ad eccitare l'atomo di neon dimostrando la struttura discreta dei suoi livelli energetici.