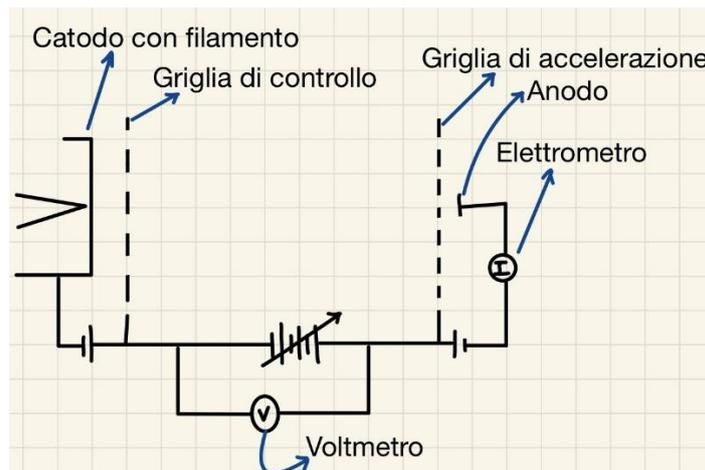


ESPERIENZA DI FRANCK E HERTZ

SCOPO: dimostrazione sperimentale dell'esistenza dei livelli discreti di energia negli atomi.

MATERIALE:

1. Tubo a vuoto con
 - a. Catodo cilindrico con filamento;
 - b. Griglia di controllo (filo sottile avvolto a elica);
 - c. Griglia acceleratrice (griglia metallica cilindrica);
 - d. Anodo metallico concentrico alla griglia acceleratrice;
 - e. Goccia di Mercurio;
2. Batteria a 6 V;
3. Voltmetro;
4. Stufa;
5. Registratore automatico.

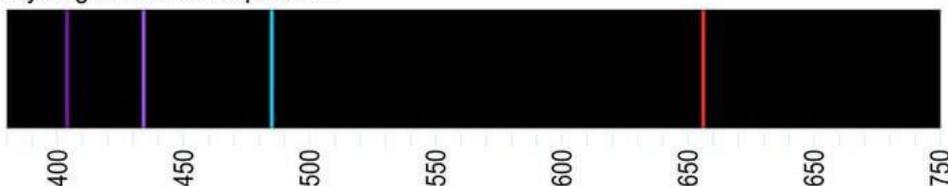


PREMESSA TEORICA

Nella storia dei modelli atomici, il danese Niels Bohr (1885-1962) ha ricoperto un ruolo fondamentale. Grazie ai suoi studi di spettroscopia, Bohr si era reso conto che il precedente modello planetario di Rutherford non riusciva a spiegare gli spettri di emissione atomica. In questo campo, risale al 1908 una legge empirica in grado di individuare, al variare dei parametri m ed n , tutte le righe spettrali dell'idrogeno. Tale relazione è detta legge di Balmer generalizzata, in quanto generalizzazione della legge di Balmer che descriveva le righe spettrali limitatamente alle lunghezze d'onda della luce visibile (nell'immagine).

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ in cui } m < n \text{ e } R_H \text{ è la costante di Rydberg dell'idrogeno } (1,097 \text{ m}^{-1})$$

Hydrogen Emission spectrum



Oltre a contrastare il modello di Rutherford dimostrando che atomi dello stesso elemento dovevano necessariamente essere tutti uguali, la legge di Balmer generalizzata aveva solo un riscontro empirico fino a

quando Bohr non propose la sua ipotesi rivoluzionaria. Nel 1913, rifacendosi all'intuizione di Planck (vedere relazione del 20/02/23), egli suggerì che anche le orbite elettroniche fossero quantizzate. In questo modo, a differenza di quanto sarebbe accaduto nel modello di Rutherford, l'elettrone non avrebbe perso energia irraggiando mentre ruotava attorno al nucleo, a patto che lo facesse in alcune traiettorie particolari dette livelli o stati stazionari.

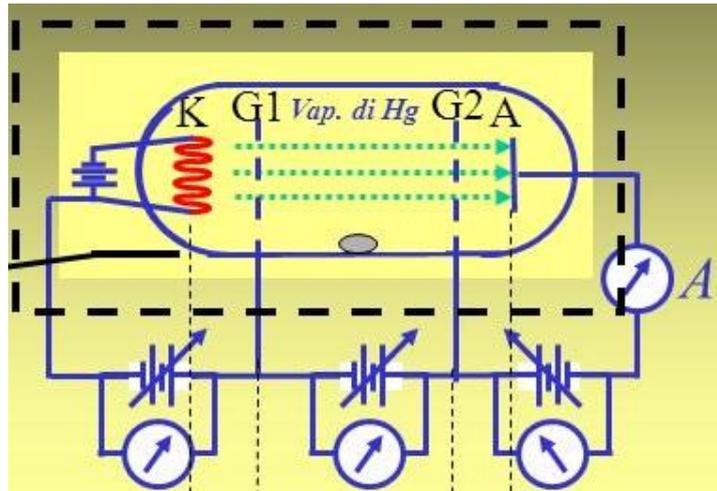
Partendo dall'ipotesi che momento angolare (L) dell'elettrone è quantizzato, si dimostra che anche la misura del raggio e l'energia di ciascuno stato stazionario lo sono. L è un multiplo intero della costante di Dirac ($\hbar = h/2\pi$, dove h è la costante di Planck che vale $6,62 \times 10^{-34}$ Js): $L = n\hbar$. Poiché $L = mrv$, si ha $v = \frac{n\hbar}{2\pi mr}$. Sopponendo per semplicità che le orbite siano circolari, affinché l'elettrone si mantenga stabile, la forza centripeta deve essere controbilanciata da quella elettrostatica esercitata dal nucleo di carica +e, quindi: $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$. Sostituendo e semplificando si ottiene: $r = n^2 \left(\frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \right)$, dove $\frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$ vale $0,53 \times 10^{-10} \text{m} = 0,53 \text{\AA}$ ed è il raggio del primo livello stazionario o raggio di Bohr (r_0). Allo stesso modo, per la conservazione dell'energia si ha che $E = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$ da cui $E = -\left(\frac{me^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \right) \frac{1}{n^2}$, dove $\frac{me^4}{8h^2 \epsilon_0^2}$ vale -13,6eV ed è l'energia del primo stato stazionario (E_0). n è un numero naturale detto numero quantico principale e identifica i vari livelli energetici o shells. Quando un atomo viene eccitato acquisisce energia tale da saltare sulla shell successiva e l'energia assorbita è pari alla differenza tra le energie dei due livelli. Tale stato è metastabile e, presto, l'elettrone ritorna nella posizione iniziale emettendo l'energia assorbita sottoforma di fotone ($E=hf$). Quindi $hf = E_1 - E_2$ da cui $h \frac{c}{\lambda} = \frac{E_0}{n_1^2} - \frac{E_0}{n_2^2}$ e, infine, $\frac{1}{\lambda} = \frac{E_0}{hc} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$. Guarda caso, $\frac{E_0}{hc}$ vale proprio come R_H : l'ipotesi di Bohr confermava la legge empirica presentata all'inizio. Ai fini dei calcoli nella nostra esperienza, occorrerà sapere che l'energia di un fotone con una specifica lunghezza d'onda e che, quindi, con i suoi simili compone una specifica riga spettrale vale: $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12397 \text{ eV\AA}}{\lambda}$ con λ misurata in \AA .

Il modello di Bohr non era ancora completo. Accortosi della struttura fine delle righe spettrali, Sommerfeld ipotizzò che in uno stesso livello energetico vi fossero più orbite con differente eccentricità e introdusse il numero quantico secondario o angolare l, compreso tra 0 e n-1. Infine, l'esperienza di Stern e Gerlach dimostrò che anche il momento magnetico degli elettroni era quantizzato e venne introdotto il numero quantico magnetico m, compreso tra -l ed l. Con questi tre numeri quantici era possibile ipotizzare la conformazione di tutti gli atomi. Il modello di Bohr-Sommerfeld prese il nome di modello quanto-meccanico perché combinava fisica classica e quantistica. Solo più tardi, con l'introduzione del numero quantico di spin, si sarebbe arrivati al modello ad orbitali, quello attualmente più accreditato.

La definitiva dimostrazione sperimentale dell'ipotesi di Bohr venne dato l'anno successivo dall'esperienza condotta da James Franck (1882-1964) e Gustav Ludwig Hertz (1887-1975), che per questo vinsero il Nobel nel 1925. In realtà, i due fisici tedeschi non conoscevano la teoria di Bohr e realizzarono un tale esperimento allo scopo di trovare il confine tra urto elastico e urto anelastico.

In ogni caso, la nostra relazione si occuperà proprio di questa esperienza, replicata dal Physical Science Study Committee. In pratica, Franck e Hertz fecero collidere atomi di gas rarefatto – nel nostro caso Mercurio – con un fascio di elettroni di energia nota e regolabile. Quando un elettrone è lento, scontrandosi con un atomo di gas produce un urto elastico e non trasmette ad esso alcuna energia; ma se l'elettrone è sufficientemente accelerato, allo scontro si avrà un urto anelastico e all'atomo verrà trasferita una parte di energia. In particolare, i due fisici tedeschi si accorsero che non veniva assorbita una quantità qualunque di energia, bensì precisamente quella necessaria per il salto da uno stato energetico ad un altro. Quindi, indipendentemente dall'entrata in gioco o meno dei fotoni, l'ipotesi di Bohr rimaneva valida.

Per realizzare l'esperienza, Franck e Hertz utilizzarono uno speciale tubo a vuoto, simile ad un triodo termoionico e così anche il Physical Science Study Committee. Tale tubo (nell'immagine) è formato da un catodo, una griglia di controllo (G1), una griglia di accelerazione (G2), un anodo. Esso è collegato ad un generatore di corrente e contiene una grossa goccia di Mercurio, che vaporizza a una temperatura di 160°C.



Quando il catodo viene riscaldato da un primo generatore a 6V, emette gli elettroni in seguito accelerati dalla griglia di accelerazione, che per questo ha carica positiva. La griglia di controllo a regola la tensione del secondo generatore, che interessa il tratto tra sé stessa e la griglia acceleratrice; in questo modo, essa permette di variare l'accelerazione degli elettroni. Grazie al voltmetro collegato a questo tratto di circuito, possiamo conoscere con precisione l'energia degli elettroni accelerati. Infine, avendo una carica inferiore della suddetta griglia di accelerazione grazie a un terzo generatore, l'anodo raccoglie solo gli elettroni sopra una certa energia – nel nostro caso 1eV. L'elettrometro connesso all'anodo rileverà, quindi, il numero di elettroni che hanno subito urti elastici e non hanno perso parte della loro energia; da questo, possiamo ricavare il numero di elettroni che hanno, invece, generato urti anelastici.

PROCEDIMENTO

1. Costruire il circuito come descritto nella premessa teorica, impostando l'elettrometro su $10^{-8}A$, perché la presenza degli atomi di Mercurio abbasserà notevolmente la corrente;
2. Posizionare il tubo collegato al circuito in una stufa e portarlo alla temperatura di $160^{\circ}C$ in modo che il Mercurio vaporizzi e i suoi atomi si diffondano in tutto il tubo;
3. Aumentare gradualmente la tensione acceleratrice fino ad arrivare al massimo consentito (30V) e, nel frattempo, osservare cosa accade alla corrente;
4. Collegare al circuito un registratore automatico che permette di disegnare la caratteristica tensione-corrente del tubo e ripetere il punto 3;
5. Sfruttando la carta millimetrata, misurare le distanze tra i picchi e calcolare la media dei valori;
6. Trarre le opportune conclusioni.

OSSERVAZIONI

Attraverso l'utilizzo dell'elettrometro, si misura la corrente nel tubo a vuoto al variare della tensione acceleratrice, misurata con il voltmetro.

Si osserva che:

- All'inizio entrambi gli strumenti misurano valori nulli;
- Aumentando la tensione acceleratrice, in un primo momento non c'è corrente;
- Continuando ad aumentare la tensione acceleratrice, la corrente inizia ad aumentare;
- Se si continua ad aumentare con continuità e lentamente la tensione, la corrente aumenta;



→ Al contrario, se si diminuisce la tensione gradualmente, la corrente diminuisce fino ad arrivare a zero.

Si introducono gli atomi di Mercurio sul percorso degli elettroni mettendo il tubo a vuoto in una stufa che permette di riscaldarlo a ca 160°C. Gli atomi di Mercurio evaporano dalla goccia e si diffondono in tutto il tubo. Quando vengono in contatto con le parti fredde, gli atomi evaporati condensano e riscendono verso la goccia.

Aumentando la tensione acceleratrice, ci si aspetta che non ci sia corrente fin quando gli elettroni non hanno abbastanza energia per oltrepassare la barriera di potenziale. Aumentando, poi, la tensione acceleratrice ci si aspetta che la corrente aumenti. Essendoci gli atomi di Mercurio tra le griglie, gli elettroni urtando gli atomi di Mercurio non dovrebbero cedere apprezzabilmente energia a quest'ultimi, perché si tratta di urti elastici. Quando, però, si aumenta ancora la tensione, gli elettroni, passando da una griglia all'altra, hanno abbastanza energia da poter cedere un pacchetto di energia agli atomi di Mercurio, perdendo così l'energia necessaria per oltrepassare la barriera di potenziale. Infine, in corrispondenza di questo valore della tensione, ci si aspetterebbe una notevole caduta della corrente anodica.

Eseguendo la stessa osservazione iniziale, si nota che inizialmente si ripetono le stesse osservazione:

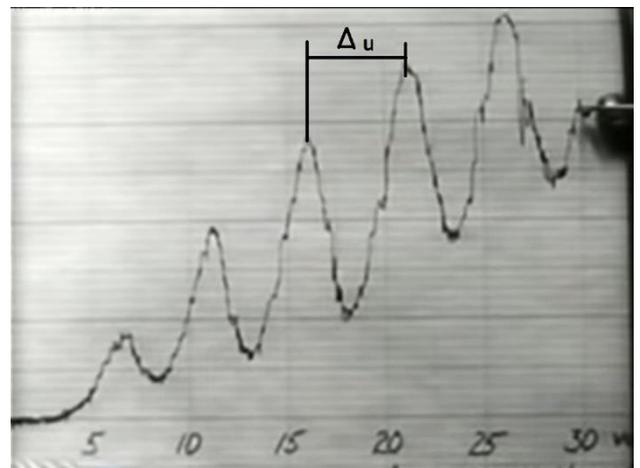
- All'inizio entrambi gli strumenti misurano valori nulli;
- Aumentando la tensione acceleratrice, in un primo momento non c'è corrente;
- Continuando ad aumentare la tensione acceleratrice, la corrente inizia ad aumentare.

Ad un certo punto, però, si osserva una caduta improvvisa di corrente. Se si smette di aumentare la tensione acceleratrice, la corrente ricomincia a salire. Continuando, poi, ad aumentare la tensione, si verifica lo stesso fenomeno:

- La corrente aumenta
- Caduta di potenziale
- La corrente ricomincia ad aumentare.

Servendosi di un registratore automatico, si può riprodurre l'esperienza ottenendo dei dati quantitativi. Il dispositivo, infatti, produce un grafico della corrente anodica in funzione della tensione acceleratrice: in questo modo si possono misurare i valori dell'energia in corrispondenza dei quali si hanno le cadute di corrente. Una volta ottenuto il grafico, si può misurare la distanza tra i picchi:

Tra il 1° e il 2°	4,5 eV
Tra il 2° e il 3°	4,8 eV
Tra il 3° e il 4°	4,9 eV
Tra il 4° e il 5°	5,1 eV
MEDIA	4,9 eV



Essendo gli intervalli all'incirca uguali, si possono trarre due conclusioni distinte:

1. Gli atomi di Mercurio possono assorbire solo pacchetti di energia multipli di 4,9 eV.

2. Gli elettroni urtano talmente tante volte contro gli atomi di Mercurio che quando raggiungono un certo valore non riescono a salire ancora d'energia; perciò, cedono la loro energia ad un atomo di Mercurio.

Questa seconda ipotesi è molto più plausibile: gli elettroni, infatti, quando vengono accelerati fino ad un'energia di 5 eV nel tempo in cui arrivano vicino alla griglia 2, compiono degli urti anelastici con gli atomi di Mercurio vicino alla griglia e gli cedono la loro energia. Non avendo abbastanza energia per oltrepassare la buca di potenziale, la loro energia non viene rilevata dall'elettrometro; perciò, si osserva una caduta di corrente. Quando si aumenta la tensione acceleratrice, la distanza che un elettrone deve percorrere per arrivare a 5 eV è minore, quindi, gli urti anelastici avvengono prima. Questo spiega l'andamento del grafico.

Da ciò si conclude che il più piccolo pacchetto di energia che un atomo di Mercurio può accettare è di 4,9 eV.

Se si utilizza la relazione tra l'energia di un fotone e la lunghezza d'onda della luce è possibile trovare l'energia del fotone:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12397 \text{ eV}\text{\AA}}{\lambda} = \frac{12397 \text{ eV}\text{\AA}}{2537 \text{\AA}} = 4,9 \text{ eV}$$

Dal risultato ottenuto si può dire che un atomo è capace di assorbire questa quantità di energia dall'urto con un elettrone e di perdere la stessa quantità di energia con l'emissione di un fotone.

CONCLUSIONI

Quando Franck e Hertz avevano realizzato l'esperimento, non conoscevano la teoria di Bohr. Tuttavia, i due scienziati sperando di trovare il confine tra l'urto elastico e quello anelastico, cioè l'energia minima degli elettroni per ottenere la luce, avevano con il loro esperimento confermato la teoria di Bohr secondo cui:

- Il sistema elettronico degli atomi può stare solo in diversi stati discreti di energie;
- L'emissione di luce avviene se un atomo è stato eccitato in uno stato quantico più elevato e ritorna emettendo luce allo stato fondamentale.

La prima osservazione qualitativa degli atomi di Mercurio nel tubo a vuoto conferma il postulato teorico secondo cui gli elettroni possono cedere agli atomi solo pacchetti di energia di determinata grandezza.

L'osservazione quantitativa, infine, conferma ancora una volta l'esattezza della teoria: il più piccolo pacchetto di energia che un atomo di Mercurio può accettare è di 4,9 eV. Questo risultato è confermato dalla relazione esistente tra energia e lunghezza d'onda del fotone emesso.

Il fatto che la distanza tra due picchi consecutivi non sia esattamente uguale ma simile è dovuta al fatto che il voltmetro non misura le tensioni proprie dei componenti circuitali.

FONTI

Esperienza di Franck e Hertz realizzata dal PHYSICAL SCIENCE STUDY COMMITTEE:

<https://www.youtube.com/watch?v=CYLalgh83C0&list=PLrrEI0HpCEBHMPawoLgSGFVrSX8SoAl1i&index=22>