

Misura sperimentale della costante di Planck

Esperienze con i raggi catodici e misura sperimentale della costante di Planck.

Materiali:

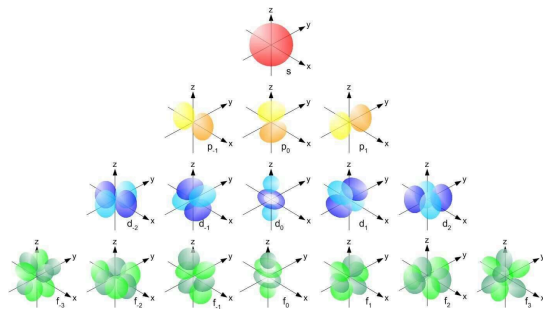
Rocchetto di Ruhmkorff per alimentare dei tubi catodici (uno con all'interno una croce di Malta, uno con all'interno una ventola, e un tubo catodico con un'estremità più larga, e una serie di tubi catodici con all'interno vari gas), un supporto di plastica con 6 led, un treppiede per sostenere il supporto, dei cavi e un tester.



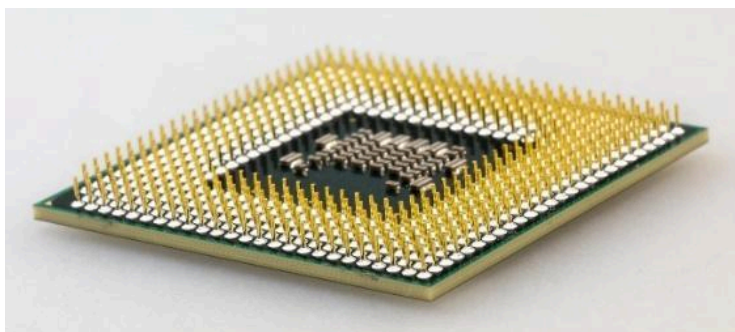
Premessa teorica:

Un ruolo chiave nella nostra esperienza di laboratorio lo svolgerà l'elettrone. L'elettrone è una particella subatomica con carica negativa pari a $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ che è esattamente opposta a quella del protone; mentre la sua massa, pari a circa $9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$, è estremamente piccola rispetto alle altre particelle che compongono l'atomo.

Dal punto di vista quantistico, l'elettrone è caratterizzato da uno spin di $\pm \frac{1}{2}$, il che lo classifica come un fermione, e obbedisce al principio di esclusione di Pauli. Questo significa che due elettroni non possono occupare lo stesso stato quantico all'interno dello stesso sistema, una proprietà che ha conseguenze fondamentali nella struttura atomica e nella formazione delle molecole. Nell'atomo, gli elettroni si trovano in orbitali intorno al nucleo, distribuiti in livelli energetici distinti, che definiscono le proprietà chimiche dell'elemento. Gli elettroni di valenza, ovvero quelli negli orbitali più esterni, determinano il modo in cui un atomo interagisce con altri, formando legami chimici e definendo la reattività.



Gli elettroni sono anche i protagonisti dei fenomeni elettrici e magnetici. La loro capacità di muoversi nei materiali, soprattutto nei conduttori, è alla base del flusso di corrente elettrica. Nei semiconduttori, il controllo preciso del loro movimento ha permesso lo sviluppo dell'elettronica moderna, dai transistor ai microprocessori, rendendo possibile la rivoluzione tecnologica che caratterizza il nostro tempo. Inoltre, il comportamento degli elettroni nei materiali magnetici è alla base del funzionamento di molti dispositivi come motori elettrici e hard disk. In particolare, il loro comportamento all'interno dei semiconduttori sarà essenziale in questa esperienza di laboratorio.



I LED (Light Emitting Diodes) o fotodiodi sono dispositivi semiconduttori in grado di emettere radiazione quando attraversati da una corrente elettrica; questo fenomeno, avviene grazie alla ricombinazione di elettroni e lacune all'interno del materiale semiconduttore, poiché equivale alla combinazione di elettrone e positrone (il cui annichilamento provoca un'emissione di luce). Il funzionamento dei LED si basa sulle proprietà di questi materiali, e sulla struttura dei diodi. I diodi sono formati da due diverse regioni, la prima ricca di lacune, chiamata "p", e la seconda ricca di elettroni liberi, chiamata "n". Quando viene applicata una tensione, gli elettroni della regione n e le lacune della regione p si muovono verso la giunzione. In questa zona si verifica la ricombinazione, un processo in cui un elettrone occupa una lacuna. Questa transizione rilascia energia sotto forma di fotoni, la cui lunghezza d'onda dipende dal divario energetico del materiale semiconduttore utilizzato. Tale lunghezza d'onda definisce il colore della luce emessa.



La capacità di ottenere diverse lunghezze d'onda rende i LED estremamente versatili, consentendo loro di coprire un'ampia gamma dello spettro elettromagnetico. Il colore della luce emessa non è l'unico punto di forza dei LED. Tra le loro caratteristiche principali spiccano l'efficienza energetica, poiché convertono la maggior parte dell'energia elettrica in luce con perdite minime sotto forma di calore, e la lunga durata, che può raggiungere decine di migliaia di ore di funzionamento. Inoltre, la compattezza dei LED li rende ideali per un'ampia gamma di applicazioni. I LED hanno rivoluzionato numerosi settori grazie alla loro efficienza e versatilità. Sono ampiamente utilizzati nell'illuminazione, come nelle lampadine a LED e nei sistemi di illuminazione stradale, ma trovano applicazione anche nell'elettronica, ad esempio come indicatori luminosi, nei display e nei telecomandi a infrarossi.



I tubi a raggi catodici, detti anche tubi di Crookes, sono contenitori di vetro sigillato, al cui interno viene creato un quasi vuoto, in cui è presente soltanto una minima quantità di gas. All'interno del tubo sono collocati due elettrodi metallici, un catodo (negativo) e un anodo (positivo), collegati a un generatore di alta tensione. Quando si applica una differenza di potenziale elevata tra gli elettrodi, si osserva che il gas all'interno del tubo, sebbene rarefatto, comincia a emettere luce e, in condizioni di vuoto sufficientemente alto, emergono i raggi catodici, un fascio invisibile che si propaga dal catodo all'anodo.

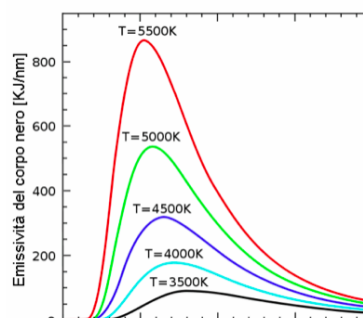


Il comportamento dei raggi catodici fu studiato intensivamente, e i tubi di Crookes furono fondamentali per comprenderne la natura. William Crookes dimostrò che i raggi catodici potevano proiettare un'ombra di oggetti solidi posizionati lungo il loro percorso, indicando che si trattava di un flusso di particelle piuttosto che di onde luminose. Questo flusso di particelle, in seguito

identificato come elettroni da J.J. Thomson nel 1897, rappresentava una scoperta rivoluzionaria, poiché rivelava l'esistenza di una particella subatomica.

Tra le proprietà dei raggi catodici osservate con i tubi di Crookes, si notano: la capacità di produrre ombre, la loro deflessione in presenza di campi magnetici ed elettrici, e il loro effetto meccanico su piccole pale montate su cuscinetti all'interno del tubo, dimostrando che possiedono una massa e un momento. Inoltre, quando i raggi colpiscono una superficie metallica o uno strato di materiale fosforescente generano un bagliore visibile. Questo principio venne sfruttato successivamente per sviluppare i tubi catodici nei display televisivi e negli oscilloscopi. I tubi di Crookes furono anche essenziali per studiare il fenomeno della luminescenza dei gas. Durante il funzionamento del tubo, il gas residuo emette luce di colori diversi a seconda del tipo di gas utilizzato.

L'ipotesi di Planck rappresenta una pietra miliare nella fisica moderna, poiché introduce un nuovo modo di concepire l'energia e i processi di emissione e assorbimento della radiazione elettromagnetica. Formulata da Max Planck nel 1900, questa ipotesi nasce dall'esigenza di spiegare il fenomeno della radiazione di corpo nero, che non poteva essere descritto adeguatamente dalla fisica classica. Planck propose che l'energia emessa o assorbita da un corpo nero non fosse continua, come si pensava fino ad allora, ma quantizzata, ossia suddivisa in pacchetti discreti chiamati "quanti". L'energia di ogni quanto è direttamente proporzionale alla frequenza della radiazione attraverso una costante di proporzionalità, oggi nota come costante di Planck.



La relazione fondamentale introdotta da Planck è espressa dalla formula

$$E = hf \quad (1.1)$$

dove E rappresenta l'energia del quanto, f la frequenza della radiazione e h la costante di Planck.

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

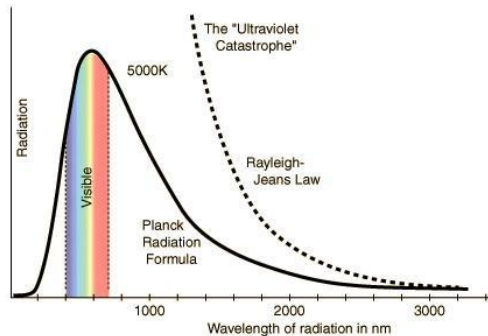
La scoperta di questa quantizzazione dell'energia segnò l'inizio della meccanica quantistica, una delle teorie più rivoluzionarie e fondamentali della fisica.

Le teorie classiche, come la legge di Rayleigh-Jeans, prevedevano che l'intensità della radiazione aumentasse indefinitamente alle alte frequenze, un risultato noto come "catastrofe ultravioletta". Planck superò questo problema ipotizzando che gli oscillatori atomici che generano la radiazione elettromagnetica potessero assumere solo valori discreti di energia dati dalla seguente:

$$E = nhf \quad (1.2)$$

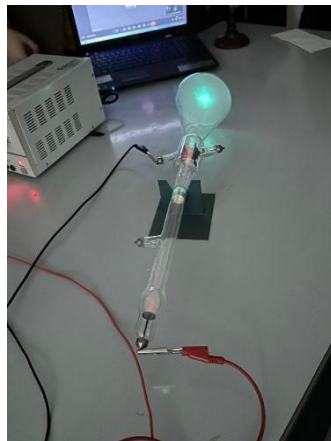
Con n un numero intero positivo. Questa quantizzazione permise di derivare con successo la legge di Planck per la distribuzione spettrale della radiazione di corpo nero, che si adattava perfettamente ai dati sperimentali. L'ipotesi di Planck trova conferma in numerosi esperimenti e applicazioni

pratiche. Ad esempio, l'effetto fotoelettrico, spiegato successivamente da Albert Einstein, si basa sul concetto di quantizzazione dell'energia. In questo fenomeno, la radiazione luminosa incidente su una superficie metallica può liberare elettroni, ma solo se la frequenza della radiazione supera una certa soglia, in accordo con la 1.2.

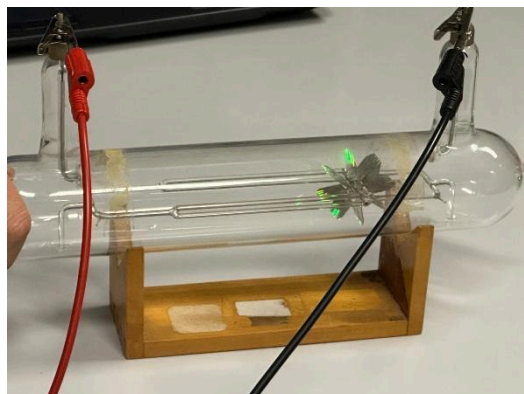


Esecuzione dell'esperienza:

Iniziamo collegando gli elettrodi del tubo catodico all'alimentatore e osserviamo il fascio di elettroni che colpisce lo schermo fosforescente. Quando avviciniamo un magnete al tubo, notiamo che gli elettroni sullo schermo si spostano in base alla direzione del campo magnetico, dimostrando che i raggi catodici sono costituiti da particelle cariche in movimento.



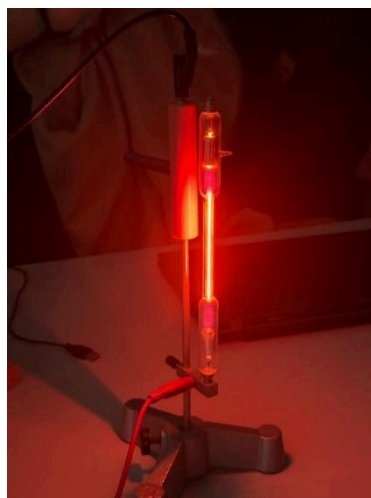
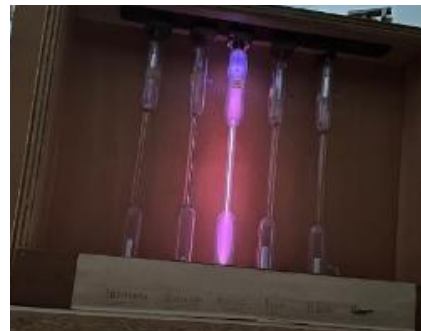
Passiamo poi al tubo con all'interno una ventola: accendiamo l'alimentatore e vediamo che, quando il fascio di elettroni lo colpisce, la ventola si illumina e inizia a ruotare. Questo conferma che i raggi catodici non solo hanno una massa dinamica (sebbene questa sia una dimostrazione debole poiché anche la luce ha una massa dinamica), ma trasportano anche quantità di moto.



Utilizziamo successivamente il tubo con la croce di Malta: collegando il tubo all'alimentatore, notiamo che l'ombra proiettata sullo schermo fosforescente è la croce di Malta stessa. Questo esperimento dimostra che i raggi catodici si propagano in linea retta, poiché la croce blocca il loro percorso.

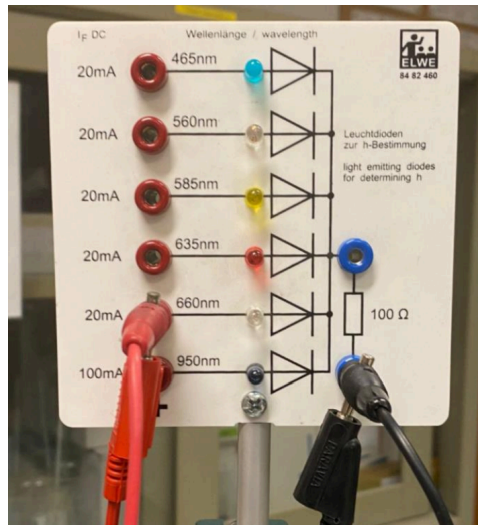


Proseguiamo con i tubi di Plucker, ciascuno contenente un gas specifico. Li colleghiamo all'alimentatore e osserviamo il colore emesso da ogni gas in seguito all'eccitazione degli elettroni. Notiamo che l'argon brilla di un viola chiaro, l'elio di un arancione intenso, l'azoto di un viola scuro (richiedendo 9000 V), l'ossigeno di bianco (a 1800 V), l'idrogeno di fucsia e il neon di rosso (già visibile a 400 V). Ogni gas emette il suo colore caratteristico, legato alla lunghezza d'onda della luce emessa e all'energia richiesta per eccitare gli atomi.



Infine, colleghiamo un alimentatore con funzione di raddrizzatore a un LED. Quando l'elettrone si unisce alle lacune del semiconduttore, si libera un fotone con energia corrispondente alla differenza tra i livelli energetici. Osserviamo che il LED si accende appena questa energia supera una certa

soglia. Per maggiore precisione, ripetiamo ogni misura due volte, annotando il momento in cui il LED si illumina per evitare errori dovuti alla percezione soggettiva.



Questa serie di esperimenti dimostra i principi fondamentali legati alla propagazione e alle interazioni degli elettroni, consentendoci anche di misurare fenomeni quantistici come l'emissione di fotoni e la determinazione della costante di Planck.

Dati e calcoli:

Grazie all'ultimo esperimento siamo riusciti a ricavare le varie frequenze della luce emessa dai rispettivi diodi, e le abbiamo inserite nella seguente tabella:

#	λ [nm]	ΔV_1 [V]	ΔV_2 [V]	ΔV_{finale} [V]	h [Js]
1	465	3,13	3,20	3,165	$7,85 \times 10^{-34}$
2	560	1,81	1,89	1,85	$5,52 \times 10^{-34}$
3	585	1,74	1,73	1,735	$5,41 \times 10^{-34}$
4	635	1,60	1,61	1,605	$5,47 \times 10^{-34}$
5	660	1,54	1,53	1,535	$5,40 \times 10^{-34}$

Abbiamo ricavato la costante di Planck con la formula 2.1:

$$E = hf$$

$$h = \frac{E}{f}$$

Perciò, essendo l'energia dell'elettrone, possiamo ricavarla con la formula:

$$E = q\Delta V$$

$$E = e\Delta V$$

Con "e" la carica dell'elettrone, e ΔV la differenza di potenziale. Inserendo questa formula all'interno della 2.1 otteniamo:

$$h = \frac{e\Delta V}{f}$$

Però, noi conosciamo la lunghezza d'onda, e quindi possiamo utilizzare la seguente per ricavare la frequenza:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Dove "c" è la velocità della luce. E quindi la formula per ricavare la costante di Planck risulta la seguente:

$$h = \frac{e\Delta V\lambda}{c}$$

Ora che abbiamo capito come ricavare la costante di Plank, possiamo fare una media tra quelle ottenute:

$$\langle h \rangle = 5,93 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Calcoliamo la semidispersione per ottenere successivamente l'errore percentuale:

$$\text{semidispersione} = \Delta h = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{2} = 1,23 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Con $h_{th} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$, che è la costante di Planck ricavata con strumenti più precisi e ponendo $\langle h \rangle = h_{sp}$. Calcoliamo quindi l'errore assoluto è dato dalla seguente:

$$\varepsilon_a = |h_{th} - h_{sp}| = 0,7 \times 10^{-34} = 7 \times 10^{-35}$$

$$\varepsilon_{\%} = \frac{\varepsilon_a}{h_{th}} \times 100 = 10,56\%$$

Calcoliamo anche lo scarto percentuale:

$$\text{scarto}\% = \frac{h_{th} - h_{sp}}{h_{th}}$$

$$\text{scarto}\% = 10,5\%$$

Inoltre, un'ultima forma di controllo è la seguente:

$$h_{sp} - \varepsilon_a < h_{th} < h_{sp} + \varepsilon_a$$

$$(5,93 - 0,7) \times 10^{-34} < 6,63 \times 10^{-34} < (5,93 + 0,7) \times 10^{-34}$$

$$5,23 \times 10^{-34} < 6,63 \times 10^{-34} < 6,63 \times 10^{-34}$$

Conclusioni:

Possiamo concludere dicendo che l'esperienza ha avuto dei risultati alquanto precisi, poiché l'ordine della misura era notevolmente piccolo; ed inoltre l'errore assoluto, sebbene fosse piccolo, approssima bene la costante di Planck misurata da noi, rendendola accettabile.

Inoltre, in questa esperienza di laboratorio la soggettività è la maggior causa di errori, poiché ognuno vede in modo differente, e quindi riesce o non riesce a vedere un flebile luce. Però, la soggettività non è l'unica fonte di propagazione dell'errore; poiché, anche la differenza di potenziale che viene applicata ai capi dei diodi non può essere regolata con precisione, ma con una

manovella poco sensibile; perciò, era complicato anche impostare la corretta differenza di potenziale.

Perciò, nonostante i numerosi errori, la misura della costante di Planck è risultata un valore accettabile.