

	LICEO DEI TIGLI LABORATORIO DI FISICA	Relazione N.35
		Classe: 5 H
		Gennaio 2022
		PEREGO NICCOLÒ ENRICO

TITOLO: CALCOLO SPERIMENTALE DELLA COSTANTE DI PLANCK

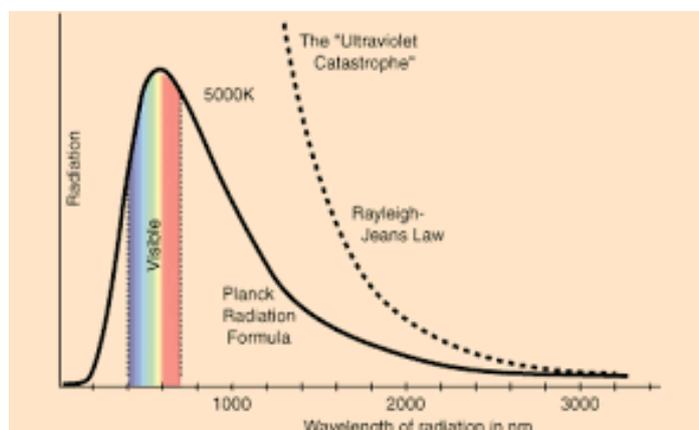
Scopo dell'esperienza: calcolare sperimentalmente la costante di Planck.

Durante queste lezioni noi alunni, guidati dal Prof. Franco Maria Boschetto, abbiamo condotto una serie di osservazioni sperimentali al fine di calcolare sperimentalmente la costante di Planck. Per fare ciò si utilizzano numerosi strumenti, tra cui i principali sono: un **voltmetro**, un **reostato**, dei **led colorati** e un **treppiede** (in grassetto gli strumenti utilizzati per l'esperienza).

Premessa teorica:

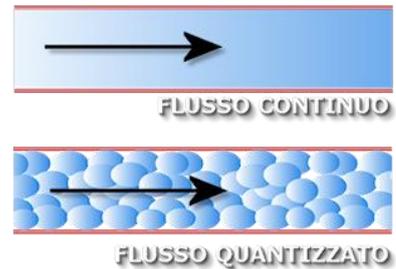
Catastrofe ultravioletta ed ipotesi di Planck:

Due fisici di nome Rayleigh e Jeans ipotizzano, seguendo le equazioni di Maxwell, una legge che avrebbe dovuto spiegare lo spettro di emissione di un corpo ma, tuttavia, i risultati che ottennero (che si basavano sulla fisica classica) erano incompatibili con i valori sperimentali. Essi considerarono, in primo luogo, che gli atomi che compongono il corpo nero sono degli oscillatori armonici. Di conseguenza, secondo la loro teoria, gli atomi oscillano di moto armonico e, dunque, poiché nel moto armonico è presente un'accelerazione e poiché una carica accelerata è in grado di irraggiare, ne segue che l'emissività dipende, secondo questa teoria, dal quadrato della frequenza con cui gli atomi oscillano. Da ciò ne deriva che per valori di frequenza molto basse, e di conseguenza lunghezze d'onda molto alte, questa teoria si accorda bene con i valori sperimentali ma per valori più alti di frequenza, ossia per lunghezze d'onda più piccole, la stessa teoria se ne discosta di molto. Infatti, secondo questa, il valore di emissività dovrebbe continuare ad aumentare. Tuttavia, in questo caso, si verificherebbe la cosiddetta catastrofe ultravioletta poiché al tendere all'infinito della frequenza si avrebbe un valore di emissività infinito e ciò non si accorda con i valori sperimentali. "Catastrofe" è un termine



piuttosto drammatico che esprime il paradosso in base al quale anche un comune forno domestico, se scaldato ad oltranza, diventerebbe una pericolosissima sorgente di raggi ultravioletti (che vengono subito dopo il violetto nello spettro elettromagnetico); e per temperature via via crescenti, anche di terribili raggi X e raggi gamma.

In seguito agli esperimenti di questi due scienziati, il fisico prussiano e conservatore Max Planck ebbe un'idea. Egli partì dal presupposto presente nella fisica classica in base al quale la materia può scambiare vicendevolmente energia in modo continuo. Fino a questo momento, appunto, l'energia che veniva scambiata poteva assumere un qualunque valore; Planck, invece, ipotizzò che l'energia potesse essere scambiata solo tramite dei pacchetti energetici e che potesse assumere, pertanto, solamente dei valori discreti. Questi pacchetti energetici presero il nome di quanti di energia e Planck verificò che l'energia contenuta in un quanto è direttamente proporzionale alla sua frequenza. Pertanto, Max Planck derivò una legge fondamentale per la meccanica quantistica, che è la seguente: $E = h f$ nella quale 'h' è la cosiddetta costante di Planck e assume un valore di $6,63 \cdot 10^{-34}$ J s. Questa costante, insieme alla costante di gravitazione universale (G) e insieme alla costante della velocità della luce (c), fa parte delle tre costanti fondamentali di tutta la fisica dalle quali è possibile derivare tutte le altre formule. In particolar modo, la costante di gravitazione universale è riferita alla fisica classica, quella della velocità della luce alla relatività ristretta e generale e la costante di Planck alla meccanica quantistica. Osservando l'unità di misura della costante di Planck, è possibile notare come questa abbia le stesse dimensioni del momento angolare e, pertanto, questa costante prende anche il nome di quanto d'azione. Dagli studi di Planck se ne derivò, dunque, che tutta l'energia poteva essere scambiata solo con dei valori discreti e poteva assumere, cioè, un valore multiplo intero del pacchetto di energia chiamato quanto. Questa ipotesi, operata dal fisico prussiano, fu a dir poco rivoluzionaria in quanto non trovava alcun fondamento nella fisica classica. Tuttavia, in seguito a numerosissimi calcoli complessi, Planck riuscì a dimostrare che l'emissività dipende da una formula molto complessa e, in particolare, dal cubo della frequenza e dal numero 'e' elevato alla -f ossia che:

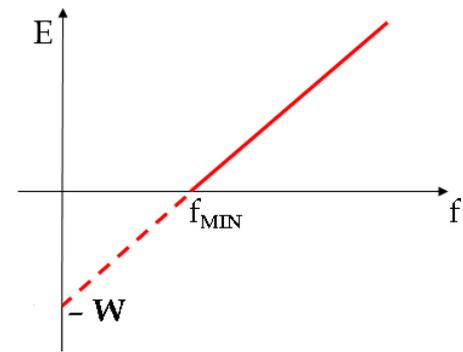


$$u(f, T) = \frac{8 \pi h}{c^3} \cdot \frac{f^3}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1}$$

Inserendo i valori ottenuti da questa formula in un grafico è possibile ricavare dei valori affini a quelli sperimentali. Ne segue dunque l'ipotesi di Planck è corretta e che questo fenomeno può essere spiegato solamente tramite la quantizzazione dell'energia. Inizialmente, il fisico presentò questa teoria nel 1900 solo come una semplice ipotesi matematica; tuttavia, nel 1905 Albert Einstein, per mezzo dell'ipotesi di Planck, era riuscito a spiegare l'effetto fotoelettrico e, dunque, da questo momento, l'ipotesi di Max Planck prese sempre più piede.

L'effetto fotoelettrico:

Philipp Von Lenard era un grande oppositore di Einstein, in quanto seguace delle idee naziste sin dal principio. Fu proprio questo scienziato, però, a scoprire e a studiare l'effetto fotoelettrico. Questo effetto è molto importante in quanto, ad esempio, si pone alla base del funzionamento dei pannelli solari e delle celle fotoelettriche dei cancelli. In particolar modo, egli utilizzò un tubo vuoto contenente una piastra di metallo; Lenard osservò che se la radiazione ultravioletta colpiva il catodo presente nel tubo, quest'ultimo



era in grado di emettere elettroni e, di conseguenza, il catodo era considerabile un generatore quantistico. Inoltre, se si misura l'intensità della luce in funzione della frequenza di una determinata onda si ottiene, in un grafico cartesiano, una linea retta trascinata in basso rispetto all'origine. Il fatto che tale retta non parta dall'origine è spiegabile dalla presenza di una "frequenza di soglia" o di una "soglia fotoelettrica". Questa è, infatti, la minima frequenza sotto la quale, dal catodo, non fuoriesce neppure un elettrone. Tuttavia, seguendo le equazioni della fisica classica di Maxwell, si sarebbe dovuto ricavare un valore di intensità per ogni frequenza, anche se minima. Ne segue, dunque, che la fisica classica non era in grado di spiegare questo fenomeno e, proprio per questo, Einstein decise di utilizzare, correttamente, le ipotesi di Max Planck al fine di spiegare tale fenomeno.

Come appena detto, dunque, il problema consiste nella presenza di una frequenza di soglia che rende tale fenomeno incompatibile con i principi della fisica classica. Se l'energia viene, infatti, scambiata in modo continuo, così come sostiene la fisica classica, si dovrebbe avere un'emissione per ogni tipo di frequenza, ma ciò, appunto, non avviene. Dal grafico si evince, infatti, che il rapporto che lega l'energia alla frequenza è di una relazione lineare e non di una proporzionalità diretta. Come fece Einstein, dunque, a spiegare tale fenomeno? Egli nel 1905 ipotizza che la luce che investe il catodo non è una radiazione continua ma, al contrario, è atomizzata; in particolare lo scienziato decise di seguire l'ipotesi di Max Planck per la quale la radiazione era divisa in quanti di fotoni e, dunque, non era continua. In particolare, il termine fotoni deriva dal termine greco 'φως' che significa luce. Dunque, i fotoni sono degli atomi di luce la cui energia è direttamente proporzionale alla loro frequenza.

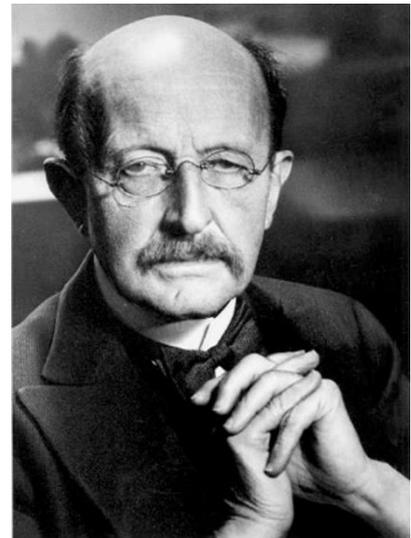
Richiamo alle buche di potenziale:

<< Fissata, dunque, una determinata energia potenziale ne segue che un elettrone può orbitare solamente fino ad una determinata distanza. Più si aumenta l'energia totale e più l'elettrone è libero di muoversi in un raggio più ampio e, se l'energia totale arriva a 0 o lo supera, accade che l'elettrone può uscire dall'orbita dell'atomo. In questo caso l'atomo perde un elettrone, si carica positivamente e diventa uno ione positivo ossia un catione. Un elettrone, fissata una certa energia totale, può muoversi solamente all'interno di un determinato spazio che prende il nome di buca di potenziale. Affinché l'elettrone possa uscire dalla buca di potenziale bisogna fornire una quantità di energia in modo da aumentare l'energia totale e permettere dunque all'elettrone di muoversi più liberamente. Il caso spiegato adesso contempla un solo atomo. Se si considerano due atomi, ad esempio di idrogeno, la buca di potenziale si ricava dalla somma delle due buche di potenziale dei due atomi. Allo stesso modo di prima, a seconda dell'energia totale, l'elettrone potrà muoversi

su un solo atomo, su entrambi, o potrà uscire dall'orbita della molecola H_2 . Allo stesso modo di prima, se si considera un numero di Avogadro di atomi, per ricavare la buca di potenziale si dovranno sommare tutte le buche di potenziale di tutti gli atomi. Se l'energia totale ha un valore parecchio basso, l'elettrone rimarrà solo su quell'atomo e verrà dunque chiamato elettrone di valenza; al contrario, se l'energia totale è maggiore ne segue che l'atomo sarà libero di muoversi anche su tutti gli altri atomi e, il cristallo formato da tutti questi atomi sarà dunque un conduttore e l'elettrone prenderà il nome di elettrone di conduzione. Allo stesso modo, se la sostanza ha solo elettroni di valenza si tratta di una sostanza isolante e dunque non condurrà corrente, viceversa è un conduttore. I semiconduttori invece, hanno solo elettroni di valenza a cui però manca una molto ridotta quantità di energia per poter scavalcare la barriera e poter diventare un conduttore. Tutto ciò appena spiegato è l'interpretazione microscopica dei conduttori, dei semiconduttori e degli isolanti. >>

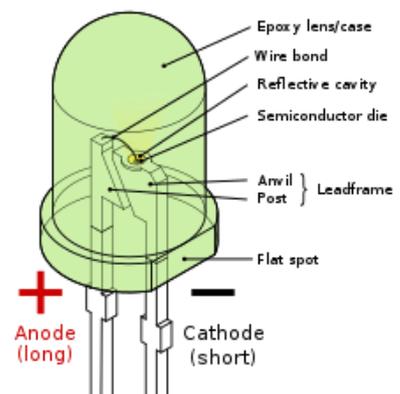
Il catodo utilizzato nell'esperimento è, logicamente, metallico e se un elettrone si trova in un punto della sua buca di potenziale si ha che è necessario fornire una certa quantità di energia 'E' per farlo fuoriuscire. Il lavoro che è necessario compiere al fine di estrarre un elettrone dalla buca di potenziale di un materiale metallico prende il nome di lavoro di estrazione e si indica con W_0 .

Inoltre, l'energia cinetica di un elettrone non può essere uguale all'energia di un fotone in quanto, prima, come detto, è necessario compiere un lavoro al fine di sollevare un elettrone da un livello energetico fino ad un altro livello energetico. Ne segue dunque che: $h f = E + W_0$ nella quale 'h f' corrisponde all'energia di un quanto di luce, 'E' corrisponde all'energia cinetica e 'W₀' corrisponde all'energia di estrazione dell'elettrone dal metallo. Pertanto, tale formula può anche essere riscritta come la seguente: $E = h f - W_0$. Da questa relazione se ne deriva che se si pone 'f' in ascisse e 'E' in ordinate si ottiene una retta non passante per l'origine, in accordo con i valori sperimentali dati dall'effetto fotoelettrico. Ne segue dunque che se non si raggiunge una frequenza minima non è possibile estrarre alcun elettrone dall'atomo metallico. In seguito alla dimostrazione da parte di Einstein dell'effetto fotoelettrico, ne seguì un grande problema per la fisica classica in quanto l'ipotesi di Max Planck stava divenendo qualcosa di molto più importante di una semplice ipotesi matematica.

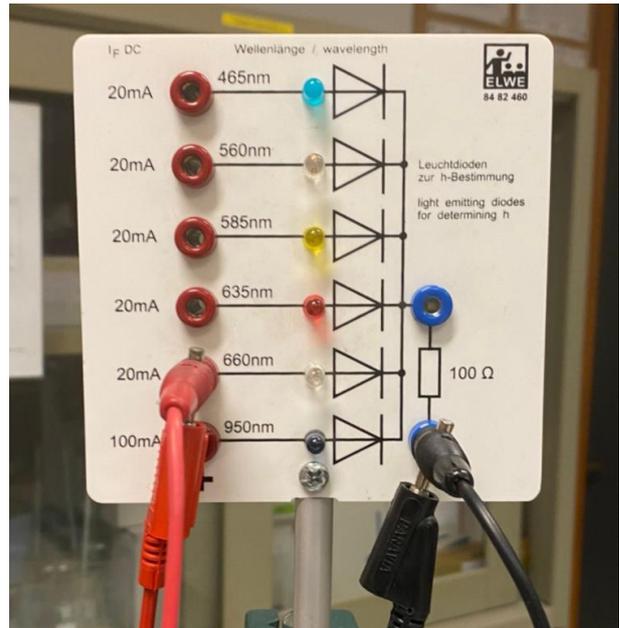


Esecuzione dell'esperienza e rielaborazione dei dati nelle tabelle:

L'esperienza realizzata aveva lo scopo di misurare sperimentalmente la costante di Planck che, da un punto di vista teorico, assume un valore pari a: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s. Al fine di realizzare questa esperienza, sono stati utilizzati dei led colorati, posizionati, per l'occasione, su un treppiede, per mezzo di una morsetta. Inoltre, è stato utilizzato un tester come voltmetro in corrente continua e, inoltre, è stato utilizzato un reostato in corrente continua. Il reostato, come già visto lo scorso anno, ha la funzione di permettere la regolazione dell'intensità della corrente elettrica in un circuito tramite la variazione della resistenza.



I LED, o Light Emitting Diode, hanno sostituito, nel corso degli ultimi anni, le normali lampadine e ciò è avvenuto grazie al loro elevato rendimento e grazie al loro netto minor consumo di energia a parità di utilizzo. Ogni volta che un elettrone ed una sua lacuna si ricombinano, avviene l'emissione di un raggio γ , ossia di un'onda elettromagnetica, ossia di luce. Quando accade ciò, avviene che l'energia di un fotone è equivalente a quella posseduta da un elettrone. Nel caso della nostra esperienza, i led sono montati su una piastra, che li contiene tutti. Ogni particolare led, inoltre, ha la caratteristica di emettere un'onda avente una particolare lunghezza d'onda e ad una particolare frequenza. Poiché la differente lunghezza d'onda determina



caratteristiche diverse per ciascuna onda, si ha che ogni led emetterà un'onda luminosa avente un colore diverso. Dei 6 led presenti, 5 emettono nel campo della luce visibile mentre 1 led emette nel campo degli infrarossi e, dunque, l'onda che viene emessa può essere osservata solo con l'ausilio di particolari strumenti in grado di vedere, appunto, le frequenze infrarosse. Come detto, in questa circostanza, avviene che l'energia del fotone si eguaglia a quella dell'elettrone. Dunque, si ha che: $E_e = h f$; tuttavia, poiché $E_e = e \Delta V$, in quanto corrisponde al lavoro che l'elettrone

compie per passare nel diodo, si ha che: $e \Delta V = h f$; infine, si ha che: $\Delta V = \frac{h f}{e}$. Da questa formula si evince che la differenza di potenziale dell'elettrone è direttamente proporzionale alla frequenza che esso emette e, questa, è proprio la caratteristica dell'effetto fotoelettrico nel quale l'elettrone cede parte della sua energia al fotone. Dalla stessa formula si ottiene anche che: $h = \frac{e \Delta V}{f}$. Poiché $c = \lambda f$, si ha che: $h = \frac{e \Delta V \lambda}{c}$. Questa, dunque, è la formula che verrà utilizzata al fine di ricavare la costante di Planck in modo sperimentale. Poiché 'e' lo si prende come valore definito, in quanto già ricavato nell'esperienza di Millikan, poiché 'c' è una costante, in quanto corrisponde alla velocità della luce, poiché 'λ' viene già indicato presso ogni differente led, si ha che l'unica grandezza da ricavare è, dunque, la differenza di potenziale. ΔV è, infatti, il potenziale di attivazione di ciascun led e per ogni led assumerà, logicamente, un valore diverso, dipendente dalla lunghezza d'onda dell'onda che esso emette.



Dopo aver collegato correttamente i poli positivi e negativi, si fa passare la corrente all'interno della piastra di plastica, nella quale, come detto, sono situati i vari led e si procede alla misurazione del potenziale di accensione per ciascuno. Non appena si vede che il led inizia ad emettere luce, si smette di muovere il reostato e si procede all'osservazione del valore del potenziale d'accensione indicato sul tester. Logicamente, al fine di limitare gli errori sperimentali, tali rilevazioni sono state effettuate in un ambiente buio, al fine di rilevare in modo più sensibile

l'inizio dell'emissione di luce da parte del led. Nella tabella sottostante sono riportati i valori dell'esperienza:

LUCE:	λ	ΔV	ΔV media	f onda = $\frac{c}{\lambda}$
LUCE BLU	$4,56 \cdot 10^{-7}$ m	2,55 V 2,45 V	2,500 V	$6,58 \cdot 10^{14}$ Hz
LUCE VERDE	$5,60 \cdot 10^{-7}$ m	1,53 V 1,46 V	1,495 V	$5,36 \cdot 10^{14}$ Hz
LUCE GIALLA	$5,85 \cdot 10^{-7}$ m	1,35 V 1,34 V	1,345 V	$5,13 \cdot 10^{14}$ Hz
LUCE ROSSA	$6,35 \cdot 10^{-7}$ m	1,26 V 1,24 V	1,250 V	$4,72 \cdot 10^{14}$ Hz
LUCE ROSSA	$6,60 \cdot 10^{-7}$ m	1,32 V 1,26 V	1,29 V	$4,55 \cdot 10^{14}$ Hz

Da una prima osservazione ci si può rendere conto che più la lunghezza d'onda diminuisce e più il potenziale d'accensione aumenta. Dunque, più la frequenza di un'onda aumenta e più aumenta anche il suo potenziale di accensione.

Come detto in precedenza, la formula da utilizzare per ricavare la costante di Planck è: $h = \frac{e \Delta V \lambda}{c}$ e dunque:

$$h \text{ luce blu: } h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \times 2,5 \times 4,56 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 10^8} = 6,080 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$h \text{ luce verde: } h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \times 1,495 \times 5,60 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 10^8} = 4,465 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$h \text{ luce gialla: } h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \times 1,345 \times 5,85 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 10^8} = 4,196 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$h \text{ luce rossa: } h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \times 1,25 \times 6,35 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 10^8} = 4,233 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$h \text{ luce rossa: } h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \times 1,29 \times 6,6 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 10^8} = 4,541 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

A questo punto si procede al calcolo della semidispersione dei valori sperimentali trovati tramite la differenza tra il valore maggiore e il valore minore divisa per 2:

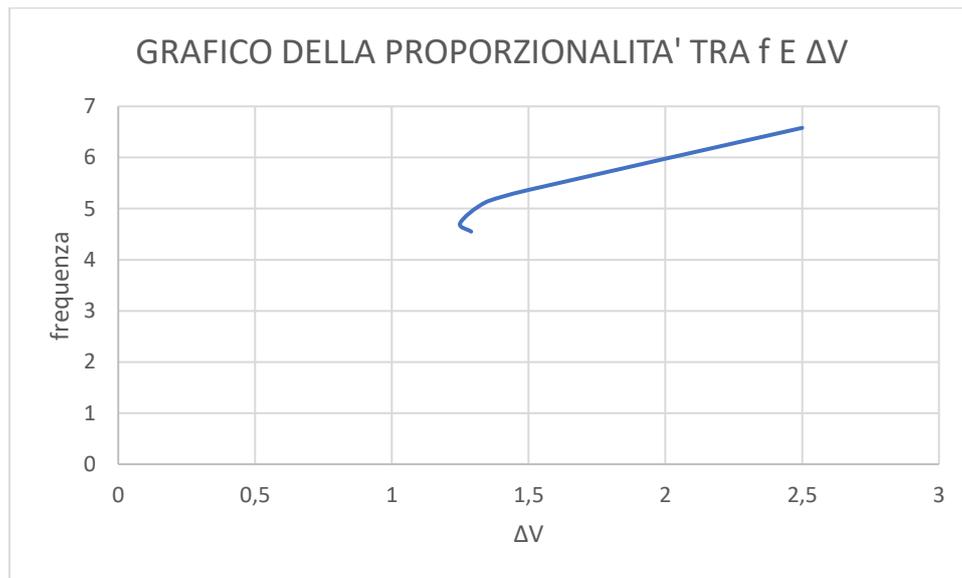
$$\text{semidispersione} = \frac{6,080 \cdot 10^{-34} - 4,196 \cdot 10^{-34}}{2} = 9,42 \cdot 10^{-35} \text{ J s}$$

A questo punto, si calcola la media aritmetica tra i rapporti ottenuti sperimentalmente e si ottiene, pertanto, che: $h \text{ medio} = \frac{6,080 \cdot 10^{-34} + 4,465 \cdot 10^{-34} + 4,196 \cdot 10^{-34} + 4,233 \cdot 10^{-34} + 4,541 \cdot 10^{-34}}{5} = 4,703 \cdot 10^{-34} \pm 9,42 \cdot 10^{-35} \text{ J s}$. Questo valore corrisponde alla media dei cinque valori della costante di Planck ottenuti sperimentalmente.

Ottenuti questi dati, è necessario verificare se l'esperimento sia riuscito o meno e, per questo motivo, si calcola lo scarto percentuale tra il rapporto ottenuto con degli strumenti eccelsi (e pertanto ritenuto il valore teorico) con i dati ottenuti da noi sperimentalmente.

Per fare ciò, si utilizza la seguente formula: $\frac{h(TH) - h(SP)}{h(SP)} \times 100$. Poiché il valore teorico della costante corrisponde a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J s si ha che: $\frac{6,63 \cdot 10^{-34} - 4,703 \cdot 10^{-34}}{4,703 \cdot 10^{-34}} \times 100 = 41 \%$. Osservando questo valore, si potrebbe affermare che l'esperienza non sia riuscita in modo preciso. Tuttavia, se si considera il valore più alto compreso, a causa della semidispersione, si ha che: $\frac{6,63 \cdot 10^{-34} - 5,645 \cdot 10^{-34}}{5,645 \cdot 10^{-34}} \times 100 = 17,45 \%$. Quest'ultimo valore è compreso in uno scarto del 20% e, pertanto, è possibile affermare che l'esperienza sia riuscita in modo abbastanza preciso.

Grafico di proporzionalità tra il potenziale d'accensione e la frequenza dell'onda emessa:



I valori della frequenza individuati sull'asse delle ordinate sono da intendere tutti elevati alla 10^{14} .

Conclusioni:

Le conoscenze teoriche acquisite sull'effetto fotoelettrico e sulla costante di Planck sono state confermate dalla nostra esperienza di laboratorio. Quest'ultima ha permesso, infatti, di verificare sperimentalmente il valore di questa costante. Inoltre, per quanto riguarda la nostra esperienza, è possibile affermare che sia riuscita in modo abbastanza accurato. Come al solito, i vari errori sono da imputare, in parte, ad una non corretta rilevazione dei dati durante l'esperienza ma gli errori principali sono dovuti alla soggettività dell'esperienza. Infatti, sarebbe necessario, per essere precisi, sviluppare l'esperienza in un luogo completamente buio e con uno strumento in grado di rilevare anche l'emissione più impercettibile che il laser produce. L'occhio umano e un ambiente non troppo buio hanno aumentato questa componente d'errore. Si può concludere affermando che l'esperienza ha permesso di comprendere al meglio gli aspetti teorici e ha permesso di osservare fenomeni prima compresi solo teoricamente.