

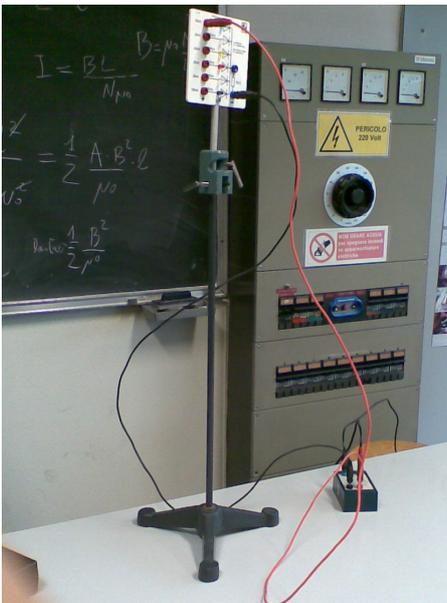
## Come misurare la costante di Planck

Oltre a questo scopo che è quello principale altri due obiettivi sono:

- stabilire il potenziale di attivazione dei LED in questione
- studiare la caratteristica di conduttori non ohmici

### Materiale utilizzato

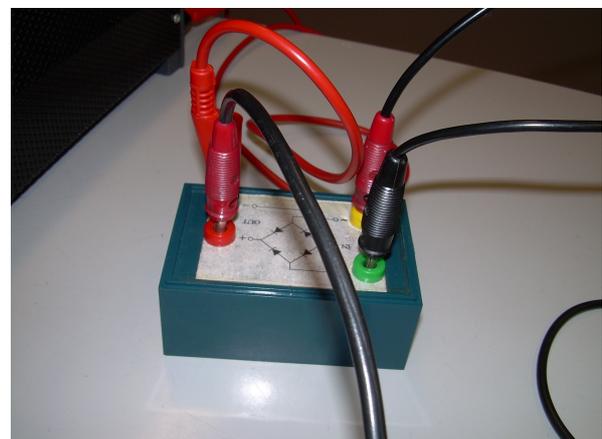
- Variac
- Ponte a diodi
- Supporto per LED (essi sono: azzurro, verde, giallo, rosso, rosso scuro ed infrarosso)
- Amperometro
- Voltmetro
- Cavetti



### Premessa teorica

Il **variac** è un alimentatore che crea corrente continua; esso presenta al suo interno un ponte a diodi che stabilizza la corrente emessa dal variac. Abbiamo utilizzato un altro ponte a diodi per rendere ancora più stabile tale corrente. Questi apparecchi possono fornire in uscita una tensione regolabile, praticamente con continuità, tra zero e il valore massimo (ecco il variac sullo sfondo).

**Il ponte a diodi** trasforma la corrente da alternata a continua, è detto anche raddrizzatore di corrente. Contiene appunto 4 diodi a semiconduttori. In questa immagine possiamo vedere le **prese a banana** (quella rosso brillante) che sono dei cavetti e sono chiamate così poiché nella loro parte posteriore presentano un foro in cui è possibile infilarne un'altra. Possono essere rosse o nere ma la loro funzionalità non cambia.



**Il supporto per LED** è costituito da sei LED che emettono luce con frequenze diverse. Essi sono: azzurro, verde, giallo, rosso, rosso scuro ed infrarosso. L'ultimo non è stato analizzato perché è necessario un rivelatore di infrarossi per individuare il suo fascio di luce. Invece il LED rosso scuro non è stato studiato per mancanza di tempo. Su questo supporto sono segnate inoltre le varie lunghezze d'onda della luce emessa dai vari LED. Questo supporto presenta 6 entrate, ciascuna in corrispondenza di ogni LED, e 2 uscite poiché collegata ad una di esse c'è una resistenza che impedisce il verificarsi di un corto circuito.

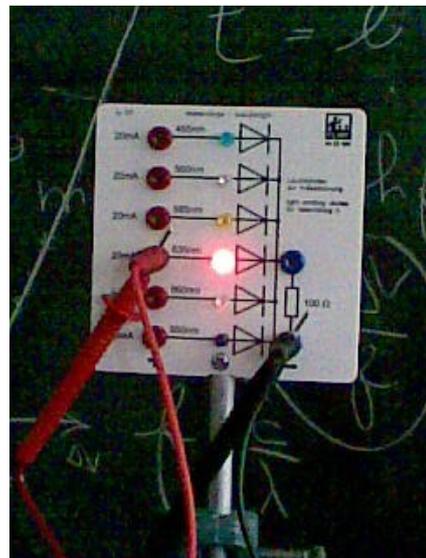
LED significa light emitting diode ovvero diodo ad emissione di luce e fu inventato nel 1962 da Nick Holonyak Jr.. Esso sfrutta la capacità dei semiconduttori di produrre fotoni dalla ricombinazione fra lacune ed elettroni che si verificano in una zona detta appunto di ricombinazione nella quale essi giungono dalle regioni drogate p ed n. Il colore della luce del LED viene determinato dalla distanza fra i livelli di energia degli elettroni delle lacune e degli elettroni e quindi dalla scelta dei semiconduttori. Nei LED gli elettroni della banda di conduzione si ricombinano con le lacune della banda di valenza e emettono energia sotto forma di fotoni\*.

Come detto, mediante l'utilizzo di semiconduttori drogati è possibile costruire semplici dispositivi elettronici quali diodi e transistor dispositivi elettronici quali fotocellule o fotodiodi (i LED) in grado di rispondere elettricamente a segnali di tipo luminoso. Infatti per innescare il meccanismo di liberazione degli elettroni e di formazione delle lacune può essere utilizzata, al posto dell'energia termica, anche l'energia luminosa, ad esempio la semplice radiazione solare.

Vediamo ora in cosa consiste il drogaggio. Il carbonio e altri semiconduttori, quali il silicio e il germanio, hanno i coefficienti di temperatura negativi. Ciò significa che la resistenza elettrica di un semiconduttore diminuisce con l'aumentare della temperatura e aumenta al diminuire di questa. Inoltre tali elementi presentano una resistività intermedia rispetto a quella degli isolanti e dei conduttori.

Il comportamento dei semiconduttori può essere interpretato a livello microscopico a partire dallo studio dei legami chimici (in genere di tipo covalente) che determinano la loro struttura. Ciascun atomo del reticolo costituisce quattro legami covalenti con i suoi primi vicini e in tal modo raggiunge una configurazione elettronica stabile. Gli elettroni impegnati nei legami vengono detti elettroni di valenza. A bassa temperatura, dunque, il semiconduttore manifesta proprietà isolanti. All'aumentare della temperatura alcuni elettroni di valenza, debolmente legati, possono acquisire un'energia cinetica tale da permettere loro di slegarsi dall'atomo di origine. In questo modo si stabilisce una situazione simile a quella di un conduttore metallico in cui si ha una popolazione di elettroni in grado di muoversi quasi liberamente all'interno del reticolo cristallino del solido. Il numero di elettroni liberi presenti nel semiconduttore aumenta progressivamente con l'aumentare della temperatura poiché aumenta l'energia termica a disposizione degli elettroni più esterni per liberarsi dai legami con i rispettivi nuclei. Gli elettroni liberi presenti nel semiconduttore sono detti elettroni di conduzione. L'energia termica necessaria per trasformare un elettrone di valenza in un elettrone di conduzione dipende dal tipo di semiconduttore.

A livello macroscopico si verifica un aumento della conducibilità e una conseguente diminuzione della resistività. Ciascun elettrone che si libera e diviene disponibile per la conduzione, lascia dietro di sé un "vuoto" di carica negativa, che possiamo considerare



come un centro di carica positiva, chiamato lacuna, che tende a essere saturato dagli elettroni degli atomi più vicini del reticolo. Si crea in tal modo un doppio flusso di cariche: uno costituito dagli elettroni (cariche negative) e uno dalle lacune (cariche positive). In assenza di differenza di potenziale, elettroni e lacune vagano disordinatamente all'interno del reticolo; se però ai capi di una porzione di semiconduttore viene applicata una differenza di potenziale, si assiste ad un moto ordinato dei portatori di carica (elettroni e lacune), ostacolato come nei conduttori metallici dagli altri ioni del reticolo. I moti dei due tipi di portatori di carica hanno verso opposto ma determinano un contributo di ugual segno alla corrente convenzionale.

Veniamo ora in modo preciso al drogaggio. Si è scoperto che l'effetto di conduzione precedentemente descritto si può essere notevolmente aumentato introducendo nel reticolo cristallino delle impurezze, costituite da atomi con valenza diversa rispetto a quella del semiconduttore, che favoriscono l'insorgere di lacune o la liberazione di elettroni (semiconduttori drogati). Vediamo infatti cosa accade se all'interno di un campione di silicio (che ha valenza quattro) vengono introdotti atomi di un elemento con valenza cinque, ad esempio arsenico. Tali atomi, di specie diversa, inseriti nel reticolo cristallino del silicio, impegnano solo quattro dei loro cinque elettroni di valenza nella costruzione di legami stabili con gli atomi di silicio vicini; di conseguenza il quinto elettrone di valenza, non impegnato in legami, si trova a essere debolmente legato al reticolo. È sufficiente l'energia termica corrispondente alla temperatura ambiente per consentire a tale elettrone di liberarsi dall'atomo di arsenico di origine e quindi di muoversi liberamente all'interno del reticolo cristallino. Se sottoposti a tali modifiche, i semiconduttori vengono chiamati di tipo n e gli atomi degli elementi droganti sono detti donori. Un effetto opposto è ottenibile drogando il semiconduttore con atomi di valenza inferiore rispetto a quella del silicio, ad esempio con alluminio (di valenza tre). L'inserimento di una tale impurezza nel reticolo del silicio impedisce la completa saturazione dei legami tra gli atomi, in altre parole non è più attuabile con l'alluminio uno dei legami covalenti costituiti in precedenza tra atomi di silicio. Di conseguenza, l'atomo di alluminio si trova nella situazione di dover ospitare una carica negativa in eccesso. Per ottenere tale situazione, un elettrone degli atomi di silicio circostanti deve legarsi all'atomo di alluminio, ma ciò altera la saturazione del legame con altri atomi di silicio contigui. Per compensare l'assenza di elettroni nell'atomo contiguo, uno degli altri atomi di silicio vicini tenderà a cedere uno dei suoi elettroni, permettendo di fatto il movimento di tale lacuna all'interno del conduttore. Si ha un moto di lacune e si parla di corrente di lacune. Un semiconduttore drogato in questo modo viene detto di tipo p e gli elementi come l'alluminio sono detti accettori.

Inoltre a seconda del tipo di drogante utilizzato si producono LED diversi. Vediamo quelli da noi utilizzati:

- ➔ Giallo: Ga, As P oppure Ga P oppure ancora In Ga Al P
- ➔ Azzurro/blu: Ga N altrimenti In Ga N, Zn Se
- ➔ Verde: Ga Al P oppure Ga N oppure ancora In Ga Al P
- ➔ Rosso: In Ga Al P oppure Ga P oppure ancora Al Ga As

Come ultima nota sui LED si può dire che essi vengono utilizzati per creare sensori o sistemi di puntamento. Infatti essi sono reversibili nel senso che se la loro giunzione è esposta ai raggi solari od un'altra fonte di luce si crea una tensione (presso i terminali del LED) che dipende dall'intensità della radiazione.

**L'amperometro** è uno strumento che misura l'intensità di corrente (va collegato sempre in serie). Presenta una scala arancione per la corrente alternata e una bianca per la corrente continua, possiede inoltre una serie di boccole in cui inserire delle prese a banana; le boccole servono per determinare il fondoscala. Ad esempio nel nostro caso, posizionando una presa a banana nella boccia contrassegnata dallo zero e l'altra nella boccia 5 significa che la scala graduata indicherà una intensità di corrente di 5 ampere (quindi 100 tacchette=5 ampere). In proposito ricordiamo che l'**intensità di corrente** ( $i$ ) indica la quantità di carica che scorre nell'unità di tempo:  $i = \Delta Q / \Delta t$  la sua unità di misura è l'ampere [A]=[C/s]



**Il voltmetro** è uno strumento atto alla misurazione della d.d.p. o voltaggio o  $\Delta V$ . Presenta due scale: quella della corrente alternata (AC) è rossa, invece quella della corrente continua (DC) è bianca. Possiede anche 2 elettrodi uno rosso (+) ed uno nero (-). Esso si collega sempre in parallelo alla componente di cui si vuole calcolare la d.d.p. In proposito ricordiamo che il **voltaggio o differenza di potenziale (d.d.p.)** è dato dal rapporto fra l'energia potenziale di una carica e la carica stessa. Cioè

$\Delta V = Ep/q$ , la sua unità di misura è il volt [V] cioè [J/C].

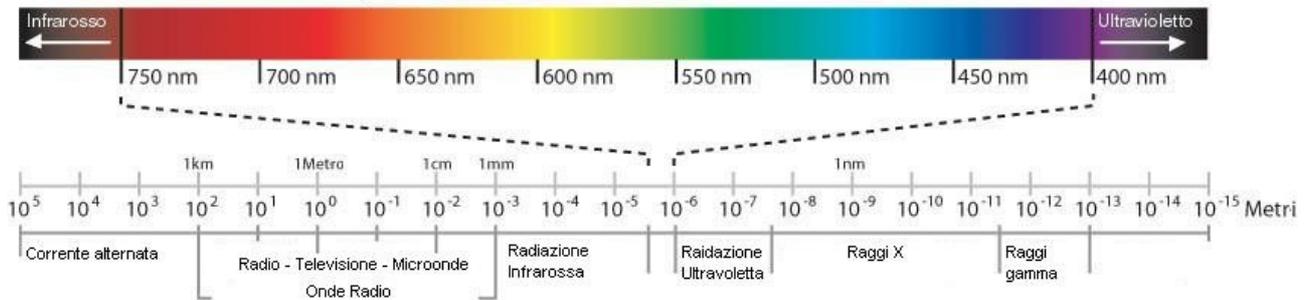


La nostra esperienza si basa quindi sulla luce dello spettro magnetico, spieghiamo di che cosa si tratta. Le onde elettromagnetiche vengono classificate in base alla loro frequenza, l'insieme degli intervalli di frequenze (onde radio, microonde, radiazioni infrarosse, visibili, ultraviolette, raggi X, raggi gamma) costituiscono lo spettro elettromagnetico. Si tratta di uno specchio continuo in cui i confini tra i vari intervalli sono solo indicativi (vedi figura alla pagina seguente).

Parliamo ora dell'intervallo delle frequenze emesse dai 6 LED. I primi 5 appartengono alla luce visibile. Essa è definita dalle frequenze che vanno da  $4,3 \times 10^{14}$  Hz a  $7,5 \times 10^{14}$  Hz cioè dalla lunghezza d'onda di 700 nm a 400 nm. Solo le radiazioni di questo intervallo sono in grado di attivare i recettori presenti nei nostri occhi. Le radiazioni visibili sono emesse dall'agitazione termica dei corpi che possiedono elevate temperature (Sole ed oggetti incandescenti) in seguito alla variazione di energia cinetica subita dagli elettroni più esterni a loro volta eccitati dai violenti scontri tra molecole.

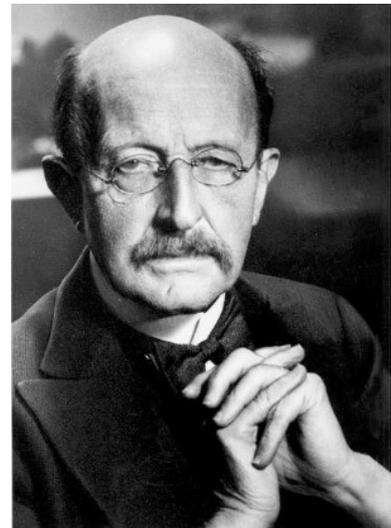
Non tutti gli animali sono sensibili alla stessa gamma di frequenza. Ad esempio gli insetti possono vedere anche le frequenze dell'ultravioletto, mentre i serpenti vedono anche l'infrarosso. L'altro tipo di radiazioni emesse da uno dei nostri LED è proprio quello dell'infrarosso. Queste radiazioni hanno una lunghezza d'onda compresa fra  $10^{-6}$  e  $10^{-3}$  metri; il loro intervallo è quindi adiacente a quello del visibile. Esse sono radiazioni (definite come termiche) emesse da corpi caldi ma non incandescenti in seguito a vibrazioni atomiche dovute a scontri fra molecole. Ad esempio un corpo a temperatura ambiente

## Spettro di luce visibile all'occhio umano



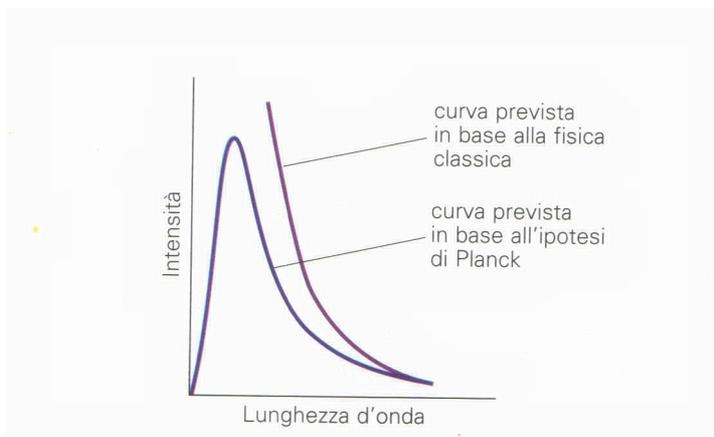
emette radiazioni della regione del lontano infrarosso, cioè radiazioni appartenenti alla zona dello spettro infrarosso più lontana dalla banda del visibile. La loro frequenza è in grado di porre in vibrazione gli atomi investiti da questo tipo di radiazioni. L'aumento del moto molecolare porta quindi ad un aumento della temperatura del corpo. Le radiazioni infrarosse presentano una lunghezza d'onda relativamente grande che non permette loro di essere riflesse dall'atmosfera. Le radiazioni infrarosse sono importanti poiché mantengono calda la superficie terrestre tramite l'effetto serra. Infatti la luce solare assorbita dalla superficie terrestre viene riemessa sotto forma di radiazione infrarossa, che a sua volta viene intrappolata dal vapore acqueo presente nell'atmosfera.

Veniamo ora alla costante di **Planck**. Secondo la fisica classica la radiazione di un corpo è dovuta all'agitazione termica e alla accelerazione delle cariche elettriche presenti sulla superficie del corpo. Dato che ogni carica è soggetta ad una accelerazione diversa, le radiazioni emesse dal corpo dovrebbero formare uno spettro continuo. Sempre stando alla fisica classica l'intensità delle radiazioni termiche dovrebbe essere inversamente proporzionale a  $\lambda^4$ .



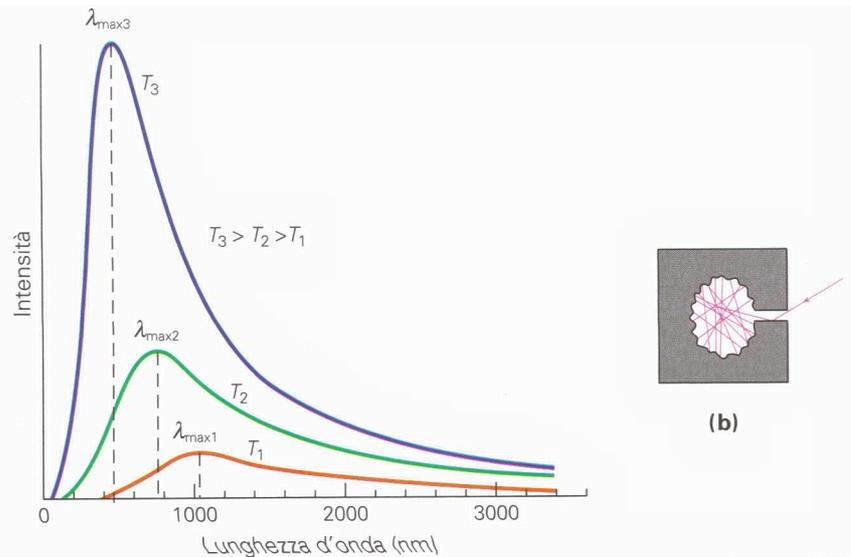
Diversamente da quanto si ottiene sperimentalmente la fisica classica prevede che l'intensità della radiazione termica aumenti al diminuire della lunghezza d'onda. Il tipo di andamento previsto dalla fisica classica viene chiamata catastrofe ultravioletta (vedi figura in basso); catastrofe perchè la teoria classica prevede che  $I$  (intensità della radiazione ed anche l'energia) tende all'infinito al tendere a zero di  $\lambda$  ; ultravioletta perchè la divergenza fra previsioni della fisica classica e i dati ottenuti sperimentalmente si trova proprio nella regione di spettro elettromagnetico accanto al violetto. Stiamo parlando di uno di quei fenomeni che la fisica classica non riusciva a

spiegare: la radiazione emessa da un **corpo nero** (vedi figura alla pag. Segue). Esso è un corpo che assorbe tutta la radiazione che riceve ma può riemetterne di sua. Per esempio una bottiglia con pareti oscurate. Essendo nera assorbe tutta la radiazione proveniente dall'esterno ma anche i raggi che entrano dalla fessura riflettono così tante volte all'interno della bottiglia che alla fine non riescono ad uscire dal corpo in questione. Max Planck fu indotto dall'incapacità (da parte



della fisica classica) di spiegare le caratteristiche della radiazione termica dei corpi a cercare di spiegare in modo più soddisfacente tale fenomeno.

Nel 1900 Planck riuscì a spiegare l'andamento dell'intensità delle radiazioni del corpo nero. Per far ciò Planck fu costretto ad ipotizzare che l'energia non fosse una grandezza continua ma dovesse assumere solo determinati valori (grandezza discreta).



L'energia in questione è quella emessa da oscillatori termici elementari, ovvero gli atomi. L'**ipotesi di Planck** afferma che l'energia termica degli oscillatori è quantizzata, poichè essi assorbono ed emettono energia sotto forma di pacchetti discreti (i quanti). L'equazione di Planck è:  $E = nh\nu$  dove E è l'energia, n (con  $n=1,2,3,\dots$ ) è un numero quantico,  $\nu$  è la frequenza, h è la costante di Planck. Il suo valore è  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}$ . l'equazione di Planck si può anche scrivere  $E = hf$ . hf prende il nome di **quanto di energia**. Quindi all'inizio del 1900 Max Planck diede l'avvio ad una radicale rivoluzione scientifica: la fisica quantistica. Egli aveva all'epoca 42 anni, era titolare di una cattedra prestigiosa all'Università di Berlino e non aveva mai nutrito dubbi sulla solidità della fisica ottocentesca, fondata sulla meccanica newtoniana e sull'elettromagnetismo maxwelliano.

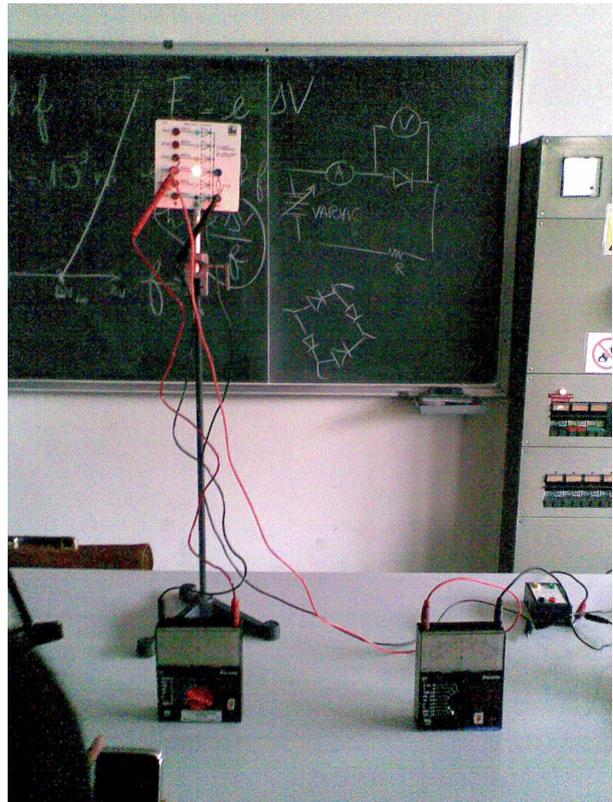
Vediamo ora alcune relazioni fra grandezze che serviranno successivamente nell'esperienza.  $E = q\Delta V$  e nel caso di elettroni ( $q=e=1,6 \times 10^{-19}$ )  $E = e\Delta V$ . Uguagliando l'equazione di Planck con la precedente relazione si ottiene  $e\Delta V = hf$ , quindi  $h = e\Delta V / f$  (considerando che  $f = c/\lambda$  e che  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). Utilizzando il valore del potenziale di attivazione del LED e la rispettiva frequenza ed inserendo tali valori nella formula precedente si ottiene la costante di Planck.

\*In continuità con le scoperte di Planck ve ne furono altre soprattutto da parte di Einstein che portò alle estreme conseguenze le scoperte di Planck. Einstein ipotizzò che la radiazione fosse composta da pacchetti di energia che verranno chiamati più tardi fotoni che hanno energia  $E = hf$  e quantità di moto  $p = hf/c$ .

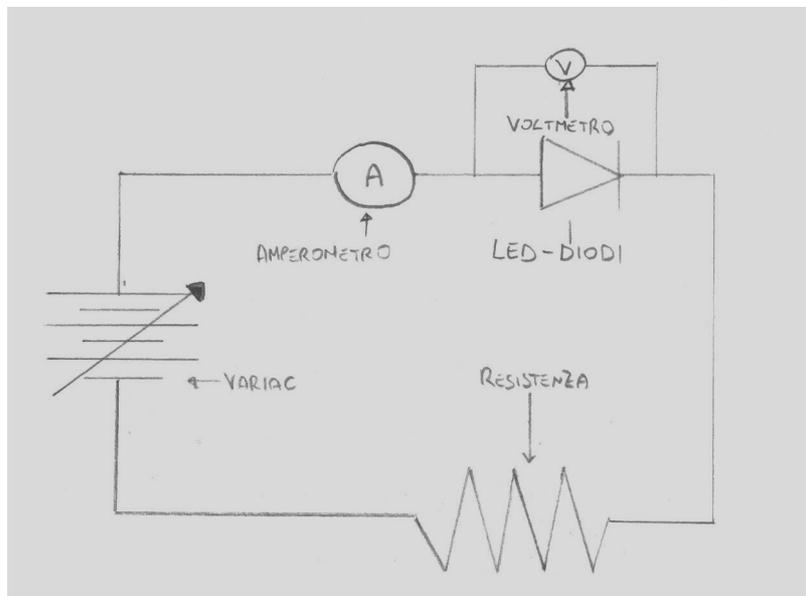
Vediamo infine cosa sono i **conduttori ohmici**. La prima legge di Ohm afferma che la d.d.p.  $\Delta V$  ai capi di un conduttore è direttamente proporzionale all'intensità di corrente  $i$  che lo percorre:  $\Delta V \propto i$ . In questa legge la costante di proporzionalità varia da materiale a materiale ed è la sua resistenza (R). Quindi la legge può essere scritta  $\Delta V = Ri$  di conseguenza  $R = \Delta V / i$ . L'unità di misura della resistenza è l'Ohm:  $[\Omega] = [V/A]$ . La resistenza può essere rappresentata su di un grafico cartesiano ponendo sull'asse delle ascisse la  $i$  e su quello delle ordinate il valore del d.d.p.; si ottiene così la curva caratteristica del conduttore preso in esame. Se si ottiene una retta passante per l'origine (la bisettrice del primo quadrante), allora  $\Delta V \propto i$  quindi il conduttore è ohmico. Non tutti i materiali sono ohmici, né tutti quelli che sono ohmici mantengono la loro resistenza costante all'aumentare della temperatura.

## Montaggio dell'esperienza

- Si collega alla presa di corrente continua, generata dal variac, ad un ponte a diodi con dei cavetti.
- Si collega il ponte a diodi al supporto per LED sempre con dei cavetti
- Si collega, in parallelo al supporto per LED, il voltmetro posizionato su DC (fondo scala 10 volt).
- Si collega, in serie col supporto per LED, l'ampmetro posizionato su DC, (fondoscala su 1 mA oppure 10 mA a seconda dei casi).
- Si varia l'intensità di corrente tramite la manopola del variac.
- Si registrano di volta in volta i valori presenti sul voltmetro ed amperometro secondo delle proporzioni.
- Si costruiscono le curve caratteristiche dei vari LED.
- Si calcola il potenziale di attivazione.
- Si calcola la costante di Planck.



Ecco uno schema ed una foto del circuito.



## Dati ed elaborazione

Riportiamo subito i valori teorici della tensione di accensione.

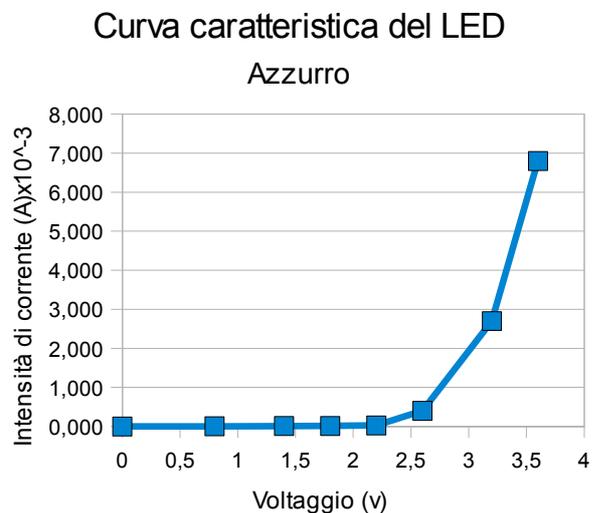
Colore LED	Tensione di accensione (v)
blu	3,5
verde	2,0
giallo	1,9
rosso	1,8

Invece la costante di Planck approssimata a due cifre significative:  $6,6 \times 10^{-34}$

Ecco i dati raccolti (tutti i dati ed i calcoli sono approssimati a 2 cifre significative)

→ LED azzurro:  $\lambda = 465 \times 10^{-9} \text{ m}$

$\Delta V \text{ (v)}$	$I \text{ (A)} \times 10^{-3}$
0,8	0,002
1,4	0,008
1,8	0,012
2,2	0,026
2,6	0,4
3,2	2,7
3,6	6,8



Come si evince dal grafico (si vedano i grafici su carta millimetrata), la tangente alla caratteristica incontra l'asse delle ascisse nel punto in cui il voltaggio vale 2,8 v. Si tratta della tensione di accensione. Un valore abbastanza buono dato che quello della luce blu vale circa 3,5 v. Ricordiamo ora che l'errore percentuale si calcola con la seguente formula che verrà applicata anche nei casi successivi:  $[(R_{th} - R_{sp})/R_{th}] \times 100$ . Quindi l'errore percentuale è del  $[(3,5 - 2,8)/3,5] \times 100 = 20\%$ .

Calcoliamo ora la costante di Planck con le formule enunciate nella premessa teorica.

Frequenza  $f = c/\lambda$  :  $f = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} / 465 \times 10^{-9} \text{ m} = 6,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .

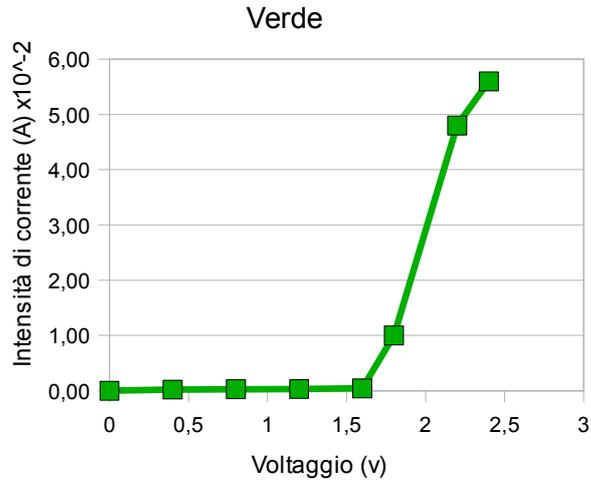
Costante di Planck  $h = e \Delta V / f$  :  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2,8 \text{ v} / 6,5 \times 10^{14} \text{ Hz} = 6,9 \times 10^{-34}$

Calcoliamo ora l'errore percentuale :  $[(6,6 \times 10^{-34} - 6,9 \times 10^{-34}) / 6,6 \times 10^{-34}] \times 100 = 4,5\%$

→ LED verde:  $\lambda = 560 \times 10^{-9} \text{ m}$

$\Delta V \text{ (v)}$	$I \text{ (A)} \times 10^{-2}$
0,4	0,020
0,8	0,025
1,2	0,030
1,6	0,042
1,8	1,00
2,2	4,80
2,4	5,60

Curva caratteristica del LED



Come si evince dal grafico (si vedano i grafici su carta millimetrata), la tangente alla caratteristica incontra l'asse delle ascisse nel punto in cui il voltaggio vale 1,7 v. Si tratta della tensione di accensione. Un valore abbastanza buono dato che quello della luce verde vale circa 2,0 v. Quindi l'errore percentuale è del  $[(2,0-1,7)/2,0] \times 100 = 15\%$ .

Calcoliamo ora la costante di Planck con le formule enunciate nella premessa teorica.

Frequenza  $f = c/\lambda : f = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} / 560 \times 10^{-9} \text{ m} = 5,4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .

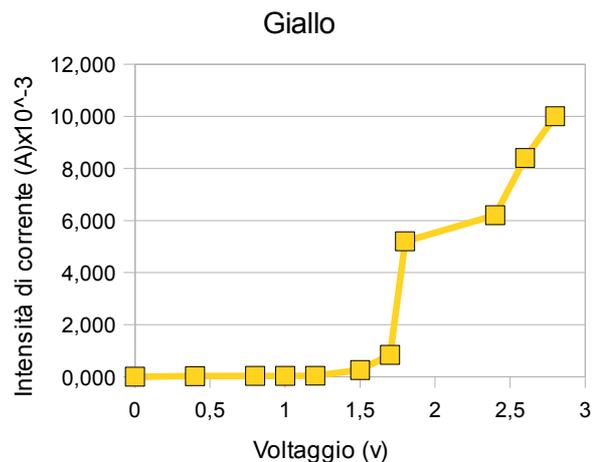
Costante di Planck  $h = e \Delta V / f : 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2 \text{ v} / 5,4 \times 10^{14} \text{ Hz} = 5,9 \times 10^{-34}$

Calcoliamo ora l'errore percentuale :  $[(6,6 \times 10^{-34} - 5,9 \times 10^{-34}) / 6,6 \times 10^{-34}] \times 100 = 11\%$

→ LED giallo:  $\lambda = 585 \times 10^{-9} \text{ m}$

$\Delta V \text{ (v)}$	$I \text{ (A)} \times 10^{-3}$
0,4	0,025
0,8	0,03
1	0,03
1,2	0,04
1,5	0,26
1,7	0,84
1,8	5,2
2,4	6,2
2,6	8,4
2,8	10

Curva caratteristica del LED



Come si evince dal grafico (si vedano i grafici su carta millimetrata), la tangente alla caratteristica incontra l'asse delle ascisse nel punto in cui il voltaggio vale 1,7 v. Si tratta della tensione di accensione. Un valore abbastanza buono dato che quello della luce blu vale circa 1,9 v. Quindi l'errore percentuale è del  $[(1,9-1,7)/1,9] \times 100 = 11\%$ .

Calcoliamo ora la costante di Planck con le formule enunciate nella premessa teorica.

Frequenza  $f = c/\lambda$  :  $f = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} / 585 \times 10^{-9} \text{ m} = 5,1 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .

Costante di Planck  $h = e \Delta V / f$  :  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1,7 \text{ V} / 5,1 \times 10^{14} \text{ Hz} = 6,3 \times 10^{-34}$

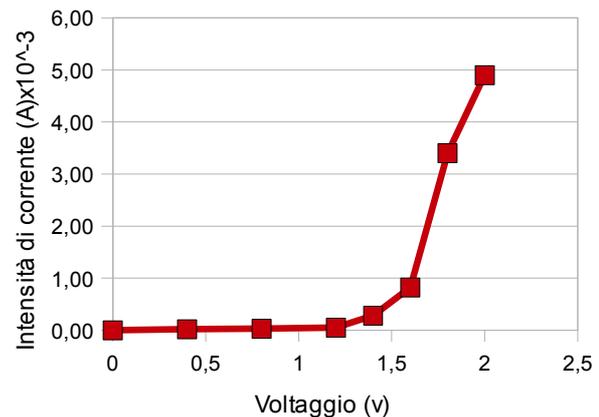
Calcoliamo ora l'errore percentuale :  $[(6,6 \times 10^{-34} - 6,3 \times 10^{-34}) / 6,6 \times 10^{-34}] \times 100 = 4,5\%$ .

→ **LED rosso:**  $\lambda = 635 \times 10^{-9} \text{ m}$

### Curva caratteristica del LED

Rosso

$\Delta V \text{ (v)}$	$I \text{ (A)} \times 10^{-3}$
0,4	0,02
0,8	0,03
1,2	0,05
1,4	0,28
1,6	0,82
1,8	3,4
2	4,9



Come si evince dal grafico (si vedano i grafici su carta millimetrata), la tangente alla caratteristica incontra l'asse delle ascisse nel punto in cui il voltaggio vale 1,5 v. Si tratta della tensione di accensione. Un valore abbastanza buono dato che quello della luce blu vale circa 1,8 v. Quindi l'errore percentuale è del  $[(1,8 - 1,5) / 1,8] \times 100 = 17\%$

Calcoliamo ora la costante di Planck con le formule enunciate nella premessa teorica.

Frequenza  $f = c/\lambda$  :  $f = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} / 635 \times 10^{-9} \text{ m} = 4,7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .

Costante di Planck  $h = e \Delta V / f$  :  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1,5 \text{ V} / 4,7 \times 10^{14} \text{ Hz} = 5,1 \times 10^{-34}$

Calcoliamo ora l'errore percentuale escludendo l'ordine di grandezza ( $10^{-34}$ ) altrimenti lo scarto non sarebbe apprezzabile:  $[(6,6 \times 10^{-34} - 5,1 \times 10^{-34}) / 6,6 \times 10^{-34}] \times 100 = 23\%$

A questo punto calcoliamo il valore medio della costante di Planck ricavato sperimentalmente per poi calcolare l'errore percentuale.

**Valore medio** =  $(6,9 \times 10^{-34} + 5,9 \times 10^{-34} + 6,3 \times 10^{-34} + 5,1 \times 10^{-34}) / 4 = 6,1 \times 10^{-34}$

**Errore percentuale** =  $[(6,6 \times 10^{-34} - 6,1 \times 10^{-34}) / 6,6 \times 10^{-34}] \times 100 = 7,6\%$

### Conclusioni

Si è verificato, come si evince dai grafici che i diodi, in questo caso i LED, non sono dei conduttori ohmici poiché la loro caratteristica non è una retta (ovvero  $i$  non è direttamente proporzionale a  $V$ ).

Inoltre è stato possibile stabilire i valori del potenziale di attivazione dei vari LED i cui errori percentuali sono del 20, 11, 15 e 17 %. Si tratta di risultati abbastanza buoni considerando il fatto che gli strumenti a disposizione non erano particolarmente precisi.

Infine si è ottenuto un valore della costante di Planck accettabile poiché il suo scarto percentuale è solo del 7,6 %. Presi singolarmente i valori ottenuti sono comunque accettabili dato che i vari errori percentuali sono rispettivamente del 4,5 11 4,5 e 23%.

