

**Cod. 5435**

## APPARECCHIO PER LO STUDIO DELL'EFFETTO FOTOELETTRICO - COSTANTE DI PLANCK



**OPTIKA S.r.l.**

Via Rigla, 30 – 24010 Ponteranica (Bergamo) – Italia  
Tel. +39 035 571392 Fax +39 035 571435

[www.optikascience.com](http://www.optikascience.com) [info@optikascience.com](mailto:info@optikascience.com)

## ARGOMENTI TRATTATI

- 1° Istruzioni per l'uso
- 2° Note storiche sulla natura della luce
- 3° Le onde elettromagnetiche
- 4° l'intensità di un' onda elettromagnetica
- 5° L'effetto fotoelettrico
- 6° Il lavoro di estrazione
- 7° La frequenza di soglia
- 8° La curva caratteristica della fotocellula
- 9° Il potenziale di arresto
- 10° L'energia cinetica degli elettroni è indipendente dall'intensità della radiazione
- 11° La corrente anodica aumenta con l'intensità della radiazione
- 12° L'energia cinetica degli elettroni aumenta con la frequenza della radiazione
- 13° Facciamo il punto
- 14° La teoria quantistica di Einstein
- 15° Come la teoria di Einstein spiega i fatti sperimentali
- 16° Valutazione della frequenza di soglia della fotocellula
- 17° Misurazione della costante di Planck

N° Esperienze eseguibili: 8

## ELENCO DEL MATERIALE FORNITO

- 1 SUPPORTO CON FOTOCELLULA, PORTALED E TAPPO OPACO
- 1 CENTRALINA DI COMANDO CON ALIMENTATORE 24V dc
- 1 LED ROSSO ( $\lambda = 618 \pm 10$ ) nm
- 1 LED VERDE ( $\lambda = 533 \pm 10$ ) nm
- 1 LED BLU ( $\lambda = 462 \pm 10$ ) nm

## DESCRIZIONE DEL MATERIALE FORNITO



Fig. 1

## 1° ISTRUZIONI PER L'USO

### LA CENTRALINA DI COMANDO

In figura 2a è mostrata la parte anteriore della centralina di comando.



Fig. 2a

In figura 2b è mostrata la parte posteriore della centralina di comando.



Fig. 2b

## OPERAZIONI PRELIMINARI

Collega la fotocellula all'ingresso della centralina, un LED a scelta all'uscita alimentazione dei LED e l'alimentatore alla presa di corrente di rete. Accendi la centralina e verifica la funzionalità della sorgente luminosa con il comando intensità LED. Noterai che al variare di questa manopola, sul display di destra appare la lettera L seguita dalla percentuale dell'intensità luminosa rispetto al valore massimo.

Per esempio, la scritta L050 significa che la luminosità del LED è al 50% di quella massima.

**Si ricordi che i LED impiegano del tempo (circa 5 minuti dalla prima accensione) a raggiungere l'equilibrio termico. Il mancato stabilirsi dell'equilibrio può inficiare l'esito delle misure.**

### ATTENZIONE: regolazione dell'offset

Prima di ogni esperienza è importante azzerare le eventuali correnti anodiche parassite che si creano all'interno del circuito. Quando l'ingresso dei LED è chiuso dal tappo opaco, regola la tensione anodica a  $V_a=0$  V e premi il pulsante offset. Questo pulsante spegne automaticamente il led e azzerà l'amperometro.

Il tasto offset va tenuto premuto per almeno 4 o 5 secondi e va rilasciato quando si visualizzano 0 nA.

Piccole variazioni dell'ultima cifra della corrente anodica ( $10^{-9}$  A) sono causate da inevitabili disturbi esterni.

Nel caso sia necessario azzerare l'amperometro quando il fotocatodo è illuminato e la tensione anodica è a 0 V, premendo il pulsante offset, potrai notare una variazione della tensione più o meno grande a seconda dell'intensità luminosa del LED utilizzato. Questa variazione è del tutto normale quando si studiano correnti così piccole e non compromette il risultato delle misure da effettuare. Quello che avviene all'interno del circuito è che se il LED si spegne, non circola più corrente nel fototubo, di conseguenza, a causa dell'alta resistenza di uscita dell'alimentatore, la tensione subisce una variazione.

## 2° NOTE STORICHE SULLA NATURA DELLA LUCE

Uno dei più grandi enigmi che hanno dovuto affrontare i fisici di ogni tempo, riguarda la natura della luce.

La luce stimola in noi una moltitudine di sensazioni, come la visione e i colori.

Ma, che cos'è la luce? Qual è la sua vera essenza? Come si genera? Come si propaga?

Per rispondere a queste domande, tra il XVII e il XVIII secolo furono proposte due diverse teorie fisiche sulla natura della luce, **la teoria corpuscolare e la teoria ondulatoria.**

Secondo la teoria corpuscolare, che ebbe il suo più autorevole sostenitore in Isaac Newton, ogni sorgente di luce dovrebbe emettere una corrente di tenuissimi corpuscoli in ogni direzione, per cui la visione sarebbe dovuta all'introduzione di questi corpuscoli negli occhi.

Secondo la teoria ondulatoria, invece, la luce sarebbe un fenomeno di propagazione di energia con carattere ondulatorio. I principali assertori della teoria ondulatoria furono, inizialmente, l'olandese Christian Huygens, (1629-1685) e l'inglese Robert Hooke (1635-1703); in un secondo tempo, l'inglese Thomas Young (1773-1829) e il francese Augustin- Jean Fresnel (1788-1827), i quali approfondirono lo studio su importanti fenomeni quali, la diffrazione, l'interferenza e la polarizzazione della luce.

Tra gli assertori delle due opposte teorie, ebbe luogo una disputa scientifica aspra, che si protrasse a lungo. Come sempre accade in queste situazioni, fu l'esperienza a dirimere la questione.

Quando nel 1850 il fisico francese Leon Foucault dimostrò sperimentalmente che la velocità della luce nei mezzi trasparenti è minore di quella nel vuoto, la teoria corpuscolare, che prevedeva il contrario, fu definitivamente abbandonata. La teoria ondulatoria, però, lasciava aperta una questione importante. Nel XIX secolo era noto che le onde meccaniche, per propagarsi, necessitano di un mezzo elastico. Gli studiosi del tempo si posero, quindi, la seguente domanda: **come può la luce emessa dal Sole e dalle altre stelle arrivare a noi attraversando gli spazi cosmici in assenza di aria?**

Essi, quindi, ipotizzarono che in tutto lo spazio, anche quello ritenuto vuoto, fosse presente una sostanza, non percepibile dai nostri sensi, alla quale fu dato il nome di **etere cosmico.**

### 3° LE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Fin dalla metà del XVIII secolo ai fisici era noto che quando un corpo elastico esegue delle oscillazioni, genera intorno a sè delle onde, mediante le quali irradia energia meccanica nello spazio.

Verso il 1864 il fisico scozzese James Clerk Maxwell dimostrò matematicamente che, quando ad oscillare è una carica elettrica, vengono generate **onde elettromagnetiche**.

In particolare egli scoprì che l'irraggiamento di energia elettromagnetica è una conseguenza del moto accelerato delle cariche elettriche.

Quando poi dimostrò che le onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto con velocità  $c = 300.000$  km/s, che è la velocità della luce, gli fu facile dedurre che anche la luce dovesse essere costituita di onde elettromagnetiche con particolare lunghezza d'onda. La produzione e la rivelazione sperimentale di onde elettromagnetiche (anche definite radiazioni), fu eseguita per la prima volta, verso il 1888, dal fisico tedesco Heinrich Hertz. Oggi sappiamo che esistono diverse onde elettromagnetiche le cui proprietà dipendono dalla lunghezza d'onda (fig. 3), che è legata alla frequenza dalla relazione

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

- onde radio:** ( $\lambda > 1$  m), usate nelle comunicazioni radio-televisive;
- microonde:** ( $1$  m  $>$   $\lambda >$  1 mm), usate nei sistemi radar e nella navigazione aerea;
- radiazioni infrarosse:** ( $1$  mm  $>$   $\lambda >$  750 nm), emesse dai corpi caldi;
- radiazioni ottiche:** ( $750$  nm  $>$   $\lambda >$  380 nm), che stimolano la sensazione di luce;
- radiazioni ultraviolette:** ( $380$  nm  $>$   $\lambda >$  10 nm), che provengono dal sole;
- radiazioni X:** ( $10$  nm  $>$   $\lambda >$  1 pm), usate in medicina e in metallurgia;
- radiazioni gamma:** ( $1$  pm  $>$   $\lambda$ ), emesse dai nuclei radioattivi.

1nm =  $10^{-9}$  m; 1pm =  $10^{-12}$  m.

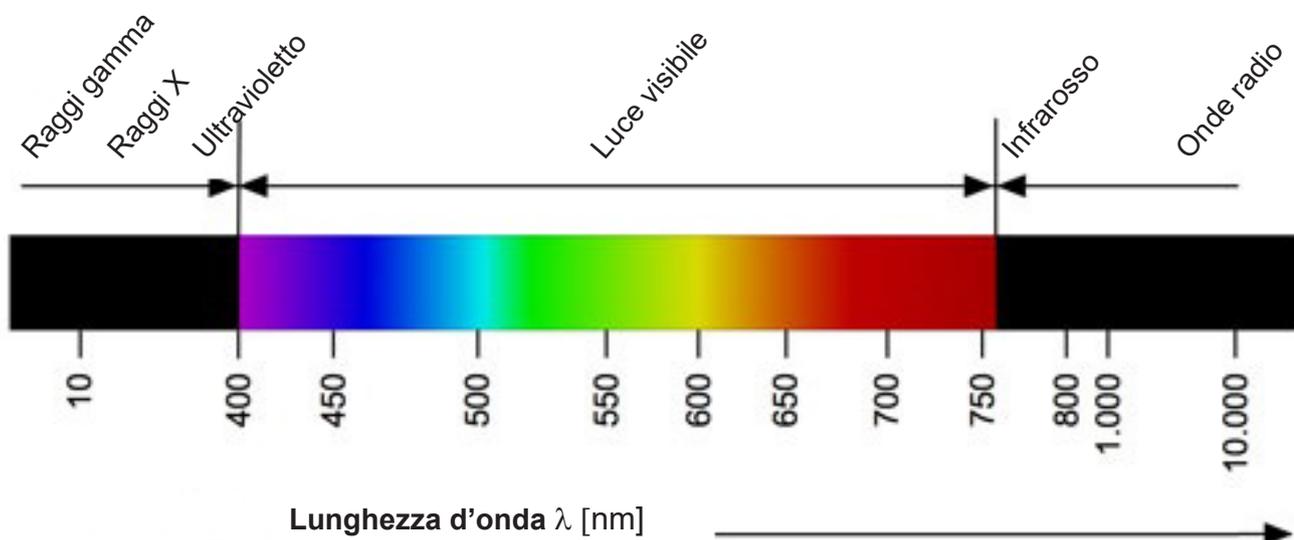


Fig. 3

#### 4° L' INTENSITA' DI UN' ONDA ELETTROMAGNETICA

Secondo la teoria ondulatoria classica l'energia trasportata da un'onda elettromagnetica è proporzionale alla sua intensità, cioè al quadrato della sua ampiezza. Quindi non dipende dalla sua frequenza.

Cioè, **radiazioni aventi diversa frequenza, ma eguale ampiezza, dovrebbero avere la stessa energia.** (Fig. 4).

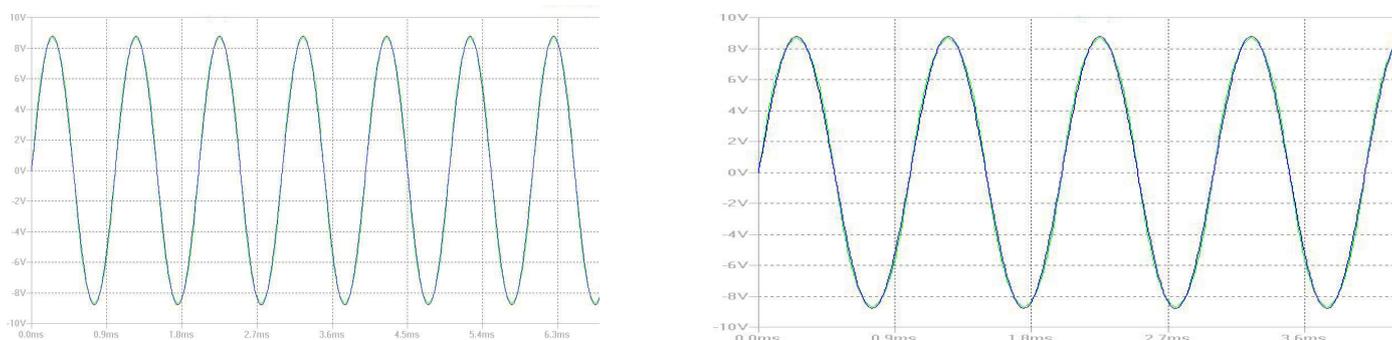


Fig. 4

Se indichiamo con  $E$  l'energia inviata da una radiazione in un intervallo di tempo  $\Delta t$  su una superficie  $S$ , si definisce **intensità di irraggiamento** la quantità di energia incidente nell'unità di tempo sull'unità di superficie.

Cioè,

$$I = \frac{E}{S \Delta t} \quad (1)$$

Ma è anche  $E = P \Delta t$  dove  $P$  è la potenza della radiazione. Quindi,

$$I = \frac{P}{S} \quad (\text{W} / \text{m}^2) \quad (2)$$

## 5° L'EFFETTO FOTOELETTRICO

Esperimenti eseguiti dal tedesco H. R. Hertz, verso il 1887, aventi lo scopo di dimostrare l'esistenza delle onde elettromagnetiche, previste teoricamente dallo scozzese Maxwell, rivelarono, casualmente, che alcuni metalli, irradiati dalla luce, acquistavano una carica positiva. ( Fig. 5).

Ulteriori esperimenti furono effettuati dal tedesco P. Lenard e dall'italiano A. Righi, che diede a questo fenomeno il nome di **effetto fotoelettrico**.

La scoperta dell'elettrone, avvenuta nel 1895 ad opera dell'inglese J.J. Thompson, convinse i fisici ad ipotizzare che il fenomeno fosse dovuto all'emissione di elettroni, che sono cariche negative, da parte dei metalli irradiati.

L'effetto fotoelettrico viene realizzato mediante particolari valvole elettriche, definite **fordiodi** o **foto cellule**, che sono costituite essenzialmente da un bulbo di vetro nel quale viene creato il vuoto. (Fig. 6)

Una piastrina ricurva di metallo, preferibilmente alcalino, costituisce l'emettitore di elettroni, anche definito **fotocatodo**. Un filo di platino posto di fronte al fotocatodo e definito **anodo**, ha il compito di accogliere gli elettroni emessi dal fotocatodo quando viene irradiato.

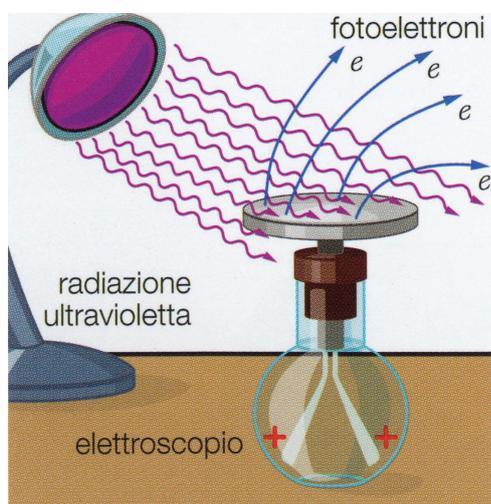


Fig. 5

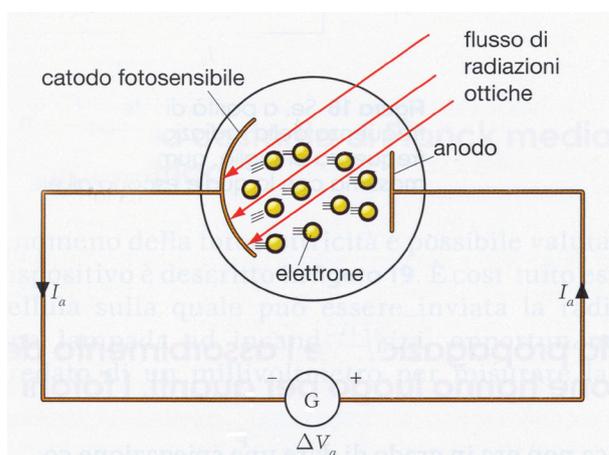


Fig. 6

Puoi realizzare l'effetto fotoelettrico con la seguente esperienza.

### ESPERIENZA N. 1

Materiale occorrente: 1 supporto con cellula fotoelettrica; 1 centralina di comando; 1 tappo opaco; 1 LED di luce blu.

Al fine di prendere confidenza con l'apparecchio, allestisci l'apparecchiatura illustrata in figura 7 chiudendo il portaLED con il tappo opaco. Accendi l'alimentatore, porta la tensione anodica al valore di 0 V e premi il pulsante offset. Questo pulsante azzerla la corrente che circola nella fotocellula. Noterai che l'intensità della corrente anodica è sempre  $i \approx 0$ , per qualunque valore positivo della tensione anodica.

Se togli il tappo e inserisci il LED acceso (almeno 20%), l'amperometro segnala il passaggio di corrente elettrica, la cui intensità aumenta con l'aumentare della tensione anodica (fig. 8).

Non essendoci contatto diretto tra il catodo e l'anodo, è evidente che,

***l'irradiazione del catodo ha provocato emissione di elettroni poi catturati dall'anodo positivo.***  
***Se sul catodo non perviene energia raggiante, non vengono emessi elettroni.***



Fig. 7



Fig. 8

## 6° IL LAVORO DI ESTRAZIONE

Gli elettroni di conduzione di un metallo hanno sia un'energia cinetica  $K$ , sia un'energia potenziale  $U$  (in modulo sempre maggiore di  $K$ ). Essendo il campo tra elettroni e metallo di tipo attrattivo, il potenziale è negativo e va aumentando all'aumentare della distanza, fino ad azzerarsi all'infinito. Per allontanare dal metallo un elettrone, ad una qualsiasi distanza, sarà pertanto necessario compiere un lavoro.

**Il lavoro di estrazione  $W_e$  è l'energia che è necessario fornire all'elettrone di conduzione per strapparlo al metallo e portarlo, fermo, all'infinito**, ossia dove l'energia potenziale dell'elettrone è nulla e dunque anche tutta la sua energia. Trattandosi di un conduttore, non appena l'elettrone viene a trovarsi fuori dalla superficie del metallo, gli elettroni di conduzione vanno a schermare la lacuna positiva lasciata dall'elettrone.  $W_e$  rappresenta dunque l'energia minima necessaria all'elettrone per uscire dal metallo.

Poiché il lavoro di estrazione dipende dall'energia potenziale, esso varia al variare del campo elettrico in cui l'elettrone è immerso, e dunque varia di metallo in metallo. Nella seguente tabella è riportato il valore del lavoro di estrazione per alcuni metalli. In riferimento alla relazione che classicamente lega il lavoro  $L$  al potenziale  $V$ , ossia,  $L = eV$ , dove  $e$  è la carica dell'elettrone e  $V$  è il potenziale, si parla quindi anche di potenziale di estrazione. Ricordiamo che  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Elemento	Simbolo	$W_e$ (eV)
Potassio	K	2,25
Sodio	Na	2,28
Calcio	Ca	3,20
Torio	Th	3,47
Zinco	Zn	4,27
Rame	Cu	4,48
Ferro	Fe	4,63
Argento	Ag	4,70
Nichel	Ni	4,91

## 7° LA FREQUENZA DI SOGLIA

Verso il 1900 il fisico tedesco Lenard (1862-1947) eseguì una serie di esperimenti sull'effetto fotoelettrico in seguito ai quali scoprì che l'emissione di elettroni da parte dei metalli varia da metallo a metallo a seconda della radiazione elettromagnetica utilizzata.

Egli trovò che,

**ogni metallo, è caratterizzato da una data lunghezza d'onda, che gode della seguente proprietà: esso emette elettroni soltanto se la radiazione incidente ha una lunghezza d'onda minore di una caratteristica lunghezza d'onda  $\lambda_0$  definita "soglia fotoelettrica". La frequenza di soglia per ogni metallo risulta**

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad (3)$$

dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto.

Nella seguente tabella sono riportate le frequenze di soglia per alcuni metalli.

Metallo	frequenza ( $f_0$ )	lungh. d'onda $\lambda_0$	Rad. E.M.
Potassio (K)	$5,43 \times 10^{14}$ Hz	$552 \times 10^{-9}$ m = 552 nm	luce verde
Sodio (Na)	$5,51 \times 10^{14}$ Hz	$544 \times 10^{-9}$ m = 544 nm	luce verde
Calcio (Ca)	$7,74 \times 10^{14}$ Hz	$388 \times 10^{-9}$ m = 388 nm	luce viola
Torio (Th)	$8,39 \times 10^{14}$ Hz	$357 \times 10^{-9}$ m = 357 nm	raggi u.v.
Zinco (Zn)	$1,03 \times 10^{15}$ Hz	$291 \times 10^{-9}$ m = 291 nm	raggi u.v.
Rame (Cu)	$1,08 \times 10^{15}$ Hz	$278 \times 10^{-9}$ m = 278 nm	raggi u.v.
Ferro (Fe)	$1,12 \times 10^{15}$ Hz	$268 \times 10^{-9}$ m = 268 nm	raggi u.v.
Argento (Ag)	$1,14 \times 10^{15}$ Hz	$263 \times 10^{-9}$ m = 263 nm	raggi u.v.
Nichel (Ni)	$1,19 \times 10^{15}$ Hz	$252 \times 10^{-9}$ m = 252 nm	raggi u.v.

Se tu potessi disporre di molte altre sorgenti di radiazione monocromatica, scopriresti che il catodo della fotocellula di cui disponi ha questa caratteristica:

**emette elettroni soltanto se la radiazione incidente ha una lunghezza d'onda minore di circa 650 nm, quindi una frequenza maggiore di  $4,62 \cdot 10^{14}$  Hz.**

La radiazione con questa frequenza è rossa.

## 8° LA CURVA CARATTERISTICA DELLA FOTOCELLULA

Una volta nota la frequenza di soglia di una fotocellula, è interessante verificare come varia l'intensità della corrente anodica  $i$  al variare della differenza di potenziale  $\Delta V$  tra anodo e catodo, quando la radiazione elettromagnetica utilizzata abbia una frequenza superiore alla frequenza di soglia.

Puoi verificarlo con la seguente esperienza nella quale viene utilizzata la luce verde di un LED, con una lunghezza d'onda  $\lambda = (533 \pm 10)$  nm.

### ESPERIENZA N. 2

Materiale occorrente: 1 supporto con cellula fotoelettrica; 1 centralina di comando; 1 LED verde.

Alllestisci l'apparecchiatura descritta in figura 8 e premi il pulsante offset, utilizzando il LED verde come sorgente di radiazioni. Regola l'alimentazione del LED al 40% e mantienila costante durante tutta l'esperienza. Indica  $I_l$  l'intensità luminosa del LED.

Poi regola la differenza di potenziale tra anodo e catodo al valore  $\Delta V = 0$  V.

Aumenta la tensione anodica di 1 V alla volta e prendi nota, ogni volta, del valore della corrente anodica  $i$ . Riportando le misure in un riferimento cartesiano, si ottiene il grafico di figura 9.

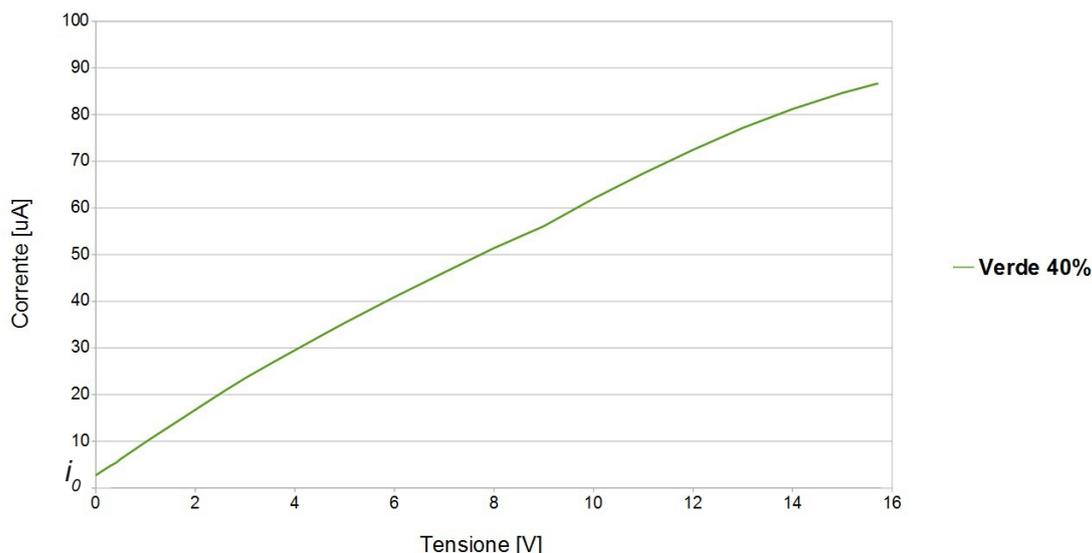


Fig. 9

Questi sono gli aspetti importanti del grafico:

1) Aumentando la tensione anodica la corrente anodica cresce linearmente nel primo tratto, ma all'aumentare della tensione, la corrente tende a saturarsi.

Si può spiegare questo risultato tenendo presente che **la saturazione si verifica quando tutti gli elettroni emessi dal catodo sono raccolti dall'anodo.**

2) Il secondo aspetto interessante è che quando la tensione anodica è nulla, la corrente anodica non è nulla ma ha un'intensità di  $i_0$ .

Questo significa che, **l'energia che alcuni elettroni del catodo acquistano dalla radiazione incidente è sufficiente ad eseguire il lavoro di estrazione e a fornire, inoltre, un'energia cinetica che consente loro di raggiungere l'anodo anche se questo è a potenziale zero.**

## 9° IL POTENZIALE DI ARRESTO

L'aspetto evidenziato al punto 2) della precedente esperienza, è simile ad un fenomeno meccanico. Lanciando un oggetto verso l'alto, l'energia cinetica che gli viene conferita gli consente di vincere per un certo tratto l'attrazione del campo gravitazionale. L'altezza massima raggiunta è quella in corrispondenza della quale l'energia potenziale gravitazionale acquisita eguaglia l'energia cinetica di partenza.

In modo analogo, **perchè un elettrone, una volta uscito dal catodo, possa raggiungere l'anodo, deve avere energia cinetica sufficiente a vincere l'attrazione esercitata dal nucleo dal quale è uscito.**

È possibile valutare la massima energia cinetica  $K_{max}$  degli elettroni emessi fornendo all'anodo un potenziale negativo  $\Delta V_a$ , tale da creare un campo elettrico repulsivo in grado di arrestare anche gli elettroni con la massima energia cinetica.

Questo è il motivo per cui  $\Delta V_a$  viene definito **potenziale di arresto.**

In questa situazione l'energia cinetica massima con la quale gli elettroni escono dal catodo, deve essere eguale alla loro energia potenziale elettrica. Cioè,

$$K_{max} = e \Delta V_a \quad (4)$$

dove  $e$  è la carica dell'elettrone.

Puoi determinare il potenziale di arresto, in corrispondenza della luce verde, con la seguente esperienza.

**ESPERIENZA N. 3** Materiale occorrente: come nell'esperienza N. 2.

Disponi l'apparecchio come in figura 8, controllando che il regolatore dell'intensità della luce LED sia ancora al 40%.

Inizia a dare all'anodo una tensione di 0V e premi il pulsante offset. L'amperometro segnerà il valore  $i_0$ . Lentamente, passa a valori sempre più negativi fino a quando la corrente anodica si azzerà. Quando la corrente è prossima allo zero, premi nuovamente il pulsante offset per avere la certezza che non siano presenti correnti parassite. E' possibile considerare l'intensità della corrente anodica nulla quando il nanoamperometro segna il valore 0,000  $\mu\text{A}$  anche solo per un istante. Delle piccole oscillazioni sono normali vista la criticità della misura.

Definiamo

$$\Delta V_{av} = \text{potenziale d'arresto nel caso di led verde} \quad (5)$$

a cui corrisponde un'energia cinetica massima

$$K_{max} = e \Delta V_{av} \quad (6)$$

Questo tratto della curva caratteristica è mostrato in figura 10, mentre in figura 11 è mostrata l'intera curva caratteristica quando l'intensità luminosa del LED è al 40%.

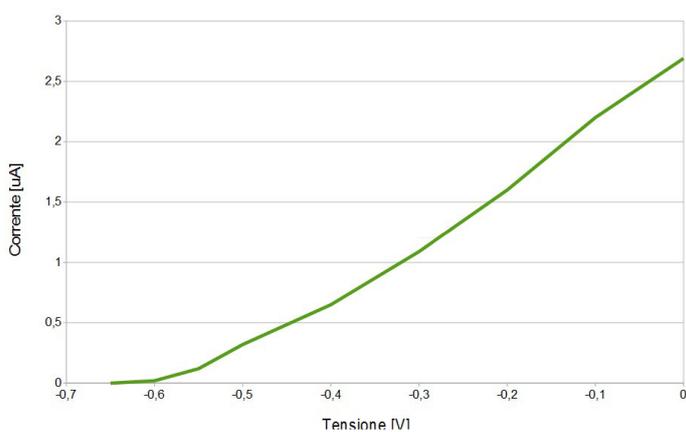


Fig. 10

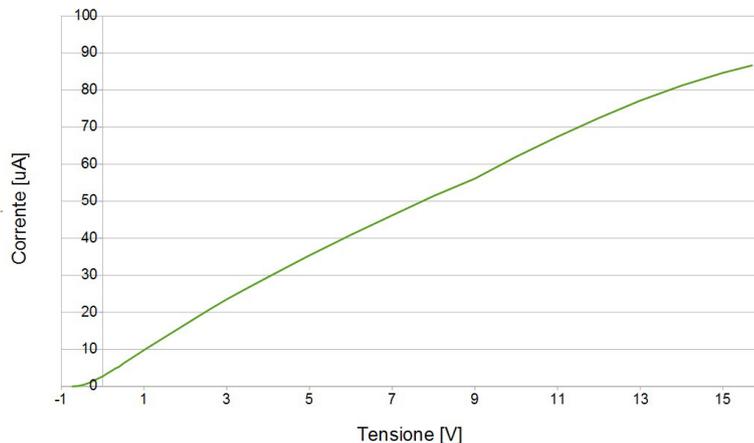


Fig. 11

## 10° L'ENERGIA CINETICA DEGLI ELETTRONI E' INDIPENDENTE DALL'INTENSITA' DELLA RADIAZIONE

Al paragrafo 4° è stato fatto presente che, secondo la teoria ondulatoria classica, l'energia trasportata da una radiazione è proporzionale alla sua intensità. Di conseguenza una radiazione più intensa, dovrebbe fornire una maggiore energia cinetica massima agli elettroni emessi, per cui, in base alla relazione (4), anche il modulo del potenziale di arresto  $|\Delta V_a|$  dovrebbe aumentare con il crescere dell'intensità della radiazione. E' proprio così? Puoi verificarlo con la seguente esperienza.

**ESPERIENZA N. 4** Materiale occorrente: come nell'esperienza N. 2.

A questo punto, è possibile aumentare la tensione di alimentazione del LED al 60 % per verificare come cambia la risposta del fototubo al variare dell'intensità della radiazione che incide sul catodo. Seguendo la teoria classica, ci aspettiamo che intensità della radiazione e potenziale d'arresto siano tra loro direttamente proporzionali.

Ripeti l'esperienza N.3 e verifica il valore del potenziale di arresto.

Se durante queste operazioni hai osservato gli strumenti, ti sarai accorto che il potenziale di arresto è rimasto sostanzialmente immutato. Questo significa che ***l'energia cinetica massima degli elettroni emessi dal catodo, è indipendente dall'intensità della radiazione incidente.***

Questa caratteristica dell'effetto fotoelettrico, è incompatibile con la teoria classica della radiazione.

## 11° LA CORRENTE ANODICA AUMENTA AL CRESCERE DELL'INTENSITA' DELLA RADIAZIONE

Con l'esperienza N. 4 hai potuto verificare che l'energia cinetica degli elettroni non dipende dall'intensità della radiazione incidente. Con la prossima esperienza invece, noterai che l'intensità della corrente dipende dall'intensità luminosa della radiazione.

### ESPERIENZA N. 5

Materiale occorrente: 1 supporto con cellula fotoelettrica; 1 centralina di comando; 1 LED verde.

Ripeti le esperienze N. 2 e 3 con l'intensità del led impostata su diversi valori (al 20%, 25% o 30%), variando il potenziale anodico dall'annullamento della corrente nella fotocellula alla tensione massima che l'alimentatore può fornire. Riporta in un grafico le curve caratteristiche del led verde con le diverse intensità (Fig. 12).

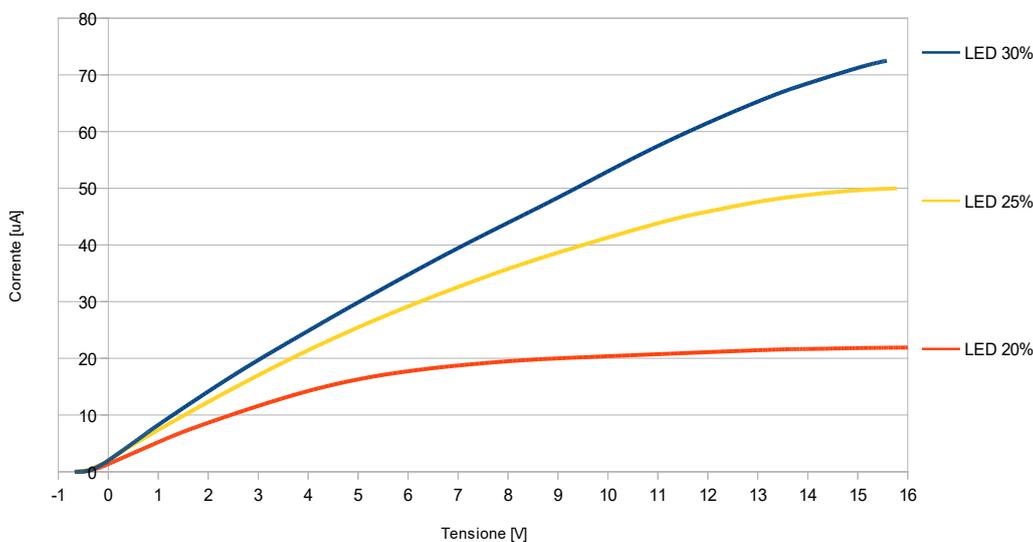


Fig. 12

Dal confronto delle curve si notano due importanti proprietà; **a parità di tensione anodica, l'intensità della corrente  $i$  cresce con l'aumentare dell'intensità  $I$  della radiazione.**

Ricordiamo, infatti, che l'energia catturata da ogni elettrone per abbandonare il catodo è misurata dal lavoro di estrazione  $L$ ; quindi, se indichiamo  $E$  l'energia radiante che incide sul catodo in un intervallo di tempo  $\Delta t$ , il numero di elettroni emessi dal catodo nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  risulta,

$$N = \frac{E}{L}$$

e la carica elettrica totale emessa dal catodo nello stesso intervallo di tempo è

$$Q = N e \quad \text{dove } e = \text{carica dell'elettrone}$$

l'intensità della corrente elettrica risulta

$$i = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{N e}{\Delta t} = \frac{E e}{L \Delta t}$$

ricordando le relazioni (1) e (2), otteniamo

$$i = \frac{I S e}{L} \quad (7)$$

la quale mostra che l'intensità  $i$  della corrente elettrica è proporzionale all'intensità  $I$  della radiazione.

In secondo luogo, **al variare dell'intensità luminosa, il potenziale di arresto non varia, a conferma del fatto che l'energia cinetica massima degli elettroni non dipende dall'intensità della radiazione  $I$ .**

## 12° L'ENERGIA CINETICA DEGLI ELETTRONI EMESSI AUMENTA AL CRESCERE DELLA FREQUENZA DELLA RADIAZIONE

Con la precedente esperienza hai potuto verificare che l'energia cinetica degli elettroni emessi, non dipende dall'intensità della radiazione incidente. Ma ciò che caratterizza un'onda elettromagnetica sono due grandezze fisiche: l'intensità e la frequenza. E' lecito ipotizzare che l'energia cinetica degli elettroni emessi possa dipendere dalla frequenza della radiazione incidente. Solo l'esperienza può rispondere a questo interrogativo.

### ESPERIENZA N. 6

Materiale occorrente: 1 supporto con cellula fotoelettrica; 1 centralina di comando; 1 LED blu.

Dopo aver regolato l'offset, utilizza la disposizione mostrata in figura 10 sostituendo il led verde con il led blu. Regola l'intensità al 40% in modo che sia la stessa utilizzata per il LED verde. Inizia dando all'anodo una tensione di 0V. Poi operando lentamente, dai all'anodo potenziali sempre più negativi fino a quando la corrente anodica si azzerava. Quando la corrente è prossima allo zero, premi nuovamente il pulsante offset per avere la certezza che non siano presenti correnti parassite.

Indichiamo con  $\Delta V_{aB}$  la tensione di interdizione della luce blu a cui corrisponde una energia cinetica massima

$$K_{max} = e \Delta V_{aB} \quad (8)$$

Come si vede il potenziale di arresto in corrispondenza della luce blu è, in valore assoluto, molto più elevato di quello relativo alla luce verde. D'altra parte la frequenza della luce blu è maggiore di quella della luce verde, quindi si può affermare che, il potenziale di interdizione diviene sempre più negativo con l'aumentare della frequenza della radiazione incidente. Cioè,

$$\text{se } f_2 > f_1 \quad \text{è pure} \quad |\Delta V_{a2}| > |\Delta V_{a1}|$$

In base alla relazione (4) si ha anche  $K_{max a2} > K_{max a1}$ , e si può quindi concludere che,

**L'energia cinetica massima in possesso agli elettroni che vengono estratti dal catodo, non dipende dall'intensità della radiazione incidente, bensì dalla sua frequenza.** (Fig. 13).

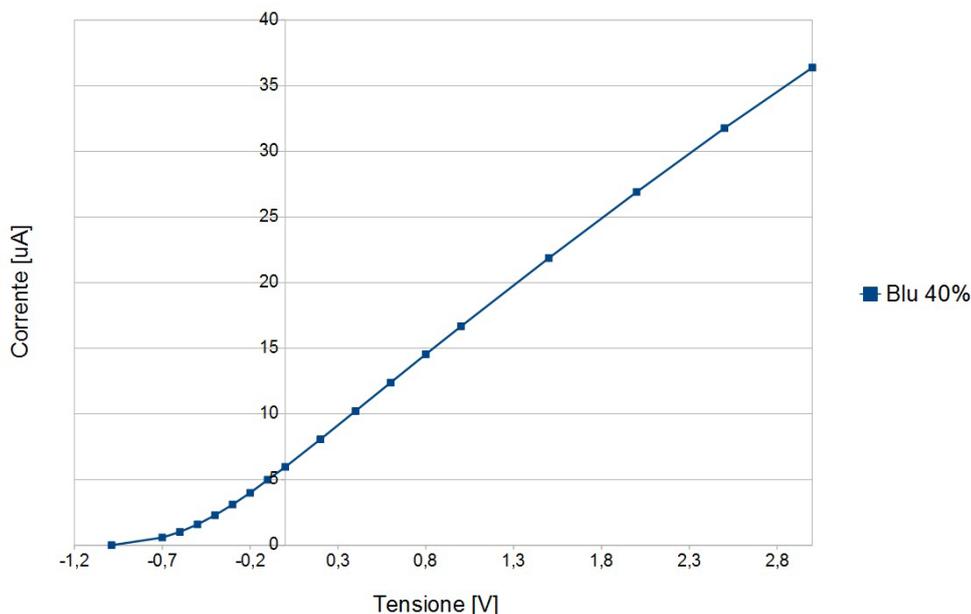


Fig. 13

## 13° FACCIAMO IL PUNTO

Le esperienze fin qui eseguite hanno consentito di verificare le seguenti proprietà dell'effetto fotoelettrico.

- 1) L'estrazione di un elettrone da parte di un metallo richiede dall'esterno l'esecuzione di un lavoro, definito, appunto, **lavoro di estrazione**.
- 2) Per alcuni metalli l'estrazione di elettroni si ottiene mediante irradiazione di onde elettromagnetiche.
- 3) Perché un metallo possa emettere elettroni per irraggiamento, è necessario che la frequenza della radiazione incidente non sia minore di una particolare frequenza, definita **frequenza di soglia**.
- 4) Se l'energia della radiazione incidente è maggiore del lavoro di estrazione gli elettroni escono dal metallo con una certa energia cinetica.
- 5) Secondo la teoria ondulatoria classica l'energia trasportata da un'onda elettromagnetica dipende dalla sua intensità, non dalla sua frequenza.
- 6) L'esperienza dimostra, invece, che, aumentando l'intensità dell'onda incidente, aumenta il numero di elettroni emessi, ma non aumenta la loro energia cinetica.
- 7) L'esperienza dimostra che l'energia cinetica degli elettroni aumenta soltanto al crescere della frequenza della radiazione incidente.

**Risulta chiaro che l'elettromagnetismo classico non è in grado di fornire una spiegazione di questo particolare aspetto dell'effetto fotoelettrico.**

## 14° LA TEORIA QUANTISTICA DI EINSTEIN

In una memoria pubblicata nel 1905, Einstein espone una sua teoria per spiegare l'effetto fotoelettrico, che nel 1921 gli valse il premio Nobel. In essa Einstein generalizzava un'idea esposta alla fine del 1900 da Planck per interpretare teoricamente la curva di emissione di radiazione da parte del corpo nero.

Planck aveva supposto che l'energia elettromagnetica venga emessa dalla materia soltanto per multipli interi di piccole quantità, definite successivamente " **quanti** ".

L'energia trasportata da un singolo quanto è

$$E = h f \quad (9)$$

dove  $f$  è la frequenza della radiazione e  $h$  è una costante che ha le dimensioni di una azione (energia x tempo) e alla quale Planck attribuì il seguente valore:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (10)$$

L'ipotesi di Einstein fu quella di supporre che,

**l'energia elettromagnetica, non solo viene emessa dalla materia per quanti, ma si propaga anche per quanti.** Cioè,

**egli suppose che il campo elettromagnetico sia composto di quanti di radiazione, ai quali fu dato il nome di fotoni.** (Fig. 14).

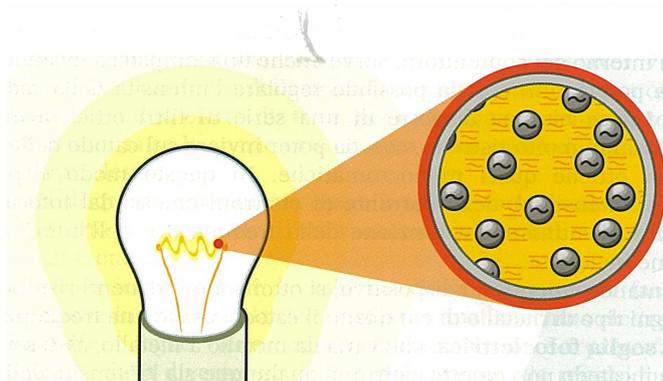


Fig. 14

## 15° COME LA TEORIA DI EINSTEIN SPIEGA I FATTI SPERIMENTALI

Come è stato esposto al paragrafo 6°, per estrarre un elettrone da un materiale è necessario che dall'esterno venga eseguito il corrispondente lavoro  $W_e$ . L'ammontare di questo lavoro, oltre che dal tipo di materiale usato, dipende dalla posizione dell'elettrone. Sarà minimo per gli elettroni di superficie e massimo per quelli più interni.

L'energia necessaria all'esecuzione del lavoro è fornita dalla radiazione.

Il carattere discontinuo della radiazione elettromagnetica prevista da Einstein prevede come conseguenza che ***l'interazione tra radiazione ed elettroni non può avere carattere di continuità ma deve avvenire secondo eventi discreti.***

***Questo significa che ogni singolo elettrone può assorbire l'energia di un solo fotone.***

La frequenza di soglia  $f_0$ , che caratterizza ogni materiale, rappresenta la minima frequenza in corrispondenza della quale un fotone incidente ha l'energia sufficiente ad eseguire il lavoro di estrazione. Cioè,

$$h f_0 = W_e \quad (11)$$

Quindi, secondo Einstein l'energia cinetica sarà massima per quegli elettroni il cui lavoro di estrazione è minimo e viceversa. Di conseguenza il bilancio energetico di ogni singola interazione è il seguente:

$$K_{max} = h f - L_{min} \quad (12)$$

dove  $f > f_0$ . Cioè,

***l'energia cinetica massima di ogni elettrone è pari alla differenza tra l'energia fornita dal fotone e il corrispondente lavoro di estrazione.***

D'altra parte,  $K_{max} = e \Delta V_a$ , per cui la precedente espressione può essere riscritta nel modo seguente:

$$e \Delta V_a = h f - h f_0$$

e anche

$$e \Delta V_a = h (f - f_0) \quad (13)$$

***Ecco spiegato perchè il potenziale di arresto  $\Delta V_a$  varia soltanto con la frequenza e non con l'intensità della radiazione.***

***Una maggiore intensità della radiazione produrrà un numero maggiore di fotoni e perciò un numero maggiore di elettroni emessi, ma non potrà mai alterare la loro massima energia cinetica.***

## 16° VALUTAZIONE DELLA FREQUENZA DI SOGLIA DI UNA FOTOCELLULA

Al paragrafo 7 è stato fatto presente che ogni fotocellula è caratterizzata da una particolare frequenza  $f_0$  definita frequenza di soglia, con la seguente caratteristica: se la radiazione incidente ha una frequenza minore di  $f_0$ , non emette elettroni, qualunque sia l'intensità della radiazione.

Puoi determinare la frequenza di soglia della fotocellula sulla quale sperimenti, con la seguente esperienza.

### ESPERIENZA N. 7

Materiale occorrente: 1 banco ottico; 1 LED verde; 1 cellula fotoelettrica; 1 centralina di comando.

Dalla relazione (13), si ottiene

$$f_0 = f - \frac{e \Delta V_{aV}}{h}$$

dove  $f = 5,63 \cdot 10^{14}$  Hz;  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  V;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J s e  $\Delta V_{aV}$  come da te misurato. Il fornitore riferisce una frequenza di soglia:

$$f_0 = 4,62 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

## 17° MISURAZIONE DELLA COSTANTE DI PLANCK

L'espressione (13) mette in relazione la frequenza di soglia con la costante di Planck. Nel precedente paragrafo si è assunta come nota la costante di Planck per determinare la frequenza di soglia della fotocellula. Puoi utilizzare la stessa relazione per misurare la costante di Planck.

Applicando l'espressione (13) a due diverse radiazioni I e J, si ottiene

$$e \Delta V_{aI} = h f_I - h f_0 \quad (14)$$

e

$$e \Delta V_{aJ} = h f_J - h f_0 \quad (15)$$

Facendo la differenza tra la (15) e la (16) si ottiene

$$h (f_I - f_J) = e (\Delta V_{aI} - \Delta V_{aJ})$$

da cui

$$h = \frac{e (\Delta V_{aI} - \Delta V_{aJ})}{(f_I - f_J)} \quad (16)$$

### ESPERIENZA N. 8

Materiale occorrente: 1 supporto con cellula fotoelettrica; 1 centralina di comando; 1 LED blu; 1 LED rosso.

Dopo aver regolato l'offset, misura i potenziali d'arresto. Note le frequenze associate ai fotoni provenienti dai due LED,  $f_R = 4,85 \cdot 10^{14}$  Hz e  $f_B = 6,49 \cdot 10^{14}$  Hz, ricava il valore della costante di Planck. Si dovrebbe ottenere

$$h = \frac{e (\Delta V_{aB} - \Delta V_{aR})}{(f_B - f_R)} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

Per una riflessione sugli errori vedi nota nella pagina successiva e spunti per il docente.

La relazione  $e \Delta V_a = h f - h f_0$  è lineare tra  $\Delta V_a$  ed  $f$ .

Rappresentando in un grafico i tre potenziali di arresto relativi ai tre Led, in funzione delle relative frequenze, è possibile evidenziare questa linearità entro i limiti dell'errore sperimentale (fig. 15).

I valori della frequenza sono legati alla lunghezza d'onda dalla nota relazione

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

essendo  $c$  la velocità della luce (assumiamo che il valore in aria sia uguale a quello nel vuoto) e  $\lambda$  la lunghezza d'onda. Calcolare la frequenza relativa ai 3 led e preparare una tabella con i valori dei potenziali di interdizione e le relative frequenze. Inserire i valori in un grafico come quello in figura 1 e calcolare la dipendenza lineare.

Nel nostro caso risulta una retta del tipo

$$\Delta V_a = \frac{h}{e} f,$$

dove  $h/e$  è la pendenza della retta.

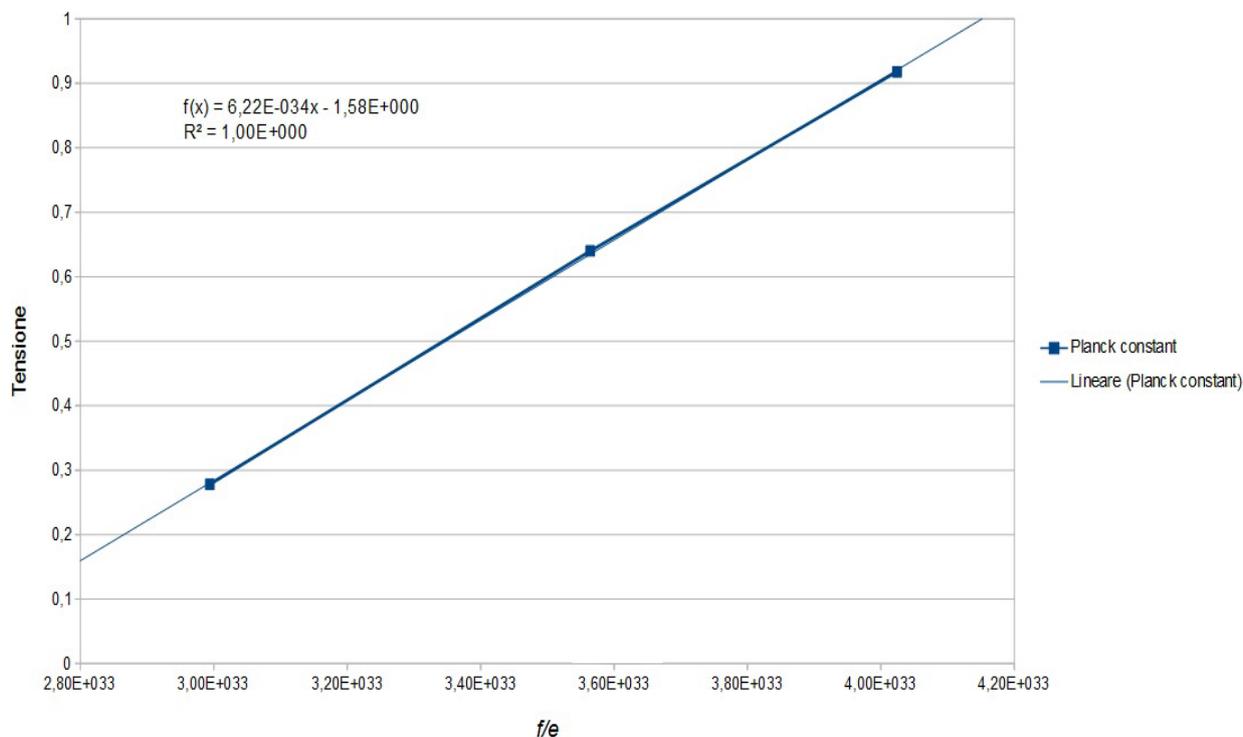


Fig. 15

**NOTA :** I valori della lunghezza d'onda dei filtri sono riferiti al valor medio della banda passante, c'è da tenere conto che la lunghezza d'onda di un led varia leggermente con la temperatura ma l'errore dovuto a questo spostamento non supera il 5%. Questi valori sono stati ottenuti con l'intensità dei led regolata al 40%, consigliamo di non superare questa intensità nella misura della costante di Planck, perchè se i led si scaldano eccessivamente, lo shift potrebbe risultare troppo grande per ottenere un risultato soddisfacente. Non è poi da dimenticare la propagazione degli errori, nonché la non perfetta simmetria attorno al valor medio delle bande di emissione dei LED: una variazione della differenza ( $f_B - f_R$ ) dell'ordine dei 10 nm fa variare la stima della costante di Plank di oltre il 5%. Durante la misura della costante di Planck, quando si è prossimi alla tensione di arresto, premere il pulsante offset per almeno 5 secondi per essere sicuri che anche dopo pochi minuti, non si sia verificato uno shift della corrente che circola nel fototubo rispetto a quella rilevata dall'ampmetro. Si consiglia inoltre di tenere acceso l'apparecchio giusto il tempo necessario alla misura, per evitare il riscaldamento del circuito.

## Spunti per il docente

Una trattazione più approfondita dell'effetto fotoelettrico può essere data solo dopo aver studiato la teoria quantistica. Solo grazie ad essa si possono spiegare le deviazioni dalla descrizione Einsteiniana osservabili sperimentalmente. Ecco alcuni spunti di riflessione.

### 1) Modello ad elettroni liberi

La statistica classica prevede che gli elettroni nei metalli a temperatura ambiente abbiano un'energia cinetica media di circa  $2 \times 10^{-2}$  eV e siano distribuiti attorno a tale valore secondo una funzione che, all'aumentare dell'energia, decresce gradualmente dopo il valore medio. Al contrario, si osserva una soglia fotoelettrica ben definita. Il problema nasce dal fatto che non si può utilizzare la statistica classica, occorre invece quella quanto meccanica di Fermi-Dirac. Vediamola.

Sulla base del principio di indeterminazione di Heisenberg, non è possibile definire lo stato microscopico di un sistema di particelle quantistiche assegnando le posizioni e velocità di tutte le particelle. Non possiamo più, cioè, immaginare un microstato come un insieme di punti posizione-quantità di moto, ma piuttosto come un insieme di volumi dati dal prodotto tra intervalli di posizioni e di quantità di moto:

$\Delta V = (\Delta x \Delta y \Delta z) (\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z)$  (di dimensioni dell'ordine di  $h^3$ , in accordo con il principio d'indeterminazione).

Tutte le particelle con posizione e quantità di moto comprese in quell'intervallo, allora, si trovano nello stesso microstato. Per un dato stato macroscopico, lo spazio delle fasi viene così suddiviso in **celle** con volume minimo, da cui dipende il conteggio del numero dei microstati accessibili. Dal momento che non ci è più possibile definire contemporaneamente posizione e velocità di ciascuna particella, inoltre, scegliamo di utilizzare come grandezza dinamica l'energia, che sappiamo caratterizza gli stati quantici.

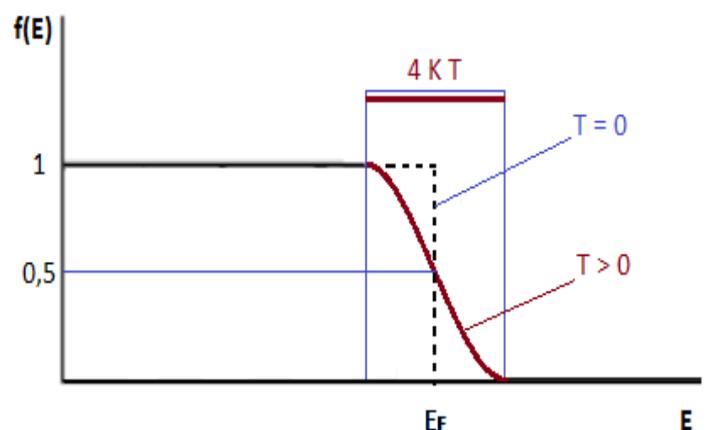
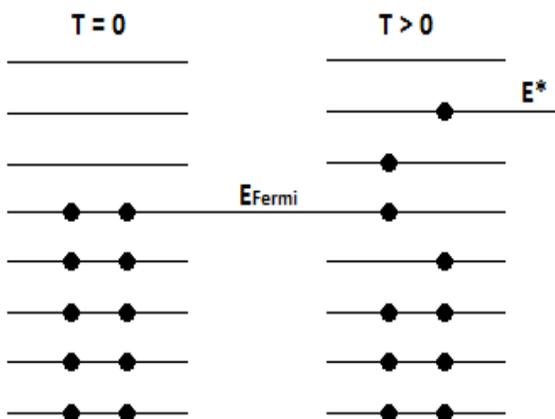
Supponiamo di avere un sistema costituito da  $N$  particelle identiche, indistinguibili e libere. L'energia delle singole particelle di un sistema spazialmente limitato, a causa delle condizioni al contorno può assumere solo valori discreti, ma, in un sistema di dimensioni macroscopiche, tali valori sono molto vicini tra loro. Lo stato microscopico del sistema si definisce assegnando il numero di particelle che si trovano su ogni livello energetico. Suddividiamo allora l'intero intervallo di energia in piccoli ma finiti livelli, indichiamo con  $g_i$  il numero di livelli energetici nella cella  $i$ -esima, e definiamo lo stato macroscopico attraverso i numeri medi  $n_i$  di particelle in ciascuna cella. Definiamo inoltre la funzione distribuzione  $f(\mathbf{e})$  come il rapporto  $n_i/g_i$ . Lo stato macroscopico sarà allora descritto dalla funzione di distribuzione  $f(E)$ , di natura probabilistica.

La forma della funzione  $f(E)$  dipende dal tipo di particelle in considerazione. Avendo noi a che fare con elettroni, dobbiamo tenere in considerazione il **principio di esclusione di Pauli**, che consente al massimo a due fermioni di occupare lo stesso livello energetico  $e_i$ . Nel caso ideale, ossia allo zero assoluto, i livelli energetici verranno dunque occupati dai nostri elettroni a partire dal più basso livello, sino ad esaurimento delle particelle. L'ultimo livello energetico occupato prenderà il nome di **livello di Fermi  $E_F$** .

Per  $T > 0$  K le particelle di Fermi che stanno nei livelli energetici più bassi non possono, in alcun modo, acquistare energia, poiché ad un acquisto di energia corrisponde il salto in un livello superiore il quale essendo già occupato da due elettroni non permette che se ne aggiunga un altro.

Le uniche particelle che acquistano energia sono quelle prossime al livello di Fermi che hanno, immediatamente sopra, livelli energetici liberi. Nel sistema si troveranno allora elettroni con energia superiore al livello di Fermi, fino ad un'energia massima  $E^*$ , funzione della temperatura.

Gli elettroni di conduzione di un metallo seguono la **statistica di Fermi-Dirac** in buona approssimazione.



Ciò detto, è chiaro che la soglia fotoelettrica del fotocatodo, corrispondente all'energia di Fermi, può essere definita esattamente solo per  $T = 0$  K. Per  $T > 0$  K vi sono elettroni, con energie distribuite attorno al livello di Fermi, in grado di assorbire fotoni associati a onde di diverse frequenze. L'ampiezza dell'intervallo di energie in gioco varia di materiale in materiale, ed è di circa  $4K_B T$  (dove  $K_B$  è la costante di Boltzmann). A  $T = 300$  K si ha  $4K_B T = 0,1$  eV, cui, secondo la relazione  $E = h f$ , corrisponde una frequenza di circa  $0,24 \cdot 10^{14}$  Hz (ossia circa il 5% delle frequenze da noi utilizzate).

## 2) Le interazioni degli elettroni

Gli elettroni di un metallo non possono ritenersi del tutto liberi: il reticolo cristallino costituito dai nuclei atomici interagisce con essi. Se rappresentiamo l'energia di legame degli elettroni nei metalli con superfici potenziali, avremo un potenziale periodico interno a buche (di cui periodo e profondità sono determinati dai nuclei e dalla loro distribuzione nello spazio) ed una barriera di potenziale alla superficie.

Se applichiamo un'elevata differenza di potenziale tra anodo e catodo, dobbiamo tenere conto che l'applicazione di un campo elettrico esterno abbassa le pareti della buca di potenziale, il che rende più facile estrarre lo stesso elettrone, anche per effetto Tunnel. Si parla in questo caso di **emissione di campo**.

In questa descrizione, è possibile trattare l'elettrone sia in ragione della barriera di potenziale superficiale sia del potenziale periodico interno; si avranno così **due effetti fotoelettrici: uno di volume e uno di superficie**, e studi dimostrano che, in certe situazioni sperimentali, l'effetto di volume può anche predominare: il tipo di materiale, ma anche campi esterni e  $T > 0$  K sono forzanti significative.

All'aumentare della temperatura, è sempre più facile estrarre gli elettroni dal metallo. In prima approssimazione, la corrente fotoelettrica è proporzionale al quadrato della temperatura; quindi per temperature abbastanza elevate gli elettroni fuoriescono dal metallo anche se questo non è colpito da onde elettromagnetiche. In altri termini, **materiali con un basso valore del lavoro di estrazione sono facilmente soggetti ad effetti termoionici**.

In un conduttore a  $T > 0$  K, va inoltre considerato che i gradi di libertà rotovibrazionali del reticolo sono interessati da eccitazione. Si modellizzano queste energie, anch'esse quantizzate, mediante il concetto di fononi, quasi-particelle (con relativo quasi-impulso) grazie alla cui ideazione è possibile la descrizione quantistica della conducibilità termica ed elettrica, in cui gli elettroni partecipano ad urti con tali fononi. Con un approccio più classico possiamo dire che gli spostamenti dalle posizioni di equilibrio dei nuclei alterano la periodicità del potenziale, generando resistenza elettrica (teoricamente assente in un potenziale simmetrico). Lavorano analogamente impurità del materiale e difetti di struttura del reticolo. Gli elettroni, dunque, si trovano immersi in un potenziale non simmetrico, ma soprattutto variabile nel tempo randomicamente in funzione della temperatura. In tali circostanze divengono anche più probabili gli urti tra elettroni, con conseguenti ripartizioni di energia e quantità di moto in funzione dello scattering.

**Fluttuazioni termiche, irregolarità del reticolo, urti tra elettroni determinano una dinamica temporale dei livelli energetici e dunque una fluttuazione del lavoro di estrazione, con conseguente alterazione dell'energia cinetica massima posseduta dagli elettroni fotoemessi.**

## 3) Effetto Auger

Supponiamo ora di avere un'interazione tra elettroni e fotoni associati ad onde con  $f < f_0$ , ossia con energie non sufficienti a provocare fotoemissione. L'energia del fotone può però essere sufficiente per eccitare un elettrone interno e portarlo su un livello più esterno, magari rimasto accessibile per ragioni termiche o di foto-emissione. Rimane vacante così un livello che può essere a sua volta riempito da un elettrone meno strettamente legato del precedente; l'energia così liberata sotto forma di fotone può a sua volta produrre l'emissione di elettroni da altri livelli. Il livello interno può essere riempito in molte maniere diverse e questo dà allo spettro energetico Auger una grande complessità.

**Possiamo concludere che la variabile che maggiormente inficia le misure è la temperatura, sia in termini di valore medio sia di fluttuazioni. Per limitare le fluttuazioni e l'eccessivo innalzamento della temperatura, il tubo esterno dell'apparecchio in dotazione è stato costruito in alluminio; si ha così un rapido trasferimento del calore all'ambiente. Si tenga conto comunque che, anche se più stabile, il valore della temperatura si aggirerà attorno ai 300 K e tenderà ad aumentare all'aumentare del tempo di accensione dell'apparecchio. Ci si può aspettare che l'amperometro registri in un primo tempo correnti sempre crescenti a parità di tensione e illuminazione. Per tempi più lunghi, il circuito a valle del fotocatodo andrà scaldandosi ed inizierà ad avere resistività più alte, facendo diminuire il valore delle correnti misurate. Al fine di minimizzare gli errori, si raccomanda quindi di effettuare le misure tenendo conto della variabile termica, e dunque di quella temporale.**

**OPTIKA<sup>®</sup>**  
**S C I E N C E**  
**I T A L Y**

**OPTIKA S.r.l. - Copyright**

Riproduzione vietata anche parziale