

# Laboratorio di Fisica 3

## Effetto fotoelettrico - Misura del rapporto $h/e$

### Materiale occorrente

- una lampada a led;
- un tubo fotomoltiplicatore Philips XP2412 B;
- filtri interferenziali (Balzers e Newport);
- scatola nera;
- generatore di tensione continua;
- un multimetro digitale;
- un picoamperometro digitale.

### Obiettivo

Obiettivo di questa esperienza è la verifica dell' effetto fotoelettrico e dell' ipotesi, formulata nel 1905 da Einstein e verificata da Millikan circa dieci anni dopo, secondo cui:

- un' onda elettromagnetica è costituita da quanti di luce, denominati fotoni, ciascuno dei quali trasporta un' energia  $E_\gamma$  proporzionale alla sua frequenza  $\nu$  tramite la formula

$$E_\gamma = h\nu \quad (1)$$

$h$  essendo la costante introdotta da Planck nel 1900 per descrivere lo spettro della radiazione di corpo nero;

- ogni elettrone può essere estratto dal metallo assorbendo un fotone di energia superiore al lavoro  $W_0$  di estrazione dal metallo (dipendente dal metallo stesso); conseguentemente l' energia cinetica di un fotoelettrone è pari all' energia del fotone assorbito privato di  $W_0$ ;

$$E_e = h\nu - W_0 \quad (2)$$

- l' intensità della corrente dei fotoelettroni è proporzionale al numero di fotoni incidenti sulla lamina nell' unità di tempo.

### Verifica dell' ipotesi di Einstein mediante il metodo del potenziale frenante

Tra il 1914 e il 1916 Robert Millikan effettuò accurate misure per la verifica sperimentale dell'equazione fotoelettrica (2) utilizzando cellule fotoelettriche costituite da un bulbo di vetro su era stato depositato a vuoto un catodo di metalli alcalini, come mostrato in Fig.1. La frequenza  $\nu$  della luce incidente poteva essere variata mediante un monocromatore; un sistema di lenti convergenti provvedeva a focalizzarla sul catodo.

La corrente dei fotoelettroni poteva essere misurata mediante un milliamperometro chiuso su un generatore di tensione continua in grado di generare una d.d.p. continua tra il catodo e l' anodo, il polo positivo essendo connesso al primo, così da generare un campo elettrico nel bulbo tale da opporsi al flusso

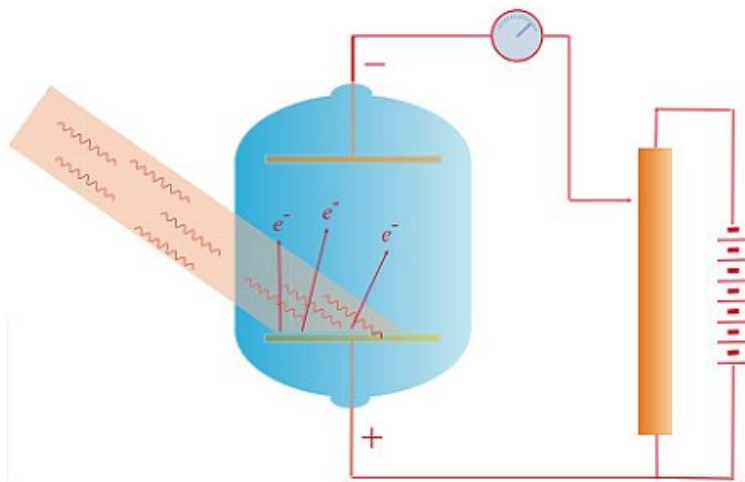


Figure 1: Schema del dispositivo usato da Millikan per la verifica dell' ipotesi di Einstein.

di fotoelettroni verso l' anodo, con il risultato di una riduzione della corrente nel circuito. Per ciascun valore della frequenza della luce incidente, la d.d.p. poteva essere regolata in un intervallo di alcuni V fino ad un valore  $V_0$  tale da arrestare il flusso dei fotoelettroni ed annullarne la corrente. La misura di  $V_0$  forniva pertanto una stima dell' energia cinetica massima dei fotoelettroni da mettere in relazione alla frequenza della luce.

Rappresentando graficamente  $V_0$  in funzione di  $\nu$  (vedi Fig.2), egli potè verificare la linearità della relazione energia-frequenza prevista dalla 2 e, dalla pendenza della retta di best-fit, ottenere una stima del rapporto  $h/e$  in sorprendente accordo (scarto inferiore al 5%) rispetto al valore predetto.

## Parte prima: relazione energia-frequenza e misura del rapporto $h/e$

### Metodo ed apparato sperimentale

Per la verifica dell' equazione (2) viene proposto un metodo simile a quello adottato da Millikan. A tale scopo si utilizzino:

- una cella fotoelettrica costituita da un tubo fotomoltiplicatore;
- una lampada a led quale sorgente di luce secondo uno spettro pressoché continuo;
- un set di filtri interferenziali con banda passante di pochi nm, con lunghezze d'onda centrali elencate in Tab.1, con cui variare la frequenza della luce incidente sul fotocatodo;
- un generatore di tensione continua da banco per stabilire la tensione di bias tra catodo ed anodo;
- un voltmetro digitale per la misurare la tensione di bias all' uscita del generatore;
- un picoamperometro su cui chiudere la corrente dei fotoelettroni.

Lo schema elettrico proposto per il circuito in è mostrato in Fig.3. Essendo la fotocorrente dell' ordine del nA, in assenza di bias, è opportuno stimarla inserendo un picoamperometro (errore pari allo 0.4% + 4 digits) in serie all' anodo e verso massa e selezionando un opportuno fondoscala.

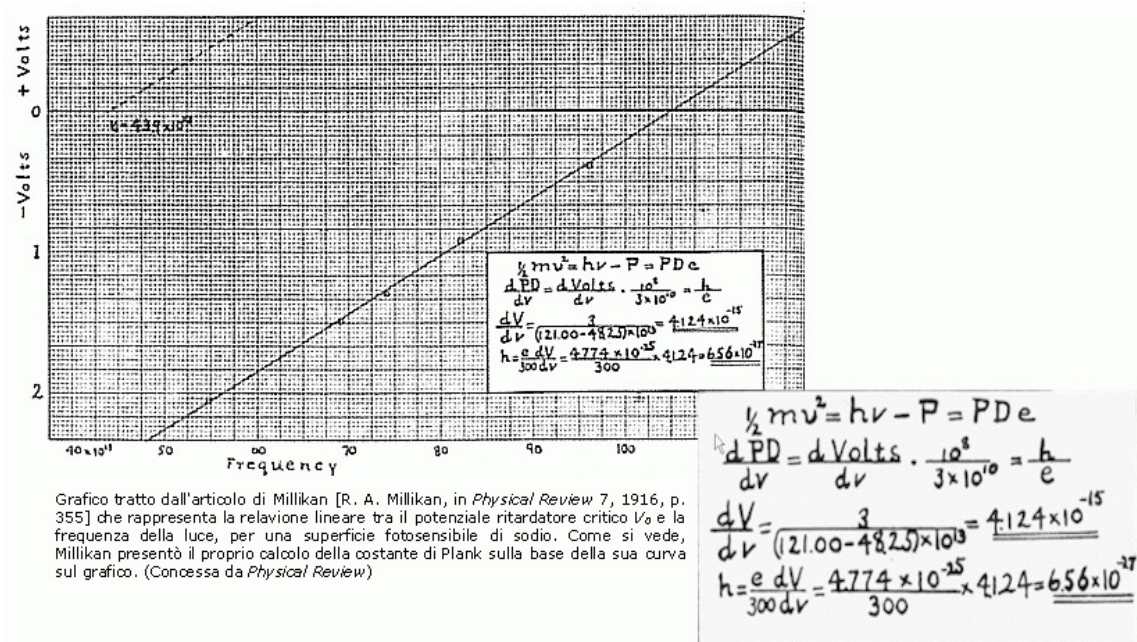


Figure 2: Grafico tratto dall' articolo di Millikan del potenziale frenante in funzione della frequenza della luce incidente su un catodo di Sodio.

Table 1: Caratteristiche dei filtri di banda da utilizzare per la selezione delle frequenze della luce.

colore	$\lambda$ (nm)	tipo
giallo	577	Newport
verde	546	Balzers
verde-azzurro	499	Newport
azzurro	449	Balzers
blu	405	Newport

L' apparato è montato in una scatola nera (vedi Fig.4), in grado di schermarlo dalla luce ambientale, da aprire ogni volta che si desidera variare la frequenza collocando il filtro nell' apposito supporto. Tutti i filtri devono essere inseriti dal vano lampada. Per posizionare i filtri Balzers (di forma quadrata) si utilizzino le alette metalliche poste in corrispondenza del setto che divide il vano lampada da quello del fotomoltiplicatore. I filtri Newport (di forma circolare con diametro di 1") devono essere invece alloggiati nel foro praticato nel setto. Si suggerisce di utilizzare la lastrina di bachelite, tenendola accostata alla parete del setto dal lato del fotomoltiplicatore, e di inserire il filtro nel foro fino a battuta, così da garantire un' incidenza normale della luce.

Dal lato del vano fotomoltiplicatore, tre boccole sono applicate per realizzare le connessioni rispettivamente al catodo (boccola rossa) ed all' anodo (boccola verde). La boccola nera è flottante ma può essere convenientemente utilizzata come riferimento di terra per il generatore e gli strumenti di misura. Si suggerisce inoltre di completare il circuito, seguendo la convenzione dei colori, collegando il polo positivo del generatore mediante cavo rosso sia al catodo che al voltmetro; si usi invece il cavo verde per chiudere il circuito, collegando l' anodo al picoamperometro.

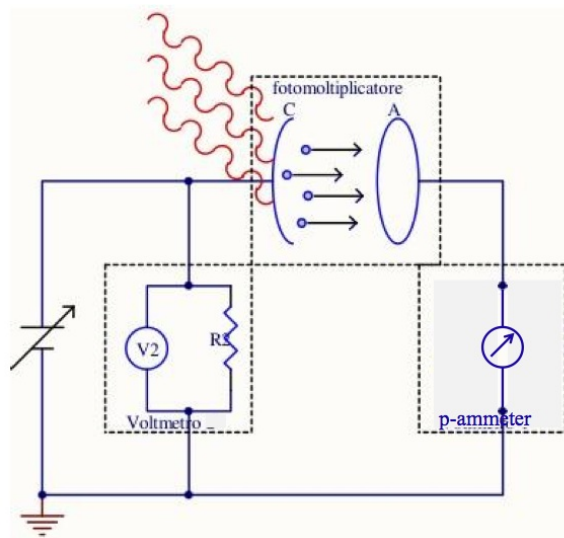


Figure 3: Circuito equivalente per la misura dell' energia cinetica dei fotoelettroni.

## Effetti sistematici

### Dispersione dello spettro incidente

I filtri che selezionano la frequenza della luce incidente sono di tipo interferenziale. La luce trasmessa è dispersa intorno al valore nominale centrale secondo lo spettro mostrato nel foglietto allegato nel caso dei filtri Newport (per quelli Balzers si assuma che la dispersione sia analoga). Di questa dispersione si tenga conto inserendo un errore sulla scala delle frequenze pari alla semi-larghezza a metà altezza della curva di trasmissione.

Si consideri inoltre che lo spettro della luce trasmessa coincide con quella nominale per incidenza normale. Cambiando l' angolo di incidenza, varierebbe apprezzabilmente il colore della luce trasmessa (lo si osservi, ad esempio, guardando attraverso il filtro la luce della lampada a neon della stanza). Occorre pertanto fare attenzione durante il posizionamento del filtro. Per i Newport in particolare, si utilizzi una lastrina di bachelite posta a contatto del setto dalla parte del vano del fotomoltiplicatore e si inserisca il filtro nell' apposito foro fino alla battuta sulla lastrina.

Occorre inoltre richiamare l' attenzione sul fatto che la dipendenza dall' angolo di incidenza limita la riproducibilità delle misure. Non si può essere confidenti del fatto che riposizionando il filtro si possa riottenere il risultato di una precedente misura entro l' errore strumentale. Si consiglia pertanto di campionare tutta la curva corrente-tensione per una determinata frequenza variando la tensione frenante con continuità e di rimuovere il filtro solo a misura ultimata.

### Fotoemissione dall' anodo

Lo spessore del catodo depositato all' interno del bulbo obbedisce alla necessità di ottimizzare la corrente dei fotoelettroni a parità di flusso luminoso incidente. Nel caso del fotomoltiplicatore in questione, l' efficienza fotocatodica (ovvero il rapporto tra il numero di fotoelettroni rispetto al numero di fotoni incidenti) mediata sullo spettro della sorgente si aggira intorno al  $15 \div 20\%$ <sup>1</sup>. Non è quindi trascurabile

<sup>1</sup>Uno spessore maggiore di metallo aumenterebbe l' efficienza di conversione, ma avrebbe al contempo l' effetto di aumentare la probabilità di interazione dei fotoelettroni all' interno dello stesso metallo, con il risultato di ridurre la



Figure 4: Foto della scatola nera; si vedono, da destra, la lampada, il filtro, il setto collimatore, il fotomoltiplicatore.

la probabilità che un fotone attraversi la parete del bulbo ed il catodo e, raggiungendo l'anodo, induca l'emissione di un fotoelettrone. La corrente misurata in serie al fotomoltiplicatore risulta pertanto dalla somma algebrica delle correnti di fotoelettroni generati rispettivamente sul catodo e sull'anodo. In particolare, per valori crescenti della tensione frenante, la componente anodica della corrente cresce fino a tendere ad un valore asintotico da sottrarre alla corrente totale misurata per ottenere la sola componente catodica. Si osservi come la corrente anodica dipenda dalla frequenza e si provi a darne una spiegazione qualitativa.

## Procedura operativa

In virtù degli effetti di cui sopra, per ottenere una stima corretta della tensione  $V_0$  non è sufficiente determinare la tensione di annullamento della corrente. Si consiglia di seguirne l'andamento in un intervallo della tensione da 0 fino ad alcuni Volts, addensando in particolare le misure nella zona del ginocchio e nel limite asintotico della corrente anodica e di utilizzare una o entrambe le procedure empiriche sotto descritte, come mostrato in figura 5. Infine si verifichi la linearità della tensione di azzeramento in funzione della frequenza della luce incidente e si determini il rapporto  $h/e$  dal coefficiente della retta di best-fit.

### Metodo a)

L'approccio più semplice consiste nel determinare il valore asintotico della corrente anodica mediando (o interpolando) le misure effettuate in quel regime, ovvero per valori della tensione frenante per i quali la corrente totale sia costante entro l'errore. A questo punto, sul grafico corrente-tensione per una particolare frequenza della luce, si tracci una linea orizzontale che, come mostrato in figura 6, differisca dal valore asintotico precedente dell'errore stimato della corrente  $\delta I$ , quale risulti sia dall'accuratezza strumentale che dalla stabilità delle misure. Dall'intersezione si ottenga quindi una stima di  $V_0$  per quella frequenza. In altri termini,  $V_0$  coincide con il valore della tensione frenante al di sopra della quale la corrente fotocatodica sia compatibile con 0.

Il risultato finale non dovrebbe dipendere criticamente dalla stima di  $\delta I$ . Da un lato è vero che la determinazione di  $V_0$  vi dipende, l'intersezione cambiando al variare dell'altezza di quella linea. Dall'altro lato, è altresì vero che, purché si utilizzi uno stesso valore di  $\delta I$  per tutte le misure, la variazione

---

frazione di fotoelettroni in grado di raggiungere l'anodo.

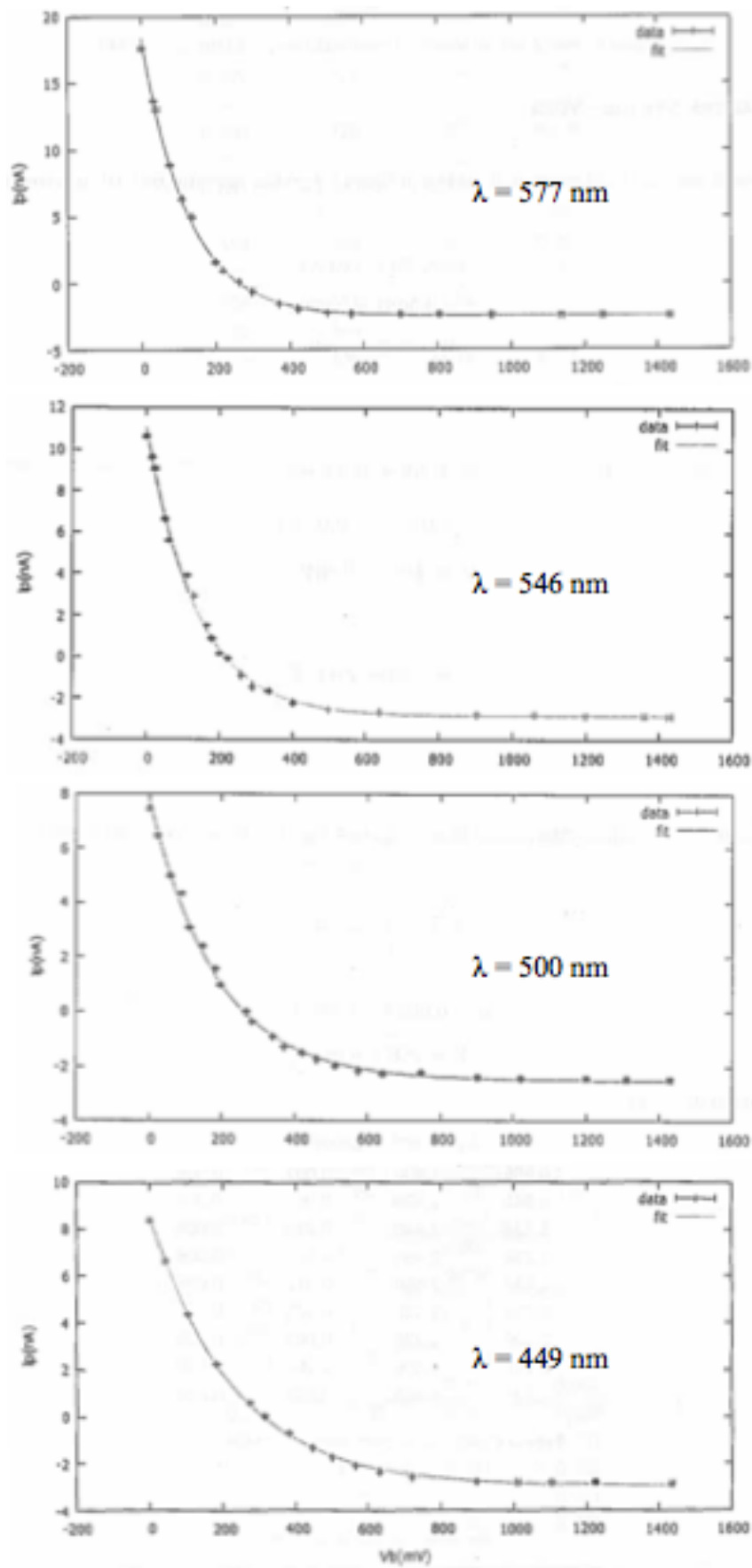


Figure 5: Fotocorrente vs. tensione di bias per alcuni dei filtri in dotazione.

di  $V_0$  sarebbe pressoché costante per ogni frequenza. L'effetto sulla linearità tra  $v_0$  e la frequenza e sulla misura finale di  $h/e$  non dovrebbe essere apprezzabile.

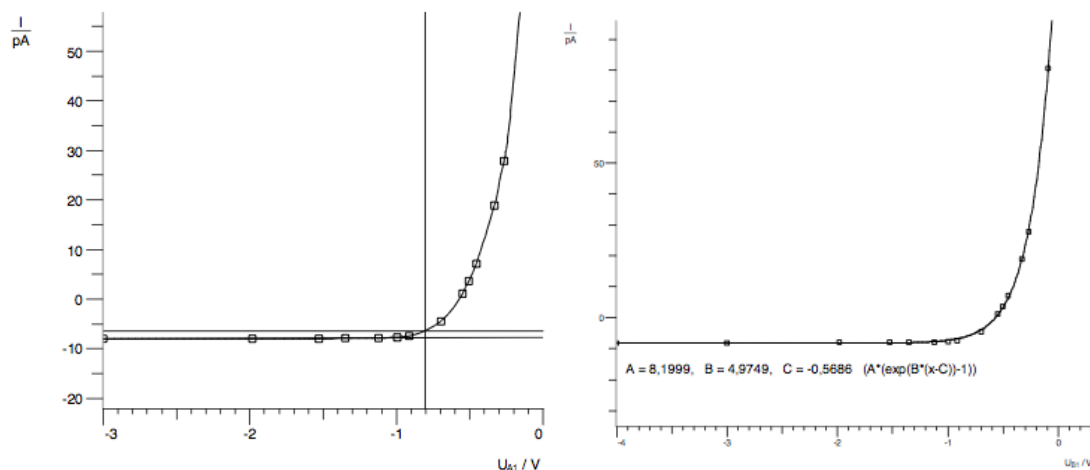


Figure 6: Illustrazione dei metodi per la determinazione di  $V_0$ . A sinistra: metodo a); a destra: metodo b). In entrambi i grafici sulle ascisse è riportato l'opposto della tensione frenante.

### Metodo b)

Per ogni frequenza, si stimi  $V_0$  dall'interpolazione della curva corrente-tensione mediante una funzione simile all'equazione di Shockley per il diodo a giunzione

$$I(V) = \bar{I} + I_0(e^{a(V_0-V)} - 1)$$

dove  $\bar{I}$  costituisce il valore assoluto della corrente nel limite asintotico,  $I_0$  la corrente oscura ed  $a$  un parametro legato all'intensità della luce ed alla risposta del fotocatodo a quella particolare frequenza.

## Avvertenze

- Si accenda la lampada all'inizio dell'esperienza inserendo la spina in una presa di corrente alla parete. Se non necessario, si eviti di spegnerla se non alla fine delle misure; richiede alcuni minuti per stabilizzarsi.
  - Cautela nell'inserimento dei filtri: sono fragili e piuttosto costosi. Possono essere maneggiati tenendoli tra le dita per le superfici laterali. È inoltre opportuno che il fotomoltiplicatore sia esposto il meno possibile alla luce ambiente, anche durante l'apertura della scatola per la sostituzione dei filtri. In questa operazione si consiglia vivamente di tenere coperto il fotomoltiplicatore con il panno nero: una prolungata esposizione potrebbe infatti dar luogo a rilevanti fenomeni di persistenza, con conseguente variazione nel tempo della misura di corrente di fotoelettroni.
- In caso di difficoltà di inserimento, si chiedi aiuto agli assistenti.
- Durante le misure di corrente allontanatevi dal tavolo finché la lettura del picoamperometro non si stabilizzi. È facile verificare come il moto di ogni operatore nei pressi del circuito provochi una variazione significativa del flusso del campo magnetico concatenato e, di conseguenza, della lettura di corrente.