

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

Gruppo E.B12

Monica Cesario, Roberto Dionisio, Francesco Zazzu.

7 Maggio 2020

## 1 Scopo

Lo scopo dell'esperienza è la verifica dell'effetto fotoelettrico attraverso la linearità tra energia e frequenza, dunque tramite la stima del rapporto tra la costante di Planck e carica dell'elettrone  $h/e$ , con valore teorico  $h/e = 4.13 \times 10^{-15}$  Vs.

## 2 Cenni teorici

Il modello di Einstein del 1905 prevede la natura corpuscolare della radiazione elettromagnetica. Questi quanti di luce vengono chiamati fotoni, ed ognuno di essi trasporta un'energia pari a:

$$E_\gamma = h\nu.$$

L'effetto fotoelettrico consiste nell'estrazione di elettroni da un metallo nel caso in cui l'energia del fotone incidente sia superiore al lavoro di estrazione  $W_0$ , caratteristico del metallo stesso. Il fotoelettrone estratto avrà dunque un'energia cinetica pari all'energia del fotone assorbito a cui viene sottratto il potenziale di estrazione:

$$E_e = h\nu - W_0. \quad (1)$$

Inoltre l'intensità  $I_\gamma$  della corrente dei fotoelettroni è proporzionale al numero di fotoni incidenti sulla lamina nell'unità di tempo.

### Metodo del potenziale frenante, Millikan 1914

Robert Millikan effettuò accurate misure per la verifica sperimentale dell'equazione 1 utilizzando un apparato simile a quello riportato in Figura 1, costituito da delle cellule fotoelettriche formate da un bulbo di vetro contenente un catodo alcalino. La frequenza  $\nu$  del fascio incidente veniva variata grazie a un monocromatore e un sistema di lenti convergenti lo focalizzava sul catodo.

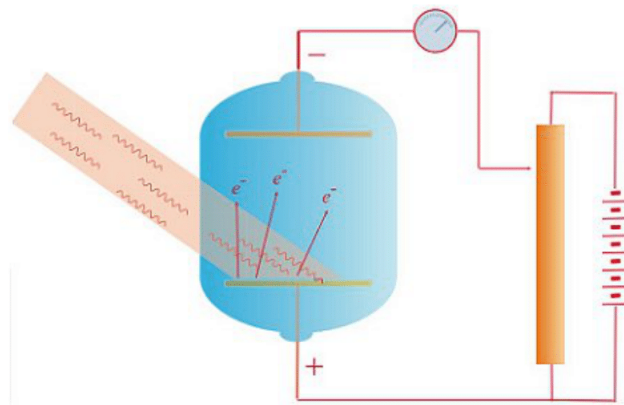


Figura 1: Schema del dispositivo usato da Millikan per la verifica dell'ipotesi di Einstein.

La corrente  $I_\gamma$  veniva misurata da un milliamperometro chiuso su un generatore di tensione continua tra il catodo e l'anodo, che generava un campo elettrico inverso rispetto al moto degli elettroni verso l'anodo, quindi con diminuzione della corrente. Per ciascun valore della frequenza, la d.d.p. era regolata fino ad un valore  $V_0$  tale da annullarne la fotocorrente. La misura di  $V_0$  forniva una stima dell'energia cinetica massima dei fotoelettroni. Rappresentando graficamente  $V_0$  in funzione di  $\nu$ , egli poté verificare la linearità della relazione energia-frequenza e, dalla pendenza della retta di *best-fit*, ottenne una stima del rapporto  $h/e$ .

### 3 Apparato sperimentale e metodo utilizzato

L'apparato sperimentale è simile a quello di Millikan, è schematicamente rappresentato in figura 2 ed'è composto da:

- fotocella Leybold 55877 (catodo di potassio);
- lampada a led utilizzata come sorgente con spettro quasi continuo;
- set di filtri interferenziali che selezionano la frequenza della radiazione con banda passante da 10 nm e lunghezze d'onda nominali di 450 nm, 499 nm, 546 nm, 577 nm;
- generatore di tensione continua;
- multimetro digitale per la misura della tensione di *bias*;
- picoamperometro digitale (risoluzione 4% + 4 *digits*).

Il metodo scelto per svolgere l'analisi dati è il metodo *b*. Esso consiste nell'interpolazione delle misure con la funzione:

$$I_\gamma(V) = a(V_0 - V)^\alpha \theta(V_0 - V) + bV + I_0, \quad (2)$$

dove:  $V_0$  è la tensione di frenamento definita al paragrafo precedente; l'esponente  $\alpha$  legato alla densità degli stati elettronici del metallo nella banda di conduzione;  $a$  dipende dalla lunghezza d'onda del filtro, dunque tiene conto dell'intensità spettrale e della sezione d'urto dell'effetto fotoelettrico a quella frequenza;  $b$  e  $I_0$  sono invece i parametri della corrente inversa dovuti principalmente alla migrazione di elettroni dall'anodo verso il catodo per effetto termoionico.

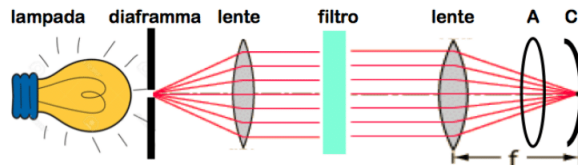


Figura 2: L'apparato è montato in una scatola metallica che permette lo schermaggio dalla luce e dal rumore elettronico ambientale. All'interno troviamo anche una fenditura con diaframma circolare, posta in successione alla lampada; due lenti convergenti per evitare dispersioni della radiazione sul catodo.

### 4 Analisi dati

I dati forniti dai docenti sono stati, per brevità, graficati in figura 3. Essi rappresentano la corrente (totale) in funzione della tensione per le quattro lunghezze d'onda dei filtri interferenziali.

#### Determinazione corrente inversa

Preliminarmente sono stati eseguiti dei *fit* lineari con la funzione

$$I(V) = I_0 + bV$$

per valutare l'effetto della corrente inversa. Essa risulta infatti predominante sulla fotocorrente per valori di tensione pari a quella di frenamento, dunque valori di corrente negativi. I *fit* per ogni lunghezza d'onda selezionata sono riportati in figura 4.

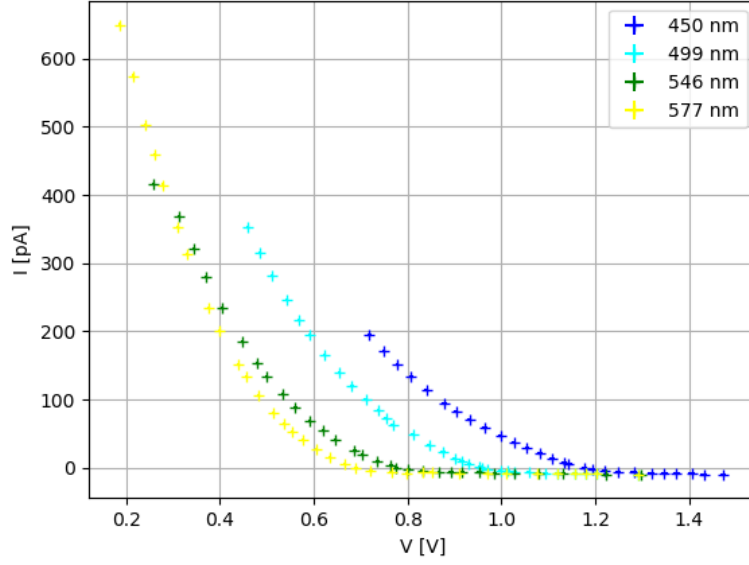


Figura 3: *Plot dei dati sperimentali.*

Teoricamente il valore di  $I_0$  dovrebbe essere indipendente dalla lunghezza d'onda della luce incidente; tuttavia i risultati dei *fit* lineari, riportati in tabella 1, mostrano una dipendenza della corrente inversa dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e dunque otteniamo 4 diversi valori per  $I_0$ . Causa di questi risultati possono essere dei piccoli aloni del fascio incidente che raggiungono l'anodo creando una corrente di fotoelettroni estratti da quest'ultimo. In accordo con questa affermazione possiamo notare la proporzionalità tra l'energia del fascio e l'intensità della corrente inversa.

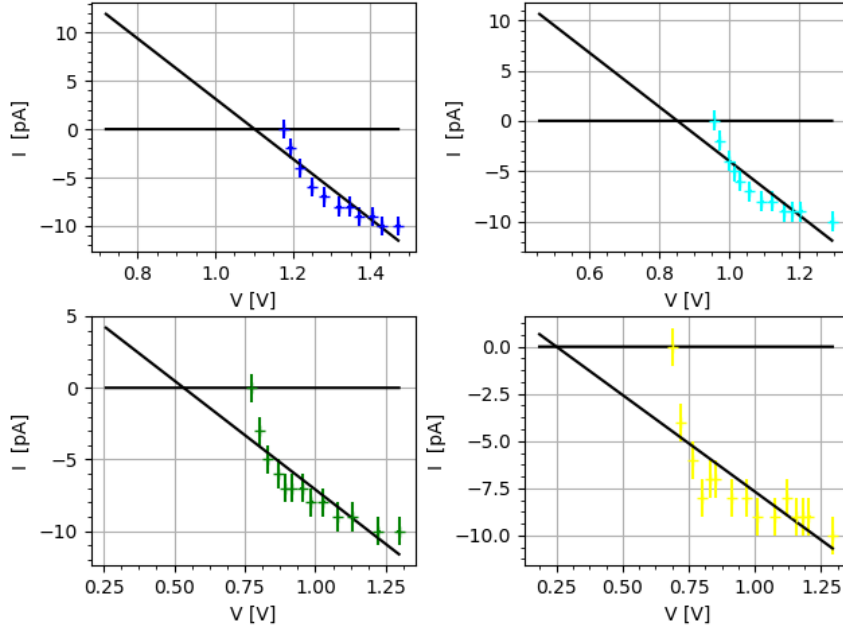


Figura 4: *Fit lineari per determinare la corrente oscura.* I colori indicano le medesime lunghezze d'onda riportate in figura 3.

Dai risultati ottenuti è stato stimato graficamente il valore di tensione  $V_0$  che per ogni frequenza annulla la fotocorrente, ed usato questo valore come parametro iniziale per eseguire il *fit* sui dati.

| $\lambda$ [nm] | $I_0$ [pA] |
|----------------|------------|
| 450            | $34 \pm 5$ |
| 499            | $22 \pm 4$ |
| 546            | $8 \pm 2$  |
| 577            | $2 \pm 2$  |

Tabella 1: Valori di corrente inversa ottenuti dai *fit* lineari.

## Fit dei dati

Per tenere conto della dipendenza della corrente inversa dalle frequenze della radiazione incidente si è scelto di eseguire separatamente i *fit* con l'equazione 2. Si è dunque fissato il parametro  $\alpha = 2$ ; il parametro  $a$  è stato preliminarmente ottenuto dal *fit* della fotocorrente a *bias* nullo; per  $I_0$  e  $b$  sono stati usati come parametri iniziali quelli precedentemente ottenuti. Con riferimento alla Figura 5 i risultati ottenuti sono riportati in tabella 2.

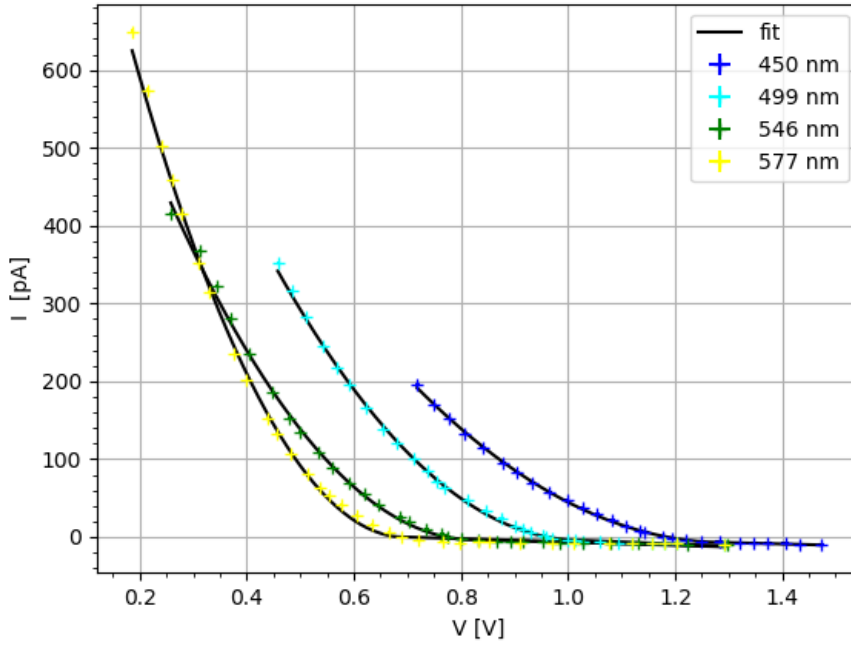


Figura 5: *Fit* secondo l'equazione 2 per la determinazione di  $V_0$ .

| $\lambda$ [nm] | $a$ [ $\times 10^3$ (p $\Omega$ V) $^{-1}$ ] | $V_0$ [V]         | $b$ [p $\Omega^{-1}$ ] | $I_0$ [pA]  | $\chi^2/ndof$ |
|----------------|--|-------------------|------------------------|-------------|---------------|
| 450 $\pm$ 2    | 0.60 $\pm$ 0.01                              | 1.28 $\pm$ 0.01   | -17 $\pm$ 7            | 15 $\pm$ 10 | 47/23         |
| 499 $\pm$ 2    | 1.08 $\pm$ 0.02                              | 1.010 $\pm$ 0.008 | -27 $\pm$ 8            | 24 $\pm$ 9  | 169/28        |
| 546 $\pm$ 2    | 1.35 $\pm$ 0.04                              | 0.818 $\pm$ 0.008 | -17 $\pm$ 6            | 10 $\pm$ 6  | 320/26        |
| 577 $\pm$ 2    | 2.41 $\pm$ 0.06                              | 0.691 $\pm$ 0.006 | -21 $\pm$ 6            | 14 $\pm$ 6  | 623/30        |

Tabella 2: Risultati dei *fit* sui dati. Le unità di misura sono state scelte considerando la fotocorrente in pA.

## Stima di $h/e$

A questo punto dai valori di  $V_0$  ottenuti dal *fit* precedente e dalle frequenze indicate per i filtri si è potuta verificare la linearità tra tensione frenante e frequenza. Per tenere conto della dispersione della lunghezza d'onda intorno al valore nominale dei filtri, si è considerata come incertezza la tolleranza intorno al valore centrale riportata nei manuali dei modelli *Newport-10BPF10*, che risulta essere  $\pm 2$  nm. Il *fit* lineare, riportato

in figura 6, è stato eseguito con la funzione

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_0}{e}.$$

Dal coefficiente angolare della retta si ottiene la stima di  $h/e$  mentre dall'intercetta si può ricavare il rapporto tra il lavoro di estrazione  $W_0$  e la carica dell'elettrone. Otteniamo

$$h/e = (4.00 \pm 0.08) \times 10^{-15} \text{ Vs} \quad W_0/e = (1.38 \pm 0.04) \text{ V} \quad \chi^2/ndof = 2.3/2$$

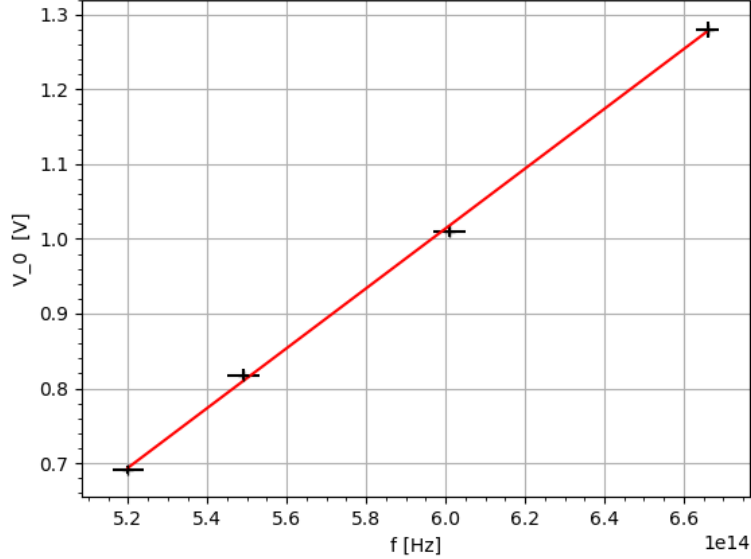


Figura 6: *Fit* per la stima di  $h/e$ .

## Conclusioni e commenti finali

La stima del rapporto  $h/e$  è incompatibile col suo valore atteso. Per quanto riguarda il valore del lavoro d'estrazione otteniamo  $W_0 = (2.21 \pm 0.06) \text{ eV}$ , valore simile a quello del potassio ( $\approx 2.30 \text{ eV}$ ) di cui è composto il catodo. Queste discrepanze, e quelle sulla stima della corrente inversa, sono dovute ad effetti sistematici che sono stati trascurati o sottostimati. Alcuni esempi sono:

- l'incidenza della radiazione non perfettamente normale al catodo;
- la presenza di aloni come già descritto in precedenza, che ha anche una correlazione con il punto precedente;
- la connessione ohmica fra gli elettrodi, non perfettamente isolati.

## Dichiarazione

I firmatari di questa relazione dichiarano che il contenuto della relazione è originale che tutti i firmatari hanno contribuito alla elaborazione della relazione stessa.