

L'effetto fotoelettrico

Indice

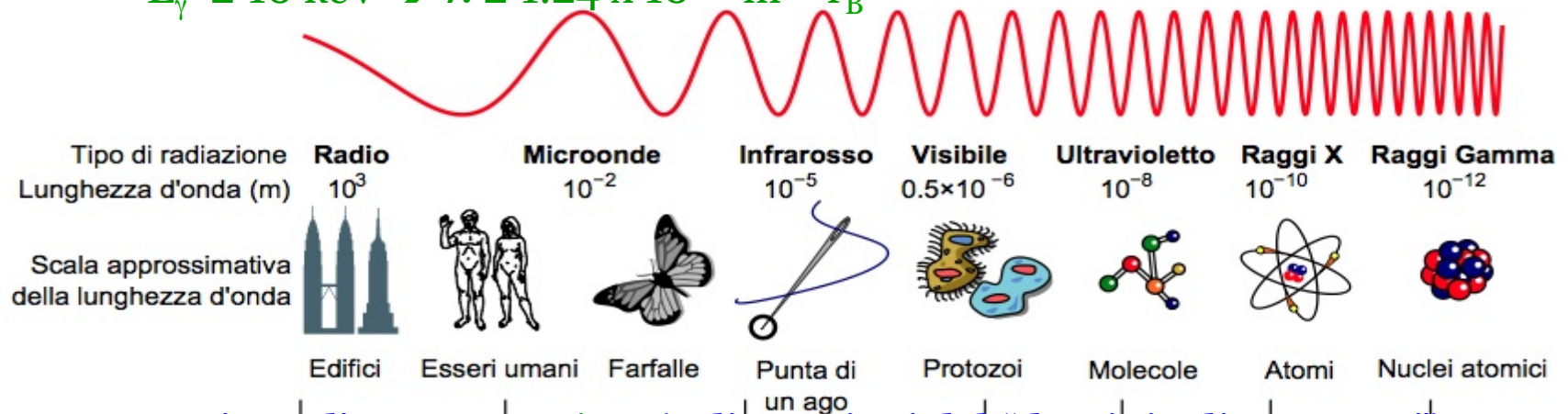
- Generalità
 - Definizione
 - Cenni storici
 - Ipotesi di Einstein e verifica di Millikan
 - Applicazioni
- Misura in laboratorio
 - Apparato sperimentale
 - Metodo
 - Stima di h/e
 - Effetti sistematici e valutazione errori

Che cosa è l'effetto fotoelettrico?

- Interazione fotone-materia

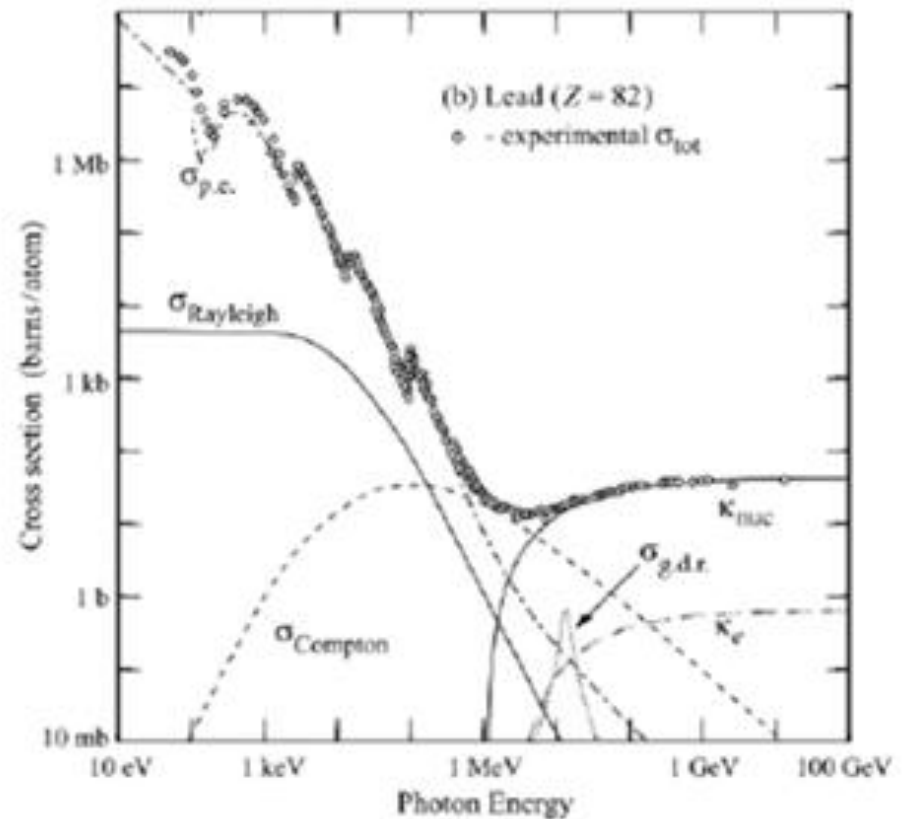
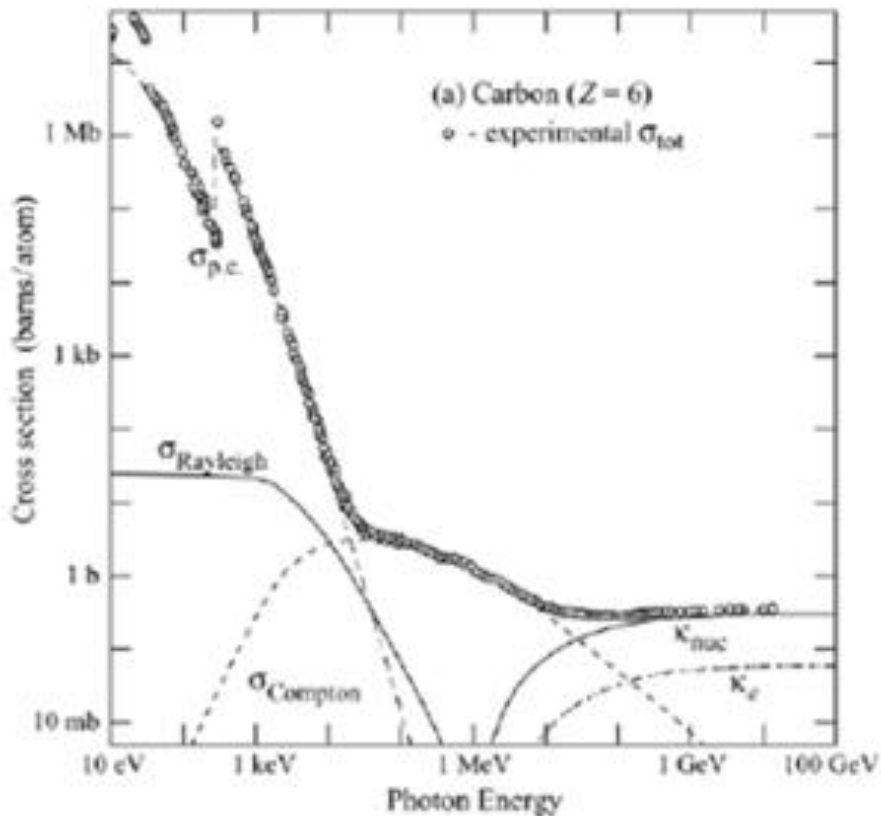
- assorbimento totale dell'energia da parte di elettroni negli shell di valenza → interazione coerente fotone-atomo
- osservabile per fotoni dal visibile ai raggi γ ($E_\gamma \approx O(\text{MeV})$)
- processo dominante fino ai raggi X

$$E_\gamma \leq 10 \text{ keV} \rightarrow \lambda \geq 1.24 \times 10^{-10} \text{ m} \approx r_B$$



- sezione d'urto $\sigma \propto Z^4/E_\gamma^3$ (\propto dimensioni del “dominio di coerenza”)
- per energie maggiori preferita l'interazione con il singolo elettrone (scattering Compton)
- più probabile nei metalli (minore potenziale estrazione, dipendenza favorevole da Z)

Sezione d'urto differenziale



In atomi con **alto Z** e per energie tali da estrarre elettroni dagli **shell più interni**, l'effetto fotoelettrico lascia l'atomo in uno **stato eccitato** → **emissione raggi X monocromatici**

Prime evidenze

- 1887: Hertz
 - Osservazione di scariche da elettrodi illuminati in camera a scintilla, più lunghe in associazione a raggi UV incidenti
- 1888: Hallwachs, Righi
 - Lastre metalliche esposte a radiazione UV si caricano positivamente
- 1899: Thomson
 - Emissione di raggi catodici da lastre esposte a raggi UV in tubi a vuoto
- 1902: Lenard
 - Ionizzazione in gas indotta da luce UV
- Dipendenza dei fenomeni osservati dal colore (frequenza) della luce e non dalla sua intensità
- Incompatibilità con la teoria classica dell'elettromagnetismo
Energia \propto Intensità $\propto |\vec{E}|^2$

Ipotesi di Einstein (1905)

- Onde e.m. costituite da quanti discreti (fotoni)

- Energia di ciascun fotone \propto frequenza

$$E_\gamma = h\nu \quad (h = \text{costante di Planck})$$

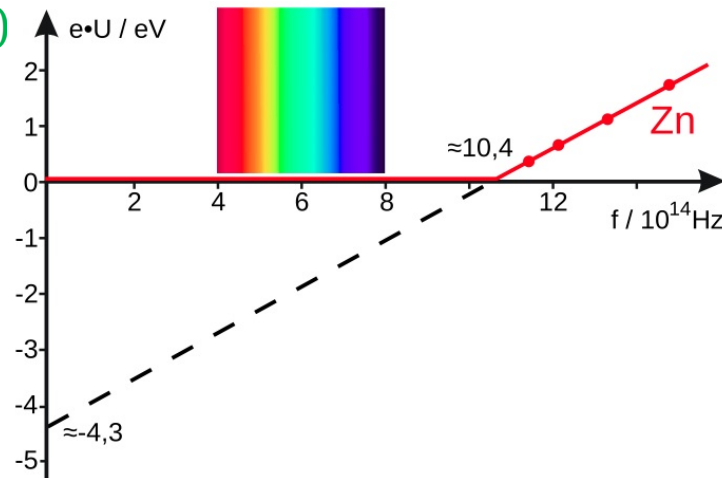
indipendente dall'intensità

- ciascun elettrone (fotoelettrone) emesso assorbe un fotone incidente ed acquista un'energia cinetica pari a

$$E_e = \frac{1}{2} m v^2 = h\nu - W_0 = h(\nu - \nu_0)$$

W_0 = potenziale di estrazione

ν_0 = frequenza di soglia
(dipendente dal metallo)

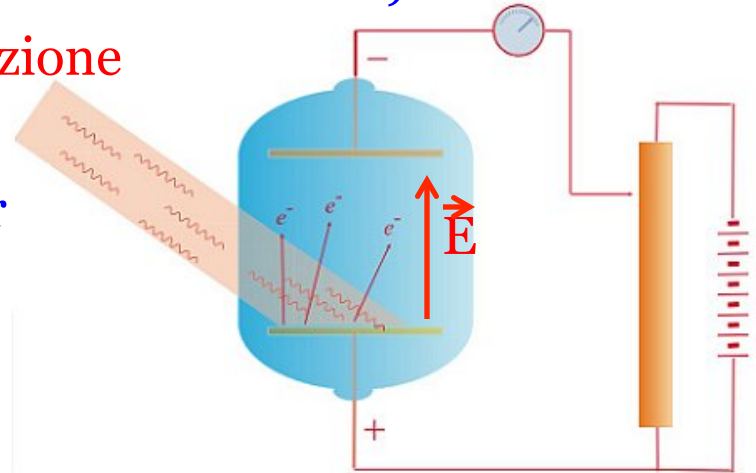


- Numero di fotoelettroni \propto numero di fotoni incidenti

→ fotocorrente \propto intensità luminosa

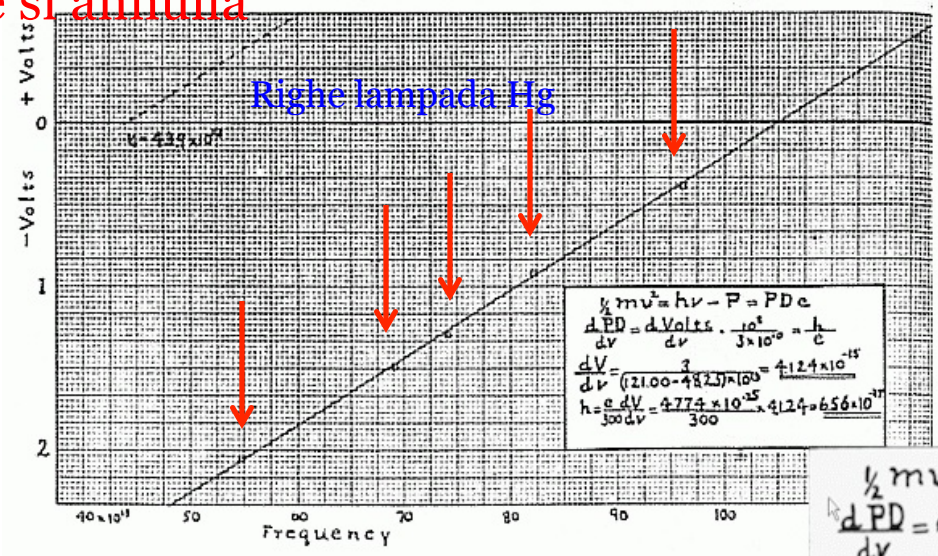
Verifica di Millikan (1914)

- Metodo del **potenziale frenante** (già usato da Lenard)
- **Campo elettrico** applicato nella **direzione principale di moto dei fotoelettroni**
- Circuito chiuso su amperometro per misura della **foto-corrente**
- Raggiungono l'altro elettrodo gli elettroni con $E_e = \frac{1}{2} m v^2 > e V$
- Esiste V_0 per cui la **fotocorrente si annulla**



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

- Pendenza \rightarrow valore di h/e in accordo entro il 5%



Utilità

- Sensoristica
 - fotocellule
 - tubi fotomoltiplicatori (vedi sotto)
- Conversione energia solare → elettrica
 - pannelli fotovoltaici
- Produzione di raggi X
 - scansione di cristalli (Bragg)
- ...

L'esperienza

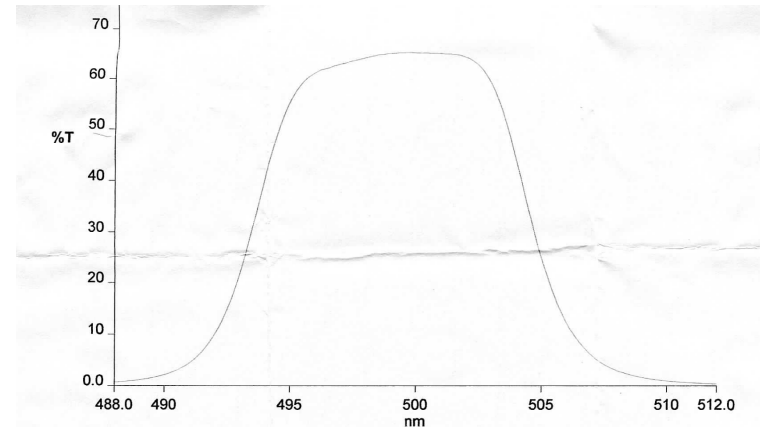
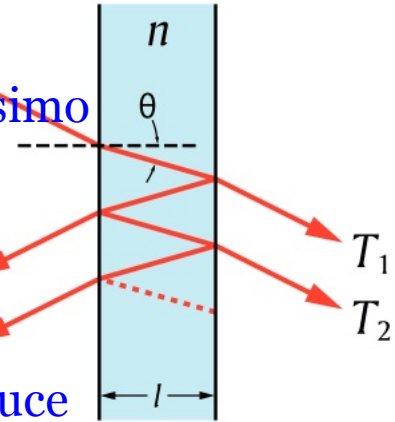
- Obiettivo
 - Verifica della linearità energia-frequenza e stima di h/e
- Metodo
 - Riproposizione esperimento di Millikan
- Materiale a disposizione
 - Sorgente
 - Lampada LED a basso consumo → spettro continuo
 - Filtri interferenziali → selezione banda frequenza
 - Ricevitore
 - Fotocella Leybold 55877 (catodo di Potassio)
 - Elementi circuitali
 - Alimentatore DC da banco (generazione della tensione frenante)
 - Voltmetro (misura della stessa)
 - Pico-amperometro (misura della fotocorrente)

Filtri interferenziali

- Principio di funzionamento (simile al Fabry-Perot)
 - Intrappolamento e **trasmissione della luce** da lastre piane e parallele di conduttore separate da **sottile strato dielettrico ($O(\lambda)$)**
 - Effetto di filtro dovuto **all'interferenza** tra i raggi trasmessi

→ dipendenza dalla **differenza dei cammini ottici** $= 2nl \cos\theta$
→ **lunghezza d'onda nominale** ($\lambda = 2l$) corrispondente al massimo di interferenza del primo ordine e per incidenza normale

- **Larghezza di banda** tipica di **pochi nm**
- per incidenza non normale la lunghezza d'onda trasmessa diminuisce con $\cos\theta$ → **spostamento verso il blu**
- per tenere la larghezza (prossima) al valore nominale occorre tenere sotto controllo la **divergenza** del fascio di luce



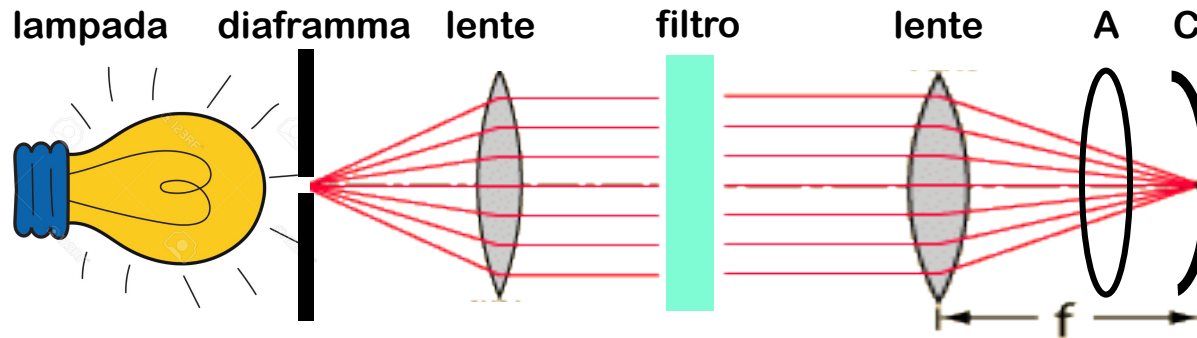
Fotocella

- **Trasduttore luce \rightarrow corrente**
 - Bulbo di vetro a vuoto
 - Effetto fotoelettrico su **catodo** (tipicamente alcalino) depositato sulla superficie opposta a quella di incidenza della luce
 - Fotoelettroni **raccolti da anodo** metallico (anello di lega di platino attraversato dalla luce)
- **Contributi alla misura della foto-corrente**
 - **effetto fotoelettrico** luce su catodo \rightarrow **corrente “diretta”**
 - “ “ “ “ anodo \rightarrow **corrente “inversa”**
(in questo caso gli elettroni estratti dall'anodo sarebbero **accelerati** dal campo elettrico)
 \rightarrow da minimizzare cercando di concentrare il fascio di luce al centro del fotocatodo
 - **effetto termoionico** su catodo ed anodo (con il secondo che diventa più significativo all'aumentare della tensione di bias)



Apparato

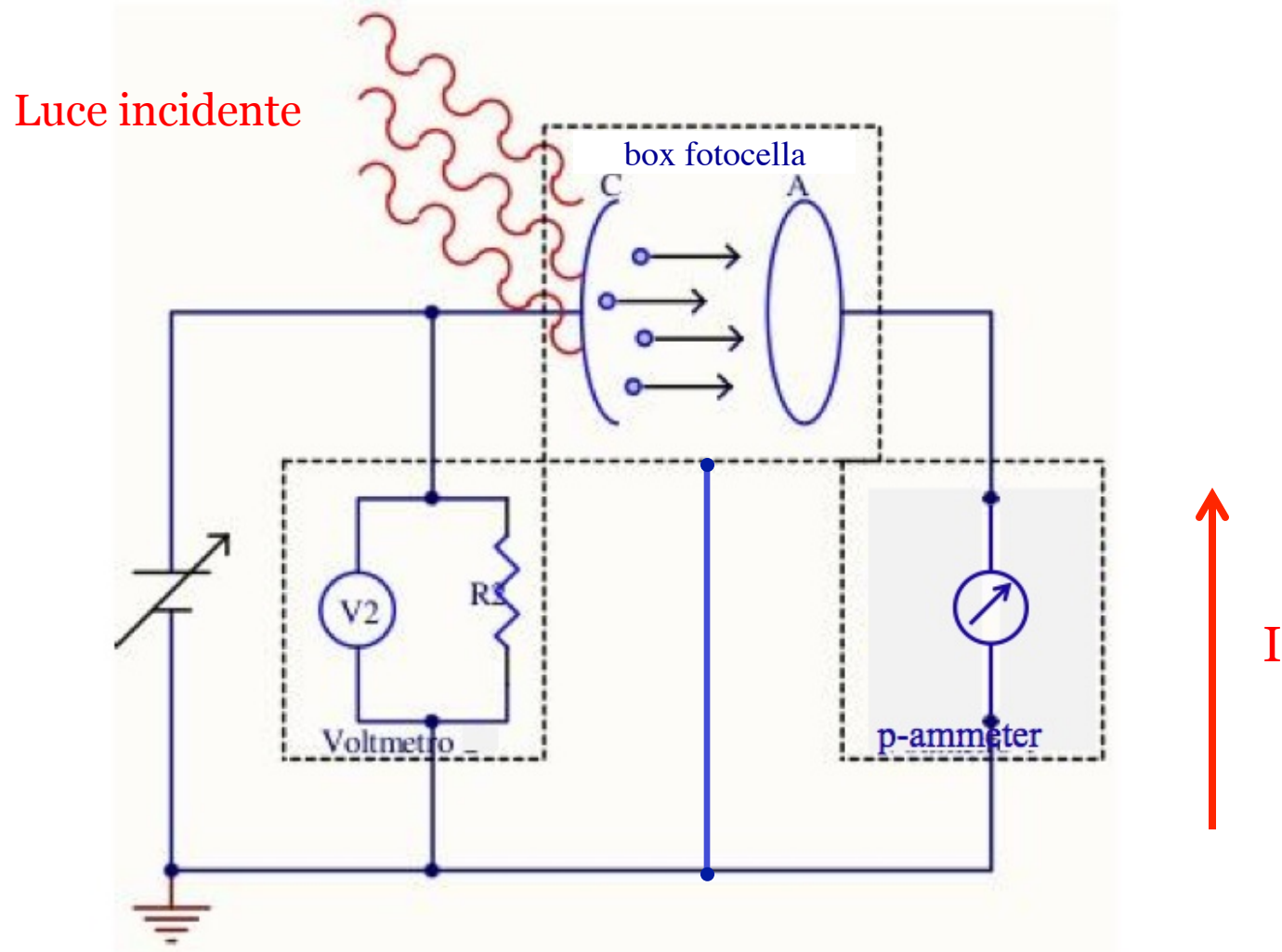
- sistema lampada+diaframma+lenti+filtro+fotocella montato su banco ottico (con l'ultima separata da una parete nera)



- accoppiamento con
 - incidenza \sim normale su filtro
 - immagine della fenditura a fuoco nel centro del catodo
- inserito in una scatola metallica (schermo da luce e rumori esterni)



Circuito equivalente



Metodo

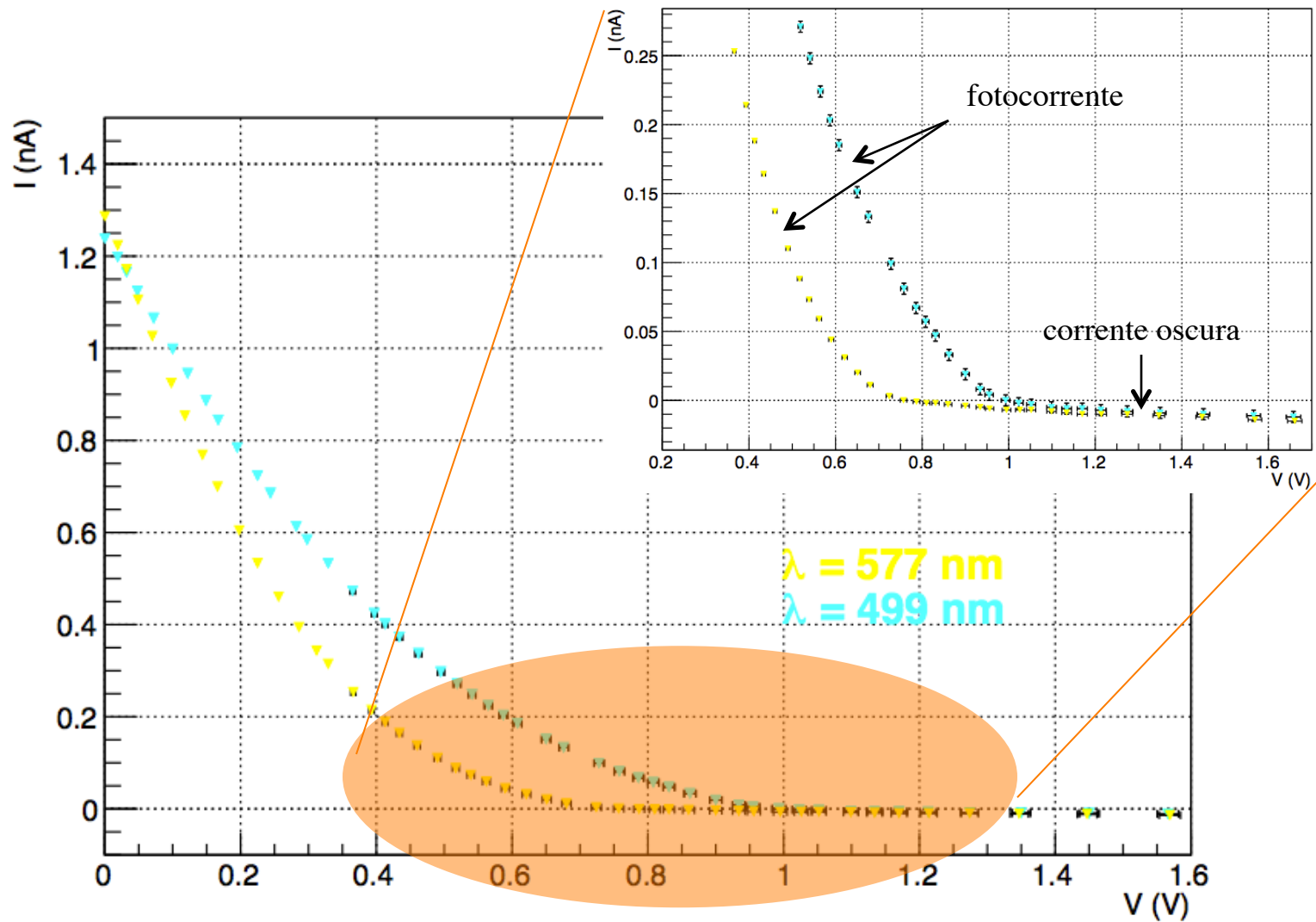
- **Procedura**

- Accendere lampada e lasciare accesa (essendo a basso consumo, impiega qualche minuto ad andare a regime)
- Disporre il filtro con la frequenza desiderata
 - 4 filtri disponibili da utilizzare in condivisione tra due gruppi
- Misurare la fotocorrente (dalla tensione anodo-terra) in funzione della tensione di bias (V_c)
- Per ogni filtro determinare la tensione di arresto dei fotoelettroni (vedi sotto)
- aprire la scatola, sostituire il filtro e ripetere

- **Accorgimenti**

- assicurarsi che la fotocella sia coperta durante l'apertura della scatola per la sostituzione del filtro
- maneggiare con cura (ed evitare di disallineare il banco)
- evitare movimenti “frenetici” durante le misure (le fotocorrenti sono frazioni di nA)

Risultato



Determinazione di V_0

- **Metodo 1: annullamento della corrente**
 - dalla curva $I(V_{bias})$ determinazione della tensione per cui $I(V_0) = 0$
 - errore **statistico** $\sigma(V_0) \approx \left| \frac{dV}{dI} \right| \sigma(I)$
 - errore **sistematico** dovuto alla **corrente oscura** (eventualmente da misurare al termine a lampada spenta e sottrarre)
- **Metodo 2: interpolazione dati al ginocchio**
 - distribuzione di Fermi-Dirac del **gas di elettroni** nella banda di conduzione del metallo con densità di stati
$$\rho(E) = \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E}$$
$$\Rightarrow I(V) \propto \int \rho(E) dE \propto (V_0 - V)^{\frac{3}{2}}$$
per $E < E_F + W_0 \Rightarrow$
$$V > (h\nu - E_F - W_0)/e = V_0 - E_F/e$$
 - interpolazione fotocorrente (al netto della corrente oscura) in prossimità del ginocchio mediante legge di potenza

