

# L'effetto fotoelettrico (versione DAD)

# Indice

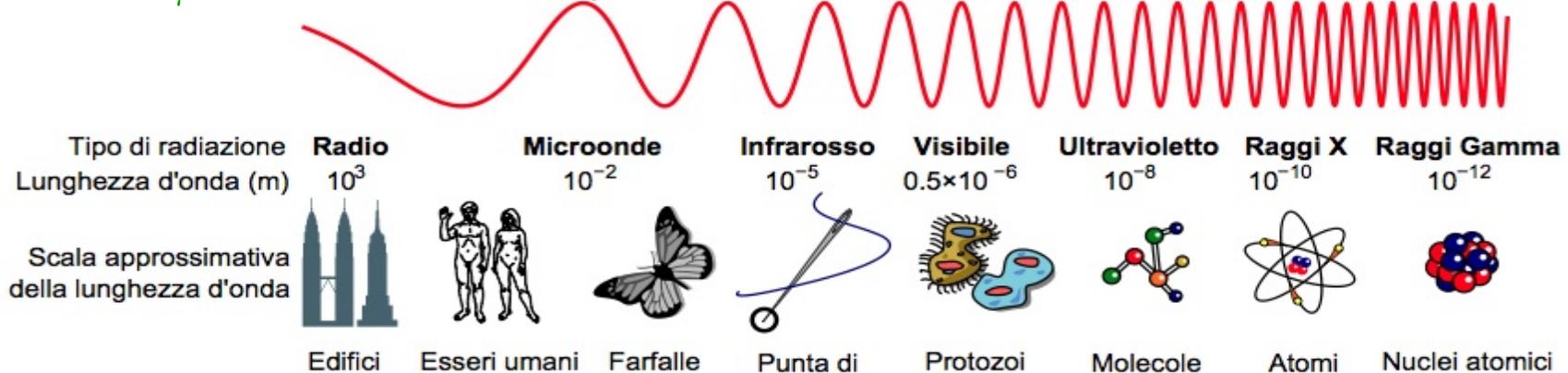
- Generalità
  - Definizione
  - Cenni storici
  - Ipotesi di Einstein e verifica di Millikan
  - Applicazioni
- Misura in laboratorio
  - Apparato sperimentale
  - Metodo
  - Stima di  $h/e$
  - Effetti sistematici e valutazione errori

# Che cosa è l'effetto fotoelettrico?

- Interazione fotone-materia

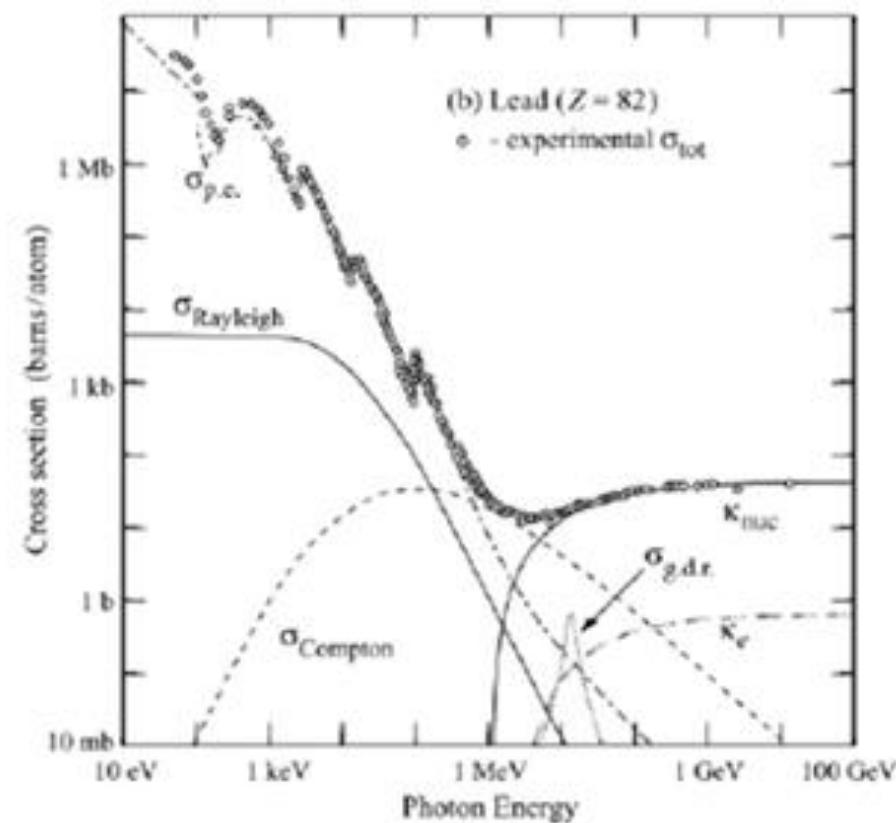
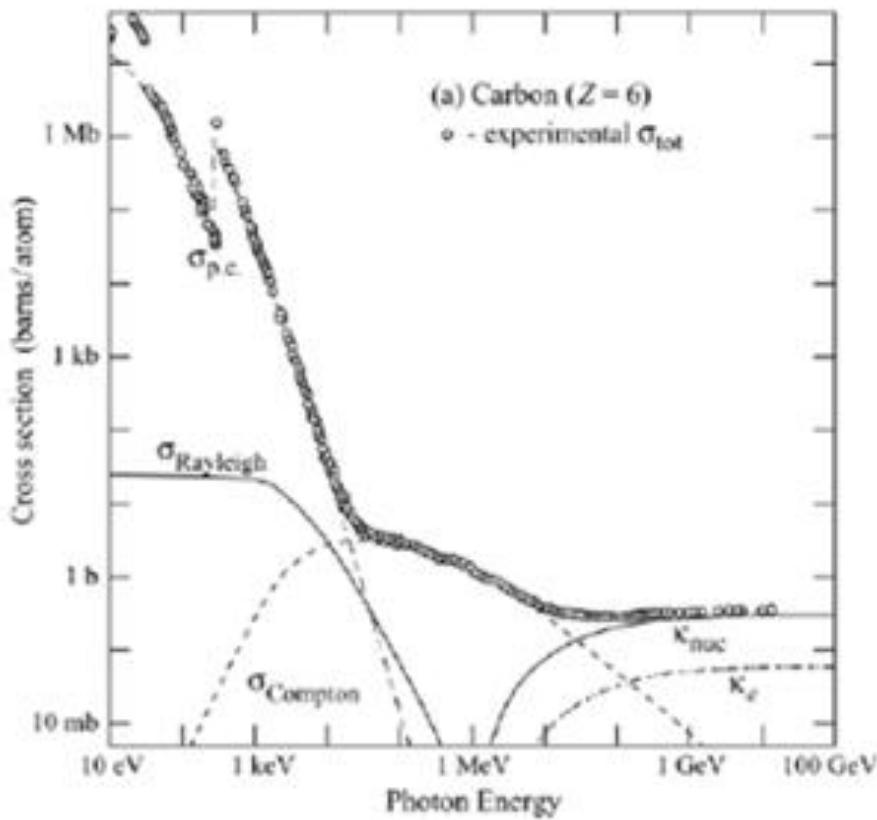
- assorbimento totale dell'energia da parte di elettroni negli shell di valenza → interazione coerente fotone-atomo
- osservabile per fotoni dal visibile ai raggi  $\gamma$  ( $E_\gamma \approx O(\text{MeV})$ )
- processo dominante fino ai raggi X

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



- 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  
 $\text{Energia} \propto \text{Intensità} \propto |\vec{E}|^2$

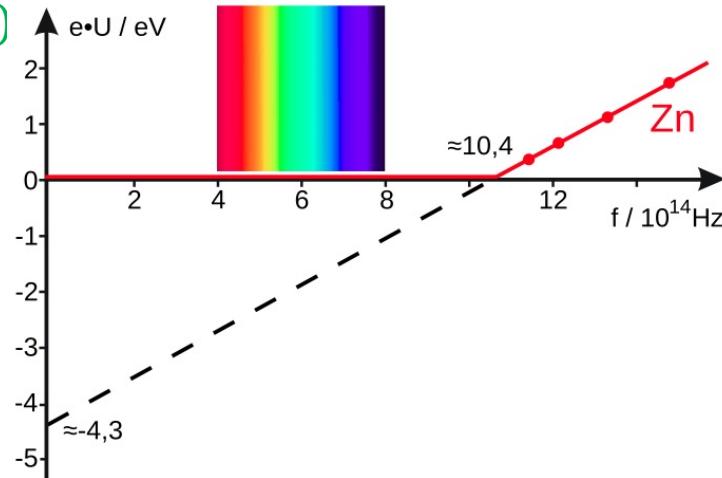
# Ipotesi di Einstein (1905)

- Onde e.m. costituite da quanti discreti (fotoni)
- Energia di ciascun fotone  $\propto$  frequenza  
 $E_\gamma = h\nu$  ( $h$  = costante di Planck)  
indipendente dall'intensità
- ciascun elettrone (fotoelettrone) emesso assorbe un fotone incidente ed acquista un'energia cinetica pari a

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

$W_0$  = potenziale di estrazione

$\nu_0$  = frequenza di soglia  
(dipendente dal metallo)



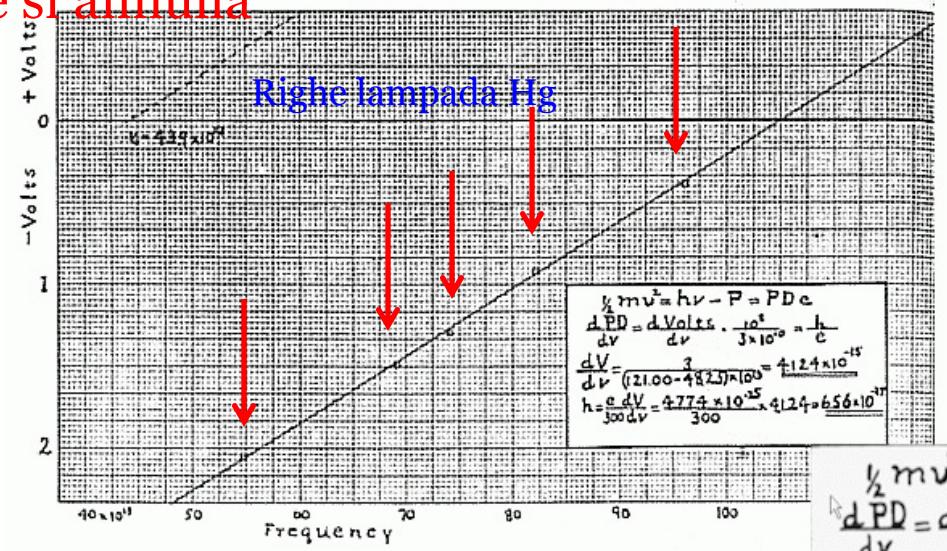
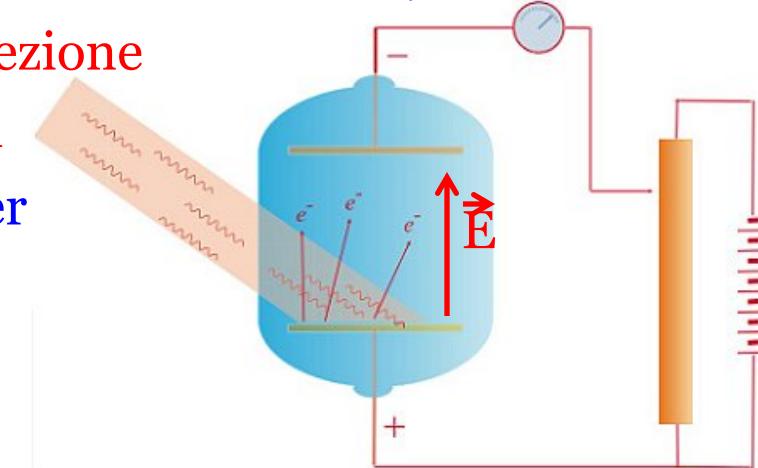
- Numero di fotoelettroni  $\propto$  numero di fotoni incidenti  
→ fotocorrente  $\propto$  intensità luminosa

# 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  $E_e = \frac{1}{2} mv^2 > eV$
- Esiste  $V_0$  per cui la fotocorrente si annulla

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

- Pendenza → valore di  $h/e$  in accordo entro il 5%



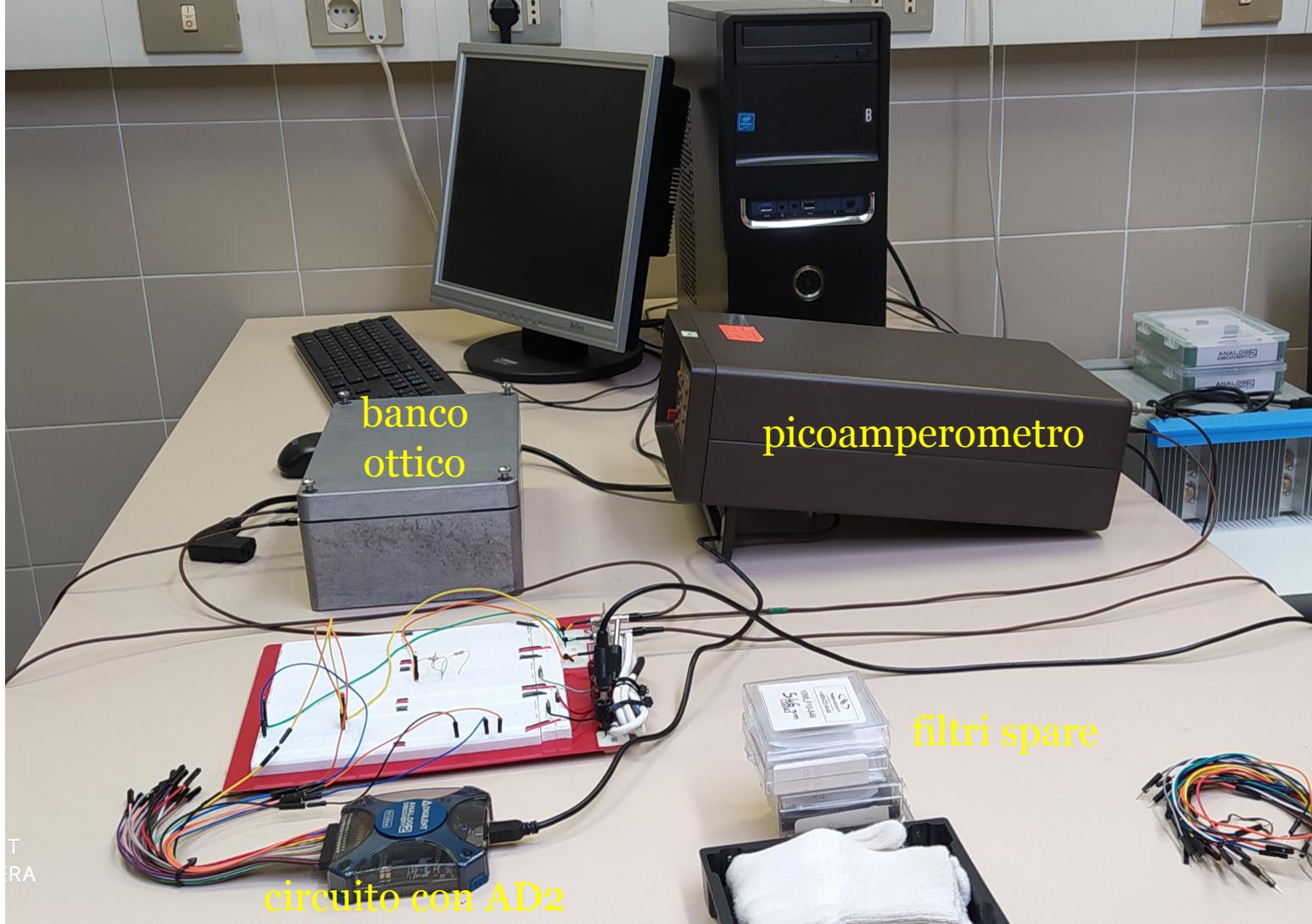
# Utilità

- Sensoristica
  - fotocellule
  - opto-elettronica (trasmissione segnali su fibra, tubi fotomoltiplicatori, ...)
- Conversione energia solare → elettrica
  - pannelli fotovoltaici
- Produzione di raggi X
  - scansione di cristalli (Bragg)
- ...

# L'esperienza

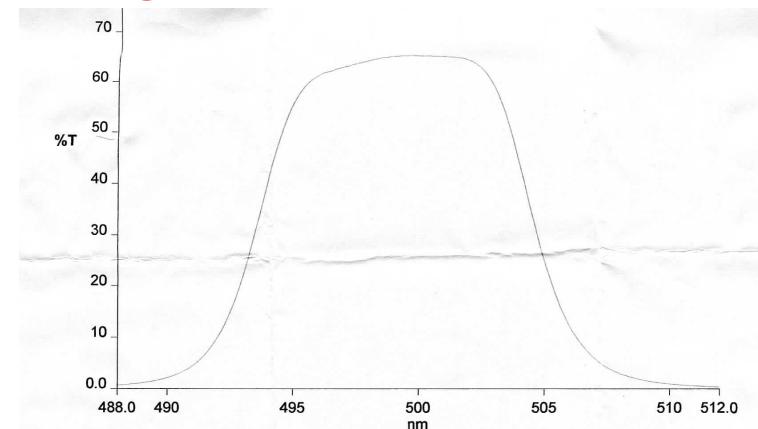
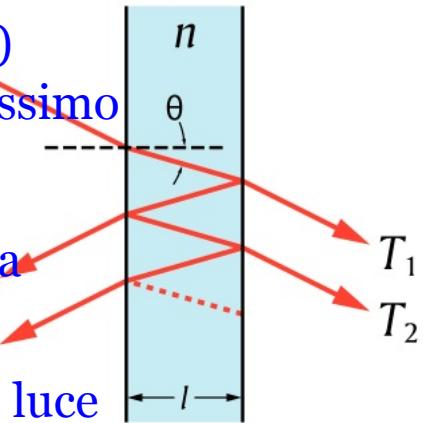
- Obiettivo
  - Verifica della linearità energia-frequenza e stima di  $h/e$
- Metodo
  - Riproposizione esperimento di Millikan
- Materiale a disposizione
  - Sorgente
    - Lampada LED a basso consumo → spettro continuo
    - Filtri interferenziali → selezione banda frequenza
  - Ricevitore
    - Fotocella Leybold 55877 (catodo di Potassio)
  - Elementi circuituali
    - Pico-amperometro (misura della fotocorrente) → uscita di tensione proporzionale
    - Alimentatore DC (generazione della tensione frenante) + misura (entrambe le funzioni integrate sull'AD2)

# Apparato su banco



# Filtri interferenziali

- Principio di funzionamento (simile al Fabry-Perot)
  - Intrappolamento e **trasmissione della luce** da lastre piane e parallele di conduttore separato 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  $R_2$  occorre tenere sotto controllo la **divergenza** del fascio di luce



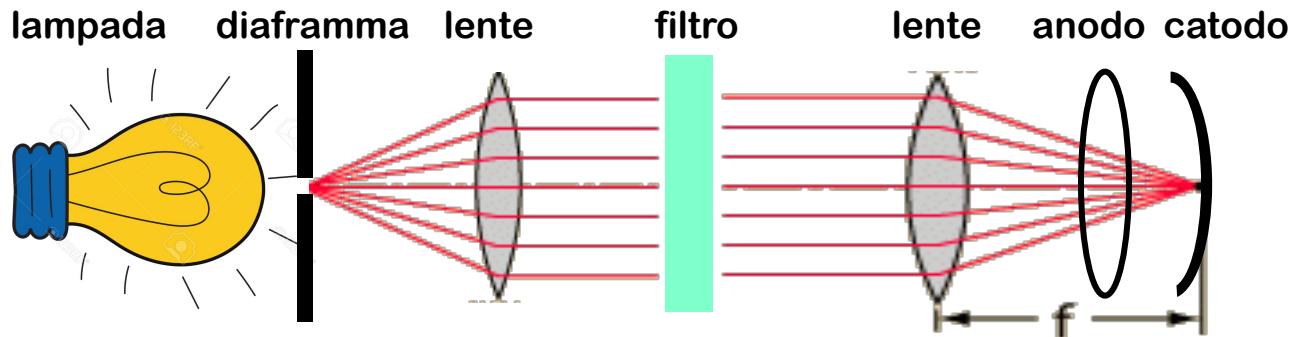
# Fotocella

- Trasduttore luce → 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 → corrente “diretta”
  - “ ” “ ” “ ” anodo → corrente “inversa”  
(in questo caso gli elettroni estratti dall'anodo sarebbero **accelerati** dal campo elettrico)  
➔ 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)



# Banco ottico

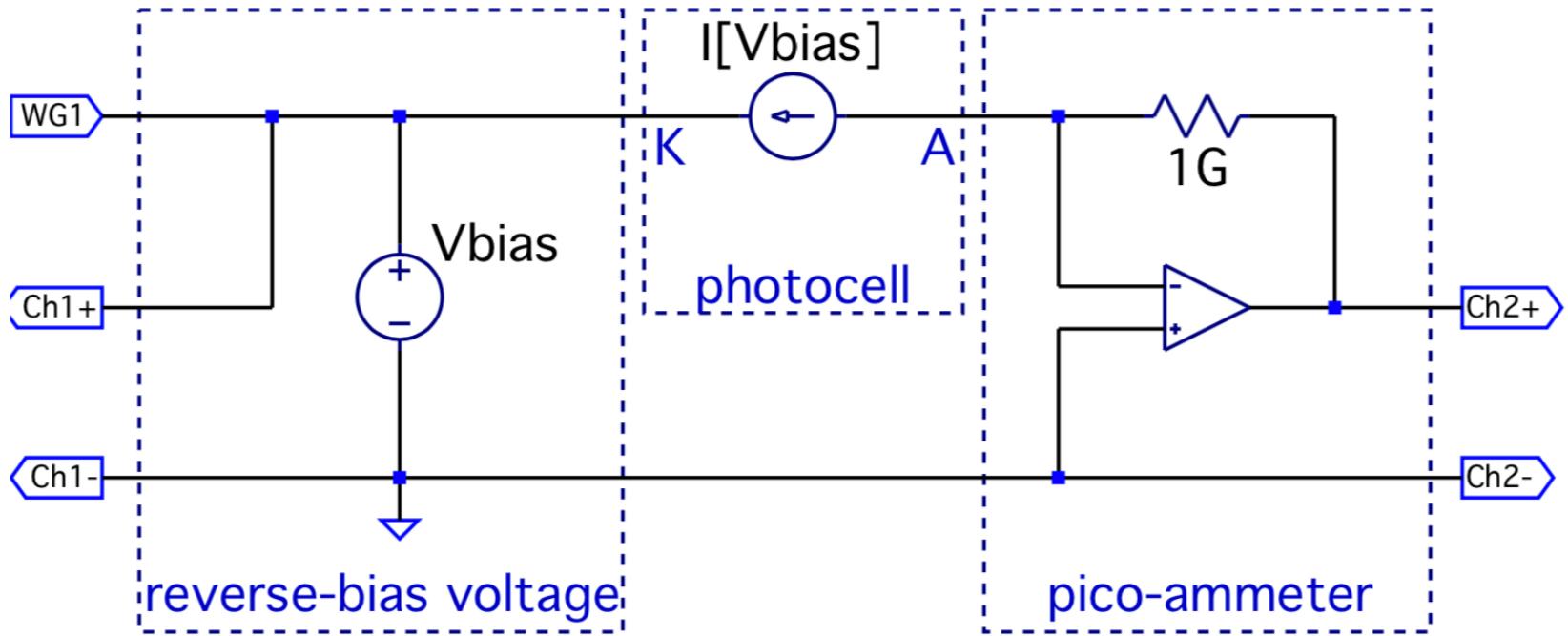
- sistema lampada+diaframma+lenti+filtro+fotocella montato su banco ottico (con l'ultima separata da una parete nera)



- accoppiamento con
  - incidenza ~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



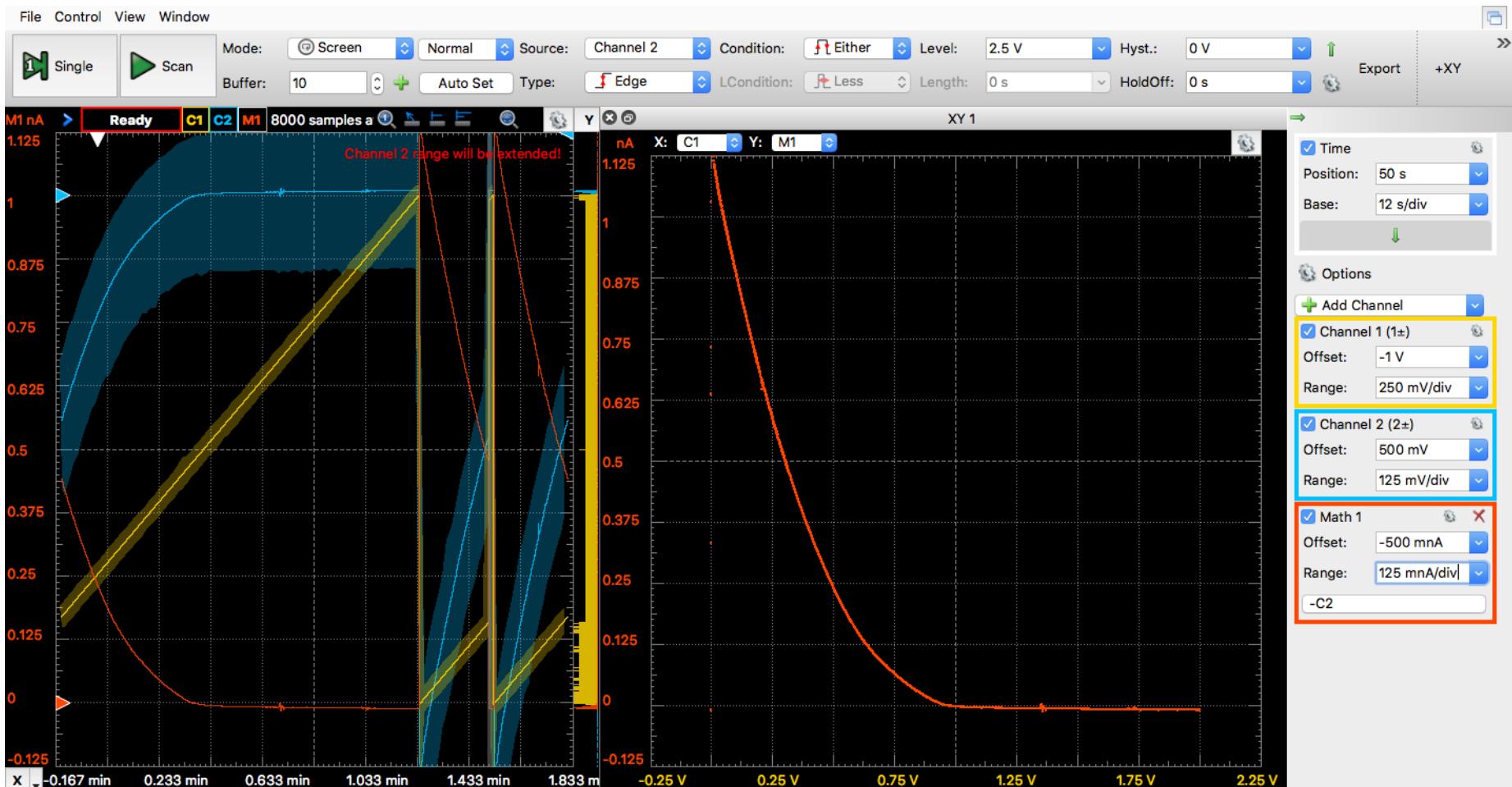
Per effetto del convertitore corrente-tensione ad 1 nA di corrente di fotoelettroni corrisponde una tensione di uscita di 1 V

# Metodo

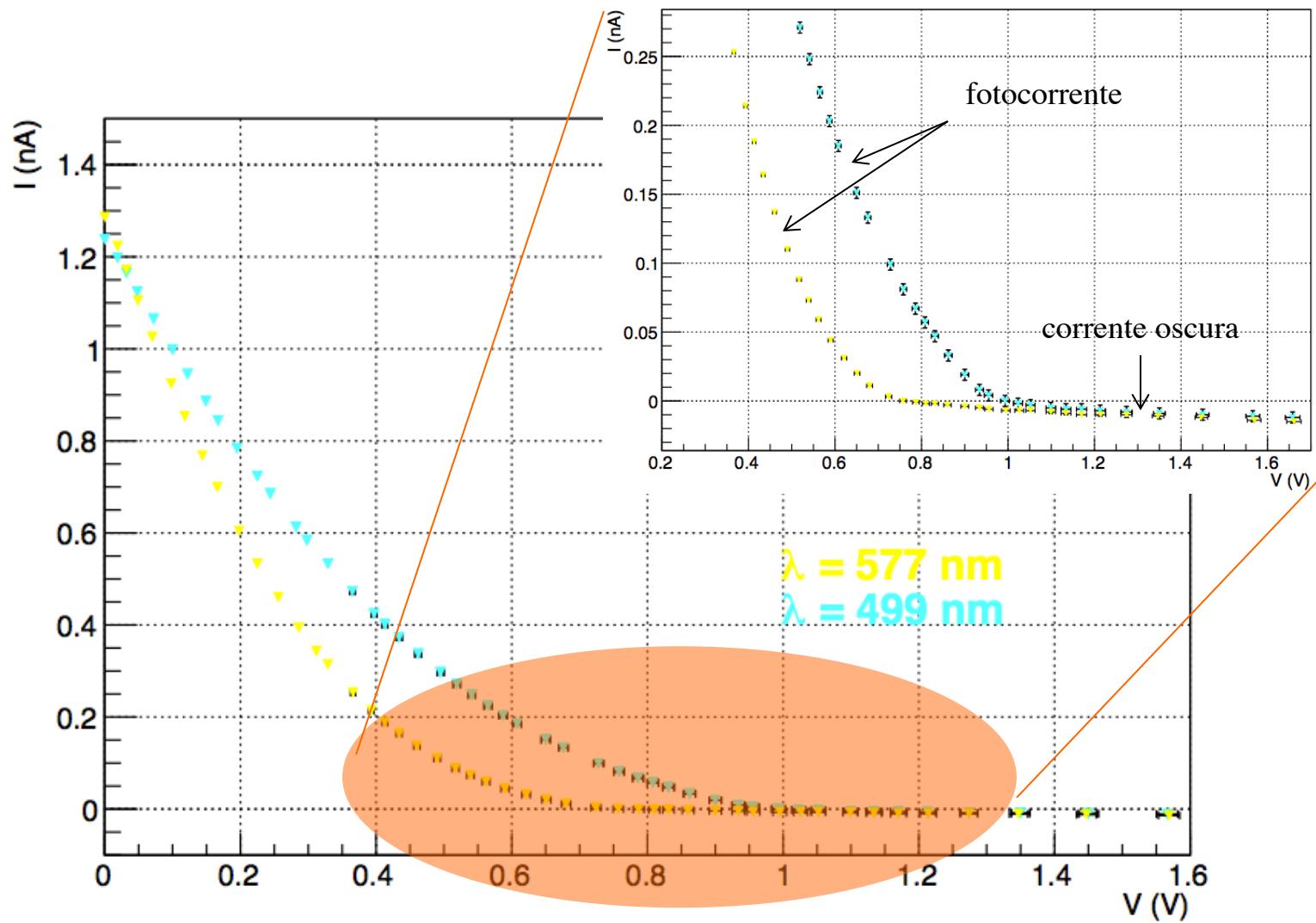
- Procedura (operazioni manuali non a vs. carico, finché siete in DAD)
  - Accendere lampada e lasciare accesa (essendo a basso consumo, impiega qualche minuto ad andare a regime)
  - Disporre il filtro con la frequenza desiderata
    - 4 filtri disponibili da utilizzare in condivisione tra due gruppi
  - Per la tensione di bias generare su WG1 una rampa di tensione compresa tra 0 e 2V (che è  $> V_0 \forall \lambda$ ) ed inviarla all'ingresso di Ch1
  - Misurare la fotocorrente dalla lettura dell'uscita del convertitore (da inviare all'ingresso di Ch2)
  - Per ogni filtro acquisire la determinare la tensione di arresto dei fotoelettroni (vedi sotto)
  - aprire la scatola, sostituire il filtro e ripetere
- Accorgimenti (come sopra)
  - 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)

# Acquisizione con AD2

Workspace (fotoelettrico.dwf3work) disponibile nella cartella dell'esperienza su Google Drive



# 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

