

Esperienza sull'effetto fotoelettrico

Gruppo BN

Federico Belliardo, Marco Costa, Lisa Bedini

28 febbraio 2017

1 Scopo dell'esperienza

Obiettivo dell'esperienza verifica dell'effetto fotoelettrico, e di stimare la grandezza del fattore h/e , dove h costante di Planck e e la carica dell'elettrone

2 Materiale occorrente

- Lampada a LED;
- Tubo fotomoltiplicatore Philips XP2412 B;
- Filtri interferenziali (Balzers e Newport);
- Scatola nera
- Generatore di tensione continua;
- Multimetro digitale;
- Picoamperometro digitale;

3 Descrizione esperimento

Si ntato il circuito in figura ???. Nella scatola nera erano fissati il fotomoltiplicatore e la lampada a LED che serviva da sorgente luminosa. Durante l'esperienza, si sono montati i filtri nell'apposito supporto, avendo cura che fossero ortogonali al piano di appoggio della scatola e quindi al fascio luminoso.

Per ogni filtro si surata la corrente in funzione del potenziale applicato ai capi del fotomoltiplicatore. Per un certo potenziale V_0 la corrente di elettroni (estratti per effetto fotoelettrico) che arriva all'amperometro si arresta. Questo ci consente di stimare la massima energia cinetica degli elettroni come eV_0 , da confrontare con l'energia dei fotoni incidenti $E_\gamma = h\nu$.

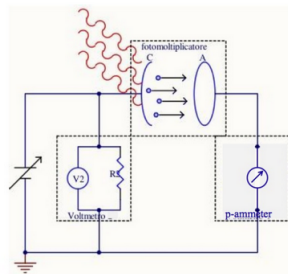


Figura 1: Schema circuito dell'esperimento e di acquisizione dati.

4 Misure

Per ogni filtro si sono prese dalle quindici alle venti misure di tensione ai capi del tubo fotomoltiplicatore e della relativa corrente. Si partiti da $V \simeq 0$ V e si variato il potenziale fino a che la corrente non raggiungeva un valore asintotico. Si sono preferite prendere misure nella regione asintotica e intorno al punto in cui il grafico curvava significativamente: in questo modo ci è stato più facile estrarre i parametri nei fit dei punti successivi della relazione. La tensione di frenamento è stata misurata tramite multimetro digitale. La corrente circolante nel circuito è stata misurata tramite picoamperometro. La lettura della corrente veniva fatta dopo un tempo sufficientemente lungo da fare in modo che il valore riportato dallo strumento si fosse stabilizzato. Come errore sulle differenze di potenziale applicate si sono prese le incertezze riportate sul manuale del multimetro. Come errore sulla misura di corrente si è presa l'ultima cifra "stabile" nella lettura, che si rivelava essere maggiore dell'incertezza strumentale riportata sul manuale del picoamperometro ($0.4\% + 1$ digit sulle scale usate). Per stimare le lunghezze d'onda dei filtri, e quindi della frequenza effettiva dei fotoni incidenti, si è usata la tabella fornita (si veda la tabella 1). L'incertezza associata ad ogni lunghezza d'onda riportata è stata presa come la FWHM della banda passante riportata sul data sheet per i filtri Newport, mentre per i Balzers si è assunto un valore del 2% di incertezza.

Colore	λ (nm)	Tipo
Arancione	602 ± 12	Balzers
Giallo	577 ± 11	Newport
Verde	546 ± 10	Balzers
Verde-azzurro	499 ± 11	Newport
Azzurro	449 ± 9	Balzers
Blu	405 ± 11	Newport

Tabella 1: Caratteristiche dei filtri utilizzati

Di seguito sono riportate le tabelle dei dati raccolti per ogni filtro.

5 Elaborazione dati: stima potenziale di azzeramento V_0

Per stimare il potenziale di azzeramento relativo ad una data frequenza dei fotoni incidenti si sono utilizzati due metodi.

5.1 Metodo A

Per ogni filtro si stima la corrente di emissione dall'anodo I_A . In prima approssimazione, si suppone che questa non dipenda significativamente dal potenziale di frenamento applicato. Pertanto si assume che la fotocorrente catodica sia I_C sia $I - I_A$. Dati gli andamenti della corrente, si esegue un fit con la funzione modello $\sqrt{I_C} = aV + b$. Una volta estratti i parametri, si trova il potenziale di azzeramento V_0 ponendo $I_C = 0 \rightarrow V_0 = -b/a$. Per stimare la corrente di emissione dell'anodo, si sono presi i dati in regime asintotico e si è eseguito un fit con funzione modello $y = b$. (Dati i cui valori di corrente differiscono dal valore di corrente massimo per meno del 5% vengono considerati asintotici). In tabella 2 si sono riportati i parametri di fit. Si osservi che i valori della

Colore	b (nA)	χ^2/ndof
Arancio	-1.8 ± 0.1	11.2/3
Giallo	-2.3 ± 0.1	157.0/5
Verde	-2.1 ± 0.1	0.9/4
Verde-Azzurro	-1.49 ± 0.05	32.2/4
Azzurro	-2.3 ± 0.1	49.1/4
Blu	-0.27 ± 0.01	29.9/3

Tabella 2: Risultati fit del regime asintotico

corrente hanno una debole dipendenza dal potenziale: tendono infatti a crescere in valore assoluto all'aumentare di V . In effetti l'ipotesi che la corrente anodica non dipenda dal potenziale applicato non è confermata dal χ^2 . Ai fini dei fit ci è comunque sembrato sensato andare a considerare come corrente asintotica il valore medio sui punti presi. Come incertezza si è usata la semidispersione dei valori di corrente dalla media. Una volta ottenuto il valore della corrente asintotica, si è eseguito un fit con la funzione modello parabolica sui dati, escludendo quelli in regime

asintotico (che non possono rispettare un simile andamento). I risultati dei fit sono riportati nelle tabelle 3 e nel grafico 2. I χ^2 normalizzati sono dell'ordine delle migliaia : si vede che l'andamento non è nulla rispettato.

are

Tabella 3: Risultati fit parabolico

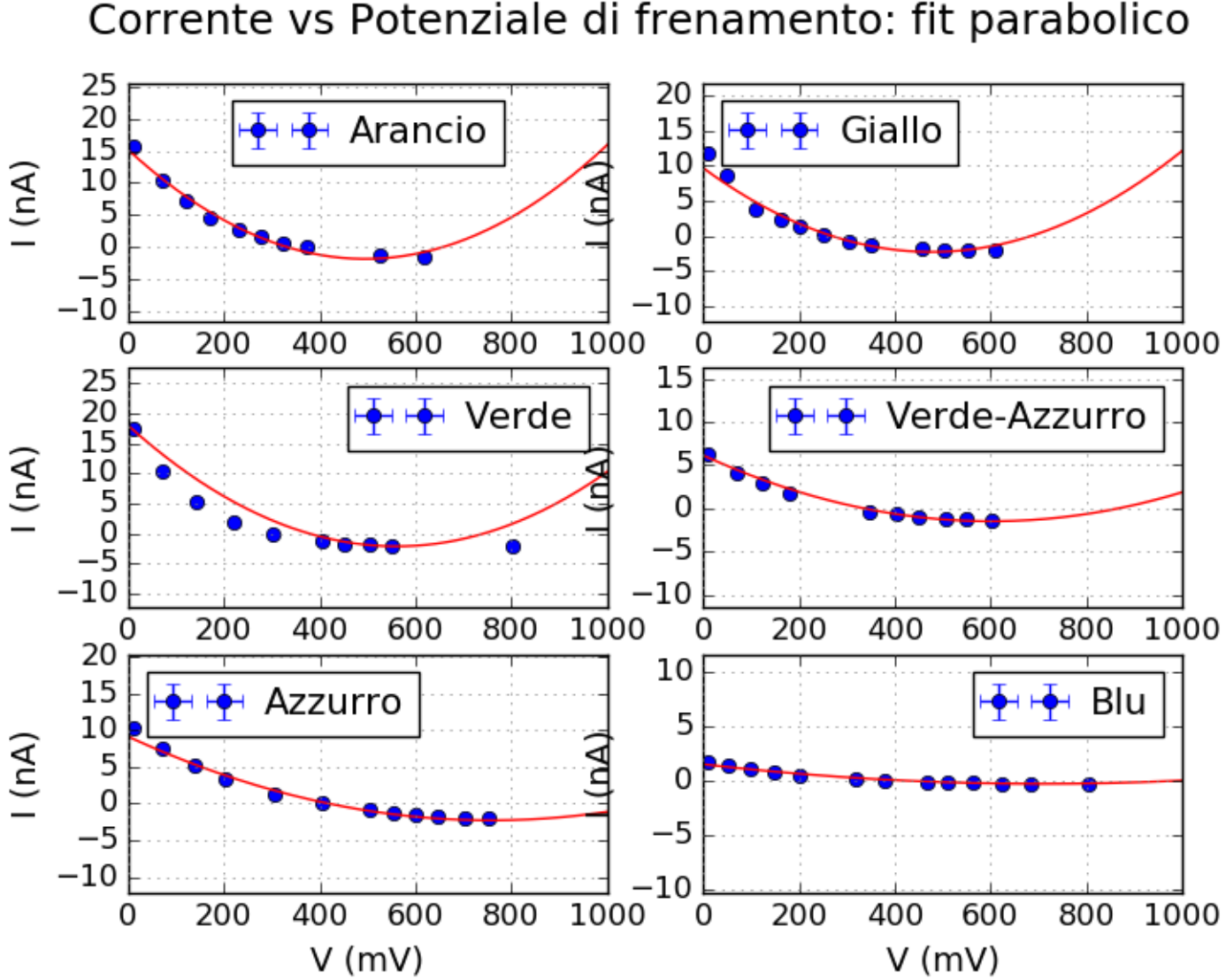


Figura 2: Corrente in funzione del potenziale di frenamento per le varie frequenze (fit parabolico)

Inoltre i potenziali di azzeramento estratti non sono per nulla in accordo con quanto predetto dal modello, né quanto ottenuto nel punto successivo. Pertanto non si è anche eseguito il fit lineare su di essi in quanto non ci aspettiamo che diano risultati sensati.

5.2 Metodo B

Per ogni filtro si impara il relativo potenziale di azzeramento V_0 corrispondente alla tensione per cui la corrente fotocatodica risulta compatibile con 0 entro una incertezza δI . Per fare ciò si esegue un fit per ogni set di misure con la funzione modello

$$I(V) = \bar{I}(e^{a(\bar{V}-V)} - 1) \quad (1)$$

Si osservi che con questa definizione \bar{I} rappresenta il modulo della corrente asintotica misurata. I risultati dei fit sono riportati nella tabella 4 e nel grafico 3. I valori dei χ^2 normalizzati vanno dalle decine alle centinaia: in effetti non ci si aspetta che l'andamento della funzione $I(V)$ sia davvero un esponenziale, ma semplicemente

Colore	$a \text{ mV}^{-1}$	$\bar{V} \text{ (mV)}$	$\bar{I} \text{ (nA)}$	χ^2/ndof
Arancio	$(6 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	380 ± 1	1.762 ± 0.006	20/11
Giallo	$(7 \pm 0.01) \cdot 10^{-3}$	248 ± 1	2.23 ± 0.03	6100/15
Verde	$(7 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	300 ± 1	2.23 ± 0.02	104/12
Verde-Azzurro	$(5 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	304 ± 1	1.55 ± 0.01	638 /12
Azzurro	$(4 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	384 ± 1	2.43 ± 0.01	1466/14
Blu	$(5 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$	366 ± 1	0.273 ± 0.03	195/14

Tabella 4: Risultati dei fit con modello esponenziale

Corrente vs Potenziale di frenamento: fit esponenziale

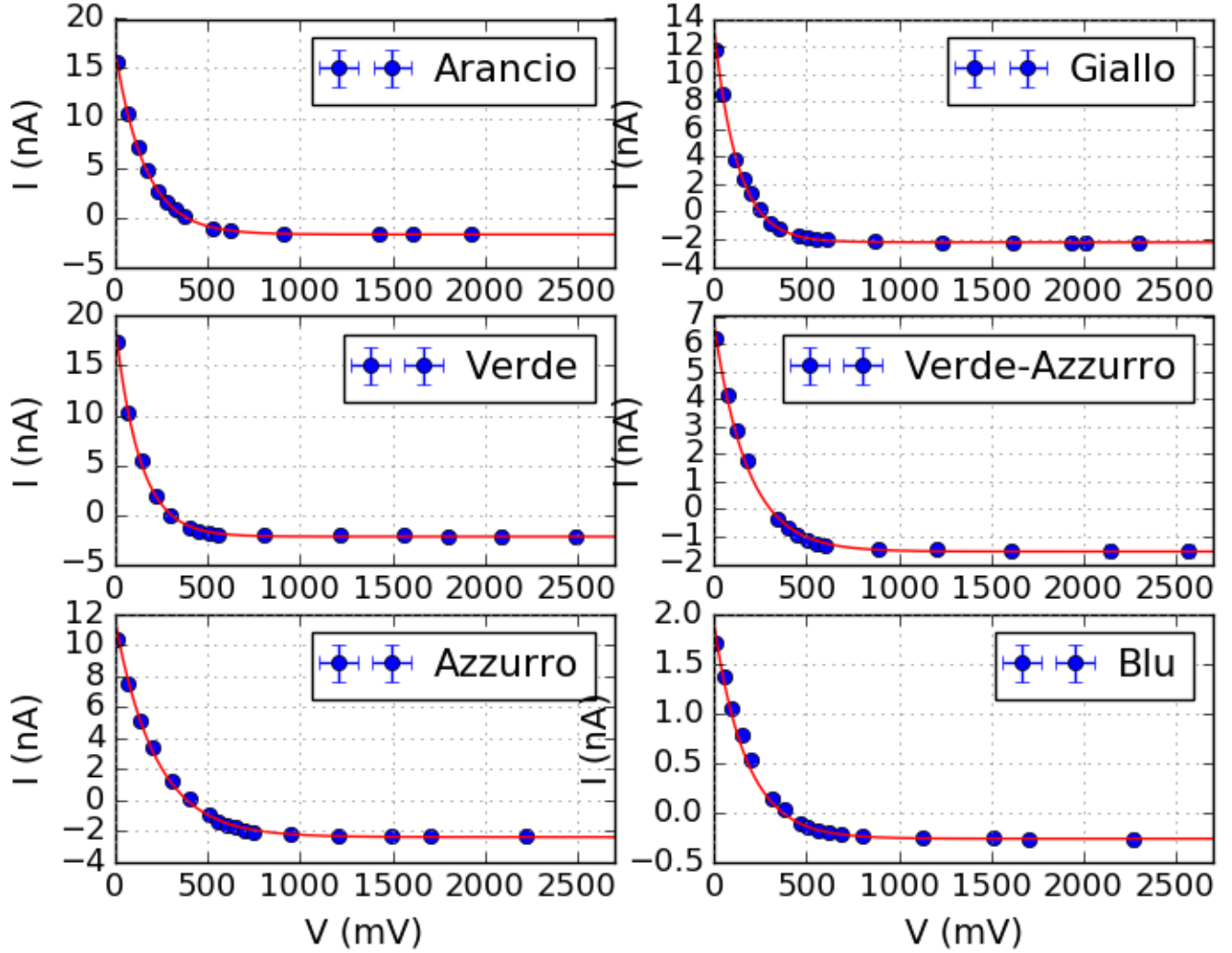


Figura 3: Grafici con le correnti misurate in funzione dei potenziali di frenamento per le varie frequenze (fit esponenziale)

un andamento approssimativo con il quale estrarre dei parametri utili per i calcoli successivi. Per ricavare V_0 basta risolvere l'equazione

$$I(V_0) = -\bar{I} + \delta(I) \Rightarrow V_0 = \bar{V} + \frac{1}{a} \ln \frac{\bar{I}}{\delta I} \quad (2)$$

Dobbiamo stimare l'incertezza δI . Si osserva intanto che la corrente anodica non è veramente indipendente dalla differenza di potenziale applicato: guardando i dati si osserva che, anche per grandi V il valore "asintotico" della corrente tende a crescere in valore assoluto. Pertanto per stimare δI si è preferito prendere la semidispersione dei valori delle correnti nella zona asintotica rispetto al valor medio. Ai fini della stima non si è voluto considerare l'errore estratto dal fit del parametro \bar{I} : esso realisticamente è piccolo, persino più piccolo delle variazioni della corrente I nel regime asintotico. Per lo stesso motivo non si è considerato neppure l'errore strumentale (dell'ordine

dello 0.4% nelle scale usate). Sebbene la scelta di δI appaia abbastanza arbitraria, questa non influisce sul fit lineare finale e sul valore del coefficiente angolare della retta h/e : essendo sia il parametro a che il valore dei δI circa lo stesso per le varie frequenze utilizzate, i vari potenziali di azzeramento V_0 vengono traslati della stessa quantità si varia δI . In tabella 5 si sono riportati i valori dei potenziali ottenuti in funzione del colore. Gli errori su V_0 estratti sono stati calcolati propagando gli errori dei parametri che compaiono nella formula per il calcolo di V_0

Colore	δI (nA)	V_0 (mV)
Arancio	0.02	1100 ± 50
Giallo	0.02	850 ± 10
Verde	0.02	930 ± 40
Verde-Azzurro	0.02	1090 ± 30
Azzurro	0.02	1440 ± 30
Blu	0.02	830 ± 30

Tabella 5: Valori del potenziale d azzeramento in funzione del filtro e del δI usato

6 Relazione frequenza- V_0

Una volta ottenuti i potenziali di azzeramento per le varie frequenze, si esegue un fit secondo la funzione modello $V_0 = a \cdot f + b$. Secondo il modello, $a = h/e \simeq 4.1 \text{V} \cdot \text{s} \cdot 10^{-15}$. Il risultati del fit portato in figura 4.

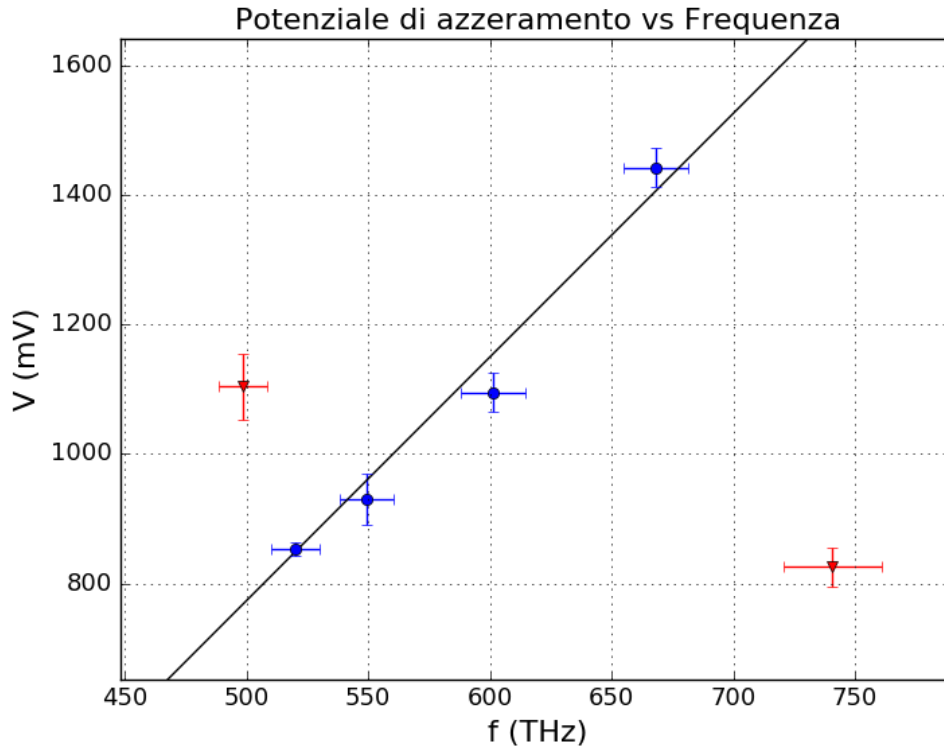


Figura 4: Grafico del potenziale di azzeramento in funzione della frequenza. I punti esclusi hanno colore e marker diversi

Come valore del coefficiente angolare si tenuto $a = 3.8 \pm 0.2 \text{V} \cdot \text{s} \cdot 10^{-15}$, in buon accordo con il valore atteso. Inoltre si ha $\chi^2/\text{ndof} = 1.8/2$, quindi l'andamento lineare spettato entro gli errori presi. Per il calcolo del χ^2 si nsiderato pure l'errore (non trascurabile) sulle frequenze, propagandolo con un valore stima di 3.5 per il coefficiente angolare. Il V_0 per il filtro arancione non accordo con l'andamento teorico. In effetti a questa frequenza (pi bassa delle altre), i fotoni hanno meno energia rispetto agli altri i casi. Il materiale eccitato nel fotomoltiplicatore costituito da due tipi di metallo,; solo uno di questi tuttavia riesce ad essere eccitato a queste energie. Pertanto il comportamento della corrente verso rispetto agli altri casi. Anche il potenziale di azzeramento per il filtro blu non accordo con quanto previsto, ma non si uscito a trovare una spiegazione di tale fenomeno. Non si sono considerati questi punti per il fit della retta.

7 Corrente anodica

Si ovato a studiare il comportamento della corrente anodica in funzione delle frequenze. Come prima cosa si osserva che in realt  ta non stante all'aumentare della tensione applicata all'apparato: in effetti si osserva dai dati un andamento decrescente. Si indi provato ad eseguire un fit con funzione modello $y = a + b$ sui dati "asintotici", sui quali avevamo in precedenza eseguito un fit con costante (sezione "Metodo A"). In tabella 6 sono riportati i risultati dei fit. Si puervare come tutti i coefficienti angolari siano, per quanto piccoli, negativi

Colore	a (nA/mV)	b (nA)	χ^2/ndof
Arancio	$-(8 \pm 3) \cdot 10^{-5}$	-1.62 ± 0.04	0.5/2
Giallo	$-(100 \pm 8) \cdot 10^{-6}$	-2.09 ± 0.01	5.3/4
Verde	$-(4.8 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	-2.1 ± 0.1	0.04/3
Verde-Azzurro	$-(4.1 \pm 0.7) \cdot 10^{-5}$	-1.41 ± 0.01	0.9/3
Azzurro	$-(7 \pm 1) \cdot 10^{-5}$	-2.20 ± 0.02	2.2/3
Blu	$-(1.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$	-0.251 ± 0.003	0.7/2

Tabella 6: Risultati fit dati asintotici con retta

(e non compatibili con 0, ossia andamento costante). Il valore dell'ordinata della retta non a buona stima della corrente anodica effettivamente circolante nel circuito per potenziali elevati: come valore della corrente asintotica si mpre preferito prendere il valore ottenuto dal fit con costante (ossia la media pesata). Pertanto, per studiare l'andamento della corrente anodica in funzione delle frequenze si sono riportati in figura 5 i valori della corrente asintotica estratta con fit costante e non con il fit appena eseguito . Ci aspettiamo che il valore della corrente anodica dipenda principalmente dallo spettro di emissione della lampada utilizzata e dalle varie trasmissionanze dei filtri.

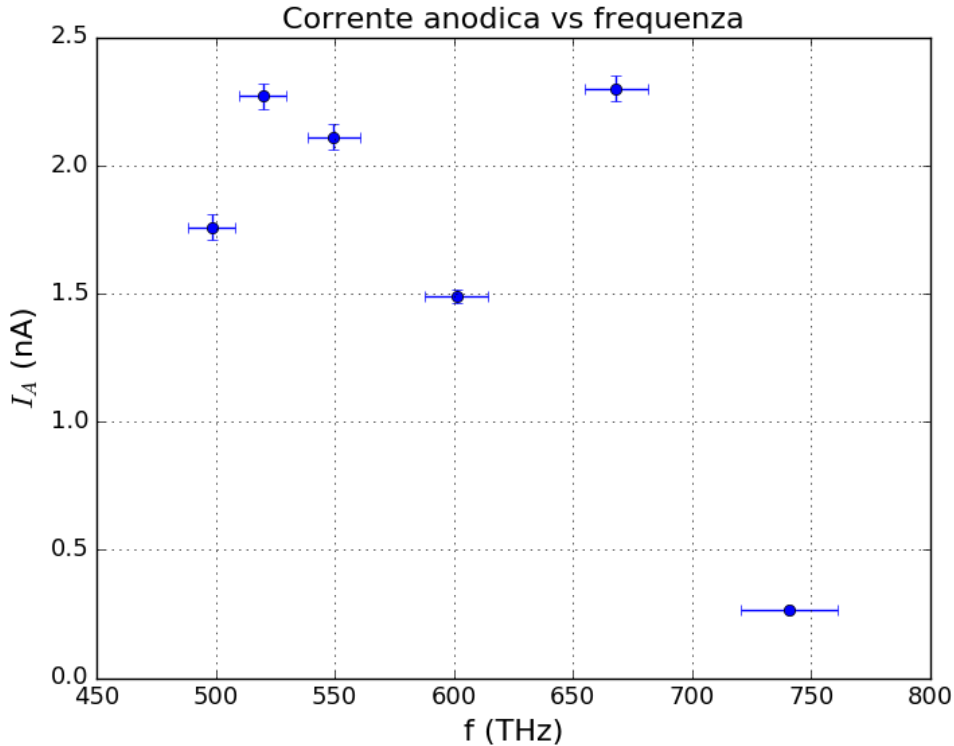


Figura 5: Valori della corrente anodica in funzione delle frequenze

Dal grafico non si riesce ad evincere un andamento particolare della corrente anodica. Si puervare che per il filtro blu, la corrente anodica ha un valore decisamente pi basso che per gli altri filtri.

8 Conclusioni

Il metodo di fit A (fit con parabola) non ha portato a stime sensate del potenziale di azzeramento. Il filtro arancione non rispecchia l'andamento per motivi che si possono ricondurre all'apparato sperimentale (struttura

del fotomoltiplicatore). Per il filtro blu non si sono riuscite a dare spiegazioni convincenti. La corrente anodica dipende debolmente dal potenziale applicato (sebbene si fosse assunto il contrario in fase di fit).