

Corso di Struttura della Materia con Laboratorio, AA 2021-2022

**Relazione Tenica di Laboratorio**

## **Esperienza: Raggi X**

Matteo Allione , Valentina Barletta e Matteo Gallo

Gruppo D6

---

### **Abstract**

In questa esperienza è stato possibile effettuare misure di assorbimento dei Raggi X, studiando la validità della legge di Lambert-Beer, e misure cristallografiche di diverse strutture cristalline ( $NaCl$ , polietilene espanso e polveri di  $SiC$ ). Inoltre, mediante l'applicazione della legge di Bragg, sono state determinate le lunghezze d'onda relative ai picchi caratteristici  $K_{\alpha}$  e  $K_{\beta}$  dei raggi X e confrontate con quelle attese. A tal fine si è utilizzato un Tel-X-Ometer 580 munito di tubo radiogeno, costituito da un anodo in rame e un catodo in tungsteno, e un contatore Geiger-Müller.

## 1 Valutazioni preliminari

Per iniziare si eseguono alcune osservazioni preliminari allo scopo di individuare le condizioni di lavoro ottimali per svolgere l'esperienza. Si comincia con l'osservare qualitativamente l'emissione dei raggi X ed alcuni fenomeni tipici della loro interazione con la materia.

### 1.1 Rivelazione dei raggi X attraverso la luminescenza

L'obiettivo è sfruttare la luminescenza di uno schermo in fosforo, posto di fronte al tubo a raggi X sul carrello del Tel-X-Ometer in *ES13*, per osservare il fascio prodotto dalla lampada prima e dopo l'inserimento di diversi spessori di *Al* e *Pb*. Si imposta la tensione tra anodo e catodo del tubo radiogeno a  $V_{EHT} = 30\text{ kV}$ . Nella condizione iniziale, senza aver inserito né gli spessori né un collimatore, si osserva una zona circolare fosforescente di grandi dimensioni. È anche possibile osservare che, allontanando la diapositiva dall'emettitore, la macchia fosforescente si allarga e quindi, con essa, il fascio.

Inserito il collimatore primario a fessura sulla Basic Port, si vede una luminescenza della forma della fenditura. Ruotando la fenditura si ha una corrispondente rotazione della regione illuminata.

Invertendo la faccia della diapositiva rivolta verso la sorgente la fosforescenza resta visibile sul lato rivestito in fosforo. Questo mostra il potere penetrante dei raggi X, che passano indisturbati attraverso lo spessore della diapositiva.

Spostato lo schermo in *ES20* e posta una lamina di *Al* di 0.1 mm in *ES13*, si continua ad osservare un debole chiarore, meno intenso di quello osservato finora. Posta la lamina di 2 mm la macchia è ancora più fievole, infatti il fascio risulta attenuato sempre più per l'aumento dello spessore. Inserita la lamina di *Pb* lo spot luminoso non è più visibile.

### 1.2 Rivelazione dei raggi X mediante il contatore Geiger-Müller

Il sistema di acquisizione è costituito da un tubo Geiger-Müller alimentato ad alta tensione. Il rivelatore viene collegato ad un circuito elettronico che provvede a convertire il suo segnale in uscita in un segnale logico, opportunamente registrato da un contatore. Vengono inseriti gli appositi collimatori che verranno utilizzati per il resto dell'esperienza.

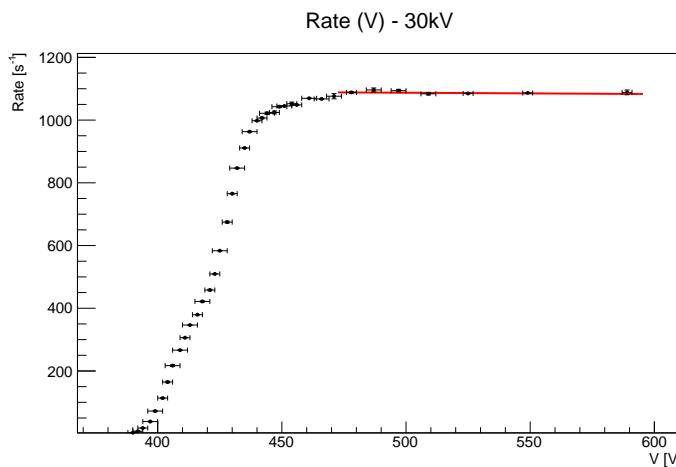
Per poter utilizzare al meglio la postazione sperimentale occorre individuare le condizioni ottimali di corrente nel tubo radiogeno e di tensione di lavoro  $V_{LO}$  e di soglia  $V_{TH}$  del contatore Geiger-Müller. L'obiettivo è massimizzare il numero di eventi raccolti, isolando il fondo, senza lavorare in condizioni critiche.

Si posiziona il rivelatore in *ES23* in asse con la sorgente di raggi X e, collegato un oscilloscopio in modo da valutare il segnale proveniente dal rivelatore prima della sua conversione in analogico, si individua, con i cursori, una stima dell'ampiezza delle oscillazioni di fondo  $V_{fondo} = (15 \pm 2) \text{ mV}$  e dei picchi di interesse  $V_{picco} = (1.7 \pm 0.2) \text{ V}$ . Per le misure successive si imposta il valore di tensione di soglia suggerito in monografia<sup>[1]</sup> di  $V_{TH} = 77 \text{ mV}$ , essendo questo in grado di discriminare oscillazioni fino a tre volte maggiori di  $V_{fondo}$ , rimanendo minore di  $V_{picco}$ .

Successivamente, posta  $V_{EHT} = 30 \text{ kV}$ , si registrano i conteggi e tempi di acquisizione al variare della tensione tra anodo e catodo del Geiger-Müller. Ogni misura viene acquisita due volte per uno stesso valore di tensione al fine di poter eseguire stime più adeguate dei *Rate* e del loro errore. Tali valori sono riportati in appendice A.1 in tab.[A1.1](#). Si ripete lo stesso procedimento per  $V_{EHT} = 20 \text{ kV}$  (tab.[A1.2](#)).

Si ricavano i conteggi al secondo, il *Rate*, dividendo ogni conteggio per il suo tempo di acquisizione. In tab.[A1.1](#) e in tab.[A1.2](#) si riportano le medie e le semidispersioni dei *Rate*. Si costruiscono, quindi, i due grafici in fig.[1a](#) e fig.[1b](#).

Come atteso, al crescere della tensione il numero dei conteggi individuati dal rivelatore aumenta fino al raggiungimento di una zona di plateau in cui il *Rate* rimane costante, essendo ormai rilevata tutta la radiazione incidente. Per scegliere il valore della tensione di lavoro  $V_{LO}$ , in modo da non perdere conteggi, si stima il primo punto per cui il trend orizzontale del plateau è verificato e lo si incrementa di un valore sufficiente tale da assicurarsi di essere nella regione di interesse.



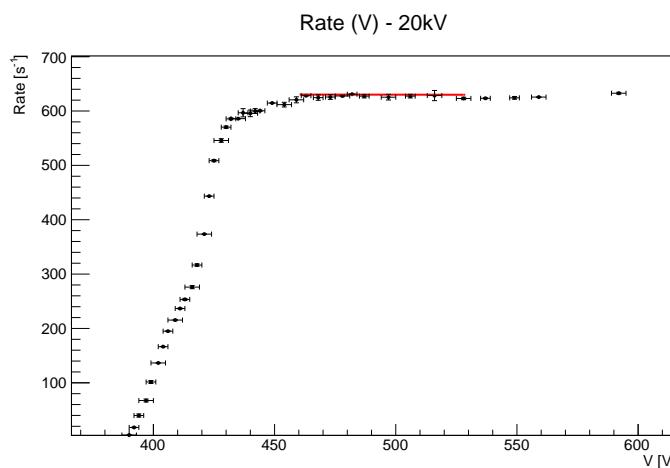
**Figura 1a.** Fit lineare del plateau per  $V_{EHT} = 30\text{kV}$

Per il primo grafico la condizione di plateau è raggiunta solo per tensioni più alte, si esegue allora un fit includendo volta per volta, partendo dalle tensioni maggiori, un numero più grande di punti fino ad ottenere un  $\chi^2$  non accettabile ed identificare così l'ultimo punto per cui è valida l'approssimazione lineare. Per il secondo fit i dati centrali mostrano già l'andamento di plateau desiderato, per cui si sceglie di escludere gli ultimi cinque punti. Includerli comporterebbe il fallimento del test del  $\chi^2$ , rigettando l'ipotesi di linearità, oppure la non compatibilità del coefficiente angolare con lo zero.

I parametri ricavati dal primo fit lineare sono:

$$p_0 = (-3 \pm 3) \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}\text{V}^{-1} \quad p_1 = (1108.4 \pm 1.8) \text{ s}^{-1}$$

dove  $p_0$  è il coefficiente angolare della retta e  $p_1$  l'intercetta. Poiché il  $\chi^2 = 9.15$  con 6 gradi di libertà è minore del  $\chi^2_{critico} = 12.59$ , l'ipotesi funzionale applicata al primo grafico risulta valida con un livello di significatività del 5%. Il primo punto del plateau corrisponde al valore di tensione  $(471 \pm 3)$  V.



**Figura 1b.** Fit lineare del plateau per  $V_{EHT} = 20\text{kV}$

Per il secondo fit lineare, invece, i parametri ricavati sono:

$$p'_0 = (1.2 \pm 1.0) \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}\text{V}^{-1} \quad p'_1 = (573 \pm 5) \text{ s}^{-1}$$

dove  $p'_0$  è il coefficiente angolare della retta e  $p'_1$  l'intercetta.

Anche in questo caso, essendo  $\chi^2 = 13.88 < \chi^2_{critico} = 15.51$  con 8 gradi di libertà l’ipotesi funzionale è accettata con un livello di confidenza del 95%. Il primo punto del plateau corrisponde al valore di tensione  $(459 \pm 3)$  V.

Si noti anche che si verifica con il test di gauss, fissando l’intervallo di confidenza al 95%, che i coefficienti angolari ottenuti dai due fit sono compatibili con lo zero (tab.1).

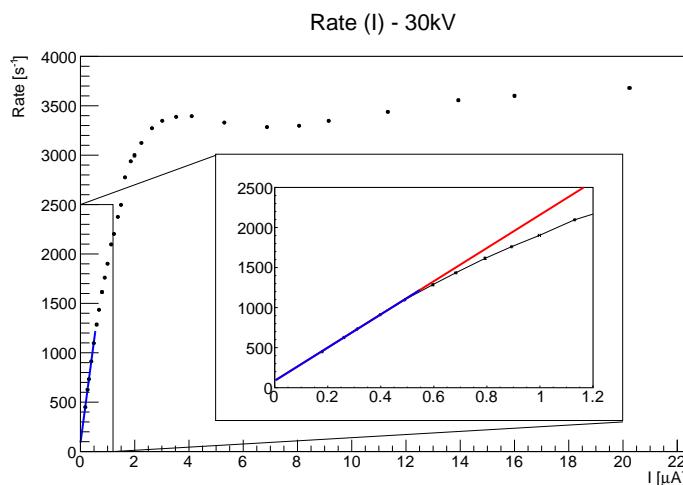
Le tensioni di lavoro che saranno, quindi, utilizzate sono:

$$V_{LO,30kV} = (490 \pm 3) \text{ V} \quad V_{LO,20kV} = (471 \pm 3) \text{ V}$$

Gli errori assegnati alle  $V_{LO}$  sono dovuti al passo del sistema di acquisizione.

In seguito, fissata  $V_{EHT} = 30\text{kV}$  e la tensione di lavoro  $V_{LO,30\text{kV}}$  si registrano i valori dei conteggi e i loro tempi di acquisizione al variare della corrente nel filamento della sorgente. Ogni conteggio è stato acquisito due volte. Tutti i dati sono riportati in tab.A1.3.

Si costruisce il grafico di fig.2 ponendo sull’asse delle ascisse la corrente  $I$  e sull’asse delle ordinate i Rate, ricavati come in precedenza. Anche in questo caso l’errore attribuito ai Rate è la semidispersione. Si osserva che aumentando l’intensità di corrente che scorre nel filamento, cresce il numero di raggi X emessi. È possibile distinguere nella parte destra del grafico una regione di saturazione in cui il rivelatore non è più in grado di registrare tutti gli eventi che si verificano.



**Figura 2.** In blu il fit lineare dei primi punti per  $V_{EHT} = 30\text{kV}$ , in rosso il suo prolungamento

Siccome occorre individuare l’intervallo di corrente in cui il numero di conteggi dipende linearmente dalla corrente ed in cui i tempi di risposta del tubo Geiger-Müller non inficiano la valutazione del Rate, si esegue un fit lineare sui primi cinque punti. I parametri ricavati dal fit sono:

$$p''_0 = (2072 \pm 18) \text{ s}^{-1} \mu\text{A}^{-1} \quad p''_1 = (86 \pm 6) \text{ s}^{-1}$$

dove  $p''_0$  è il coefficiente angolare della retta e  $p''_1$  l’intercetta. L’ipotesi di linearità è verificata poiché  $\chi^2 = 5.41$  con 3 gradi di libertà è minore del  $\chi^2_{critico} = 7.82$  con un livello di significatività del 5%. Si noti che se si considerassero più punti per il fit, il  $\chi^2$  non risulterebbe accettabile ed occorrerebbe rigettare l’ipotesi di linearità. Inoltre l’intercetta non è consistente con significatività del 5% col valore atteso, ovvero il valore del fondo ambientale, che valutato a sorgente spenta è di  $Rate_{amb} = (0.217 \pm 0.017) \text{ s}^{-1}$  ( $Z = 13.86 > Z_{critico} = 1.96$ ). Una possibile causa potrebbe essere la presenza di un offset sulle misure di corrente, oppure la non validità dell’andamento lineare a valori di corrente minori di quelli osservati. Più probabilmente la semidispersione dei Rate in questione sottostima l’errore, prendendo un maggior

**Tabella 1.** Test di Gauss

$Z_1 = -0.86$
$Z_2 = 1.18$

numero di dati si sarebbe potuto ottenere una stima statisticamente più accurata dell'incertezza. Per ulteriori osservazioni si veda l'appendice A.1.

Siccome risulta difficile individuare la reale causa del problema, si predilige la ricerca della regione lineare a quella dell'azzeramento dell'intercetta. Pertanto, il range di corrente ricavato resta quello individuato col fit precedente, cioè da  $(0.179 \pm 0.002) \mu\text{A}$  a  $(0.4900 \pm 0.0010) \mu\text{A}$ .

Per stimare un'equivalente regione di linearità per il caso  $V_{EHT} = 20\text{kV}$ , si noti che  $I \propto (V_{EHT})^2$ , che il Rate è proporzionale all'intensità luminosa e che quindi ci si aspetta di ritrovare semplicemente Rate compatibili con quelli osservati per  $V_{EHT} = 30\text{kV}$  scalati di un fattore moltiplicativo. Questo non modifica la regione di linearità.

## 2 Interazione raggi X e materia

Caratterizzato il contatore Geiger-Müller, si procede a valutare quantitativamente alcuni fenomeni di interazione dei raggi X con la materia. In tutta la sezione, ogni valore di rate si intende come media dei rate di due acquisizioni a cui si è associato come errore la semidispersione.

### 2.1 Assorbimento di Raggi X

Per iniziare si valuta il coefficiente di assorbimento nell'alluminio sfruttando la legge di Lambert-Beer. Impostata la  $V_{EHT} = 30 \text{ kV}$ , si utilizza  $I = 0.49 \mu\text{A}$ , ovvero il massimo valore del range di corrente individuato nella sezione precedente, per massimizzare i conteggi. In queste condizioni si intercetta la radiazione emessa prima che giunga al rivelatore con diverse lamine di  $Al$  sistemate sul carrello secondario montato sulla Basic Port. Mantenendo il rivelatore posto nella stessa posizione dell'esperienza precedente si prendono le misure per tempi sufficienti ad avere un centinaio di conteggi. I dati sono riportati in tab.[A2.1](#). Ci aspettiamo di poter utilizzare la legge di Lambert-Beer

$$I = I_0 e^{-\mu s} \quad (1)$$

dove  $I$  è l'intensità valutata con il numero di conteggi al secondo (Rate),  $I_0$  è quella acquisita senza spessori ( $Rate_0$ ),  $\mu$  è il coefficiente di assorbimento ed  $s$  lo spessore inserito. Per verificare la validità di questa legge si rappresenta in un grafico il  $\log(Rate_0/Rate)$ , fig.3, linearizzando così la legge di Lambert-Beer.

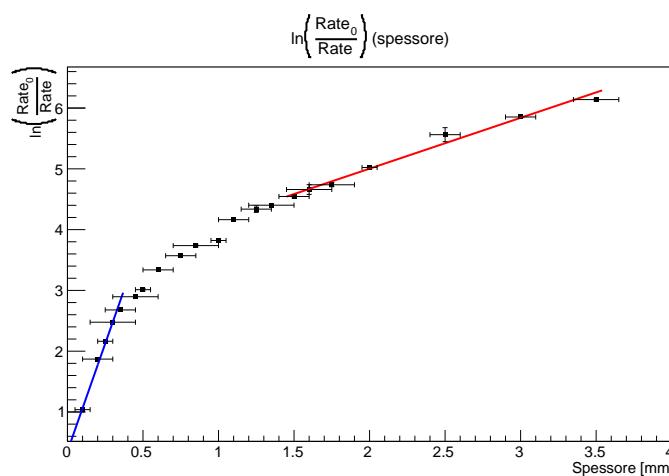


Figura 3. Fit  $\log(Rate_0/Rate)$  in funzione dello spessore attraversato.

È evidente che la relazione non è lineare considerando l'intero range di spessori, infatti la retta di best fit (fig.[A2.1](#)) che interpola tutti i dati ha un  $\chi^2 = 271.30$ , che è maggiore del  $\chi^2_{critico} = 30.14$  per 19 gradi di libertà con significatività del 5%.

In effetti occorre considerare che la sorgente utilizzata non produce raggi X monocromatici e che il coefficiente di assorbimento dipende dall'energia degli stessi, quindi cercare un valore fisso di coefficiente di assorbimento con un'unica relazione lineare non risulta efficace.

Quello che può però essere osservato è che risultano evidenti due regioni distinte in cui può essere valida una relazione lineare. Si effettuano, dunque, due fit lineari: il primo considerando i cinque punti iniziali, per cui si ottiene un  $\chi^2 = 0.08$  con 3 gradi di libertà ( $\chi^2_{critico} = 7.82$ ), e il secondo tenendo conto degli ultimi sette, ricavando  $\chi^2 = 2.41$  con 5 gradi di libertà ( $\chi^2_{critico} = 11.07$ ). Entrambi i test del  $\chi^2$  sono accettati con significatività del 5%.

I parametri ottenuti sono:

$$\mu_1 = (7 \pm 3) \text{ mm}^{-1} \quad a_1 = (0.4 \pm 0.6)$$

$$\mu_2 = (0.84 \pm 0.06) \text{ mm}^{-1} \quad a_2 = (3.33 \pm 0.13)$$

Rigettata l'ipotesi di monocromia, si può associare la prima regione lineare ad una componente dominante, che viene assorbita nei primi spessori, la seconda invece ad una componente di radiazione residua che, per essere assorbita, ha bisogno di oltrepassare una maggiore quantità di materiale. In effetti, come si vedrà anche in seguito, la sorgente non è monocromatica e si può associare la prima zona all'assorbimento delle componenti di  $K_\alpha$  e  $K_\beta$ , la seconda a quello della componente di Bremsstrahlung. Al fine di escludere la zona centrale in cui è difficile riconoscere una componente specifica che viene assorbita, si è scelto di interpolare con i due fit solo i dati sopracitati.

Nota la densità dell'alluminio ( $\rho = 2.70 \text{ g cm}^{-3}$ ) è possibile ricavare i valori sperimentalni:

$$\frac{\mu_{1exp}}{\rho} = (26 \pm 10) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \quad \frac{\mu_{2exp}}{\rho} = (3.1 \pm 0.2) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Si confrontano i valori ottenuti con i valori teorici di  $\mu/\rho$  [2]. Per l'energia tipica delle componenti  $K_\alpha$  e  $K_\beta$  caratteristiche del Cu (cioè  $(9.0 \pm 1.0) \text{ keV}$ ) si considera  $\mu_1/\rho = (38 \pm 12) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ , ottenuto come media dei valori di  $\mu/\rho$  per 8 keV e 10 keV. Nota l'energia media della componente di Bremsstrahlung (20 keV) si valuta  $\mu_2/\rho = 3.4 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ .

Dal confronto i dati teorici e sperimentali risultano compatibili tramite un test di Gauss, con significatività 5% ( $Z_1 = -0.79$ ,  $Z_2 = -1.12$ ,  $|Z_{critico}| = 1.96$ ).

Si valuta anche il Rate dopo l'inserimento di una singola lastra di piombo,  $Rate_{Pb} = (0.317 \pm 0.017) \text{ s}^{-1}$ . L'ipotesi che i conteggi a seguito dell'inserimento del piombo siano solo ambientali,  $Rate_{amb} = (0.217 \pm 0.017) \text{ s}^{-1}$ , non risulta verificata con significatività del 5% ( $Z = 4.16$ ). È comunque evidente che il Pb assorbe quasi completamente la radiazione emessa, che ha  $Rate_0 = (1116 \pm 9) \text{ s}^{-1}$ . La frazione trasmessa è minore dell'1%.

## 2.2 Difrazione di raggi X da NaCl

È stato, inoltre, possibile costruire il diffrattogramma relativo ad un cristallo di NaCl in diverse condizioni di lavoro e quindi verificare la legge di Bragg:

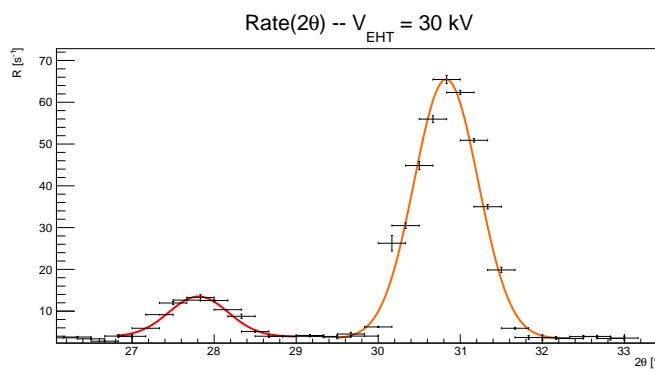
$$2d \cdot \sin\theta = n\lambda \tag{2}$$

in cui  $d$  è la distanza interplanare del cristallo,  $\theta$  è l'angolo di diffrazione,  $n$  è l'ordine di diffrazione e  $\lambda$  la lunghezza d'onda dei raggi X emessi.

Si posiziona un collimatore primario a fenditura verticale sulla Basic Port, un collimatore secondario con fenditura di 3 mm in ES13, ed un ulteriore collimatore con fenditura di 1 mm in ES18. Si posiziona il cristallo sul supporto, avendo cura di porre la faccia opaca contro il cianfrino. Guardando attraverso le fenditure si verifica l'allineamento del setup. Si controlla che la posizione angolare del piatto d'innesto zigrinato sia a  $\theta = 0.0^\circ \pm 1.0^\circ$  quando  $2\theta = 0.0^\circ \pm 0.5^\circ$ . L'errore associato alla scala di  $2\theta$  è metà del passo della scala graduata in quanto l'operatore era confidente nel cogliere la posizione centrale tra due tacche.

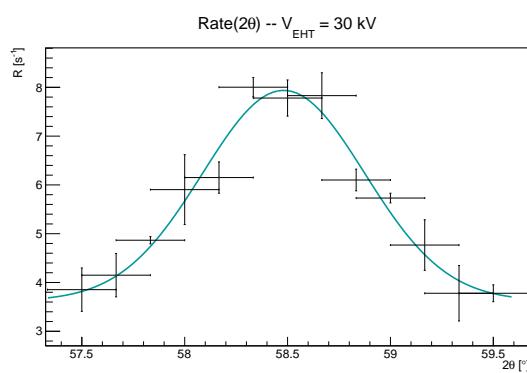
A questo punto si può inserire il contatore Geiger-Müller in ES26, impostare la tensione di lavoro  $V_{LO} = (490 \pm 3)$  V, impostare  $V_{EHT} = 30$  kV e la corrente del filamento che durante la presa dati è stata mantenuta a  $(40.00 \pm 0.10)$   $\mu$ A. Si esegue una rapida scansione angolare del fascio diffratto osservando il led dell'elettronica per individuare approssimativamente la posizione dei picchi. Quindi si prosegue con una scansione precisa per i primi due ordini di diffrazione a partire dal primo angolo accessibile. Per posizioni lontane dai picchi si utilizza la scala di  $2\theta$  con passi di  $1^\circ$ , o più. Nell'intorno dei picchi si utilizza il nonio di supporto per diminuire l'errore relativo tra le misure. I dati sono riportati in tab.[A3.1](#). Dopodiché si ripete la procedura con  $V_{EHT} = 20$ kV e  $V_{LO} = (471 \pm 3)$  V, per il primo ordine di diffrazione, tab.[A3.2](#).

I grafici di fig.[4](#) e fig.[5](#) rappresentano i picchi del primo ordine per  $K_\alpha$  e  $K_\beta$ . Si mostrano nello stesso grafico i dati ottenuti dallo stesso set di misurazioni con il nonio, in modo da poter considerare la lettura sulla scala di  $2\theta$  come una traslazione costante e poterne considerare l'errore solo dopo aver ottenuto i parametri dei fit. I dati sono stati interpolati mediante un fit Gaussiano a cui è stato aggiunto un parametro di offset per tener conto del fondo.

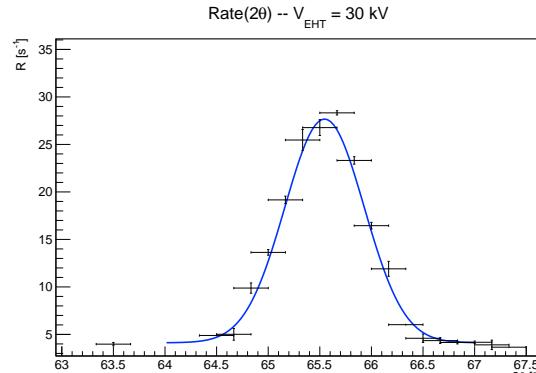


**Figura 4.** Grafico con picchi  $K_\beta$  e  $K_\alpha$  del primo ordine diffrattivo. Significatività del 5%  
 $\chi^2_\beta = 2.73 < \chi^2_{critico} = 18.31$ ,     $\chi^2_\alpha = 3.42 < \chi^2_{critico} = 22.36$

**Figura 5.** Grafico del secondo ordine diffrattivo, picco  $K_\beta$  in (a) e  $K_\alpha$  in (b)



**(a)** Picco  $K_\beta$ ,  $n = 2$ . Significatività del 5%  
 $\chi^2_\beta = 1.41 < \chi^2_{critico} = 18.31$



**(b)** Picco  $K_\alpha$ ,  $n = 2$ . Significatività del 5%  
 $\chi^2_\alpha = 1.91 < \chi^2_{critico} = 21.03$

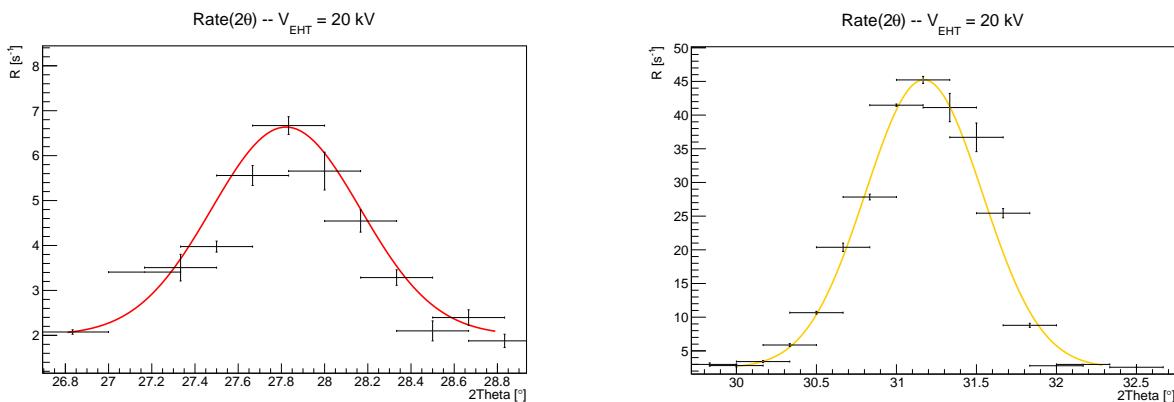
Le  $2\theta$  di picco, tab.[2](#), sono stimate con il valor medio delle gaussiane dei fit e l'errore è la somma in quadratura dell'ampiezza a mezza altezza (FWHM), ottenuta come  $FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2}$ , e dell'errore della lettura sulla scala  $2\theta$ . In questa stima si sceglie di non tener conto dell'incertezza sull'errore sistematico dovuto all'eventuale disallineamento della base su cui si appoggia il cianfrino, supponendo che la stima ricavabile dalla lettura sulla scala centrale sovrastimi inutilmente l'errore.

L'ampiezza dei picchi si può far risalire sia all'imperfetta monocromia della lampada, sia alla presenza di

**Tabella 2.**  $2\theta$  dei valori di picco con errore,  $V_{EHT} = 30\text{kV}$ 

	$n = 1$	$n = 2$
$\mu_{k\beta}$	$27.8^\circ \pm 1.0^\circ$	$58.5^\circ \pm 1.1^\circ$
$\mu_{k\alpha}$	$30.8^\circ \pm 1.0^\circ$	$65.5^\circ \pm 1.0^\circ$

impurità e/o imperfezioni nel cristallo, sia all’impreciso posizionamento del cristallo. È a causa della presenza di tutti questi effetti che la stima dell’errore è eseguita con la FWHM. Con i dati relativi a  $V_{EHT} = 20\text{kV}$ , si costruiscono invece i seguenti grafici, fig.6.

**Figura 6.** Grafico del picco  $K_\beta$  in (a) e  $K_\alpha$  in (b)

(a) Picco  $K_\beta$ . Significatività del 5%  
 $\chi^2_\beta = 3.13 < \chi^2_{critico} = 14.07$

(b) Picco  $K_\alpha$ . Significatività del 5%  
 $\chi^2_\alpha = 1.68 < \chi^2_{critico} = 18.31$

**Tabella 3.**  $2\theta$  dei valori di picco con errore,  $V_{EHT} = 20\text{kV}$ 

	$n = 1$
$\mu_{k\beta}$	$27.8^\circ \pm 1.0^\circ$
$\mu_{k\alpha}$	$31.2^\circ \pm 1.0^\circ$

Tramite la (2) si sono ricavati i valori sperimentali di  $\lambda$  associati ad ogni picco, tab.3, e i loro errori propagando. A questo punto si calcola la media pesata delle  $\lambda(K_\alpha)$  e  $\lambda(K_\beta)$  dei primi due ordini diffrattivi per  $V_{EHT} = 30\text{kV}$  e del primo ordine per  $V_{EHT} = 20\text{kV}$ , con il relativo errore. Si esegue poi un test di Gauss con i valori di aspettazione, tab.4.

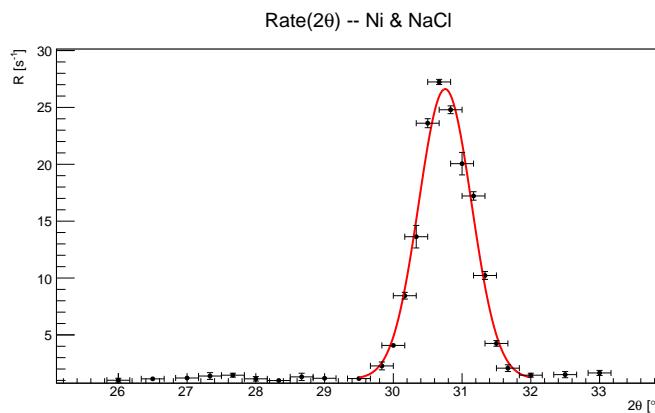
**Tabella 4.** Test di Gauss con  $Z_{critico} = 1.96$ 

Valori teorici	Valori Sperimentali	Z
$1.545 \text{ \AA}$	$(1.521 \pm 0.019) \text{ \AA}$	-1.29
$1.392 \text{ \AA}$	$(1.370 \pm 0.019) \text{ \AA}$	-1.14

I test Z sono tutti passati, quindi la legge di Bragg risulta verificata entro gli errori.

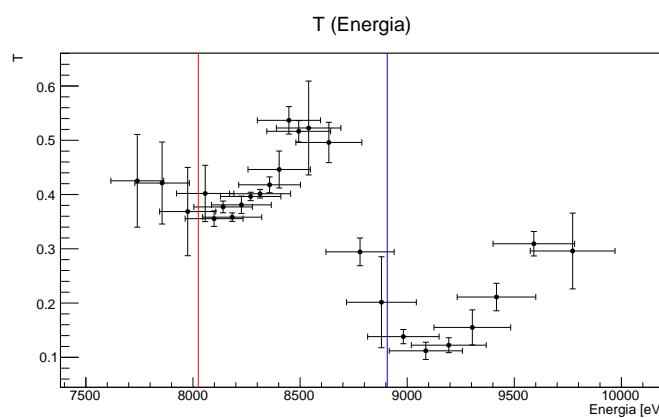
### 2.3 Difrazione con filtro di Ni

Nota la posizione dei picchi per il primo ordine di diffrazione e  $\lambda(K_\alpha)$  è possibile utilizzare la strumentazione per individuare le distanze interatomiche, ovvero le distanze interplanari per piani paralleli alla superficie del campione. Di fatto si inserisce un filtro di Ni in ES17 per minimizzare il picco relativo a  $\lambda(K_\beta)$  e si procede raccogliendo i dati come specificato nella sezione precedente con  $V_{EHT} = 30\text{kV}$ . Si produce il grafico di fig.7, con i dati di tab.A3.3.



**Figura 7.** Grafico con picco  $K_\alpha$  del primo ordine diffrattivo. Significatività del 5%  
 $\chi^2 = 0.09 < \chi^2_{critico} = 16.92$

Dall’immagine risulta evidente come il picco  $K_\beta$  sia stato quasi totalmente assorbito dal filtro e che è solo visibile il picco  $K_\alpha$ . Ciò avviene perché il  $K_{edge}$  del Ni si trova tra l’energia di  $K_\alpha$  e  $K_\beta$ . A conferma di ciò è possibile convertire le misure angolari in lunghezze d’onda tramite la legge di Bragg. Tale conversione presuppone di associare i conteggi per ogni  $\theta$  alla specifica lunghezza d’onda che permetterebbe di ottenere il primo picco di diffrazione per il dato angolo. In realtà, come osservato prima, i picchi si allargano anche per motivi diversi dalla variazione di lunghezza d’onda, ma queste assunzioni permettono di avere una stima del fenomeno di assorbimento del Ni. Ottenute le  $\lambda$ , è possibile calcolare le energie associate tramite  $E = hc/\lambda$ , dove  $h$  è la costante di Planck e  $c$  è la velocità della luce. Note le misure prese senza filtro (tab.[A3.1](#)), a parità di angolo si calcola il rapporto di trasmittanza  $T = Rate'/Rate_0$ , in cui  $Rate'$  è il  $Rate$  misurato con il filtro di Ni, e  $Rate_0$  è il  $Rate$  senza filtro. Ora, è possibile costruire il grafico di  $T$  in funzione dell’energia, fig.[8](#).



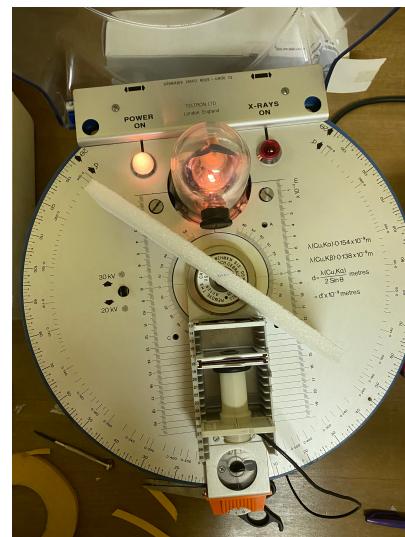
**Figura 8.** Grafico del rapporto di trasmittanza in funzione dell’energia. La linea blu rappresenta il valore del  $K_\beta$  e la rossa  $K_\alpha$

Occorre notare che le misure a  $V_{EHT} = 20$  kV e  $V_{EHT} = 30$  kV non hanno un errore relativo dato dalla sola lettura sul nonio. Per essere sicuri di valutare il rapporto tra misure equivalenti, si è sostituito il  $Rate$  valutato ad ogni angolo con la media dei  $Rate$  valutati per angoli che risultano entro  $1-\sigma$  da quello considerato. Supponendo che la deviazione standard delle misure mediate sopravvaluti l’errore, si è usato per la propagazione l’errore originale attribuito alla singola misura, che in qualche modo dovrebbe mostrare effettivamente le incertezze attese se si fossero prese realmente misure ad angoli identici. Dal grafico si osserva che, come atteso,  $K_\beta$  si trova in una zona a più alto assorbimento rispetto a dove si trova  $K_\alpha$ . Nel seguito dell’esperienza, se non altrimenti specificato, le condizioni di  $V_{EHT}$ ,  $V_{LO}$ ,  $I$ , la posizione del filtro di Ni, dei collimatori e del contatore Geiger restano invariate.

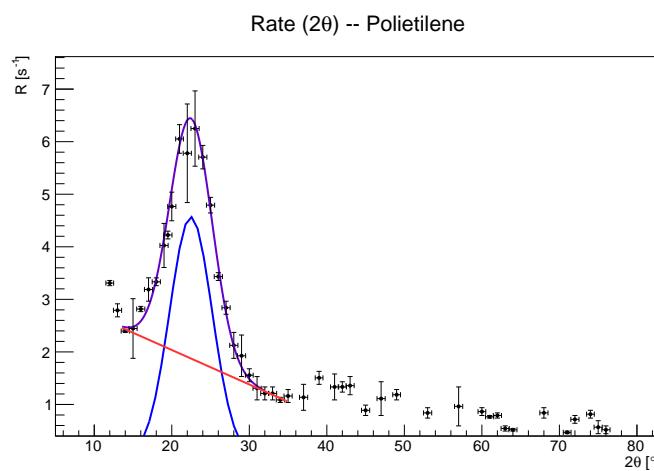
## 2.4 Cristallo di diamante e polveri

L'impiego di un singolo cristallo come quello utilizzato finora permette di valutare la distanza interplanare solo per i piani paralleli alla superficie del campione. Allo scopo di individuare più famiglie di piani e dedurre la struttura del reticolo, si possono utilizzare policristalli o polveri. L'ipotesi<sup>[3]</sup> è che nelle polveri ogni possibile orientazione cristallina sia ugualmente rappresentata e che un numero statisticamente significativo di piani sia nella orientazione opportuna per diffrarre i Raggi X. In questo modo ogni piano sarà visibile come un picco nel diffrattogramma. Ciò che cambia utilizzando un policristallo è il numero di orientazioni effettivamente rappresentate nel campione e, quindi, il numero di picchi identificabili. Si comincia ad analizzare una piastra di piccolo spessore di diamante artificiale. La sezione efficace varierebbe significativamente ruotando il diamante insieme al contatore Geiger, pertanto si costruisce un supporto in polietilene che permetta di tenere fisso il campione nella posizione più adeguata. Si evitano così anche le difficoltà legate all'inserimento della piastra tra cianfrino e supporto gommato. La struttura a forma di ponte, ricavata appositamente per evitare il contatto con il supporto ruotante, viene posta con l'inclinazione massima possibile rispetto al piano perpendicolare al fascio, in modo da massimizzare la rotazione disponibile per il braccio del contatore Geiger. Un piccolo taglio con la inclinazione opportuna permette di inserire il diamante con la superficie maggiore perpendicolare al fascio. La fig.9 rappresenta il setup sperimentale.

Accesa la sorgente, si aumenta la corrente del filamento fino al massimo valore accessibile, per massimizzare il numero di conteggi osservabili senza aumentare oltre i 20 s il tempo di acquisizione. La corrente viene mantenuta durante l'esperienza a  $(4.48 \pm 0.07)\mu\text{A}$ . Si misurano i Rate per valori di  $2\theta$  compresi tra  $12^\circ$  e  $76^\circ$  (tab.A4.1).



**Figura 9.** Setup sperimentale per la diffrazione del diamante



**Figura 10.** Dati del policristallo di diamante sostenuto in una struttura di polietilene. In rosso si mostra una stima del fondo (assunto, in prima approssimazione, lineare e valutato con i punti immediatamente precedenti e successivi la gaussiana), in blu si isola l'elemento gaussiano, in viola la sovrapposizione degli effetti.  $\chi^2 = 15.27 < \chi^2_{critico} = 25.00$  con significatività del 5%

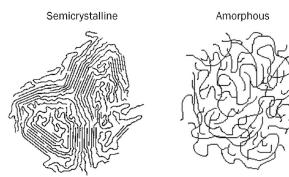
Si produce il grafico di fig.10 in cui è evidente solo un picco a  $22.46^\circ \pm 0.17^\circ$ , dove si è indicato il valor medio della gaussiana di fit. Si noti che l'errore già pondera quello proveniente dalla lettura sulla scala graduata, essendo questa volta effettivamente quello usato per eseguire il fit. Non si ritie-

ne significativo l'utilizzo della FWHM, in quanto l'ampiezza del picco nel diffrattogramma potrebbe essere tipica del materiale studiato e non alla precisione con cui sono condotte le misure sperimentali. Purtroppo con il passo utilizzato per coprire un grande range angolare, non è possibile identificare con chiarezza altri picchi nel diffrattogramma. Il picco osservato corrisponde al picco diffrattivo del polietilene. Anch'esso, come solido semicristallino, può infatti originare diffrazione e risulta che abbia due picchi diffrattivi a  $22.5^\circ$  e  $24.2^\circ$  [5]. Il picco rilevato risulta compatibile con significatività del 5% con il picco più intenso, quello a  $22.5^\circ$  ( $|Z| = | - 0.23 | < Z_{critico} = 1.96$ ).

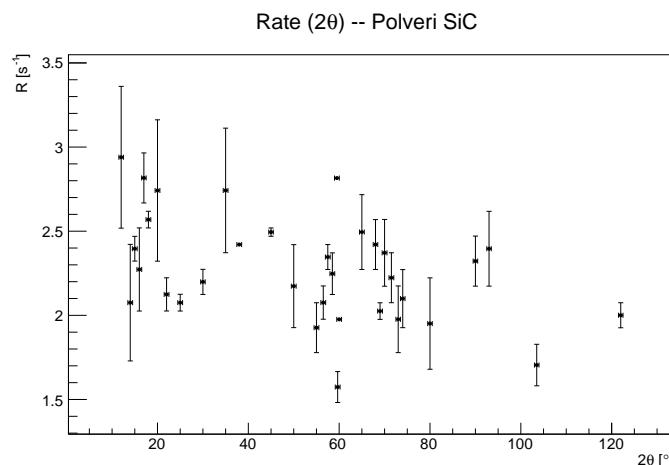
Per tentare ancora di verificare l'invarianza delle misure svolte per rotazione del polietilene e confermare che il picco identificato non fosse tipico del policristallo di diamante, sono state eseguite misure con il solo ponte di polietilene posto ad una diversa angolazione da quella iniziale (dati in tab. A4.2). In prima analisi, si conferma che l'assenza del diamante e la rotazione non variano la posizione del picco.

Sfruttando il valore di picco trovato per il polietilene è possibile valutare un passo reticolare con la formula di Bragg (2). Questo si stima essere  $(3.967 \pm 0.014) \text{ \AA}$ . Per future analisi di policristalli di diamante si suggerisce comunque di ideare un setup sperimentale senza l'utilizzo del polietilene.

Si procede ad analizzare le polveri di SiC. Queste vengono mantenute in una provetta in vetro che ruota insieme al contatore Geiger. Potendo considerare isotropa la disposizione delle polveri nella provetta la rotazione non pregiudica i risultati. Come per il diamante non risultano picchi evidenti (fig. 12) e per questo non si avanzano ipotesi sulla posizione dei picchi.



**Figura 11.** Modello di polimero semicristallino ed amorofo [4]



**Figura 12.** Diffrattogramma per la polvere di SiC, dati in tab. A4.3

### 3 Conclusioni

In questa esperienza si è studiata l'interazione dei raggi X con la materia. Le prime osservazioni qualitative condotte sul comportamento con diversi materiali hanno permesso di apprezzare la natura penetrante dei raggi X e il loro assorbimento a seconda degli spessori e del tipo di mezzo attraversato.

In seguito, dopo aver individuato una tensione di soglia  $V_{TH}$ , sono state stimate le condizioni di funzionamento ottimali per il rivelatore Geiger Müller, ovvero una tensione di lavoro  $V_{LO}$ , per entrambe le  $V_{EHT}$  selezionabili ( $V_{LO,30kV} = (490 \pm 3) \text{ V}$ ,  $V_{LO,20kV} = (471 \pm 3) \text{ V}$ ), e un intervallo di corrente (da  $(0.179 \pm 0.002) \mu\text{A}$  a  $(0.4900 \pm 0.0010) \mu\text{A}$ ). In questo modo lo strumento è in grado di registrare il maggior numero di eventi di interesse.

Studiando l'assorbimento della radiazione della sorgente da parte di diversi spessori di Al è stato possibile

evidenziarne la policromia e valutare i coefficienti di assorbimento del materiale usato per diverse energie ( $\mu_{1exp}/\rho = (26 \pm 10) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  per  $(9.0 \pm 1.0) \text{ keV}$ ,  $\mu_{2exp}/\rho = (3.1 \pm 0.2) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  per  $20 \text{ keV}$ ).

Inoltre, si è verificata la legge di Bragg (2) tramite la diffrazione di raggi X con un cristallo di NaCl. Acquisendo lo spettrogramma del campione in due stati di funzionamento diversi del Tel-X-Ometer, si è potuto ricavare la posizione angolare dei picchi, e quindi la lunghezza d'onda associata ad essi, e mediante un test Z constatare la compatibilità con i valori teorici. Dopodiché, si è confermata l'efficacia del filtro di Ni nell'assorbimento della componente  $K_\beta$ .

L'analisi di polveri e policristalli per identificarne la struttura si è rivelata inconcludente, è stato però possibile osservare il picco di diffrazione del polietilene, evidenziando le differenze di un picco semicristallino da un picco di un monocristallo appositamente preparato. È anche stato possibile valutare un ipotetico passo reticolare ( $(3.967 \pm 0.014) \text{ \AA}$ ) per le sottounità cristalline dello stesso.

## A Appendice

### A.1 Dati per la sez.1.2 "Rivelazione dei raggi X mediante il contatore Geiger-Müller"

#### *Considerazioni aggiuntive sulla variazione della corrente*

Per la valutazione del *Rate* ambientale le due misure eseguite avevano permesso di ottenere 12 e 14 conteggi in 60.027 e 60.032 secondi. Da questi i valori riportati nel testo.

Si analizzano ora con più attenzione le possibili cause indicate per spiegare il valore dell'intercetta della retta del fit di fig.2.

Una prima stima di un offset nelle correnti è pari  $(0.042 \pm 0.003) \mu\text{A}$ , maggiore dell'errore associato alle misure considerate. In prima approssimazione questo valore è stato ottenuto dall'intersezione con l'asse delle ascisse della retta ricavata nel corpo del testo. Per motivare questo offset sperimentalmente occorrerebbe analizzare il circuito interno al Tel-X-Ometer, operazione complicata e dai dubbi risultati. Studiare una eventuale relazione non lineare per bassissime correnti ha sicuramente le sue problematiche sperimentali e non sarebbe eseguibile con gli strumenti a disposizione. Dal punto di vista teorico l'emissione di elettroni dal filamento per effetto termoelettrico si può ottenere come corollario della statistica di Fermi-Dirac. Non sembra impossibile che impurità nel filamento emettitore modifichino i risultati attesi. Si nota che per avere un errore sull'intercetta che permetta di avere un valore compatibile con lo zero con significatività del 5% occorrerebbe che gli errori sui *Rate* fossero di circa 15 volte più grandi.

Si è osservato che:

$$I_{V_{EHT}} \propto (V_{EHT})^2 \rightarrow \frac{I_{20\text{kV}}}{I_{30\text{kV}}} = \frac{(20\text{kV} \pm 1\text{kV})^2}{(30\text{kV} \pm 1\text{kV})^2} = 0.44 \pm 0.04$$

dove è stato considerato un errore di 1kV siccome sul sito di TEL-Atomic Incorporated<sup>[6]</sup> è indicato che l'alto voltaggio rimane entro 1 kV dal valore selezionato. Si verifica che i valori stimati per i plateau a 20 kV e 30 kV per una tensione del Geiger-Müller di 500V differiscano effettivamente di un valore compatibile.

$$\frac{\text{Rate}_{\text{plateau1}}}{\text{Rate}_{\text{plateau2}}} = 0.6 \pm 0.1$$

Il valore è effettivamente compatibile con significatività del 5% ( $Z = 1.72 < Z_{\text{critico}} = 1.96$ ).

Quanto appena valutato ci si aspetta valga anche per il confronto dei conteggi agli stessi angoli per la diffrazione del cristallo di *NaCl* a  $V_{EHT} = 30$  kV e  $V_{EHT} = 20$  kV.

**Tabella A1.1.** Set di dati per  $V_{EHT} = 30$  kV. Gli errori associati alla tensione del Geiger-Müller dipendono dal passo utilizzato dal sistema di acquisizione. Si riportano anche i valori del Rate impiegati per il grafico di fig.1a ed i loro errori relativi

$V[V] \pm 3$	$Count_1$	$Count_2$	$t_1[s]$	$t_2[s]$	$Rate[s^{-1}]$	$err_{rel}$
$390 \pm 2$	60	77	20.251	20.246	$3.4 \pm 0.4$	0.124
$392 \pm 2$	168	145	20.245	20.246	$7.7 \pm 0.6$	0.074
$394 \pm 3$	373	359	20.252	20.246	$18.1 \pm 0.3$	0.019
$397 \pm 3$	801	766	20.248	20.248	$38.7 \pm 0.9$	0.022
$399 \pm 3$	1503	1420	20.250	20.248	$72 \pm 2$	0.028
$402 \pm 3$	2337	2263	20.245	20.244	$114 \pm 2$	0.016
$404 \pm 2$	3386	3286	20.247	20.249	$165 \pm 3$	0.015
$406 \pm 2$	4451	4340	20.252	20.250	$217 \pm 3$	0.013
$409 \pm 3$	5403	5388	20.251	20.253	$266.4 \pm 0.4$	0.001
$411 \pm 2$	6203	6194	20.253	20.251	$306.1 \pm 0.2$	0.001
$413 \pm 3$	7042	6994	20.254	20.255	$346.5 \pm 1.2$	0.003
$416 \pm 3$	7702	7666	20.255	20.252	$379.4 \pm 0.9$	0.002
$418 \pm 3$	8505	8582	20.265	20.255	$422 \pm 2$	0.005
$421 \pm 2$	9237	9327	20.259	20.262	$458 \pm 2$	0.005
$423 \pm 2$	10320	10325	20.265	20.259	$509.5 \pm 0.2$	$4 \cdot 10^{-4}$
$425 \pm 3$	11828	11814	20.263	20.258	$583.5 \pm 0.3$	$5 \cdot 10^{-4}$
$428 \pm 3$	13617	13730	20.265	20.261	$675 \pm 3$	0.004
$430 \pm 2$	15547	15476	20.270	20.265	$765.3 \pm 1.7$	0.002
$432 \pm 3$	17175	17152	20.267	20.266	$846.9 \pm 0.5$	0.001
$435 \pm 3$	18484	18451	20.268	20.271	$911.1 \pm 0.9$	0.001
$437 \pm 3$	19549	19501	20.275	20.272	$963.1 \pm 1.1$	0.001
$440 \pm 3$	20257	20202	20.273	20.271	$997.9 \pm 1.3$	0.001
$442 \pm 2$	20464	20355	20.275	20.274	$1007 \pm 3$	0.003
$444 \pm 3$	20641	20788	20.274	20.272	$1022 \pm 4$	0.004
$447 \pm 3$	20862	20675	20.273	20.273	$1024 \pm 5$	0.005
$449 \pm 2$	21087	21190	20.274	20.270	$1043 \pm 3$	0.003
$451 \pm 3$	21214	21152	20.274	20.271	$1044.9 \pm 1.5$	0.001
$454 \pm 3$	21235	21441	20.277	20.279	$1052 \pm 5$	0.005
$456 \pm 3$	21295	21215	20.274	20.269	$1048.5 \pm 1.8$	0.002
$461 \pm 2$	21688	21667	20.269	20.270	$1069.5 \pm 0.5$	0.001
$466 \pm 3$	21659	21623	20.273	20.272	$1067.5 \pm 0.9$	0.001
$471 \pm 3$	21647	21990	20.271	20.277	$1076 \pm 8$	0.008
$478 \pm 3$	22115	22020	20.276	20.277	$1088 \pm 2$	0.002
$487 \pm 3$	22348	22097	20.271	20.276	$1096 \pm 6$	0.006
$497 \pm 3$	22101	22259	20.280	20.274	$1094 \pm 4$	0.004
$509 \pm 3$	21901	22045	20.274	20.271	$1084 \pm 4$	0.003
$525 \pm 3$	21976	22025	20.271	20.278	$1085.1 \pm 1.0$	0.001
$549 \pm 2$	21996	22063	20.275	20.277	$1086.5 \pm 1.6$	0.001
$589 \pm 3$	22218	21908	20.273	20.271	$1088 \pm 8$	0.007

**Tabella A1.2.** Set di dati per  $V_{EHT} = 20$  kV. Come in precedenza gli errori associati alla tensione del rivelatore sono stati valutati in base al passo del sistema di acquisizione. Si riportano anche i valori del Rate impiegati per il grafico di fig.1b ed i loro errori relativi

$V[V]$	$Count_1$	$Count_2$	$t_1[s]$	$t_2[s]$	$Rate[s^{-1}]$	$err_{rel}$
$390 \pm 3$	74	85	20.245	20.253	$3.9 \pm 0.3$	0.069
$392 \pm 2$	375	351	20.249	20.247	$17.9 \pm 0.6$	0.033
$394 \pm 2$	866	747	20.252	20.247	$40 \pm 3$	0.074
$397 \pm 3$	1420	1309	20.245	20.247	$67 \pm 3$	0.041
$399 \pm 2$	2111	2001	20.244	20.247	$102 \pm 3$	0.027
$402 \pm 3$	2760	2768	20.247	20.249	$136.5 \pm 0.2$	0.001
$404 \pm 2$	3359	3383	20.247	20.249	$166.5 \pm 0.6$	0.004
$406 \pm 3$	3966	3930	20.249	20.250	$195.0 \pm 0.9$	0.005
$409 \pm 3$	4386	4339	20.250	20.254	$215.4 \pm 1.2$	0.005
$411 \pm 2$	4814	4775	20.258	20.249	$236.7 \pm 0.9$	0.004
$413 \pm 3$	5093	5170	20.251	20.259	$253.3 \pm 1.9$	0.007
$416 \pm 3$	5650	5532	20.254	20.252	$276 \pm 3$	0.011
$418 \pm 3$	6458	6366	20.250	20.254	$317 \pm 2$	0.007
$421 \pm 3$	7572	7560	20.256	20.258	$373.5 \pm 0.3$	0.001
$423 \pm 3$	8986	8980	20.260	20.259	$443.40 \pm 0.14$	$3 \cdot 10^{-4}$
$425 \pm 3$	10347	10267	20.262	20.260	$508.7 \pm 1.9$	0.004
$428 \pm 3$	11124	10990	20.260	20.264	$546 \pm 3$	0.006
$430 \pm 2$	11599	11512	20.263	20.264	$570 \pm 2$	0.004
$432 \pm 3$	11832	11900	20.263	20.257	$585.7 \pm 1.8$	0.003
$435 \pm 3$	11861	11886	20.264	20.262	$586.0 \pm 0.6$	0.001
$437 \pm 3$	12245	11937	20.262	20.262	$597 \pm 8$	0.013
$440 \pm 3$	11950	12195	20.267	20.264	$596 \pm 6$	0.010
$442 \pm 2$	12067	12246	20.263	20.257	$600 \pm 5$	0.008
$444 \pm 2$	12188	12139	20.258	20.261	$600.4 \pm 1.3$	0.002
$449 \pm 2$	12445	12461	20.260	20.261	$614.6 \pm 0.4$	0.001
$454 \pm 3$	12481	12310	20.263	20.268	$612 \pm 4$	0.007
$459 \pm 3$	12688	12463	20.264	20.262	$621 \pm 6$	0.009
$463 \pm 2$	12759	12717	20.277	20.261	$628.4 \pm 0.8$	0.001
$468 \pm 2$	12755	12554	20.259	20.257	$625 \pm 5$	0.008
$473 \pm 2$	12588	12764	20.258	20.258	$626 \pm 4$	0.007
$478 \pm 3$	12740	12691	20.258	20.263	$627.6 \pm 1.3$	0.002
$482 \pm 2$	12784	12775	20.256	20.262	$630.8 \pm 0.3$	0.001
$487 \pm 3$	12641	12773	20.256	20.260	$627 \pm 3$	0.005
$497 \pm 3$	12775	12565	20.258	20.258	$625 \pm 5$	0.008
$506 \pm 3$	12642	12778	20.259	20.258	$627 \pm 3$	0.005
$516 \pm 3$	12921	12541	20.259	20.258	$628 \pm 9$	0.015
$528 \pm 3$	12583	12668	20.262	20.254	$623 \pm 2$	0.004
$537 \pm 2$	12611	12649	20.260	20.258	$623.4 \pm 1.0$	0.002
$549 \pm 2$	12703	12600	20.268	20.259	$624 \pm 2$	0.004
$559 \pm 3$	12666	12684	20.260	20.261	$625.6 \pm 0.4$	0.001
$592 \pm 3$	12856	12785	20.263	20.259	$632.8 \pm 1.7$	0.003

**Tabella A1.3.** Set di dati per  $V_{EHT} = 30$  kV al variare della corrente  $I$ . Il valore della corrente è stato ricavato convertendo la tensione letta sul multmetro con il fattore  $0.1 \text{ V } \mu\text{A}^{-1}$  caratteristico del Tel-X-Ometer. L'errore associato a  $I$  è stato assegnato in base alle oscillazioni dello strumento di misura durante la presa dati. Si riportano anche i valori del *Rate* impiegati per il grafico di fig.2 ed i loro errori relativi

$I[\mu\text{A}]$	$Count_1$	$Count_2$	$t_1[\text{s}]$	$t_2[\text{s}]$	$\text{Rate}[\text{s}^{-1}]$	$\text{err}_{\text{rel}}$
$0.179 \pm 0.002$	9162	9057	20.273	20.254	$450 \pm 2$	0.005
$0.261 \pm 0.002$	12563	12827	20.259	20.255	$627 \pm 7$	0.010
$0.3110 \pm 0.0010$	14866	14858	20.263	20.279	$733.2 \pm 0.5$	0.001
$0.398 \pm 0.002$	18475	18509	20.271	20.264	$912.4 \pm 1.0$	0.001
$0.4900 \pm 0.0010$	22304	22162	20.271	20.263	$1097 \pm 3$	0.003
$0.596 \pm 0.003$	26307	25822	20.277	20.269	$1286 \pm 12$	0.009
$0.683 \pm 0.003$	29134	29073	20.283	20.274	$1435.2 \pm 1.2$	0.001
$0.793 \pm 0.002$	33002	32481	20.279	20.283	$1614 \pm 13$	0.008
$0.893 \pm 0.002$	35766	35722	20.318	20.289	$1760.5 \pm 0.2$	$10^{-4}$
$0.998 \pm 0.004$	38542	38620	20.290	20.292	$1901.4 \pm 1.8$	0.001
$1.131 \pm 0.002$	42501	42601	20.291	20.300	$2097 \pm 2$	0.001
$1.235 \pm 0.002$	44786	44663	20.301	20.302	$2203 \pm 3$	0.001
$1.377 \pm 0.002$	48156	48417	20.313	20.340	$2376 \pm 5$	0.002
$1.494 \pm 0.002$	50813	50621	20.310	20.312	$2497 \pm 5$	0.002
$1.642 \pm 0.002$	56329	56453	20.316	20.319	$2775 \pm 3$	0.001
$1.853 \pm 0.005$	59772	59713	20.337	20.334	$2937.8 \pm 1.2$	$4 \cdot 10^{-4}$
$1.991 \pm 0.003$	61257	60659	20.332	20.336	$2998 \pm 15$	0.005
$2.246 \pm 0.003$	63586	63461	20.335	20.332	$3124 \pm 3$	0.001
$2.636 \pm 0.004$	66536	66651	20.342	20.352	$3273 \pm 2$	0.001
$3.015 \pm 0.003$	68113	68151	20.347	20.350	$3348.3 \pm 0.7$	$2 \cdot 10^{-4}$
$3.527 \pm 0.005$	68989	68961	20.360	20.355	$3388.2 \pm 0.3$	$10^{-4}$
$4.100 \pm 0.003$	69052	69105	20.346	20.351	$3394.8 \pm 0.9$	$3 \cdot 10^{-4}$
$5.303 \pm 0.007$	67886	67742	20.384	20.342	$3330.26 \pm 0.10$	$3 \cdot 10^{-5}$
$6.88 \pm 0.03$	66933	66747	20.350	20.350	$3285 \pm 5$	0.001
$8.06 \pm 0.02$	67213	67034	20.350	20.355	$3298 \pm 5$	0.001
$9.15 \pm 0.03$	68225	68047	20.352	20.357	$3347 \pm 5$	0.001
$11.33 \pm 0.03$	70145	69888	20.360	20.366	$3438 \pm 7$	0.002
$13.93 \pm 0.03$	72201	72644	20.371	20.364	$3556 \pm 11$	0.003
$16.00 \pm 0.03$	73650	73145	20.377	20.381	$3602 \pm 13$	0.004
$20.24 \pm 0.05$	74953	75069	20.385	20.376	$3681 \pm 4$	0.001

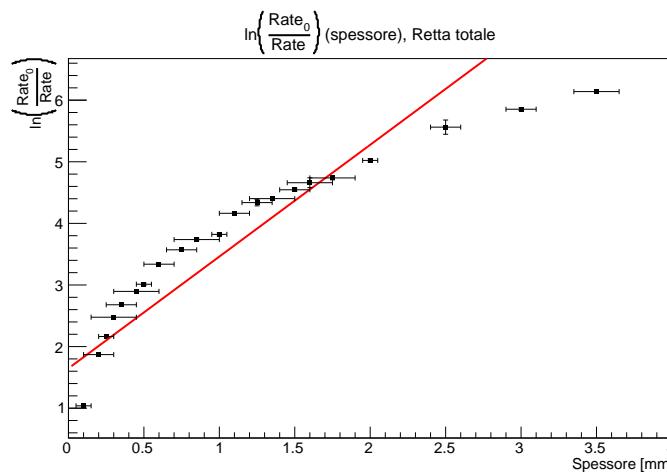
## A.2 Dati e grafici per la sez.2.1

**Tabella A2.1.** Dati dell’assorbimento dei raggi X dagli spessori di Al. Gli errori sugli spessori sono dati dal costruttore e valgono 0.5mm, vanno sommati quando si usano più spessori insieme

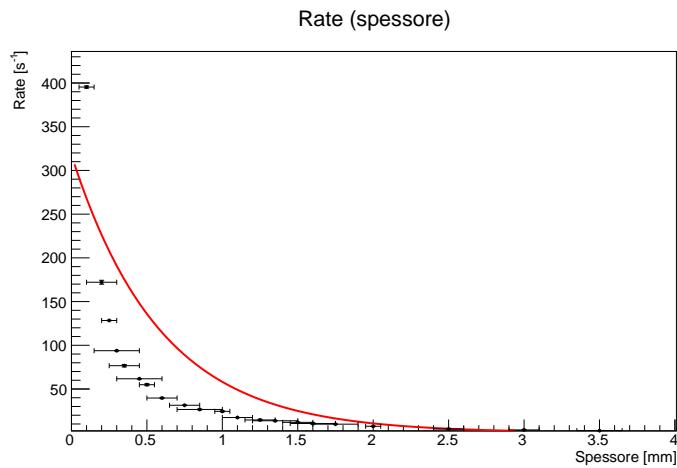
spessori [mm]	Count <sub>1</sub>	Count <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	Rate[s <sup>-1</sup> ]	err <sub>rel</sub>
0	22826	22450	20.276	20.266	1117 ± 9	0.008
0.10 ± 0.05	8033	7980	20.253	20.247	395.4 ± 1.3	0.003
0.20 ± 0.10	3439	3530	20.244	20.244	172 ± 2	0.013
0.25 ± 0.05	2603	2594	20.243	20.242	128.4 ± 0.2	0.002
0.30 ± 0.15	1893	1905	20.243	20.242	93.8 ± 0.3	0.003
0.35 ± 0.10	1523	1580	20.240	20.240	76.7 ± 1.4	0.018
0.45 ± 0.15	1251	1247	20.241	20.244	61.70 ± 0.10	0.002
0.50 ± 0.05	1090	1134	20.246	20.246	54.9 ± 1.1	0.020
0.60 ± 0.10	798	808	20.242	20.243	39.7 ± 0.2	0.006
0.75 ± 0.10	636	636	20.244	20.245	31.4159 ± 0.0008	2 · 10 <sup>-5</sup>
0.85 ± 0.15	528	549	20.243	20.244	26.6 ± 0.5	0.019
1.00 ± 0.05	506	484	20.244	20.244	24.5 ± 0.5	0.022
1.10 ± 0.10	355	348	20.243	20.243	17.36 ± 0.17	0.010
1.25 ± 0.10	280	311	20.242	20.242	14.6 ± 0.8	0.052
1.35 ± 0.15	281	273	20.241	20.242	13.7 ± 0.2	0.014
1.50 ± 0.10	235	245	20.241	20.243	11.9 ± 0.2	0.021
1.60 ± 0.15	197	231	20.242	20.243	10.6 ± 0.8	0.079
1.75 ± 0.15	192	204	20.245	20.243	9.8 ± 0.3	0.030
2.00 ± 0.05	145	153	20.243	20.248	7.4 ± 0.2	0.027
2.50 ± 0.10	115	145	30.305	30.314	4.3 ± 0.5	0.115
3.00 ± 0.10	127	132	40.394	40.385	3.21 ± 0.06	0.019
3.50 ± 0.15	124	119	50.457	50.462	2.41 ± 0.05	0.021

Si riportano anche i dati con lo spessore in Pb:

- Count = 20 per t = 60.027 s
- Count = 18 per t = 60.025 s

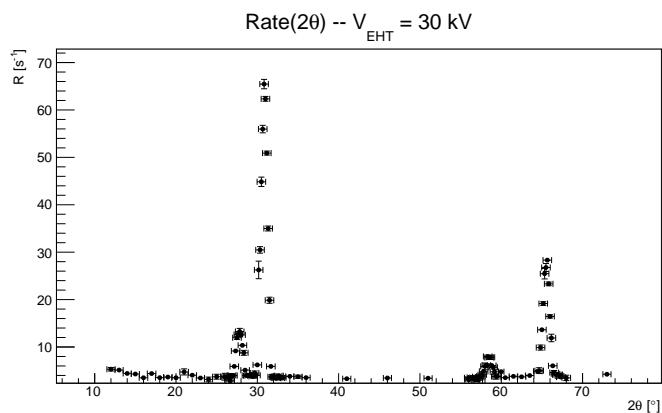


**Figura A2.1.** Fit  $\log(Rate_0/Rate)$  in funzione dello spessore attraversato. Retta totale.

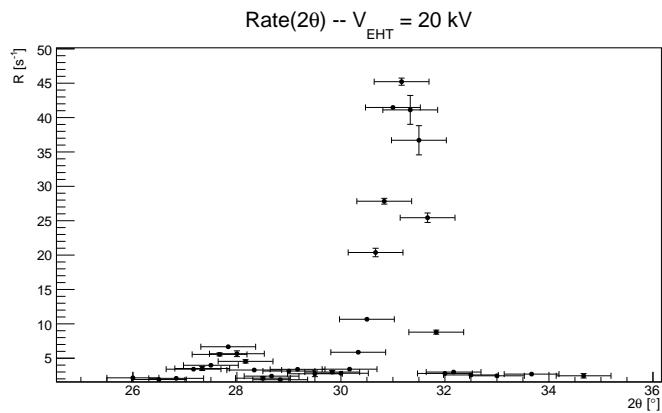


**Figura A2.2.** Fit esponenziale,  $\chi^2 = 331.2$  per 19 gradi di libertà, maggiore del  $\chi^2_{critico} = 30.1$  con una significatività del 5%.

### A.3 Dati e grafici per la sez.2.2 "Diffrazione di raggi X da NaCl"



**Figura A3.1.** Grafico complessivo per la presa dati con  $V_{EHT} = 30$  kV



**Figura A3.2.** Grafico complessivo per la presa dati con  $V_{EHT} = 20$  kV

**Tabella A3.1.** NaCl 30kV, sono raggruppati i dati tra i quali si può stimare l'errore relativo a  $10'$  perché misurati senza sollevare il nonio. L'errore sul nonio è sommato in quadratura con quello della scala di  $2\theta$

$2\theta [^\circ]$	Count <sub>1</sub>	Count <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	Rate[s <sup>-1</sup> ]	err <sub>rel</sub>
$12.0 \pm 0.5$	115	100	20.239	20.243	$5.3 \pm 0.4$	0.070
$13.0 \pm 0.5$	106	102	20.244	20.242	$5.14 \pm 0.10$	0.019
$14.0 \pm 0.5$	95	84	20.243	20.248	$4.4 \pm 0.3$	0.062
$15.0 \pm 0.5$	84	90	20.247	20.243	$4.30 \pm 0.15$	0.035
$16.0 \pm 0.5$	68	74	20.242	20.243	$3.51 \pm 0.15$	0.042
$17.0 \pm 0.5$	93	85	20.243	20.243	$4.4 \pm 0.2$	0.045
$18.0 \pm 0.5$	77	66	20.247	20.242	$3.5 \pm 0.3$	0.077
$19.0 \pm 0.5$	70	78	20.244	20.243	$3.7 \pm 0.2$	0.054
$20.0 \pm 0.5$	77	65	20.243	20.247	$3.5 \pm 0.3$	0.085
$21.0 \pm 0.5$	109	83	20.247	20.242	$4.7 \pm 0.6$	0.135
$22.0 \pm 0.5$	85	79	20.248	20.242	$4.05 \pm 0.15$	0.036
$23.0 \pm 0.5$	66	74	20.242	20.253	$3.5 \pm 0.2$	0.057
$24.0 \pm 0.5$	54	74	20.243	20.242	$3.2 \pm 0.5$	0.156
$25.0 \pm 0.5$	65	86	20.242	20.242	$3.7 \pm 0.5$	0.139
$26.0 \pm 0.5$	90	61	20.243	20.252	$3.7 \pm 0.7$	0.192
$26.2 \pm 0.5$	75	71	20.242	20.243	$3.61 \pm 0.10$	0.027
$26.3 \pm 0.5$	74	80	20.242	20.249	$3.80 \pm 0.15$	0.039
$26.5 \pm 0.5$	65	72	20.243	20.247	$3.38 \pm 0.17$	0.051
$26.7 \pm 0.5$	53	61	20.232	20.248	$2.8 \pm 0.2$	0.070
$26.8 \pm 0.5$	74	89	20.243	20.243	$4.0 \pm 0.4$	0.092
$27.0 \pm 0.5$	74	87	20.243	20.243	$4.0 \pm 0.3$	0.081
$27.2 \pm 0.5$	118	121	20.241	20.243	$5.90 \pm 0.07$	0.013
$27.3 \pm 0.5$	184	187	20.242	20.243	$9.16 \pm 0.07$	0.008
$27.5 \pm 0.5$	249	235	20.245	20.249	$12.0 \pm 0.3$	0.029
$27.7 \pm 0.5$	259	253	20.247	20.243	$12.65 \pm 0.15$	0.012
$27.8 \pm 0.5$	282	255	20.249	20.242	$13.3 \pm 0.7$	0.050
$28.0 \pm 0.5$	248	260	20.246	20.242	$12.5 \pm 0.3$	0.024
$28.2 \pm 0.5$	209	210	20.243	20.243	$10.35 \pm 0.02$	0.002
$28.3 \pm 0.5$	167	188	20.242	20.248	$8.8 \pm 0.5$	0.059
$28.5 \pm 0.5$	107	100	20.243	20.247	$5.11 \pm 0.17$	0.034
$28.7 \pm 0.5$	87	75	20.248	20.242	$4.0 \pm 0.3$	0.074
$28.8 \pm 0.5$	78	82	20.240	20.243	$3.95 \pm 0.10$	0.025
$29.0 \pm 0.5$	79	82	20.240	20.243	$3.98 \pm 0.07$	0.019
$29.2 \pm 0.5$	80	89	20.243	20.244	$4.2 \pm 0.2$	0.053
$29.3 \pm 0.5$	86	74	20.249	20.243	$4.0 \pm 0.3$	0.075
$29.5 \pm 0.5$	85	69	20.243	20.243	$3.8 \pm 0.4$	0.104
$29.7 \pm 0.5$	83	100	20.244	20.243	$4.5 \pm 0.4$	0.093
$29.8 \pm 0.5$	83	80	20.244	20.244	$4.03 \pm 0.07$	0.018
$30.0 \pm 0.5$	123	129	20.247	20.250	$6.22 \pm 0.15$	0.024
$30.5 \pm 0.5$	569	494	20.244	20.243	$26.3 \pm 1.9$	0.071
$30.3 \pm 0.5$	603	631	20.242	20.246	$30.5 \pm 0.7$	0.023
$30.5 \pm 0.5$	888	928	20.246	20.245	$44.8 \pm 1.0$	0.022
$30.7 \pm 0.5$	1149	1117	20.245	20.244	$56.0 \pm 0.8$	0.014
$30.8 \pm 0.5$	1305	1345	20.243	20.242	$65.5 \pm 1.0$	0.015
$31.0 \pm 0.5$	1252	1273	20.247	20.253	$62.3 \pm 0.5$	0.008
$31.2 \pm 0.5$	1022	1039	20.246	20.245	$50.9 \pm 0.4$	0.008
$31.3 \pm 0.5$	698	719	20.245	20.244	$35.0 \pm 0.5$	0.015
$31.5 \pm 0.5$	415	389	20.242	20.243	$19.9 \pm 0.6$	0.032
$31.7 \pm 0.5$	124	115	20.242	20.243	$5.9 \pm 0.2$	0.038
$31.8 \pm 0.5$	66	84	20.248	20.242	$3.7 \pm 0.4$	0.120
$32.0 \pm 0.5$	62	87	20.242	20.243	$3.7 \pm 0.6$	0.168

$2\theta [^\circ]$	Count <sub>1</sub>	Count <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	Rate[s <sup>-1</sup> ]	err <sub>rel</sub>
$32.2 \pm 0.5$	66	80	20.243	20.243	$3.6 \pm 0.3$	0.096
$32.3 \pm 0.5$	70	69	20.242	20.243	$3.43 \pm 0.02$	0.007
$32.5 \pm 0.5$	85	73	20.248	20.248	$3.9 \pm 0.3$	0.076
$32.7 \pm 0.5$	85	75	20.244	20.243	$4.0 \pm 0.2$	0.062
$32.8 \pm 0.5$	62	78	20.247	20.248	$3.5 \pm 0.4$	0.114
$33.0 \pm 0.5$	81	63	20.242	20.242	$3.6 \pm 0.4$	0.125
$34.0 \pm 0.5$	79	75	20.241	20.243	$3.80 \pm 0.10$	0.026
$35.0 \pm 0.5$	82	69	20.247	20.247	$3.7 \pm 0.3$	0.086
$36.0 \pm 0.5$	72	71	20.242	20.243	$3.53 \pm 0.02$	0.007
$41.0 \pm 0.5$	65	69	20.249	20.243	$3.31 \pm 0.10$	0.030
$46.0 \pm 0.5$	75	65	20.243	20.243	$3.5 \pm 0.2$	0.071
$51.0 \pm 0.5$	71	67	20.242	20.241	$3.41 \pm 0.10$	0.029
$56.0 \pm 0.5$	66	76	20.246	20.242	$3.5 \pm 0.2$	0.071
$56.2 \pm 0.5$	60	71	20.247	20.242	$3.2 \pm 0.3$	0.084
$56.3 \pm 0.5$	67	78	20.243	20.242	$3.6 \pm 0.3$	0.076
$56.5 \pm 0.5$	72	67	20.242	20.242	$3.43 \pm 0.12$	0.036
$56.7 \pm 0.5$	79	65	20.242	20.241	$3.6 \pm 0.3$	0.097
$56.8 \pm 0.5$	57	65	20.242	20.242	$3.0 \pm 0.2$	0.066
$57.0 \pm 0.5$	73	78	20.242	20.248	$3.73 \pm 0.12$	0.033
$57.2 \pm 0.5$	58	63	20.241	20.243	$2.99 \pm 0.12$	0.041
$57.3 \pm 0.5$	66	80	20.241	20.242	$3.6 \pm 0.3$	0.096
$57.5 \pm 0.5$	69	87	20.243	20.242	$3.9 \pm 0.4$	0.115
$57.7 \pm 0.5$	75	93	20.242	20.242	$4.1 \pm 0.4$	0.107
$57.8 \pm 0.5$	100	97	20.241	20.242	$4.87 \pm 0.07$	0.015
$58.0 \pm 0.5$	105	134	20.243	20.243	$5.9 \pm 0.7$	0.121
$58.2 \pm 0.5$	118	131	20.241	20.242	$6.2 \pm 0.3$	0.052
$58.3 \pm 0.5$	158	166	20.243	20.243	$8.0 \pm 0.2$	0.025
$58.5 \pm 0.5$	165	150	20.242	20.245	$7.8 \pm 0.4$	0.048
$58.7 \pm 0.5$	168	149	20.243	20.243	$7.8 \pm 0.5$	0.060
$58.8 \pm 0.5$	119	128	20.242	20.244	$6.1 \pm 0.2$	0.036
$59.0 \pm 0.5$	118	114	20.241	20.242	$5.73 \pm 0.10$	0.017
$59.2 \pm 0.5$	107	86	20.242	20.241	$4.8 \pm 0.5$	0.109
$59.3 \pm 0.5$	65	88	20.242	20.242	$3.8 \pm 0.6$	0.150
$59.5 \pm 0.5$	80	73	20.242	20.243	$3.78 \pm 0.17$	0.046
$60.0 \pm 0.5$	100	94	20.243	20.248	$4.79 \pm 0.15$	0.031
$60.5 \pm 0.5$	70	73	20.241	20.242	$3.53 \pm 0.07$	0.021
$61.5 \pm 0.5$	82	72	20.246	20.242	$3.8 \pm 0.2$	0.065
$62.5 \pm 0.5$	81	69	20.244	20.243	$3.7 \pm 0.3$	0.080
$63.5 \pm 0.5$	77	84	20.243	20.242	$3.98 \pm 0.17$	0.044
$64.5 \pm 0.5$	100	98	20.242	20.246	$4.89 \pm 0.05$	0.010
$64.7 \pm 0.5$	114	89	20.243	20.249	$5.0 \pm 0.6$	0.123
$64.8 \pm 0.5$	211	189	20.244	20.243	$9.9 \pm 0.5$	0.055
$65.0 \pm 0.5$	270	282	20.242	20.243	$13.6 \pm 0.3$	0.022
$65.2 \pm 0.5$	396	380	20.248	20.250	$19.2 \pm 0.4$	0.021
$65.3 \pm 0.5$	493	538	20.243	20.244	$25.5 \pm 1.1$	0.044
$65.5 \pm 0.5$	525	559	20.243	20.249	$26.8 \pm 0.8$	0.031
$65.7 \pm 0.5$	578	569	20.245	20.251	$28.3 \pm 0.2$	0.008
$65.8 \pm 0.5$	480	464	20.244	20.244	$23.3 \pm 0.4$	0.017
$66.0 \pm 0.5$	340	326	20.243	20.249	$16.4 \pm 0.3$	0.021
$66.2 \pm 0.5$	257	225	20.248	20.242	$11.9 \pm 0.8$	0.066
$66.3 \pm 0.5$	122	122	20.242	20.243	$6.02692 \pm 0.00015$	$2 \cdot 10^{-5}$
$66.5 \pm 0.5$	102	84	20.242	20.241	$4.6 \pm 0.4$	0.097
$66.7 \pm 0.5$	94	82	20.243	20.242	$4.3 \pm 0.3$	0.068
$66.8 \pm 0.5$	87	81	20.242	20.244	$4.15 \pm 0.15$	0.036
$67.0 \pm 0.5$	87	82	20.242	20.248	$4.17 \pm 0.12$	0.030
$67.2 \pm 0.5$	69	89	20.248	20.248	$3.9 \pm 0.5$	0.127
$67.3 \pm 0.5$	73	75	20.241	20.243	$3.66 \pm 0.05$	0.013
$68.0 \pm 0.5$	59	82	20.243	20.242	$3.5 \pm 0.6$	0.163
$73.0 \pm 0.5$	81	91	20.241	20.245	$4.2 \pm 0.2$	0.058

**Tabella A3.2.** NaCl 20kV

$2\theta [^\circ]$	Count <sub>1</sub>	Count <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	Rate[s <sup>-1</sup> ]	err <sub>rel</sub>
26.0 ± 0.5	47	40	20.242	20.243	2.15 ± 0.17	0.08
26.5 ± 0.5	36	41	20.241	20.241	1.90 ± 0.12	0.065
26.8 ± 0.5	43	41	20.243	20.242	2.07 ± 0.05	0.024
27.2 ± 0.5	69	69	20.244	20.247	3.4082 ± 0.0003	9 · 10 <sup>-5</sup>
27.3 ± 0.5	77	65	20.242	20.242	3.5 ± 0.3	0.085
27.5 ± 0.5	83	78	20.255	20.242	3.98 ± 0.12	0.031
27.7 ± 0.5	108	117	20.243	20.243	5.6 ± 0.2	0.040
27.8 ± 0.5	139	131	20.242	20.243	6.7 ± 0.2	0.030
28.0 ± 0.5	106	123	20.244	20.242	5.7 ± 0.4	0.074
28.2 ± 0.5	97	87	20.242	20.241	4.5 ± 0.2	0.054
28.3 ± 0.5	63	70	20.235	20.244	3.29 ± 0.17	0.052
28.5 ± 0.5	38	47	20.243	20.243	2.1 ± 0.2	0.106
28.7 ± 0.5	52	45	20.243	20.242	2.40 ± 0.17	0.072
28.8 ± 0.5	35	41	20.242	20.242	1.88 ± 0.15	0.079
29.2 ± 0.5	66	71	20.243	20.244	3.38 ± 0.12	0.036
29.0 ± 0.5	62	65	20.253	20.243	3.14 ± 0.07	0.024
29.5 ± 0.5	64	47	20.243	20.243	2.7 ± 0.4	0.153
29.8 ± 0.5	56	65	20.241	20.249	3.0 ± 0.2	0.074
30.0 ± 0.5	53	61	20.246	20.242	2.8 ± 0.2	0.070
30.2 ± 0.5	66	72	20.241	20.243	3.41 ± 0.15	0.043
30.3 ± 0.5	123	116	20.243	20.480	5.9 ± 0.2	0.035
30.5 ± 0.5	220	212	20.250	20.247	10.7 ± 0.2	0.018
30.7 ± 0.5	400	425	20.243	20.243	20.4 ± 0.6	0.030
30.8 ± 0.5	572	555	20.243	20.245	27.8 ± 0.4	0.015
31.0 ± 0.5	843	836	20.243	20.244	41.47 ± 0.17	0.004
31.2 ± 0.5	926	905	20.244	20.245	45.2 ± 0.5	0.011
31.3 ± 0.5	875	790	20.246	20.247	41 ± 2	0.051
31.5 ± 0.5	786	700	20.244	20.244	37 ± 2	0.058
31.7 ± 0.5	529	501	20.249	20.243	25.4 ± 0.7	0.027
31.8 ± 0.5	184	172	20.243	20.242	8.8 ± 0.3	0.034
32.0 ± 0.5	56	57	20.247	20.248	2.79 ± 0.02	0.009
32.2 ± 0.5	61	60	20.246	20.242	2.99 ± 0.02	0.008
32.5 ± 0.5	53	51	20.242	20.247	2.57 ± 0.05	0.019
33.0 ± 0.5	52	47	20.247	20.242	2.45 ± 0.12	0.050
33.7 ± 0.5	52	57	20.244	20.247	2.69 ± 0.12	0.046
34.7 ± 0.5	43	56	20.242	20.243	2.4 ± 0.3	0.131

**Tabella A3.3.** NaCl 30kV con filtro di Ni

26.0 ± 0.5	24	17	20.242	20.242	1.01 ± 0.17	0.171
26.5 ± 0.5	24	22	20.242	20.241	1.14 ± 0.05	0.043
27.0 ± 0.5	25	24	20.247	20.243	1.21 ± 0.02	0.020
27.3 ± 0.5	22	34	20.248	20.243	1.4 ± 0.3	0.214
27.7 ± 0.5	33	26	20.243	20.241	1.46 ± 0.17	0.119
28.0 ± 0.5	27	19	20.242	20.247	1.1 ± 0.2	0.174
28.3 ± 0.5	22	18	20.242	20.241	0.99 ± 0.10	0.100
28.7 ± 0.5	33	20	20.243	20.242	1.3 ± 0.3	0.245
29.0 ± 0.5	22	26	20.248	20.242	1.19 ± 0.10	0.083
29.5 ± 0.5	25	22	20.248	20.242	1.16 ± 0.07	0.064
29.8 ± 0.5	53	39	20.243	20.242	2.3 ± 0.3	0.152
30.0 ± 0.5	81	84	20.250	20.242	4.07 ± 0.07	0.018
30.2 ± 0.5	177	165	20.249	20.243	8.4 ± 0.3	0.035
30.3 ± 0.5	296	256	20.242	20.247	13.6 ± 1.0	0.073
30.5 ± 0.5	486	470	20.244	20.244	23.6 ± 0.4	0.017
30.7 ± 0.5	556	547	20.243	20.250	27.2 ± 0.2	0.008
30.8 ± 0.5	509	495	20.249	20.243	24.8 ± 0.3	0.014
31.0 ± 0.5	386	426	20.244	20.243	20.1 ± 1.0	0.049
31.2 ± 0.5	341	356	20.244	20.242	17.2 ± 0.4	0.022
31.3 ± 0.5	214	200	20.249	20.249	10.2 ± 0.3	0.034
31.5 ± 0.5	91	81	20.242	20.242	4.2 ± 0.2	0.058
31.7 ± 0.5	48	36	20.242	20.241	2.1 ± 0.3	0.143
32.0 ± 0.5	33	26	20.242	20.244	1.46 ± 0.17	0.119
32.5 ± 0.5	25	36	20.242	20.243	1.5 ± 0.3	0.180
33.0 ± 0.5	29	38	20.246	20.242	1.7 ± 0.2	0.134

#### A.4 Dati per la sez.[2.4](#) "Cristallo di diamante e polveri"

**Tabella A4.1.** Dati del diamante col polietilene. Sono raggruppati tra loro i valori di cui è nota l'incertezza relativa, pari alla scala del nonio di un sesto di grado.

$2\theta [^\circ]$	Count <sub>1</sub>	Count <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	Rate[s <sup>-1</sup> ]	err <sub>rel</sub>
12.0 ± 0.5	68	66	20.242	20.243	3.31 ± 0.05	0.015
13.0 ± 0.5	54	59	20.243	20.238	2.79 ± 0.12	0.044
14.0 ± 0.5	48	49	20.243	20.233	2.40 ± 0.03	0.011
15.0 ± 0.5	61	38	20.249	20.234	2.4 ± 0.6	0.232
16.0 ± 0.5	56	58	20.242	20.234	2.81 ± 0.05	0.018
17.0 ± 0.5	60	69	20.234	20.235	3.2 ± 0.2	0.070
18.0 ± 0.5	69	66	20.243	20.244	3.33 ± 0.07	0.022
19.0 ± 0.5	90	73	20.25	20.243	4.0 ± 0.4	0.104
19.5 ± 0.5	84	87	20.242	20.243	4.22 ± 0.07	0.018
20.0 ± 0.5	102	91	20.242	20.244	4.8 ± 0.3	0.057
21.0 ± 0.5	117	128	20.242	20.242	6.1 ± 0.3	0.045
22.0 ± 0.5	98	136	20.242	20.247	5.8 ± 0.9	0.162
23.0 ± 0.5	112	141	20.242	20.242	6.2 ± 0.7	0.115
24.0 ± 0.5	120	111	20.242	20.248	5.7 ± 0.2	0.039
25.0 ± 0.5	94	100	20.243	20.243	4.79 ± 0.15	0.031
26.0 ± 0.5	71	68	20.243	20.243	3.43 ± 0.07	0.022
27.0 ± 0.5	55	60	20.248	20.242	2.84 ± 0.12	0.044
28.0 ± 0.5	48	38	20.239	20.243	2.1 ± 0.2	0.116
29.0 ± 0.5	47	31	20.247	20.242	1.9 ± 0.4	0.205
30.0 ± 0.5	34	29	20.246	20.24	1.56 ± 0.12	0.079
31.0 ± 0.5	22	31	20.234	20.247	1.3 ± 0.2	0.169
32.0 ± 0.5	27	22	20.243	20.234	1.21 ± 0.12	0.102
33.0 ± 0.5	27	22	20.242	20.242	1.21 ± 0.12	0.102
34.0 ± 0.5	23	21	20.241	20.24	1.09 ± 0.05	0.045
35.0 ± 0.5	26	21	20.241	20.241	1.16 ± 0.12	0.106
37.0 ± 0.5	28	18	20.242	20.244	1.1 ± 0.2	0.217
39.0 ± 0.5	33	28	20.242	20.248	1.51 ± 0.12	0.082
41.0 ± 0.5	22	32	20.241	20.247	1.3 ± 0.2	0.185
42.0 ± 0.5	25	29	20.241	20.243	1.33 ± 0.10	0.074
43.0 ± 0.5	24	31	20.241	20.242	1.36 ± 0.17	0.127
45.0 ± 0.5	20	16	20.242	20.241	0.89 ± 0.10	0.111
47.0 ± 0.5	29	16	20.243	20.242	1.1 ± 0.3	0.289
49.0 ± 0.5	22	26	20.242	20.243	1.19 ± 0.10	0.083
53.0 ± 0.5	15	19	20.241	20.241	0.84 ± 0.10	0.118
57.0 ± 0.5	27	12	20.241	20.243	0.1 ± 0.4	0.385
60.0 ± 0.5	16	19	20.241	20.233	0.86 ± 0.07	0.086
61.0 ± 0.5	15	16	20.242	20.241	0.77 ± 0.02	0.032
62.0 ± 0.5	17	15	20.242	20.233	0.79 ± 0.05	0.062
63.0 ± 0.5	10	12	20.241	20.233	0.54 ± 0.05	0.091
64.0 ± 0.5	10	11	20.241	20.233	0.52 ± 0.02	0.048
68.0 ± 0.5	15	19	20.244	20.234	0.84 ± 0.10	0.118
71.0 ± 0.5	9	10	20.243	20.245	0.47 ± 0.02	0.053
72.0 ± 0.5	13	16	20.241	20.234	0.72 ± 0.07	0.104
74.0 ± 0.5	15	18	20.242	20.235	0.82 ± 0.07	0.091
75.0 ± 0.5	14	9	20.246	20.242	0.57 ± 0.12	0.217
76.0 ± 0.5	9	12	20.241	20.242	0.52 ± 0.07	0.143

**Tabella A4.2.** Dati per il polietilene a diversi angoli rispetto alla sua posizione iniziale. Le correnti nel filamento sono arbitrarie, ma mantenute costanti per la singola inclinazione. Di fatto solo il primo set di dati permette di identificare un picco osservando il massimo valore di Rate. Si verifica che si mantiene in una posizione compatibile con quella valutata inizialmente. Il secondo set di dati è utile principalmente per fortificare l'ipotesi che il picco non sia legato al diamante.

Inclinazione $4^\circ \pm 2^\circ$						
$2\theta [^\circ]$	Count <sub>1</sub>	Count <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	Rate[s <sup>-1</sup> ]	err <sub>rel</sub>
$19.0 \pm 0.5$	116	102	20.243	20.234	$5.4 \pm 0.3$	0.064
$20.0 \pm 0.5$	165	129	20.242	20.243	$7.3 \pm 0.9$	0.122
$20.5 \pm 0.5$	145	153	20.248	20.249	$7.4 \pm 0.2$	0.027
$21.0 \pm 0.5$	164	147	20.257	20.248	$7.7 \pm 0.4$	0.054
$21.5 \pm 0.5$	143	175	20.248	20.241	$7.9 \pm 0.8$	0.101
$23.0 \pm 0.5$	156	142	20.240	20.236	$7.4 \pm 0.3$	0.047
$24.0 \pm 0.5$	128	131	20.243	20.241	$6.40 \pm 0.07$	0.012
Inclinazione $45^\circ \pm 5^\circ$						
$2\theta [^\circ]$	Count <sub>1</sub>	Count <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	Rate[s <sup>-1</sup> ]	err <sub>rel</sub>
$19.0 \pm 0.5$	68	91	20.244	20.241	$3.9 \pm 0.6$	0.145
$21.0 \pm 0.5$	100	96	20.242	20.241	$4.84 \pm 0.10$	0.020
$22.0 \pm 0.5$	133	113	20.242	20.243	$6.1 \pm 0.5$	0.081

**Tabella A4.3.** Dati delle polveri

$2\theta [^\circ]$	Count <sub>1</sub>	Count <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	Rate[s <sup>-1</sup> ]	err <sub>rel</sub>
$12.0 \pm 0.5$	51	68	20.253	20.234	$2.9 \pm 0.4$	0.143
$14.0 \pm 0.5$	35	49	20.241	20.234	$2.1 \pm 0.3$	0.167
$15.0 \pm 0.5$	50	47	20.247	20.238	$2.40 \pm 0.07$	0.031
$16.0 \pm 0.5$	51	41	20.241	20.241	$2.3 \pm 0.2$	0.109
$17.0 \pm 0.5$	54	60	20.241	20.235	$2.82 \pm 0.15$	0.053
$18.0 \pm 0.5$	51	53	20.243	20.242	$2.57 \pm 0.05$	0.019
$20.0 \pm 0.5$	64	47	20.241	20.242	$2.7 \pm 0.4$	0.153
$22.0 \pm 0.5$	45	41	20.242	20.239	$2.12 \pm 0.10$	0.046
$25.0 \pm 0.5$	43	41	20.234	20.241	$2.08 \pm 0.05$	0.024
$30.0 \pm 0.5$	43	46	20.243	20.234	$2.20 \pm 0.07$	0.034
$35.0 \pm 0.5$	63	48	20.242	20.235	$2.7 \pm 0.4$	0.135
$38.0 \pm 0.5$	49	49	20.241	20.242	$2.42077 \pm 0.00006$	$2 \cdot 10^{-5}$
$45.0 \pm 0.5$	51	50	20.243	20.244	$2.49 \pm 0.02$	0.010
$50.0 \pm 0.5$	49	39	20.248	20.239	$2.2 \pm 0.2$	0.113
$55.0 \pm 0.5$	36	42	20.242	20.242	$1.93 \pm 0.15$	0.077
$56.5 \pm 0.5$	44	40	20.233	20.233	$2.08 \pm 0.10$	0.048
$57.5 \pm 0.5$	49	46	20.242	20.242	$2.35 \pm 0.07$	0.032
$58.5 \pm 0.5$	48	43	20.243	20.247	$2.25 \pm 0.12$	0.055
$59.5 \pm 0.5$	57	57	20.241	20.246	$2.8157 \pm 0.0003$	$1 \cdot 10^{-4}$
$60.0 \pm 0.5$	40	40	20.241	20.242	$1.97614 \pm 0.00005$	$3 \cdot 10^{-5}$
$59.7 \pm 0.5$	30	34	20.243	20.410	$1.57 \pm 0.09$	0.058
$65.0 \pm 0.5$	55	46	20.242	20.241	$2.5 \pm 0.2$	0.089
$68.0 \pm 0.5$	46	52	20.241	20.241	$2.42 \pm 0.15$	0.061
$69.0 \pm 0.5$	40	42	20.243	20.244	$2.03 \pm 0.05$	0.024
$70.0 \pm 0.5$	44	52	20.248	20.235	$2.4 \pm 0.2$	0.084
$71.5 \pm 0.5$	42	48	20.241	20.238	$2.22 \pm 0.15$	0.067
$73.0 \pm 0.5$	36	44	20.242	20.233	$2.0 \pm 0.2$	0.100
$74.0 \pm 0.5$	39	46	20.242	20.248	$2.10 \pm 0.17$	0.082
$80.0 \pm 0.5$	45	34	20.246	20.242	$2.0 \pm 0.3$	0.139
$90.0 \pm 0.5$	44	50	20.244	20.234	$2.32 \pm 0.15$	0.064
$93.0 \pm 0.5$	53	44	20.244	20.243	$2.4 \pm 0.2$	0.093
$103.5 \pm 0.5$	37	32	20.241	20.235	$1.70 \pm 0.12$	0.072
$122.0 \pm 0.5$	42	39	20.242	20.248	$2.00 \pm 0.07$	0.037

## Riferimenti bibliografici

1. Forneris J, Picollo F, Diffrazione Raggi X; 2021-2022. [https://elearning.unito.it/scienzedellanatura/pluginfile.php/154657/mod\\_resource/content/1/2022\\_Diffrazione%20Raggi%20X%20-%20Scheda%20Laboratorio.pdf](https://elearning.unito.it/scienzedellanatura/pluginfile.php/154657/mod_resource/content/1/2022_Diffrazione%20Raggi%20X%20-%20Scheda%20Laboratorio.pdf).
2. NIST, X-Ray Mass Attenuation Coefficients: Aluminum; <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z13.html>.
3. Hassan A. PHY3307 SOLID STATE PHYSICS I; 2019. <https://it.scribd.com/document/441213507/PHY3307-2020-pdf>.
4. Jeffrey J A, PLASTICS – IT'S ALL ABOUT MOLECULAR STRUCTURE; September 2016. [http://readnxtbook.com/wiley/plasticsengineering/september2016/consultantscorner\\_plastics.html](http://readnxtbook.com/wiley/plasticsengineering/september2016/consultantscorner_plastics.html).
5. Sabah A, Elouadi B, Ibtisam K, Structural, Thermal and Morphology Characteristics of Low Density Polyethylene Produced by QAPCO.; September 2015.
6. TEL-X-Ometer; <https://www.telatomic.com/all-produts/tel-x-ometer>.