

# Interazione gamma con la materia

Gianluca Cavallaro  
Marco Gobbo

19 Maggio 2020

## 1 Introduzione

### 1.1 Scopo dell'esperienza e rivelatore

Lo scopo di questa esperienza è quello di indagare le caratteristiche dell'interazione gamma con la materia, utilizzando differenti sorgenti e differenti materiali come bersaglio. Per fare questo si sfrutta un rivelatore al germanio, rivelatore a semiconduttore che sfrutta la tecnologia della giunzione P-N, sottoposta ad un drogaggio opportuno. Nella giunzione P-N è presente una regione, la zona di svuotamento, dove non sono presenti cariche libere: una volta che una radiazione gamma attraversa questa zona crea delle coppie elettrone-lacuna, le quali, accelerate da una differenza di potenziale opportuna, generano una corrente che permette in ultima istanza di risalire all'energia depositata dal gamma nel rivelatore. In spettroscopia la giunzione va polarizzata inversamente, di modo tale che all'interno del rivelatore non ci sia nessuna corrente che si sovrappone a quella generata dalla raccolta di cariche, così da ottenere misure corrette. L'utilizzo del germanio come semiconduttore comporta che il rivelatore sia mantenuto ad una temperatura molto bassa, di circa 77K, durante il suo utilizzo: questo è dovuto al fatto che il germanio ha un gap energetico fra banda di conduzione e banda di valenza molto basso (0.67 eV), e se il rivelatore fosse lasciato a temperatura ambiente la sola agitazione termica sarebbe sufficiente a superarlo, ostacolando le misure. Si ottiene questa condizione attraverso un bagno di azoto liquido.

### 1.2 La radiazione gamma

La radiazione gamma, attraversando la materia viene attenuata, con modalità e caratteristiche che dipendono dall'energia della radiazione, nonché dal materiale utilizzato come schermo. Se andiamo a considerare un fascio di gamma di intensità iniziale  $I_0$ , attraversando un certo materiale il fascio sarà attenuato secondo la seguente relazione:

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

dove  $\mu$  indica il coefficiente di attenuazione lineare, caratteristico del mezzo utilizzato e variabile con la sua densità, e  $x$  indica lo spessore di materiale attraversato. Rilevante è il coefficiente di attenuazione massico,  $\mu/\rho$ , ottenuto tramite il coefficiente di attenuazione lineare: esso è costante per un determinato mezzo, indipendentemente dalla densità dello stesso.

Nella loro interazione con la materia, i gamma possono andare incontro a diversi processi, principalmente 3: effetto fotoelettrico, scattering compton e produzione di coppie. Per quanto riguarda l'effetto fotoelettrico, il gamma interagisce con un elettrone atomico, cedendo completamente la sua energia all'elettrone che viene liberato dall'atomo. L'atomo ionizzato andrà incontro a processi di ricombinazione per riempire la lacuna lasciata dal fotoelettrone liberato, emettendo in questo caso dei gamma caratteristici. Nello scattering compton il gamma interagisce con un fotone del mezzo, cedendogli parte della sua energia, e venendo deviato di un certo angolo rispetto alla sua direzione iniziale. L'energia ceduta dipende dall'angolo di scattering del gamma. La produzione

di coppie è un processo che può avvenire solo se l'energia del gamma in questione è superiore ad una certa soglia, che in questo caso è 1.022 MeV, ossia due volte la massa dell'elettrone. In questo processo il gamma crea una coppia elettrone-positrone, con quest'ultimo che, essendo poco stabile, decadrà rapidamente in due gamma da 511 KeV.

Per l'interazione dei gamma con la materia è necessario introdurre la sezione d'urto, ossia la probabilità di interazione del gamma con un bersaglio del mezzo considerato. La sezione d'urto è legata al coefficiente di attenuazione lineare attraverso la relazione:

$$\sigma_{tot} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N_{Av}} \quad (2)$$

dove A indica il numero di massa del materiale usato come bersaglio, e  $N_{Av}$  indica il numero di Avogadro. Si nota in particolar modo come la sezione d'urto sia proporzionale al coefficiente di attenuazione massico. Nel caso dell'interazione gamma va sottolineato che, essendo possibili diverse interazioni, la sezione d'urto totale dipende dalla sezione d'urto caratteristica di ogni singolo processo. Le singole sezioni d'urto hanno una dipendenza diversa dall'energia del gamma incidente e dallo Z del materiale:

$$\sigma_{fototeletrico} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^{3.5}} \quad (3)$$

$$\sigma_{compton} \propto \frac{Z}{E} \quad (4)$$

$$\sigma_{coppie} \propto Z^2 \cdot \ln(E) \quad (5)$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_{fototeletrico} + \sigma_{compton} + \sigma_{coppie} \quad (6)$$

È possibile fare a priori alcune considerazioni: per materiali ad alto Z sarà preponderante l'effetto fototeletrico, mentre in materiale a Z inferiore diventa sempre più importante il contributo del Compton o della produzione di coppie. Anche a seconda del range di energie considerato può essere più significativo il contributo del fototeletrico, a basse energie, o del Compton e della produzione di coppie, ad energie sempre più alte.

## 2 Strumentazione

- Crate NIM per alimentazione di elettronica standard
- Rivelatore coassiale HPGe (Ortec Coaxial HPGe Detector GEM20P)
- Generatore HV Label Model 8124 per tensione di polarizzazione
- Amplificatore CAEN Model N968
- ADC/MCA CAEN Model N957
- Sorgenti di calibrazione:  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{228}\text{Th}$
- Becker graduato per contenere acqua
- Dischi di rame e piombo

### 3 Raccolta dati ed elaborazione

#### 3.1 Coefficiente di attenuazione lineare

Abbiamo a disposizione 3 diverse sorgenti di radiazione ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ) e 3 materiali da interporre fra sorgente e rivelatore (acqua, rame, piombo). Dei 3 materiali si possono cambiare gli spessori utilizzati: 4, 8, 12, 16, 20 cm per l'acqua; 0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.54 cm per il rame; 0.1, 0.21, 0.33, 0.58, 1.08 cm per il piombo. Tali spessori sono raggiunti riempiendo un becker nel caso dell'acqua, impilando dei dischi nel caso di rame e piombo. Mantenendo la sorgente ad una distanza fissata dal rivelatore e modificando di volta in volta lo spessore del materiale, si raccoglie lo spettro gamma. Riportiamo di seguito degli esempi:

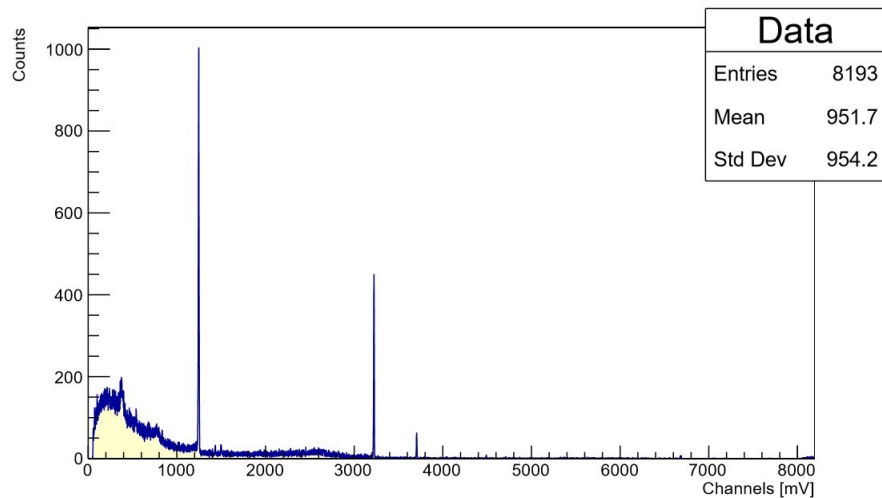


Figura 1: Spettro del sodio con acqua

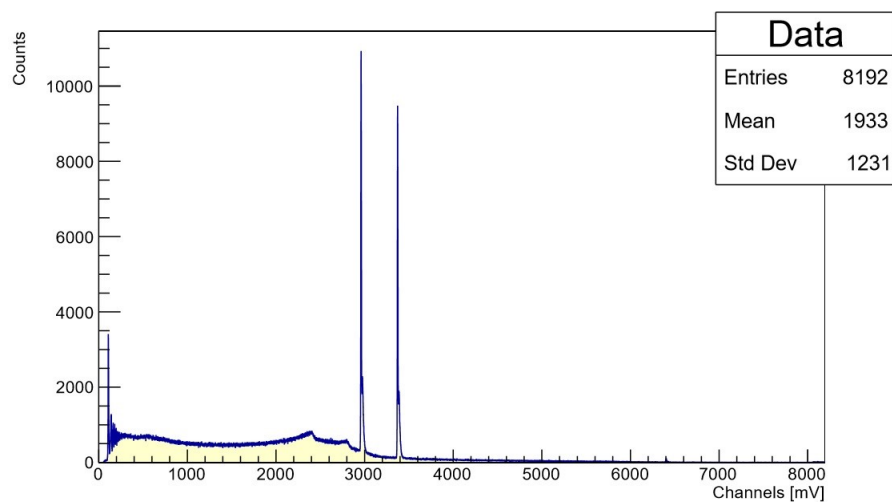


Figura 2: Spettro del colbalto con rame

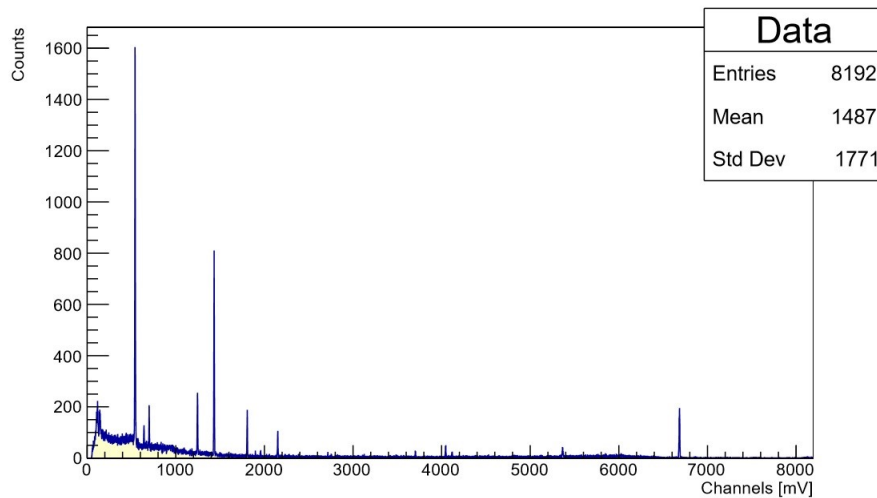


Figura 3: Spettro del torio con piombo

Per ogni picco visibile dei vari spettri, si procede ad individuare l'area sottesa al picco. In accordo con la relazione (1), all'aumentare dello spessore di materiale da attraversare il numero di gamma che arrivano al rivelatore sarà sempre minore, e di conseguenza sarà minore l'area sottesa alla gaussiana. Riportiamo di seguito alcuni esempi, i restanti vengono riportati in appendice:

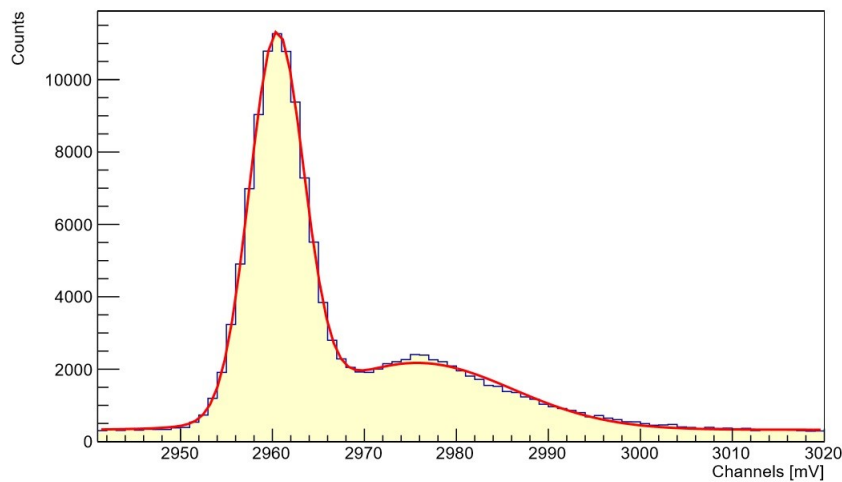


Figura 4: Esempio di picco della sorgente di  $^{60}\text{Co}$

L'interpolazione del picco è stata fatta con la somma di una gaussiana e di un polinomio di grado 0, che modella il fondo. In diversi casi, come nella Figura 4, è stato necessario interpolare con una seconda gaussiana. L'area rilevante ai fini dell'esperienza è solo quella della gaussiana principale: per individuarla è stato calcolato l'integrale sotteso ad una gaussiana con i parametri di quella principale, ottenuti dal fit complessivo. Tenendo conto che le misure sono durate 6 minuti per quanto riguarda l'acqua e 2 minuti per rame e piombo, tramite la seguente relazione si procede a calcolare il rate di conteggi al secondo:

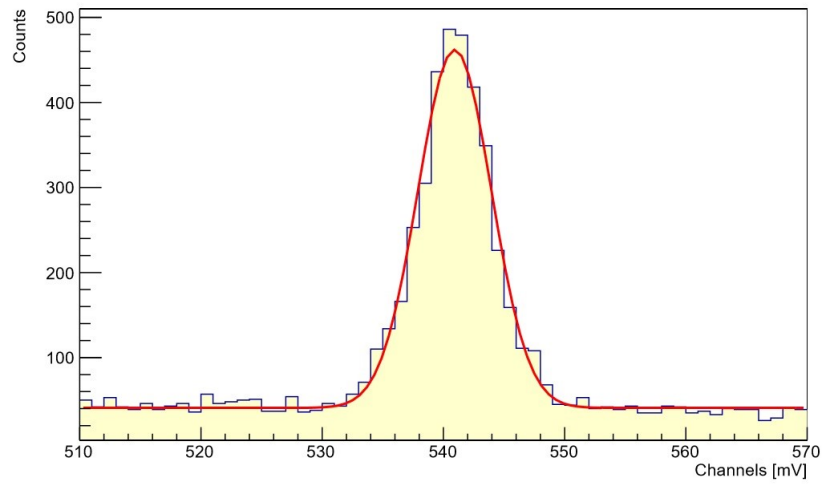


Figura 5: Esempio di picco della sorgente di  $^{228}\text{Th}$

$$\text{Rate} = \frac{\text{Area}}{\text{Durata misura}} \quad (7)$$

Per calcolare il coefficiente di attenuazione lineare dei vari materiali alle varie energie, si costruisce un grafico del rate in funzione dello spessore. Per interpolare è stata utilizzata la relazione (1):

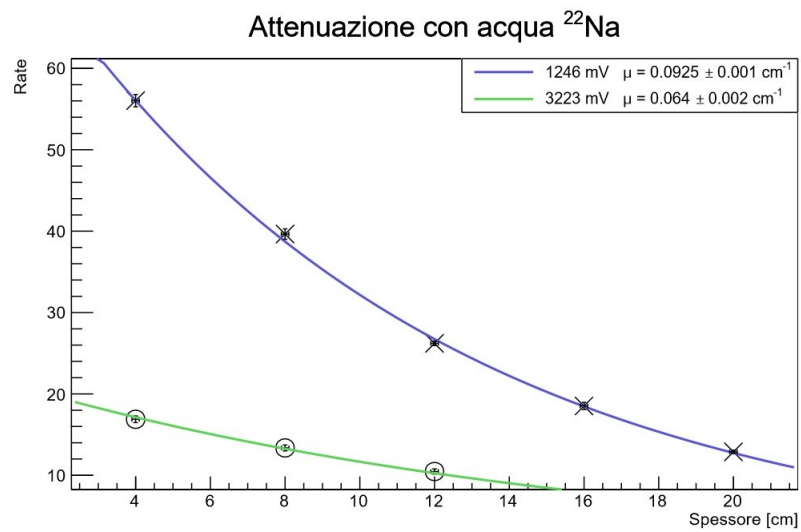


Figura 6: Attenuazione del sodio in acqua

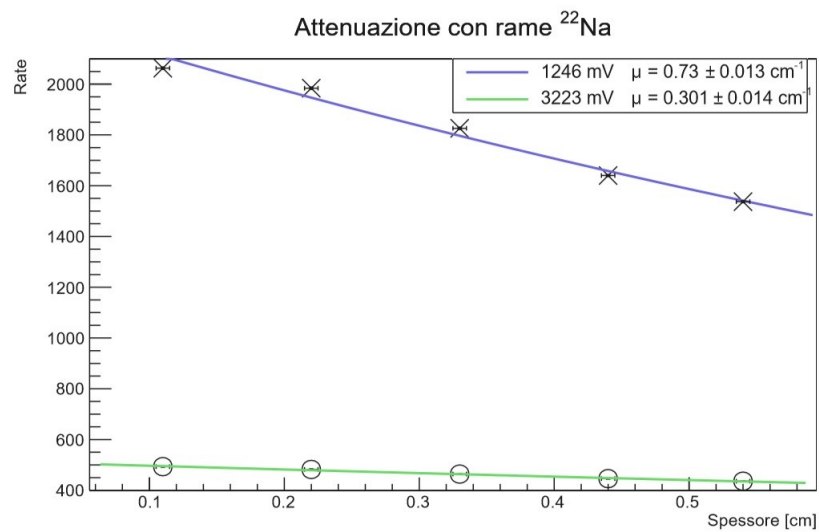


Figura 7: Attenuazione del sodio in rame

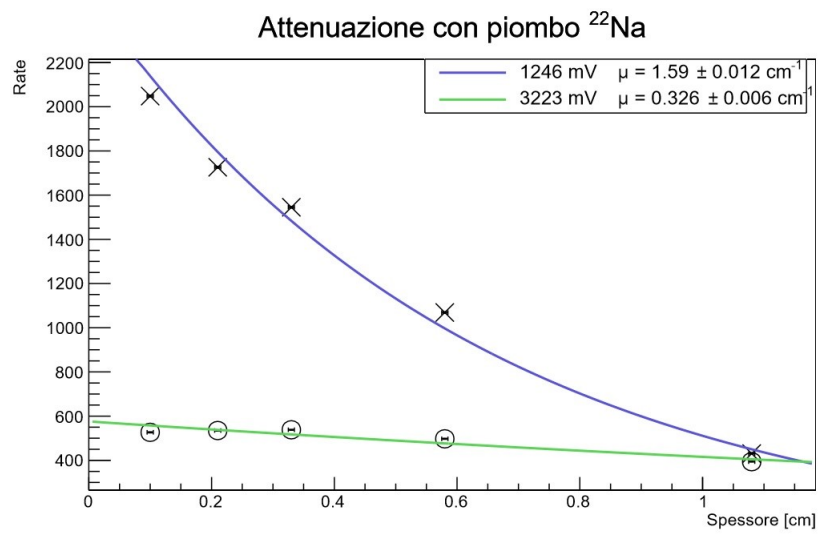


Figura 8: Attenuazione del sodio in piombo

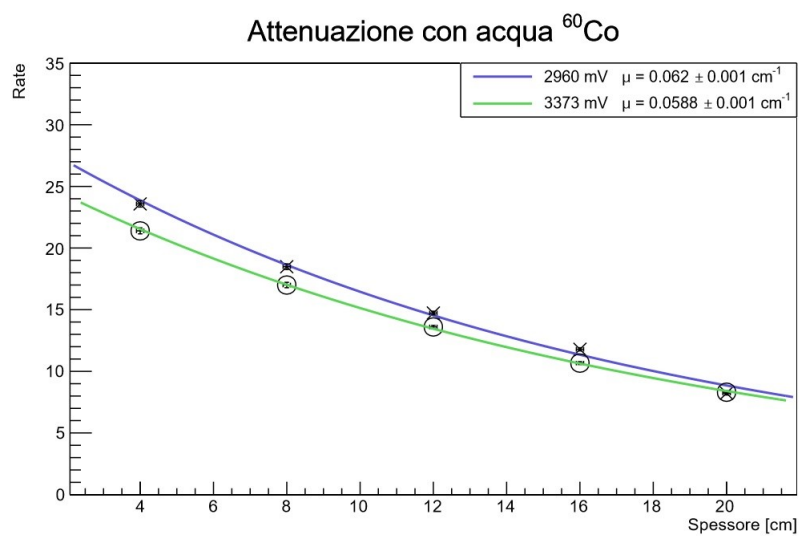


Figura 9: Attenuazione del cobalto in acqua

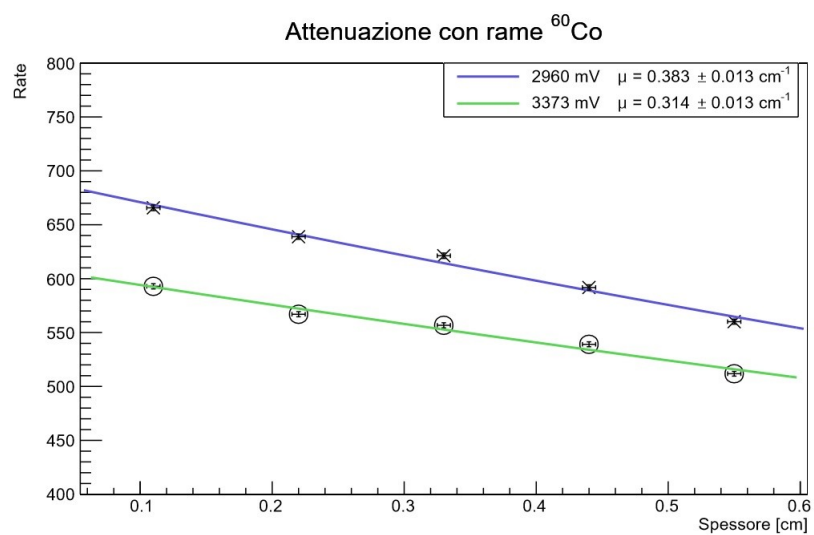


Figura 10: Attenuazione del cobalto in rame

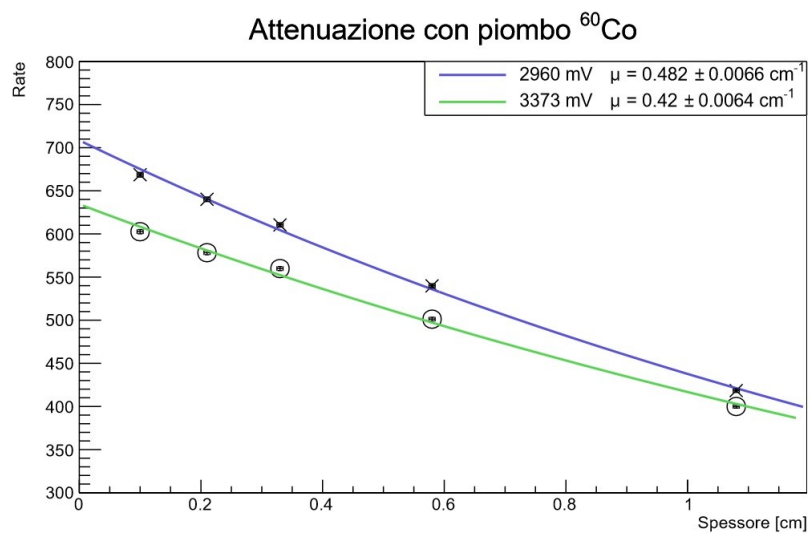


Figura 11: Attenuazione del cobalto in piombo

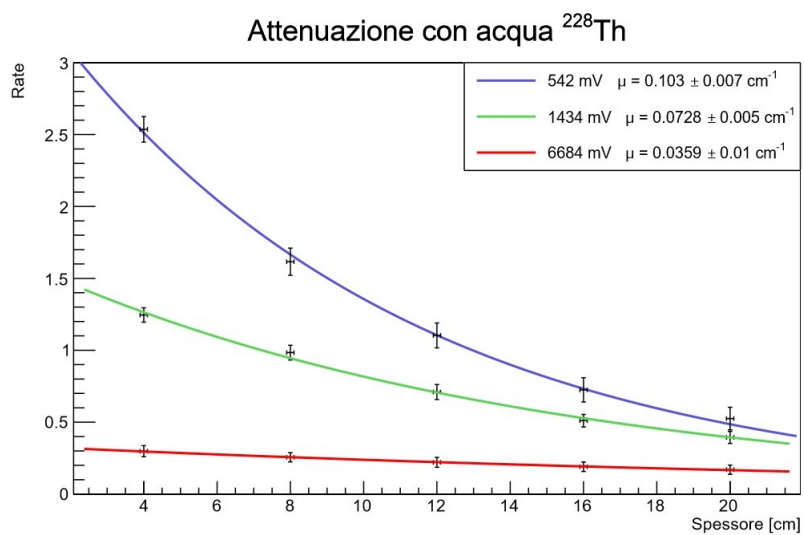


Figura 12: Attenuazione del torio in acqua



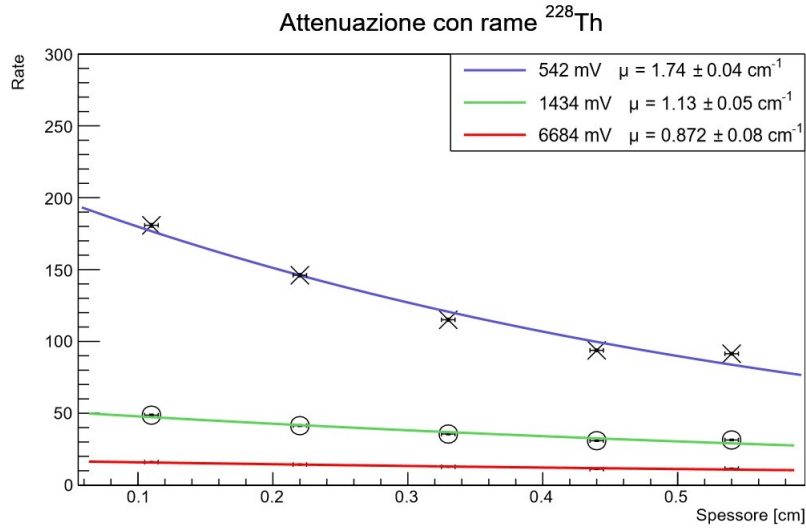


Figura 13: Attenuazione del torio in rame

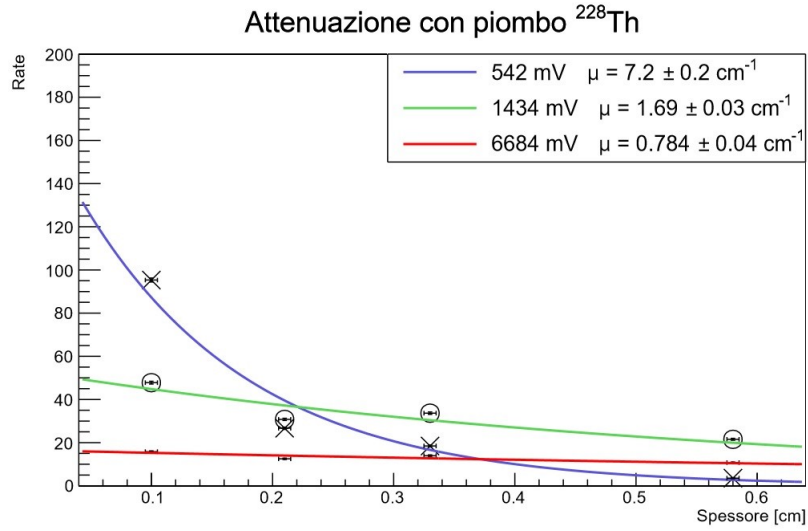


Figura 14: Attenuazione del torio in piombo

L'andamento ottenuto per i vari picchi è quello atteso: l'attenuazione segue un andamento esponenziale decrescente, caratterizzato dal coefficiente di attenuazione lineare specifico indicato nelle legende dei grafici.

### 3.2 Picco a 1460 keV

Negli spettri a nostra disposizione si nota la presenza di un picco non atteso, attorno ad una energia di 1460 keV. La presenza di questo picco è dovuta alla presenza di 40K nell'ambiente. Come fatto nel punto precedente, andiamo a calcolare il rate di conteggi al secondo di questo picco, mettendolo in funzione dello spessore del materiale:

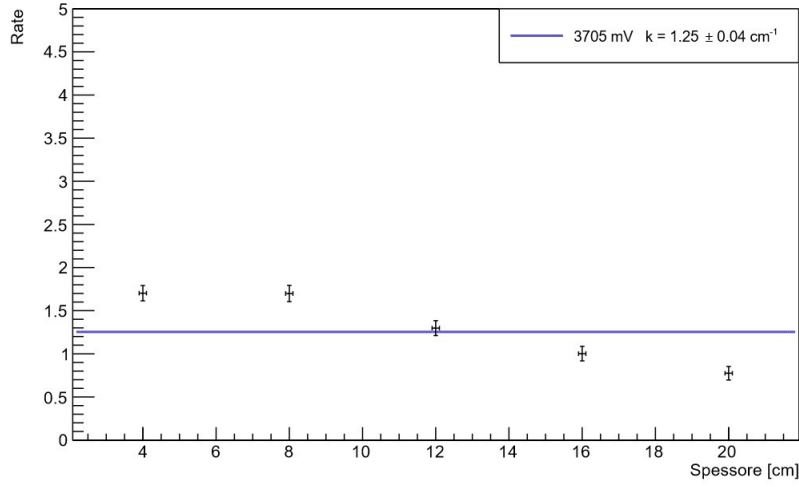


Figura 15: Andamento rate picco a 1460 keV

L'andamento riportato è relativo alla sorgente di torio con acqua come bersaglio. Il picco in questione risulta più evidente in alcuni spettri rispetto ad altri, dove il rate del fondo è paragonabile a quello del 40K, e l'andamento del picco di nostro interesse si confonde con il fondo stesso. Si nota come il rate del 40K sia pressochè costante: questo è dovuto al fatto che, essendo questo picco dovuto alla radioattività ambientale, non è prodotto dalla sorgente in questione e di conseguenza non deve attraversare il materiale venendo attenuato. Dunque, per misure della stessa durata temporale il numero di conteggi al secondo di questo isotopo sarà costante.

### 3.3 Coefficiente di attenuazione massico e sezione d'urto

Avendo a disposizione i coefficienti di attenuazione lineare  $\mu$  ricavati nella sezione 3.1, andiamo a calcolare i coefficienti di attenuazione massici  $\mu/\rho$ . Per i 3 materiali si utilizzano come densità:

$$\rho_{acqua} = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{rame} = 8,96 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{piombo} = 11,34 \text{ g/cm}^3$$

I risultati ottenuti vengono messi in un grafico in funzione dell'energia, ottenendo in totale 3 grafici, uno per ciascun materiale bersaglio. Come sottolineato nell'introduzione, attraverso la relazione (2), la sezione d'urto è proporzionale a  $\mu/\rho$ . In questi 3 grafici, avendo fissato di volta in volta il materiale, la sezione d'urto è ottenuta semplicemente moltiplicando i valori ottenuti per un valore costante  $A/N_{Av}$ ; per questo l'andamento in funzione dell'energia può essere ricavato semplicemente dal grafico del coefficiente di attenuazione massico.

#### 3.3.1 Acqua

Riportiamo di seguito il grafico di  $\mu/\rho$  in funzione dell'energia per l'acqua:

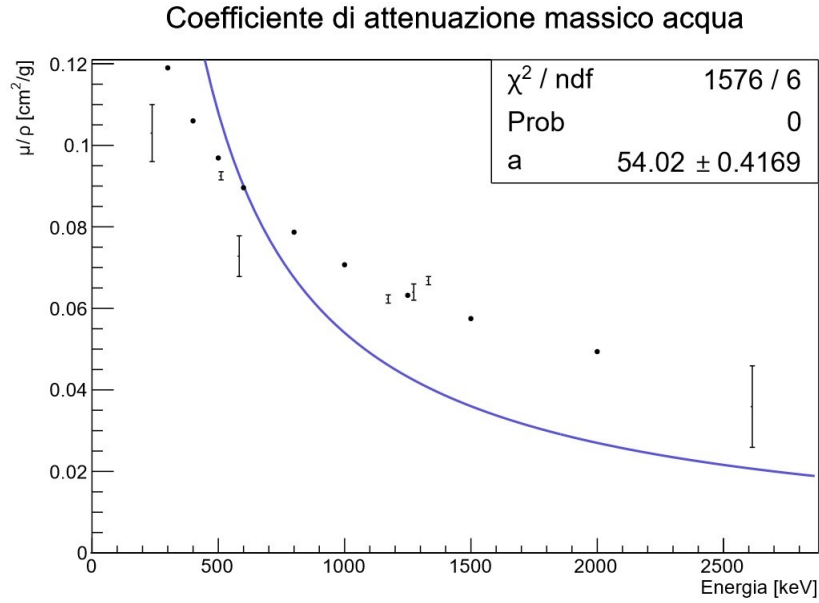


Figura 16: Coefficiente di attenuazione massico per acqua

Il grafico è stato interpolato, tenendo conto delle relazioni (3), (4) e (5), con la seguente funzione:

$$\sigma = \frac{a}{E} \quad (8)$$

poichè, nel range di energie considerate, in acqua, prevale lo scattering Compton. Nel grafico è riportato anche l'andamento teorico del coefficiente di attenuazione massico, rappresentato dai pallini. Si può notare come, appunto, prevalga l'effetto Compton in questo range di energie, seppur i dati sperimentali non siano completamente conformi alla teoria. Ciò è dovuto principalmente ad una sottostima del coefficiente  $\mu$  a determinate energie, difficoltà ascrivibile al calcolo delle corrette aree sottese ai picchi nei vari spettri.

### 3.3.2 Rame

Riportiamo di seguito il grafico di  $\mu/\rho$  in funzione dell'energia per il rame:

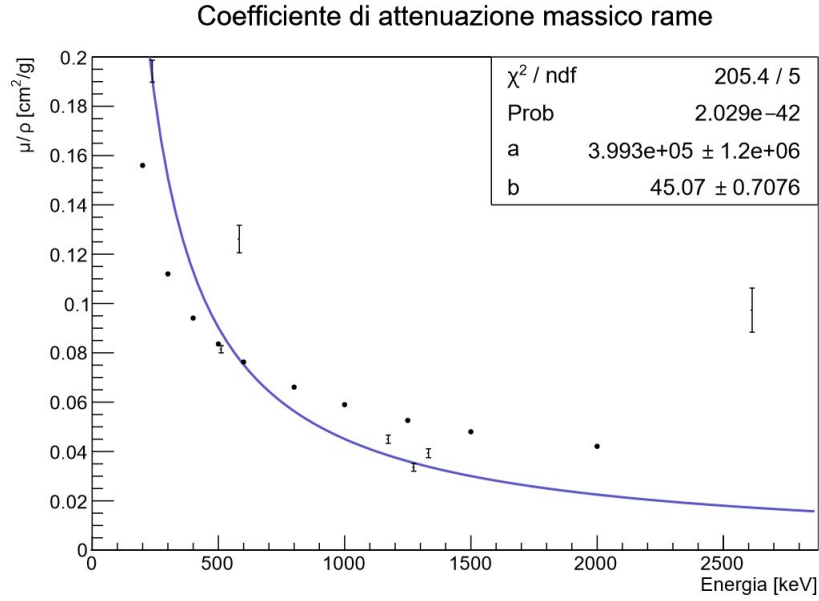


Figura 17: Coefficiente di attenuazione massico per rame

Il grafico è stato interpolato, tenendo conto delle relazioni (3), (4) e (5), con la seguente funzione:

$$\sigma = \frac{a}{E^{3.5}} + \frac{b}{E} \quad (9)$$

poichè, nel range di energie considerate prevale l'effetto Compton, ma avendo il rame uno  $Z=29$  anche l'effetto fotoelettrico comincia ad essere rilevante. In particolar modo l'effetto fotoelettrico è importante a basse energie, mentre crescendo in energia nel caso del rame continua ad essere preponderante il Compton. Anche in questo caso, alcuni punti si discostano in modo importante dall'andamento teorico.

### 3.3.3 Piombo

Riportiamo di seguito il grafico di  $\mu/\rho$  in funzione dell'energia il piombo:

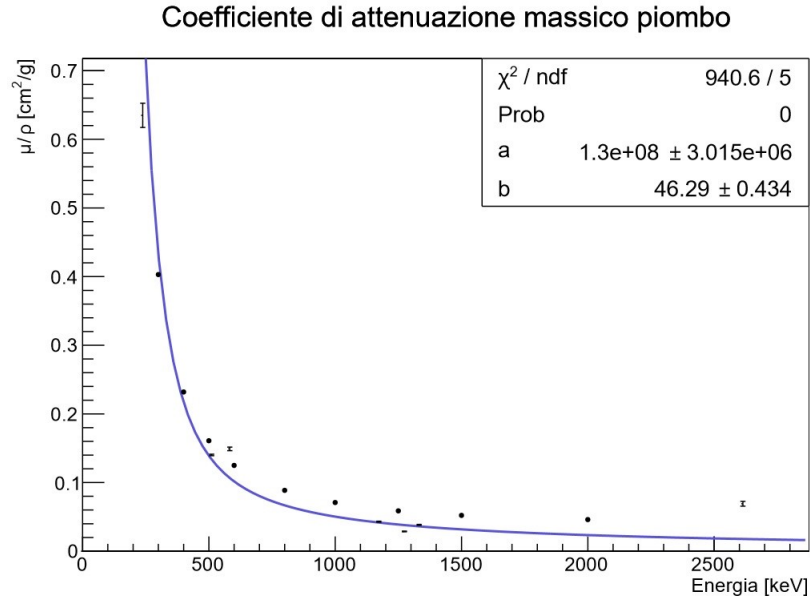


Figura 18: Coefficiente di attenuazione massico per piombo

Il grafico è stato interpolato, tenendo conto delle relazioni (3), (4) e (5), con la seguente funzione:

$$\sigma = \frac{a}{E^{3.5}} + \frac{b}{E} \quad (10)$$

In questo caso stiamo utilizzando un materiale con  $Z=82$ , molto elevato. Per questo, a basse energie l'effetto fotoelettrico si può notare come sia preponderante, mentre al crescere dell'energia diventa sempre più importante il Compton dato che il termine al denominatore nella relazione diventa sempre più significativo.

### 3.4 Sezione d'urto in funzione di $Z$

In questo caso ci proponiamo invece di studiare la dipendenza dalla  $Z$  del materiale della sezione d'urto. Fissata l'energia di un certo picco, andiamo a calcolare la sezione d'urto attraverso la relazione (2). Come  $A$  è stata utilizzata la massa molecolare dell'acqua e la massa atomica di rame e piombo, pesata in base all'abbondanza dei vari isotopi. Per ogni picco avremo a disposizione 3 valori, ognuno corrispondente ad uno dei 3 materiali usati come bersaglio. Si ottengono i seguenti grafici:

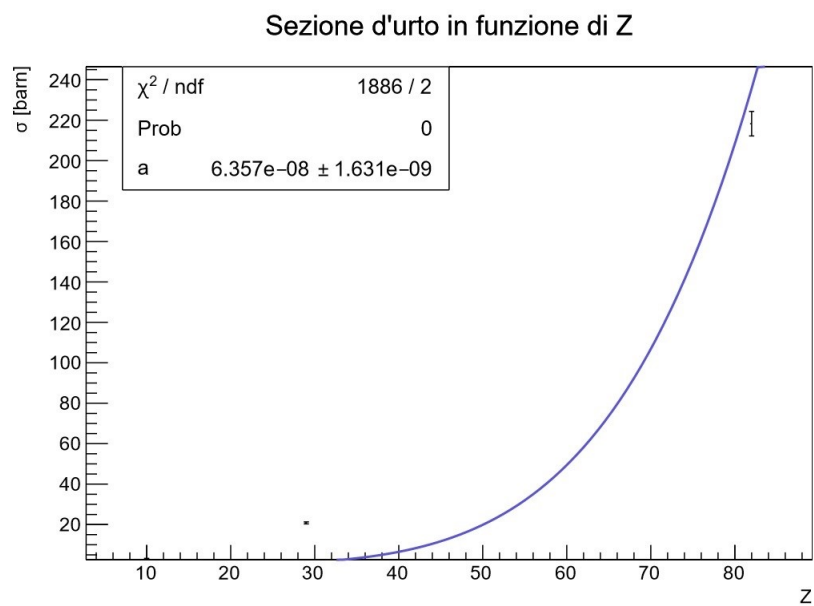


Figura 19: Picco a 238 keV

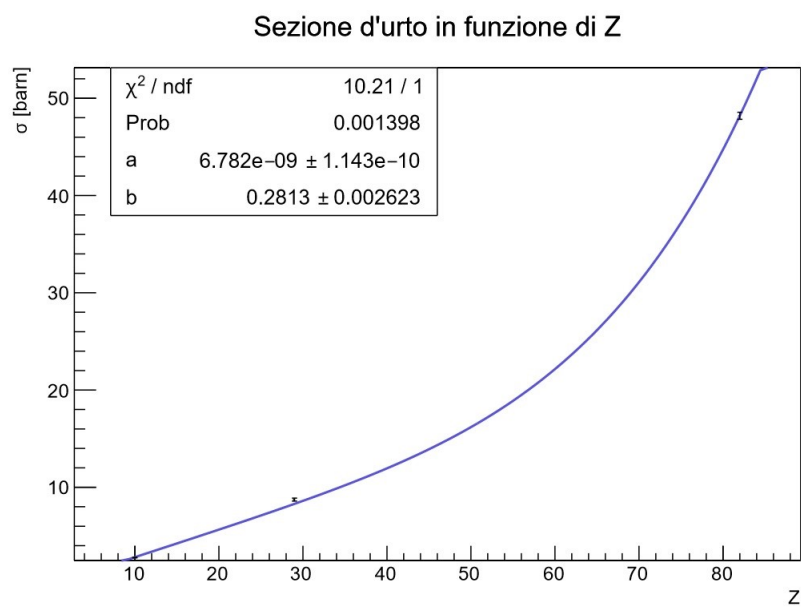


Figura 20: Picco a 511 keV

### Sezione d'urto in funzione di Z

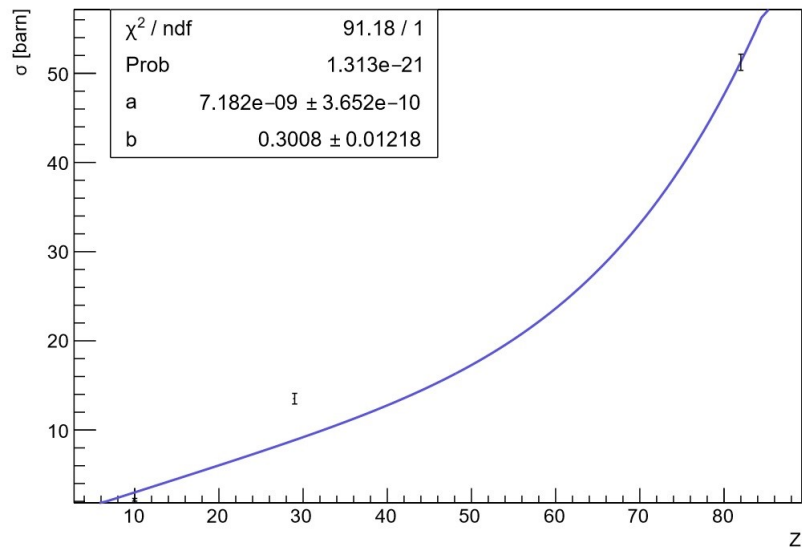


Figura 21: Picco a 583 keV

### Sezione d'urto in funzione di Z

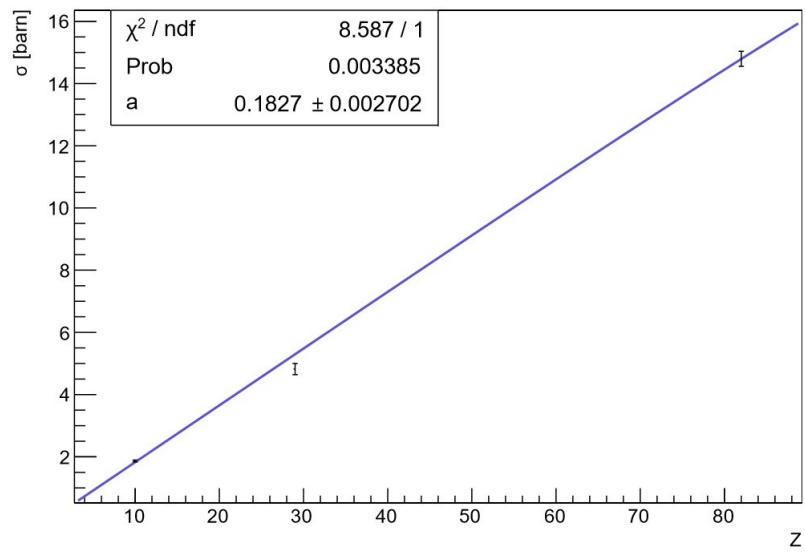


Figura 22: Picco a 1173 keV

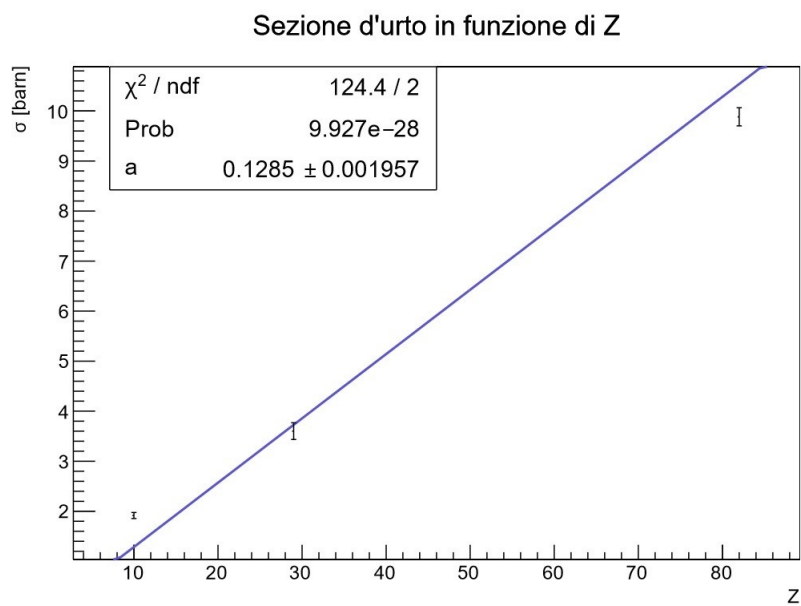


Figura 23: Picco a 1274 keV

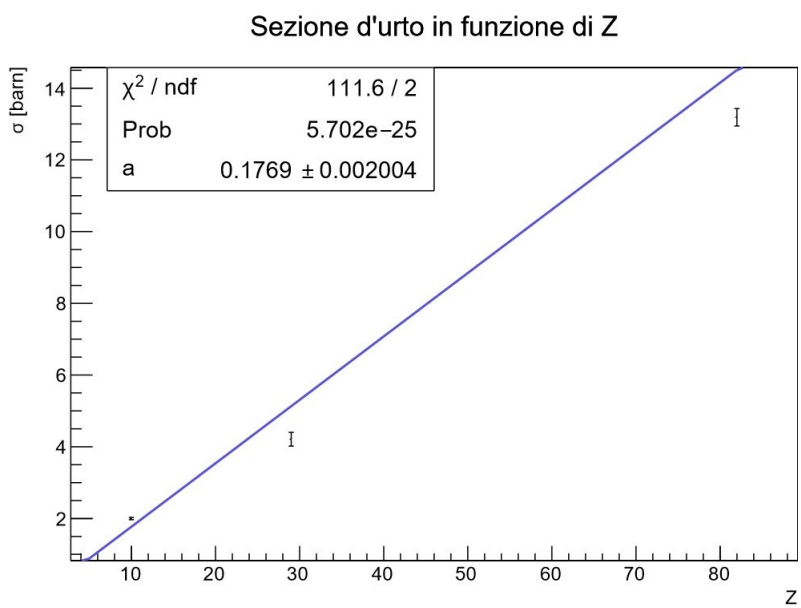


Figura 24: Picco a 1332 keV



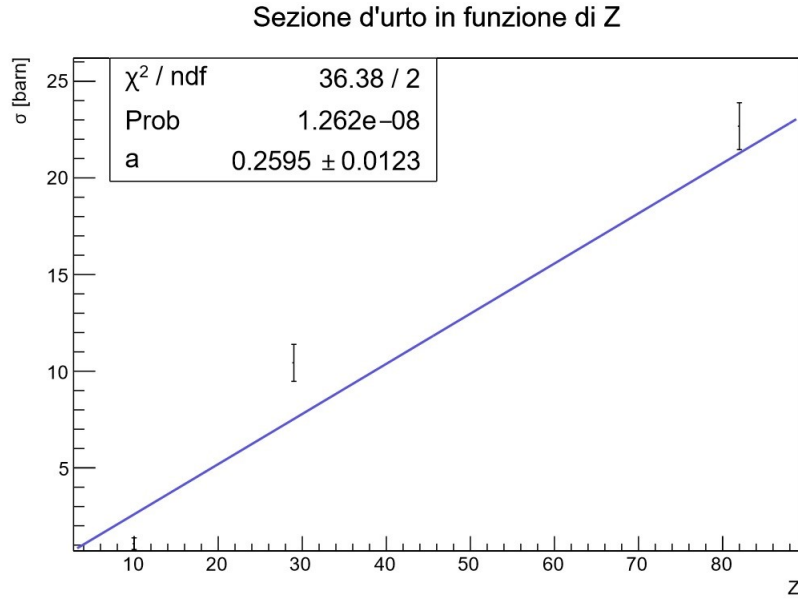


Figura 25: Picco a 2614 keV

dove sull'asse delle y la sezione d'urto  $\sigma$  è riportata in barn.

A seconda dell'energia del picco in questione si interpola con funzioni differenti. Per la figura 19 abbiamo interpolato tenendo conto della relazione (3) dal momento che a basse energie domina l'effetto fotoelettrico; per le figure 20 e 21 abbiamo interpolato con una combinazione lineare delle relazioni (3) e (4), mostrando che per materiali con basso Z come acqua e rame la relazione è già lineare, a prova del fatto che l'effetto preponderante è il Compton, mentre per materiali ad alto Z come il piombo prevale ancora il fotoelettrico; per le restanti figure abbiamo interpolato tenendo conto solo della relazione (4) mostrando come l'andamento sia lineare, provando che l'effetto prevalente sia il Compton. In tutto questo non abbiamo tenuto conto del contributo della produzione di coppie, dal momento che siamo ancora ad energie basse per avere un contributo significativo legato a tale fenomeno. In generale è possibile affermare che per avere una idea migliore e più completa dell'andamento sarebbe stato necessario utilizzare più di 3 materiali come bersaglio.