
Spettrometria Gamma

Spettrometria Gamma di
radionuclidi e
Spettrometria di
Sorgenti X

Sistema Theremino
Rev.2

Sommario

Spettrometria Gamma di Radionuclidi	4
Teoria	4
Apparecchiature	6
Parametri di Misura Theremino	8
Radiazione naturale di fondo all'interno di edifici in cemento	9
uranio	11
Ossido di uranio (Smalto all'uranio).....	13
Vetro all'uranio ("Vaseline Glass")	14
Autunite (minerale radioattivo, fosfato idrato di uranio e calcio).....	15
Uraninite (minerale radioattivo, ossido di uranio)	16
Polycrase (minerale radioattivo, contenente uranio e torio).....	17
Decadimento dell'uranio-238.....	18
Acqua Piovana	19
Decadimento del Radon in acqua piovana.....	20
Filtraggio particolato presente in ambienti chiusi	21
Filtraggio particolato presente all'esterno.....	22
Radio (^{226}Ra)	23
Torio – Reticella per lampade a gas (^{232}Th)	25
Decadimento del "Thoron" (^{220}Rn)	28
Monazite (minerale radioattivo contenente torio)	30
Thorianite (minerale radioattivo contenente torio)	31
Cesio – Valvola di Scarica (^{137}Cs).....	32
Cesio –Sorgente di Calibrazione (^{137}Cs).....	34
Sodio-22 – Sorgente di Calibrazione (^{22}Na)	35
Trinitite.....	37
Americio (^{241}Am)	39
Trizio (^3H).....	41
Potassio ^{40}K	42
Lutezio ^{176}Lu	43
Diffusione Compton.....	44
Assorbimento Radiazione Gamma.....	47
Legge del quadrato della distanza	49
Risoluzione energetica e FWHM.....	51

Spettrometria Sorgenti Raggi X	53
Teoria	53
Apparecchiature	54
Sorgente X da 15 kV (Finestra in berillio – Catodo in tungsteno)	55
Sorgente X da 75 kV (Tubo in vetro – Catodo in tungsteno)	56
Disclaimer e Avvertenze sulla Sicurezza	58
Precauzioni con Sorgenti Radioattive	58

Spettrometria Gamma di Radionuclidi

Teoria

La **spettroscopia gamma** è lo studio quantitativo degli spettri di energia da fonti di raggi gamma, utilizzata in campi come l'industria nucleare, le indagini geochimiche ed in astrofisica.

La maggior parte delle sorgenti radioattive producono raggi gamma, che sono di svariate energie ed intensità. Quando queste emissioni vengono rilevate ed analizzate con un sistema di spettrometria, viene prodotto uno spettro di energia dei raggi gamma.

Un'analisi dettagliata di questo spettro viene in genere utilizzata per determinare l'identità e la quantità di emettitori gamma presenti nella sorgente, ed è uno strumento fondamentale nella analisi radiometrica. Lo spettro gamma è caratteristico dei radionuclidi gamma emittenti contenute nella sorgente, analogamente a quanto succede in spettroscopia ottica, in cui lo spettro ottico è caratteristica del materiale contenuto nel campione.

Raggi Gamma

I raggi gamma sono la parte di più alta energia della radiazione elettromagnetica, sono fisicamente uguali a tutte le altre forme di radiazione elettromagnetica (ad esempio, raggi X, luce visibile, infrarosso, radio) ma hanno energia elevata a causa della loro corta lunghezza d'onda. A causa di questo, l'energia dei fotoni gamma può essere risolta singolarmente e uno spettrometro a raggi gamma può misurare e visualizzare le energie dei fotoni rilevati.

I nuclei radioattivi (radionuclidi) emettono comunemente raggi gamma nell'intervallo di energia da pochi keV a circa 10 MeV, corrispondenti ai livelli di energia tipici dei nuclei con tempi di vita ragionevolmente lunghi. Queste sorgenti tipicamente producono raggi gamma monocromatici (vale a dire, molti fotoni emessi a energie discrete), mentre le energie molto più elevate (verso l'alto di 1 TeV) possono verificarsi negli spettri continuo osservati in astrofisica ed in fisica delle particelle elementari. Il confine tra i raggi gamma e raggi X non è preciso, con raggi X si intende in genere le emissioni elettroniche ad alta energia degli atomi, che possono estendersi a più di 100 keV, mentre le emissioni di bassa energia dei nuclei sono in genere chiamati raggi gamma, anche se la loro energia può essere inferiore a 20 keV.

Componenti e principi generali

Le apparecchiature utilizzate nella spettroscopia gamma includono un rivelatore di energia sensibile alle radiazioni, l'elettronica di elaborazione dei segnali prodotti dal rivelatore, un analizzatore multicanale e relativi amplificatori e dispositivi di lettura dei dati per generare, visualizzare e memorizzare lo spettro. Vi possono inoltre essere anche altri componenti, come ratemeter e stabilizzatori di posizione di picco.

I rivelatori più comuni includono contatori a scintillazione a ioduro di sodio (NaI), attivati al tallio (TI) e rivelatori al germanio ad alta purezza (HpGe).

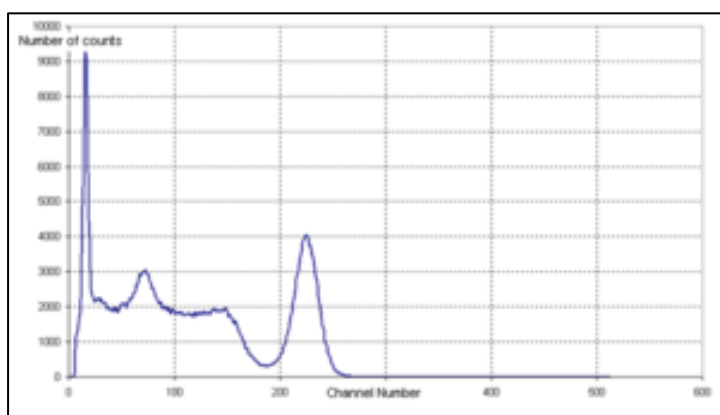
I rilevatori di spettroscopia gamma sono materiali passivi nei quali si verifica una interazione gamma all'interno del volume del rivelatore. I principali meccanismi di interazione sono l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton e produzione di coppie. L'effetto fotoelettrico è quello preferibile, in quanto assorbe tutta l'energia del raggio gamma incidente. L'assorbimento completo di energia è possibile anche quando si verifica una serie di questi meccanismi di interazione all'interno del volume del rivelatore. Quando un raggio gamma subisce un'interazione Compton o una produzione di coppie, una porzione dell'energia fuoriesce dal volume del rivelatore senza essere assorbita, in questo caso l'energia di fondo nello spettro viene aumentato di un conteggio. Questo conteggio apparirà in un canale inferiore al canale che corrisponde alla piena energia del raggio gamma. Rivelatori di grande volume riducono questo effetto.

L'impulso di tensione prodotta dal rivelatore (o dal fotomoltiplicatore in un contatore a scintillazione) è sagomato da un analizzatore multicanale (MCA). L'analizzatore multicanale prende un piccolo segnale in tensione prodotto dal rivelatore, lo rimodella in una forma gaussiana o trapezoidale e lo converte in un segnale digitale. In alcuni sistemi, la conversione analogico-digitale viene effettuata prima del reshaping. Il

convertitore analogico-digitale (ADC) ordina anche gli impulsi in base alla loro altezza. Gli ADC hanno un numero specifico di "bins" in cui gli impulsi possono essere ordinati; questi bins rappresentano i canali nello spettro. Il numero di canali può essere cambiato nella maggior parte dei moderni sistemi di spettroscopia gamma, modificando le impostazioni del software o hardware. Il numero di canali è tipicamente una potenza di due; I valori comuni sono 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16384. La scelta del numero di canali dipende dalla risoluzione del sistema e dall'intervallo delle energie in fase di studio.

Sonde a scintillazione

I rivelatori a scintillazione utilizzano cristalli che emettono luce quando raggi gamma interagiscono con gli atomi nei cristalli. L'intensità della luce prodotta è proporzionale all'energia depositata nel cristallo dal raggio gamma. I rivelatori sono uniti ai fotomoltiplicatori che convertono la luce in elettroni e quindi amplificano il segnale elettrico fornito da questi elettroni. Scintillatori comuni includono lo ioduro di sodio drogato tallio (NaI(Tl)) e rivelatori a germanato di bismuto (BGO). Poiché i fotomoltiplicatori sono sensibili anche alla luce ambientale, gli scintillatori vanno racchiusi in contenitori a tenuta di luce.



Esempio di uno spettro NaI. Spettro gamma del cesio dell'isotopo ^{137}Cs mostrato in figura parte. ^{137}Cs emette una singola linea gamma di 662 keV. Va notato che la linea 662 keV mostrato viene in realtà prodotta dal $^{137\text{m}}\text{Ba}$, il prodotto di decadimento di ^{137}Cs , che è in equilibrio con ^{137}Cs .

Lo spettro della figura è stata misurata utilizzando un cristallo NaI con un fotomoltiplicatore, un amplificatore, e un analizzatore multicanale. La figura mostra il numero di conteggi (entro il periodo di

misurazione) in funzione del numero di canale. Lo spettro indica i seguenti picchi (da sinistra a destra):

- Radiazioni X a bassa energia (a causa della conversione interna del raggio gamma)
- Picco di back scattering Compton
- Fotopicco (full energy peak) ad una energia di 662 keV

La distribuzione Compton è una distribuzione continua che è presente fino al canale 150 in figura. La distribuzione è causata dai raggi gamma primari sottoposti a Compton scattering all'interno del cristallo: a seconda dell'angolo di diffusione, gli elettroni Compton hanno energie diverse e, quindi, producono impulsi in canali energetici differenti.

Calibrazione e radiazione naturale di fondo

Se uno spettrometro gamma viene utilizzato per identificare campioni di composizione sconosciuta, la scala delle energie deve essere prima calibrata. La calibrazione viene eseguita utilizzando i fotopicchi di una fonte nota, come il cesio-137 o il cobalto-60. Poiché il numero del canale è proporzionale all'energia, la scala dei canali può poi essere convertita in una scala di energie. Se la dimensione del cristallo rivelatore è noto, si può anche effettuare la calibrazione in intensità, in modo che non solo le energie ma anche le intensità di una sorgente sconosciuta possano essere misurate e correlate alla quantità di un certo isotopo.

Poiché una minima quantità di radioattività è presente ovunque (radiazione naturale di fondo), lo spettro dovrebbe essere analizzato in assenza di altre sorgenti. La radiazione di fondo deve poi essere sottratta dalla misura reale. Assorbitori di piombo possono essere posizionati intorno all'apparecchio di misura per ridurre la radiazione di fondo.

Apparecchiature

Sonda a scintillazione per basse energie Gamma : Sonda SEI RAP 47



Sensore Alluminio

Lunghezza 19 cm, diametro 3,8 cm

Range Temperatura da -25°C a 40°C

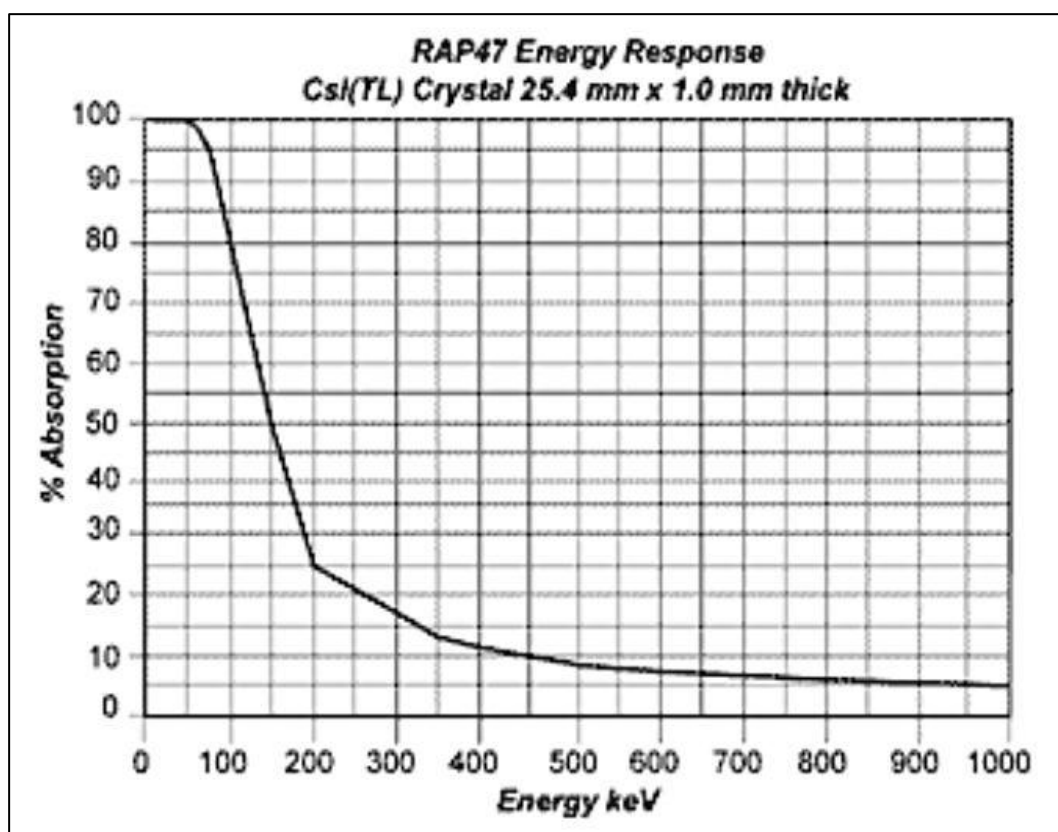
Cristallo CsI (Tl)

Dimensioni Cristallo

Diametro 25.4mm spessore 1.0mm

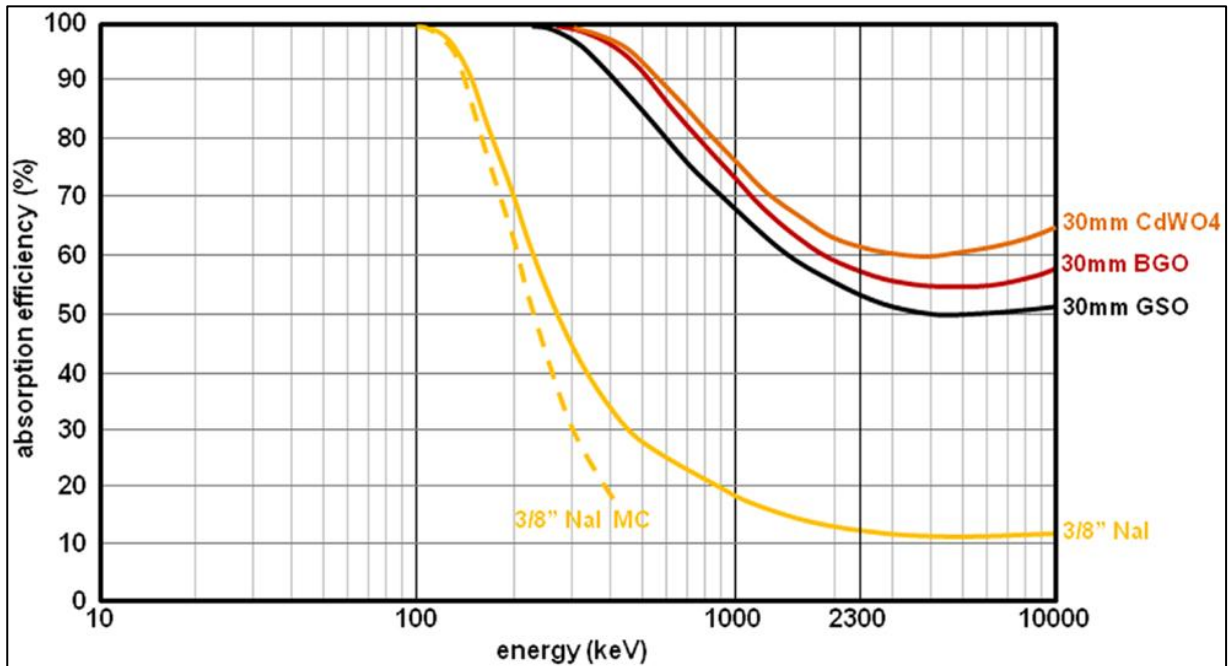
Energia da 8 keV a 1 MeV

Assorbimento 100% a 47keV, 80% a 100 keV

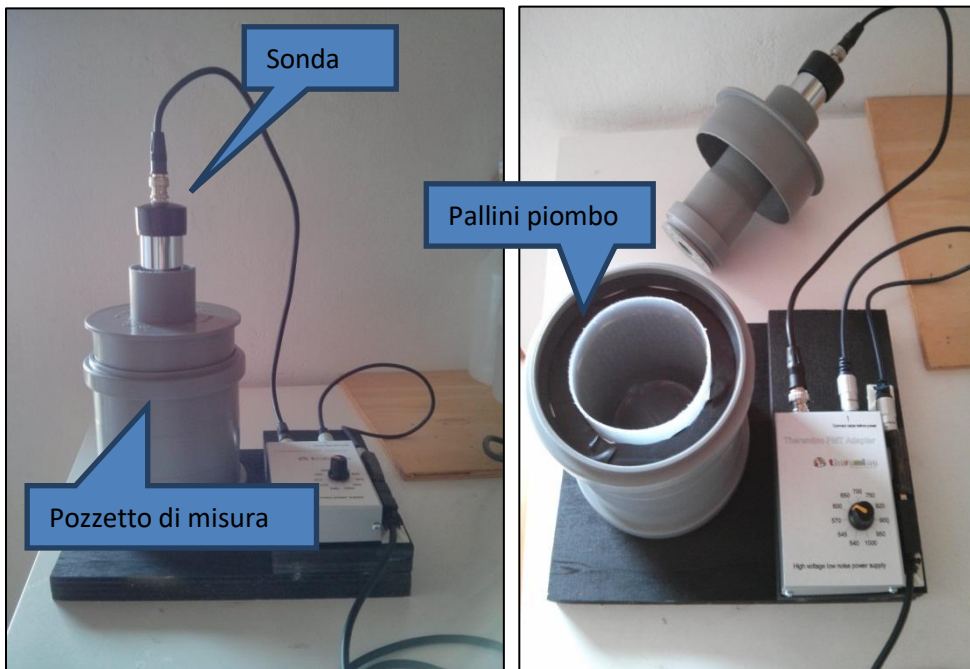


CsI(Tl) Efficienza Assorbimento

Sonda a scintillazione per medie energie – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu

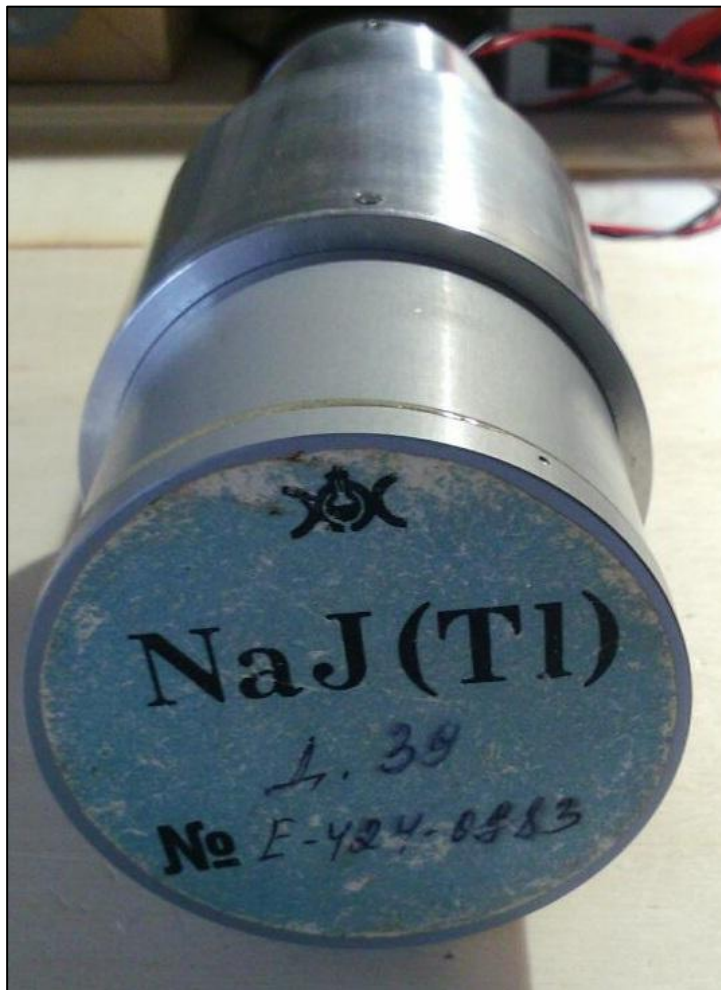


NaI(Tl) Efficienza Assorbimento



Setup misure con sonda NaI(Tl) - pozzetto di misura in plastica schermato con pallini di piombo

Sonda a scintillazione per alte energie – Cristallo NaI(Tl) 63 x 63mm - PMT R6233 Hamamatsu



Parametri di Misura

Tempi di misura = maggiore di 3600ses

Min Energia = 0

Filtro FIR = 15%÷30%

Numero di bins = X2

Base-line Test

Position = 50μsec

Width = 300 μsec

Max Slope = 20%

Max Noise = 20%

Resolution Compensation

Size = 20bins

Center = 30%

Left = 3%

Right = 7%

Radiazione naturale di fondo all'interno di edifici in cemento

Nella **radiazione naturale di fondo** terrestre, i principali radionuclidi sono **potassio, uranio e torio** e loro prodotti di decadimento, alcuni dei quali, come il **radio** ed il **radon** sono intensamente radioattivi, ma sono presenti in basse concentrazioni. La maggior parte di queste sorgenti sono andate diminuendo, a causa del decadimento radioattivo dalla formazione della Terra, poiché non vi è alcuna quantità significativa attualmente presente sulla Terra. Pertanto, la presente attività da uranio-238 è solo la metà di quanto era in origine a causa della sua emivita di 4,5 miliardi di anni, mentre per il potassio-40 (emivita 1.250 milioni di anni) è solo circa l'8% della attività originale.

Inoltre, isotopi con emivita molto più breve e quindi più intensamente radioattivi non sono assenti dall'ambiente terrestre, a causa della loro naturale produzione.. Esempi di questi sono il radio-226 (prodotto di decadimento dell' uranio-238) ed il radon-222 (un prodotto di decadimento di radio-226).

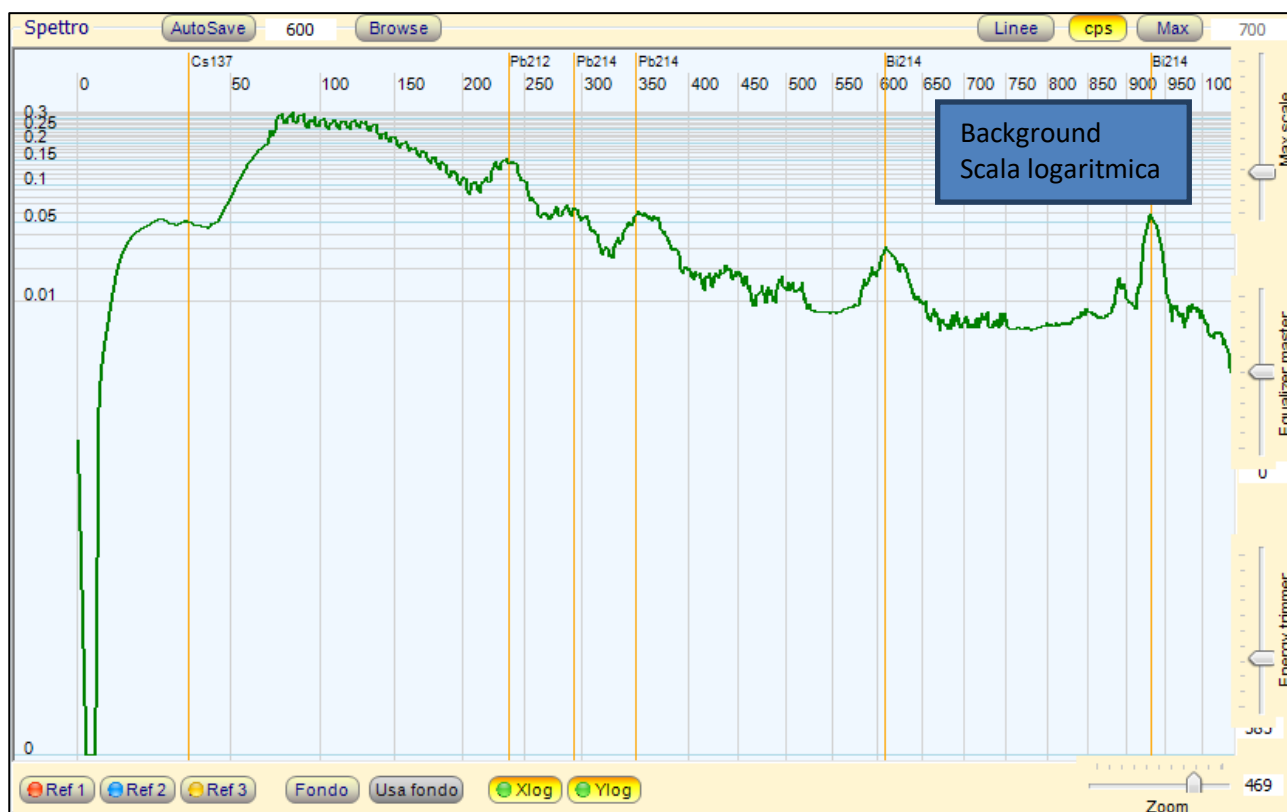
Torio e uranio subiscono principalmente decadimento alfa e beta, e non sono facilmente individuabili. Tuttavia, molti dei loro discendenti sono forti emettitori di raggi gamma.

Il torio-232 è rilevabile tramite un picco a 239 keV dal piombo-212, 511, 583 e 2.614 keV dal tallio-208, e 911 e 969 keV da attinio-228. L'uranio-238 è simile, ma manca il picco dell'attinio-228, che lo distingue dal torio-232.

L'uranio-238 si manifesta come i picchi di bismuto-214 a 609, 1120, e 1764 keV. Il potassio-40 è rilevabile direttamente attraverso il suo picco 1.461 keV gamma.

La maggior parte della **radiazione naturale di fondo atmosferica** è causato da **radon** e dei suoi prodotti di decadimento. Lo spettro gamma mostra picchi evidenti a **609, 1120, e 1764 keV, appartenente al bismuto-214, un prodotto di decadimento del radon**. Lo sfondo atmosferico varia notevolmente con la direzione del vento e le condizioni meteorologiche. Il radon può anche essere rilasciato da terra a raffiche e poi formare "nuvole di radon" in grado di viaggiare per decine di chilometri.

La **radiazione cosmica** a livello del mare di solito si manifesta con un picco a **511 keV** dovuto alla annichilazione di positroni creati da reazioni nucleari di particelle ad alta energia e raggi gamma. L'intensità del fondo cosmico a raggi aumenta rapidamente con l'altitudine, ed a pochi chilometri sopra il livello del mare i raggi cosmici dominano lo spettro su altre fonti naturali. A quote più elevate c'è anche il contributo dello spettro bremsstrahlung continuo.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu

Uranio



Uranio è un elemento chimico con simbolo **U** e numero atomico 92. È un metallo bianco-argenteo nella serie degli attinidi della tavola periodica. Un atomo di uranio ha 92 protoni e 92 elettroni, di cui 6 elettroni di valenza. L'uranio è debolmente radioattivo, perché tutti i suoi isotopi sono instabili (con emivita dei 6 isotopi noti, dall'uranio-233 all'uranio-238, che variano tra i 69 anni e 4,5 miliardi di anni). Gli isotopi più comuni dell'uranio sono **uranio-238** (che ha 146 neutroni e rappresenta quasi il 99,3% dell'uranio presente in natura) e **uranio-235** (che ha 143 neutroni, pari al 0,7% dell'elemento naturale). L'uranio è il secondo elemento con più alto peso atomico degli elementi primordiali, più leggero solo del plutonio. La sua densità è circa il 70% superiore a quella del piombo, ma leggermente

inferiore a quello di oro o di tungsteno. È naturalmente presente in basse concentrazioni di poche parti per milione nel suolo, roccia e acqua, ed è commercialmente estratto da minerali ricchi di uranio, come l'uraninite.

In natura, l'uranio si trova come **uranio-238** (99,2739-99,2752%), **uranio-235** (0,7198-0,7202%), e una piccola quantità di **uranio-234** (0,0050-0,0059%). L'Uranio decade lentamente emettendo una particella alfa. L'emivita dell'uranio-238 è di circa 4,47 miliardi di anni e quella dell'uranio-235 è 704,000,000 anni, rendendoli utili nella determinazione dell'età della Terra.

uranio-238

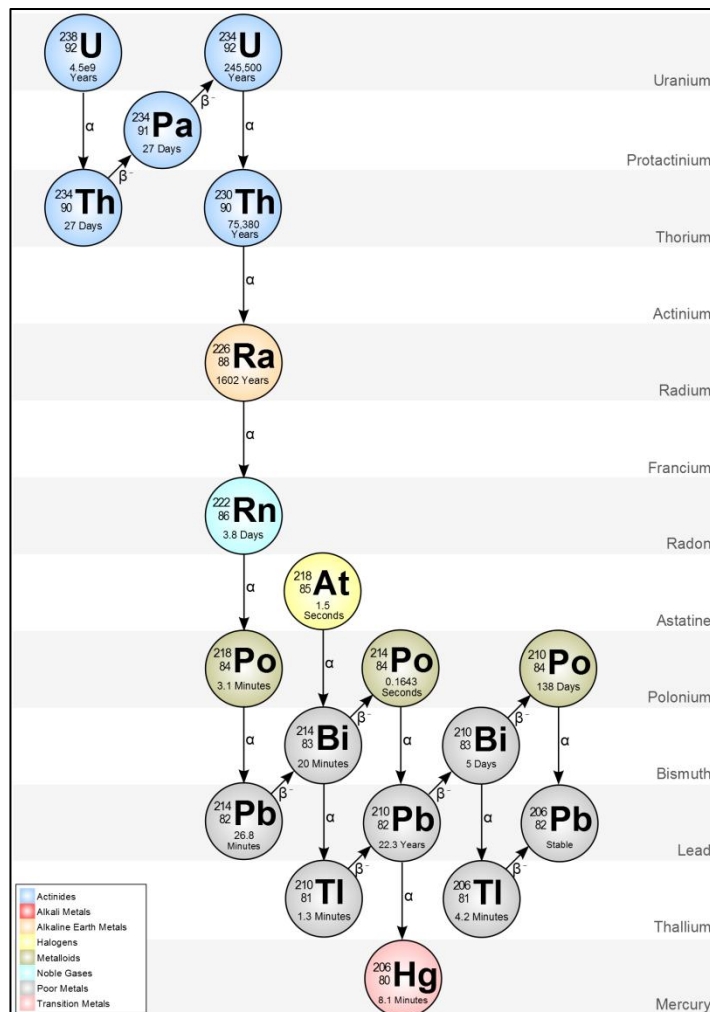
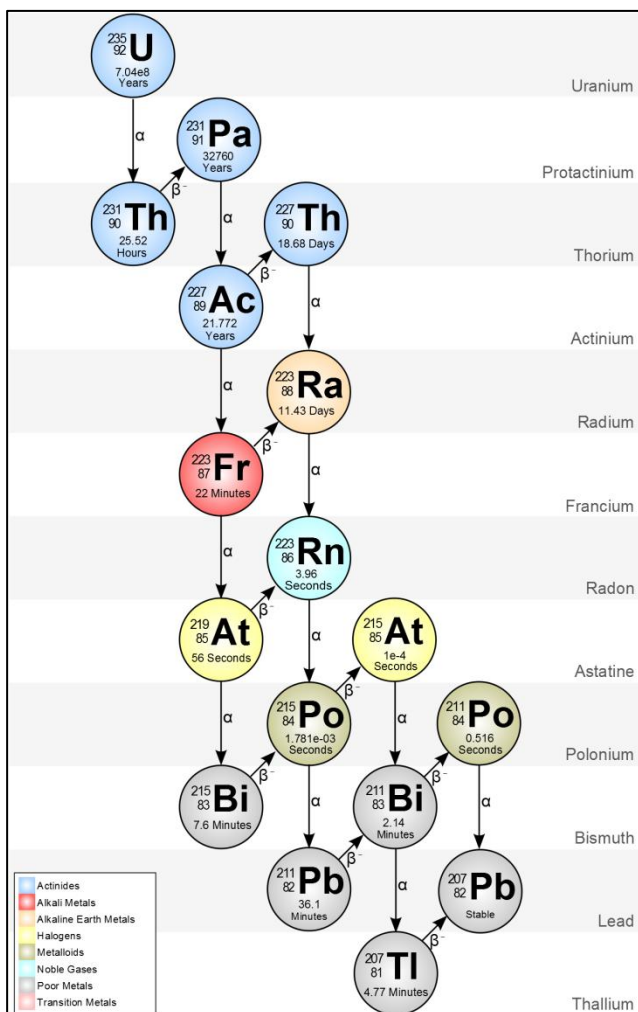
Uranio-238 è l'isotopo più stabile dell'uranio, con una emivita di circa 4.468×10^9 anni, circa l'età della Terra. Uranio-235 ha una emivita di circa $7,13 \times 10^8$ anni e **uranio-234** ha una emivita di circa $2,48 \times 10^5$ anni. Per l'uranio naturale, circa il 49% della sua radiazione alfa è emessa da ciascuno degli atomi di U-238, ed il 49% dalle emissioni di U-234 (dato che quest'ultimo è formato dal primo) e circa il 2,0% dal U-235. Quando la Terra era giovane, probabilmente circa un quinto del suo uranio era uranio-235, ma la percentuale di U-234 era probabilmente molto inferiore a questo. Uranio-238 è di solito un emettitore α (occasionalmente, subisce fissione spontanea), decade attraverso la "Serie uranio" di decadimento nucleare, che ha 18 membri, ciascuno dei quali alla fine decade in piombo-206, attraverso diversi percorsi di decadimento.

Uranio-238 non è fissile, ma è un isotopo fertile, perché dopo l'attivazione neutronica può produrre il plutonio-239, un isotopo fissile. Infatti, il nucleo U-238 può assorbire un neutrone per produrre l'isotopo radioattivo dell'uranio-239. U-239 decade per emissione beta in nettunio-239, anch'esso un beta-emettitore, che decade a sua volta, in pochi giorni in plutonio-239. Pu-239 è stato usato come materiale fissile nella prima bomba atomica fatta esplodere nel "Trinity test", il 15 luglio 1945 in New Mexico.

uranio-235

Uranio-235 è un isotopo dell'uranio che costituisce circa lo 0,72% dell'uranio naturale. Diversamente dall'isotopo predominante uranio-238, è fissile, cioè, in grado di sostenere una reazione a catena di fissione. È l'unico isotopo fissile che è anche un nuclide primordiale presente in quantità significativa in natura.

La serie di decadimento di U-235, che si chiama la "Serie Attinio", ha 15 membri, tutti alla fine decadono in piombo-207. I tassi di decadimento in queste serie di decadimento rende il confronto dei rapporti tra genitori e discendenti un utile metodo di datazione radiometrica.



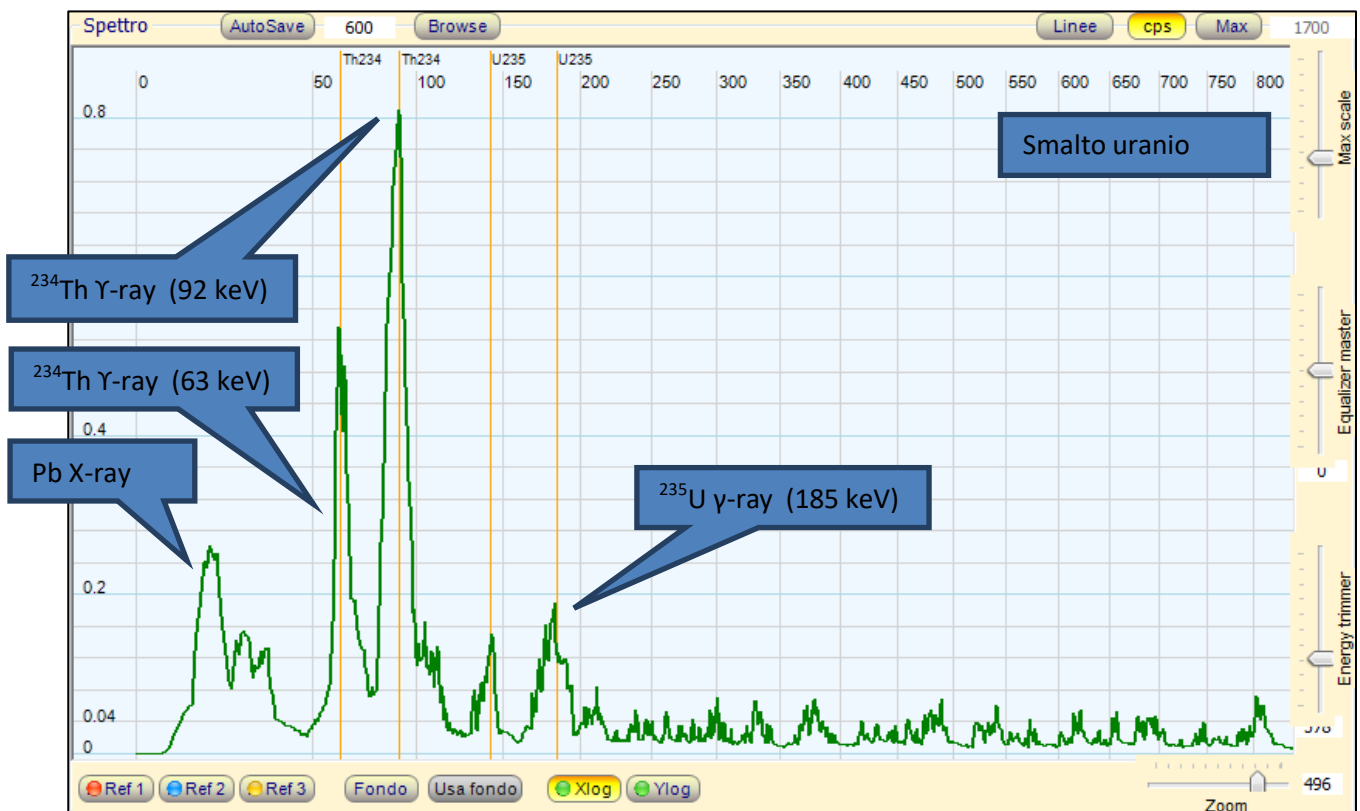
Catena Decadimento uranio-238

La catena di decadimento $4n + 2$ dell'uranio-238 si chiama "serie dell'uranio" o "cascata dell'uranio". Inizia naturalmente con uranio-238, questa serie comprende i seguenti elementi: astato, bismuto, piombo, polonio, protoattinio, radio, radon, tallio, e torio. Tutti sono presenti, almeno transitoriamente, in qualsiasi campione contenente uranio naturale, sia in metallo, composto, o minerale. La serie termina con piombo-206. L'energia totale rilasciata dal uranio-238 al piombo-206, compresa l'energia persa per neutrini, è 51.7 MeV.

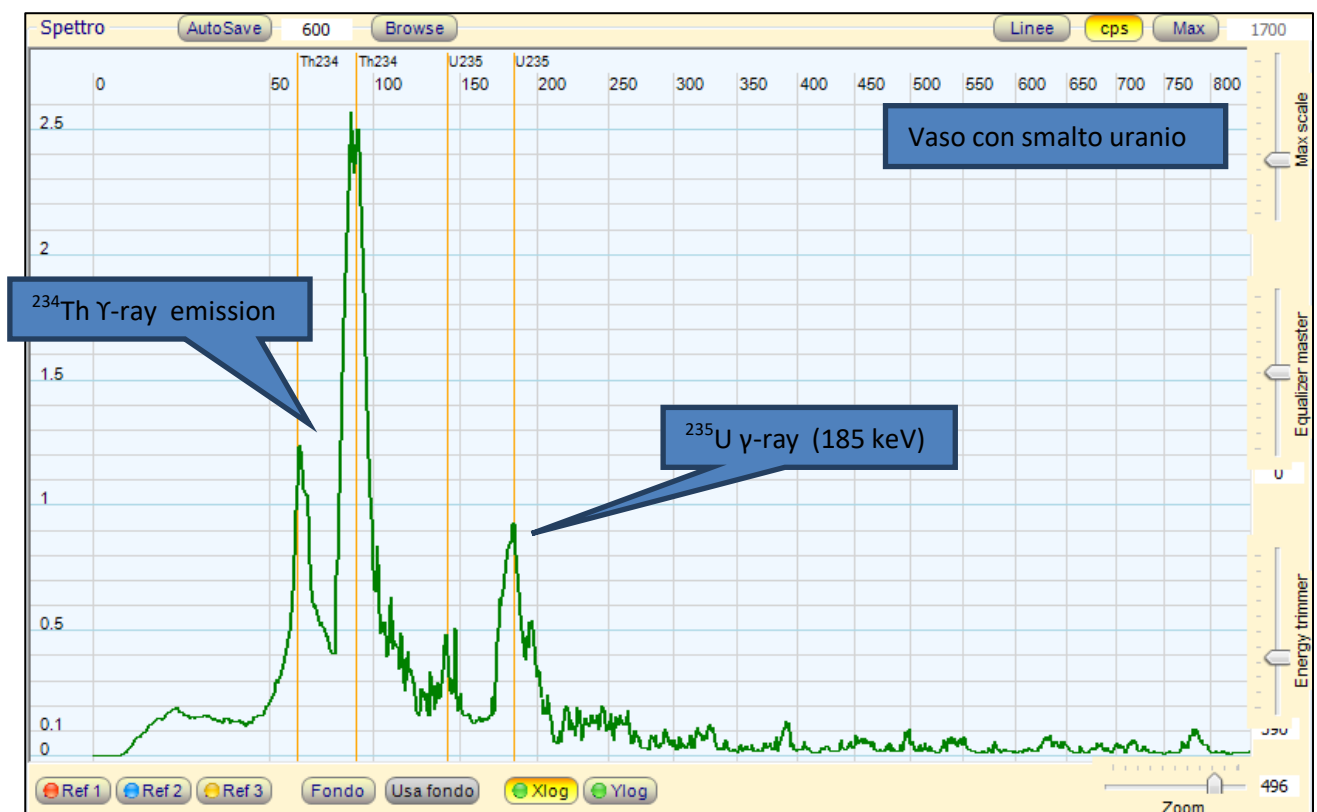
Catena Decadimento uranio-235

La catena $4n + 3$ dell'uranio-235 viene comunemente chiamata "serie attinio" o "cascata di plutonio". Cominciando con l'isotopo presente in natura uranio-235, questa serie di decadimento comprende i seguenti elementi: Attinio, astato, bismuto, francio, piombo, polonio, protoattinio, radio, radon, tallio, e torio. Tutti sono presenti, almeno transitoriamente, in qualsiasi campione contenente uranio-235, sia in metallo, composto, minerale o minerale. Questa serie termina con l'isotopo stabile di piombo-207.

Ossido di uranio (Smalto all'uranio)

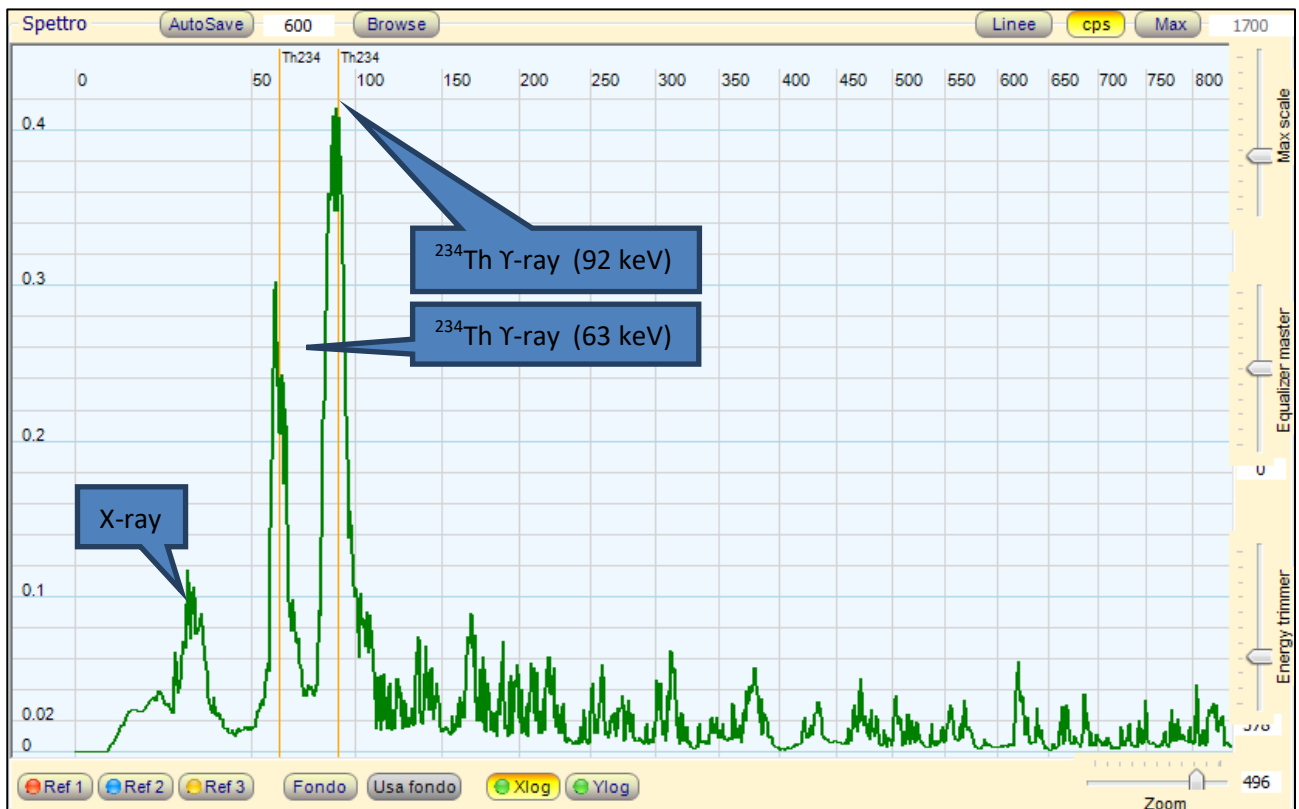


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – non schermato

Vetro all'uranio ("Vaseline Glass")



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

L'uranio contenuto nello smalto (pagina precedente) e nel vetro è stato raffinato, pertanto non contiene tutti i prodotti del decadimento a partire da radio fino al piombo e bismuto. Per questo motivo è presente soltanto il primo isotopo del decadimento : il torio-234.

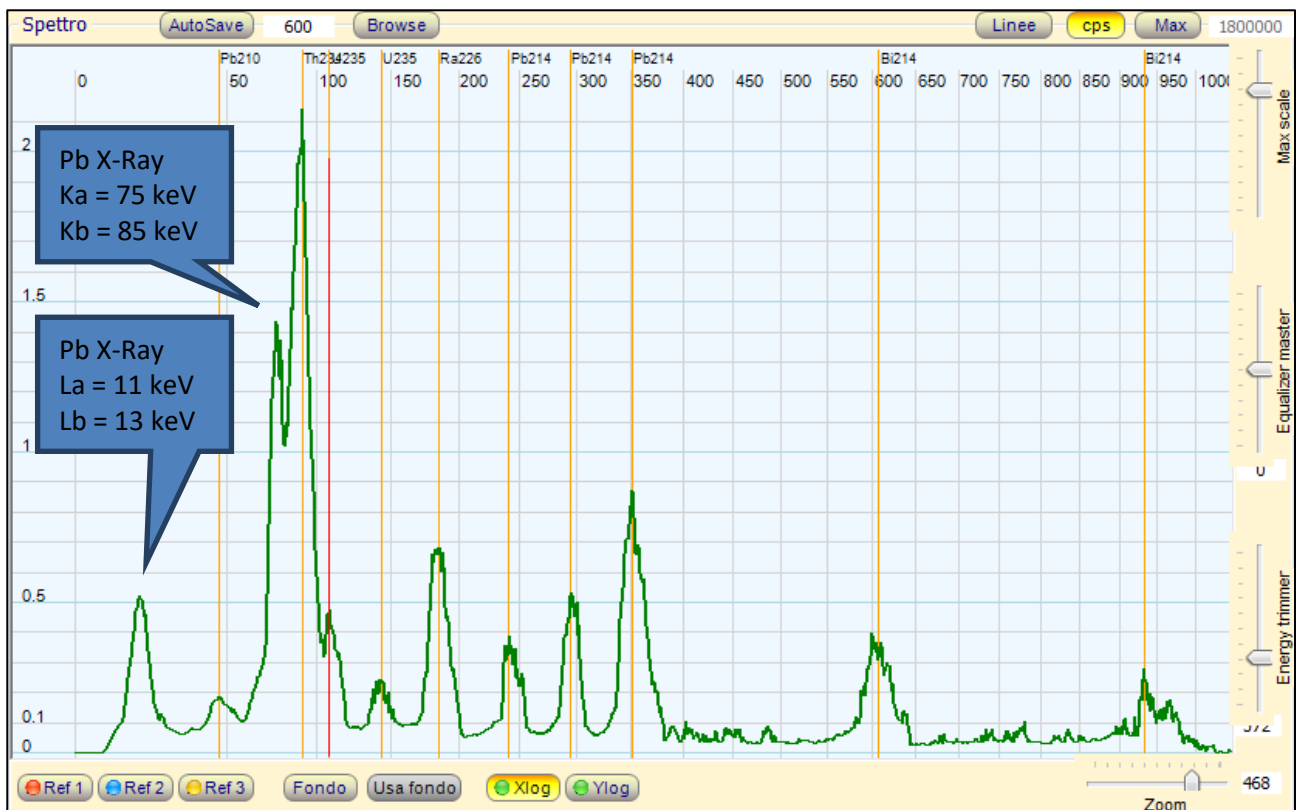
Da notare negli spettri dello smalto all'uranio la presenza dei foto-picchi dell'isotopo uranio-235. Segno che per questi manufatti è stato utilizzato uranio naturale raffinato e non uranio impoverito. Possiamo quindi dedurre che il periodo di fabbricazione è probabilmente antecedente alla seconda guerra mondiale dato che successivamente, per questo genere di prodotti, è stato utilizzato prevalentemente uranio impoverito.

Autunite (minerale radioattivo, fosfato idrato di uranio e calcio)



La **autunite** è un minerale radioattivo, un fosfato idrato di uranio e calcio, appartenente al gruppo omonimo.

Il nome deriva dalla città di Autun, in Francia. Ha luminescenza giallo-verdastra intensa. È fortemente radioattiva. Solubile in acido nitrico colora la fiamma di rosso arancio; al saggio col borace da reazione di uranio. Va pulito con acqua distillata ed è un minerale molto simile alla torbernite da cui differisce per il comportamento chimico. Oltre ad essere un minerale utile per l'estrazione di uranio, per la sua forte luminescenza viene proprio usato nelle miniere per lampade atte a farne individuare altre vene e cristalli.



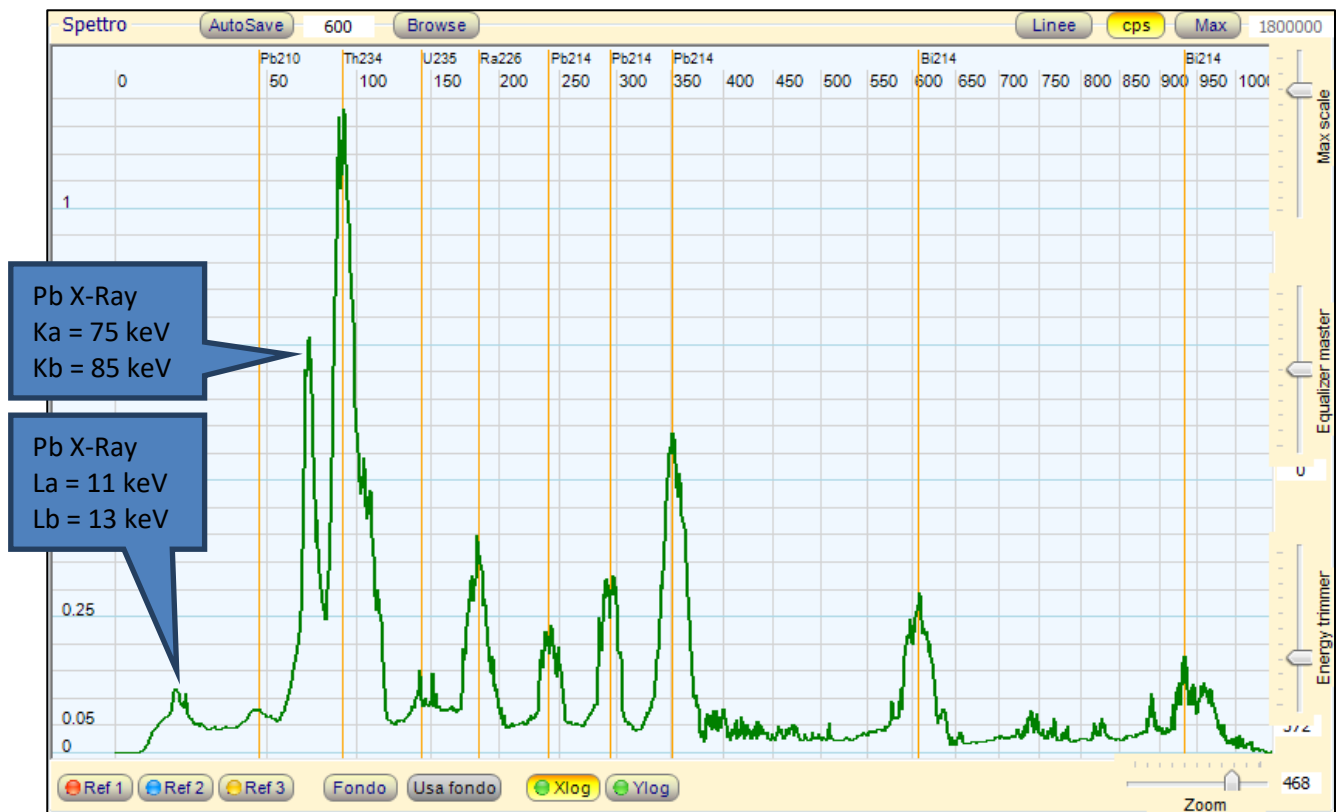
Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

Uraninite (minerale radioattivo, ossido di uranio)



L'uraninite o **pechblenda** (da pitchblende = blenda picea - un termine usato dai minatori tedeschi) è un minerale fortemente radioattivo, ed è una delle principali fonti naturali di uranio.

Da un punto di vista chimico, l'uraninite e la pechblenda sono costituite da un reticolo di UO_2 con una massa amorfa costituita da ossidi ricchi di ossigeno. Le dimensioni del reticolo sono tanto più piccole quanto più è alto il tasso di UO_2 .

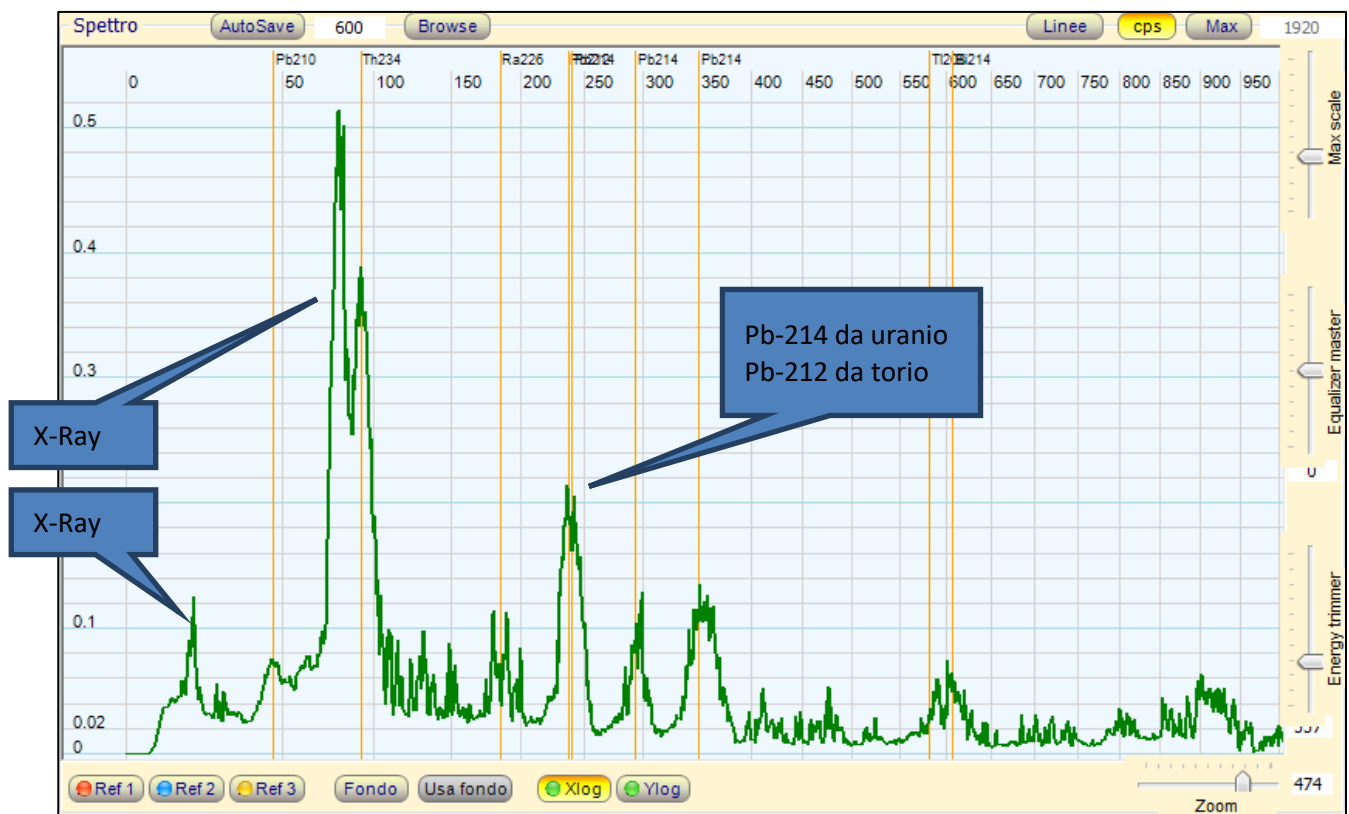


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

Polycrase (minerale radioattivo, contenente uranio e torio)

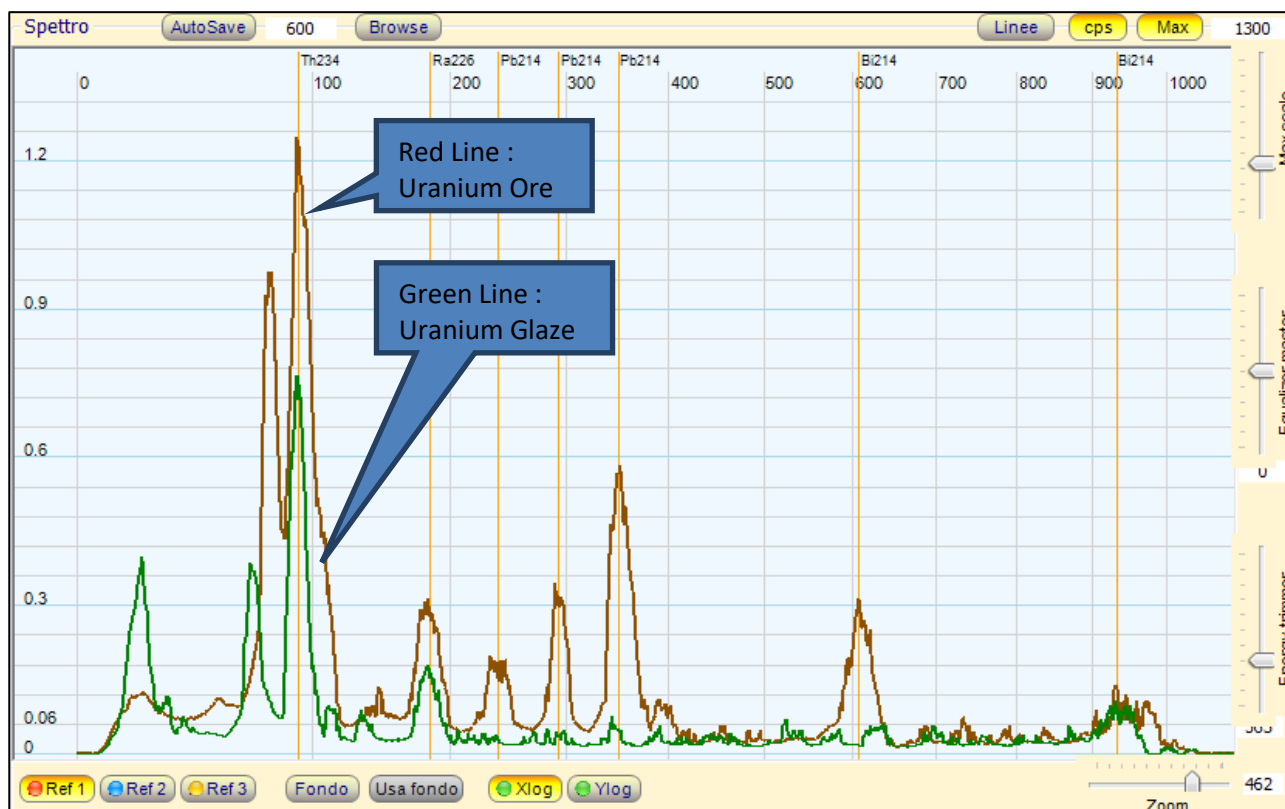


Il **polycrase-(Y)** è un minerale appartenente al gruppo della columbite-euxenite.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

Decadimento dell'uranio-238



Il decadimento dell'uranio 238 si può dividere in due parti :

- U-238 -> .. -> Ra-226 : l'uranio-238 ha una emivita di milioni di anni
- Ra-226 -> .. -> Pb-206 : il radi -226 ha una emivita di 1600 anni

Nei minerali di uranio sono presenti tutti gli isotopi della catena di decadimento perché nel tempo si è prodotto un equilibrio e quindi l'attività è la medesima per tutti gli isotopi.

In oggetti "recenti" prodotti dall'attività umana a partire da uranio purificato invece non sono presenti tutti gli isotopi dato che il tempo è stato insufficiente per raggiungere l'equilibrio tra gli isotopi, in particolare sono assenti gli ultimi isotopi della progenie: Ra-226, Pb-214 e Bi-214.

Questa caratteristica viene resa evidente negli spettri mostrati nella immagine sopra.

La linea rossa corrisponde allo spettro gamma del minerale di uranio uraninite, nel quale sono presenti i fotopicchi gamma di tutti gli isotopi discendenti dell'uranio-238. Sono presenti in particolare gli isotopi Pb-214 e Bi-214 che discendono dal radio Ra-226.

La linea verde corrisponde allo spettro gamma dello smalto all'uranio (fiesta Ware) nel quale sono evidenti i fotopicchi del torio-234 e dell'uranio-235, mentre sono praticamente assenti i fotopicchi dei discendenti del radio Ra-226 : piombo 214 e bismuto-214.

Il fotopicco che si trova in corrispondenza del Ra-226 nello spettro gamma dello smalto all'uranio è relativo all'isotopo U-235.

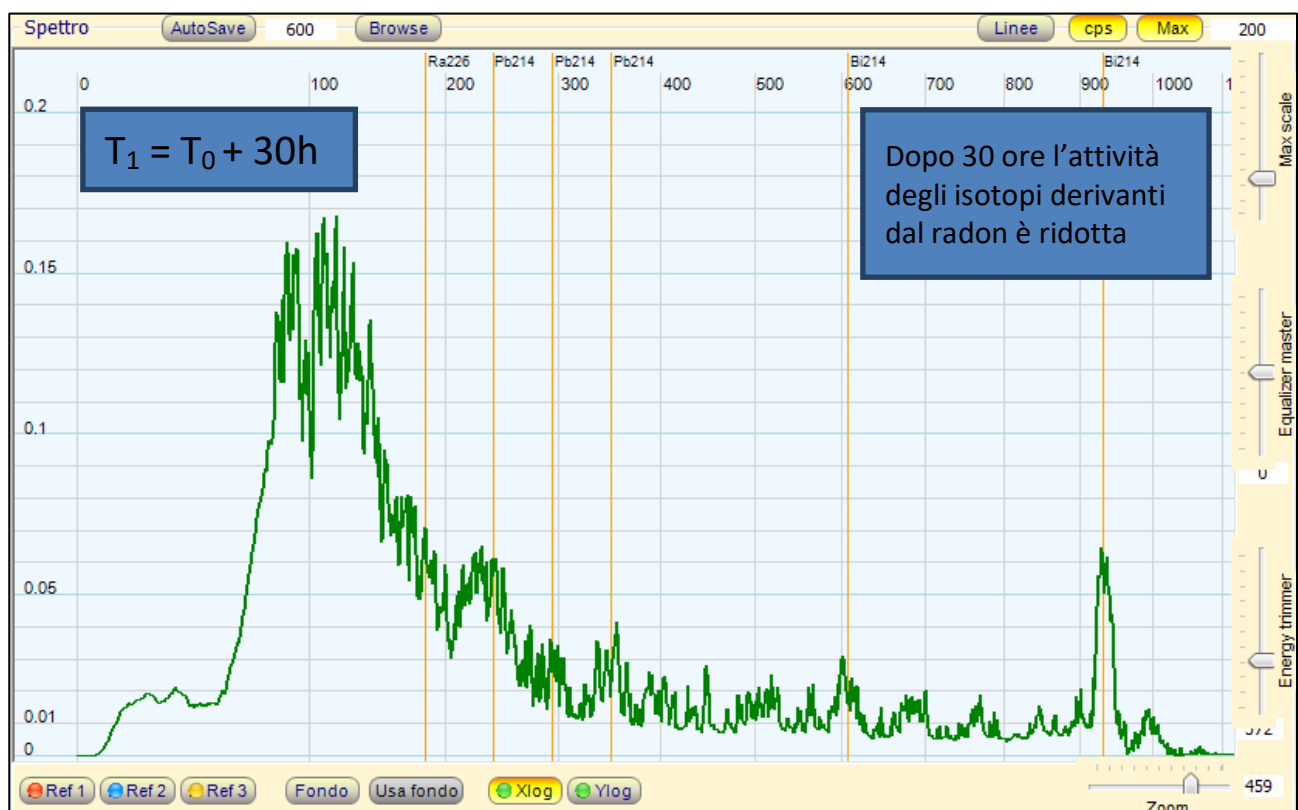
Acqua Piovana

Nella pioggia si trovano piccole quantità di sostanze radioattive. La principale sorgente di radioattività è costituita dalla progenie del radon e quindi Pb-214 e Bi-214 che vengono inglobati nelle gocce di pioggia e trascinati al suolo. Per facilitare la misurazione è preferibile concentrare il contenuto di queste particelle mediante ebollizione della pioggia raccolta oppure mediante filtrazione. In questo ultimo caso le particelle radioattive vengono trattenute dal filtro.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

Decadimento del Radon in acqua piovana

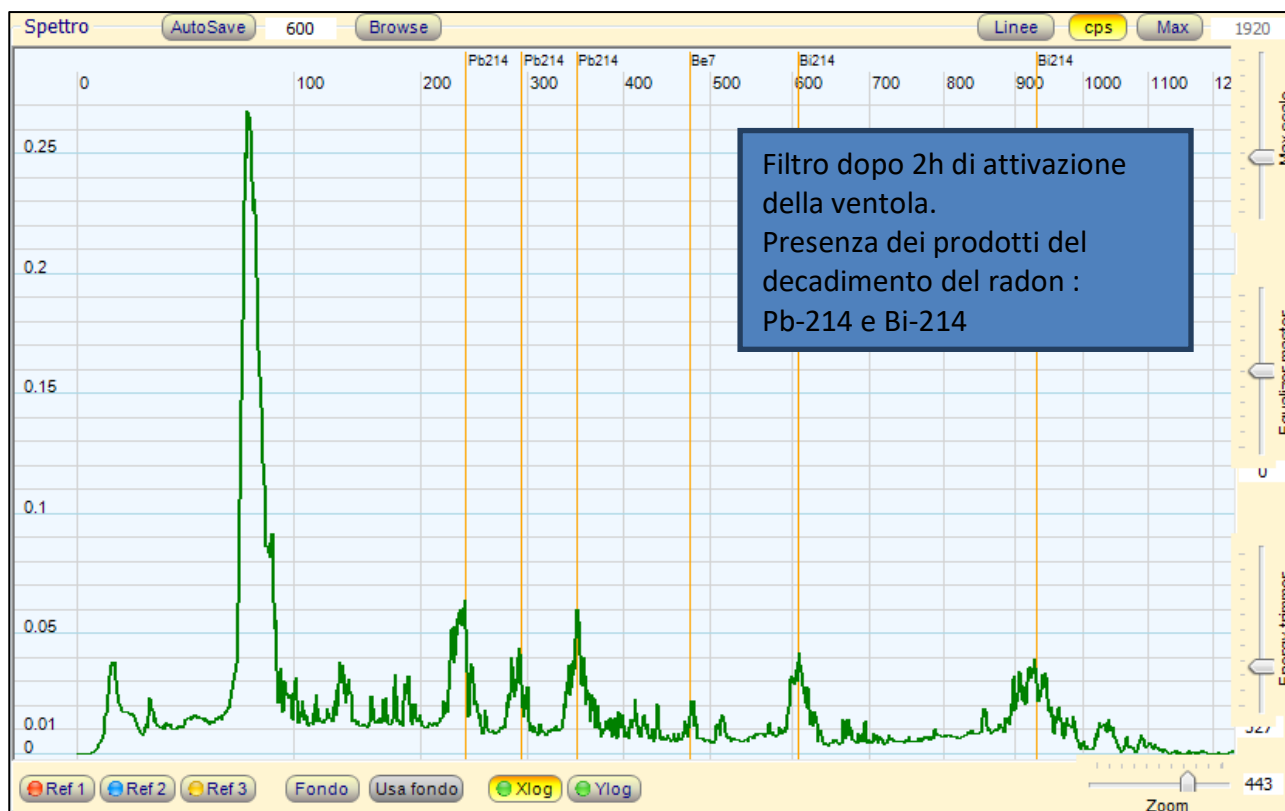


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

Filtraggio particolato presente in ambienti chiusi



In sospensione nell'aria si trovano piccole quantità di sostanze radioattive. La principale sorgente di radioattività è costituita dalla progenie del radon e quindi Pb-214 e Bi-214. Queste particelle si trovano soprattutto nell'aria presente negli ambienti chiusi. Per effettuare un campionamento si è utilizzata una ventola alimentata a 12 V, inserita in un cilindro metallico la cui apertura è stata coperta da una carta da filtro. Attivando la ventola per un paio di ore al chiuso è possibile raccogliere particelle radioattive in quantità misurabile.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermo

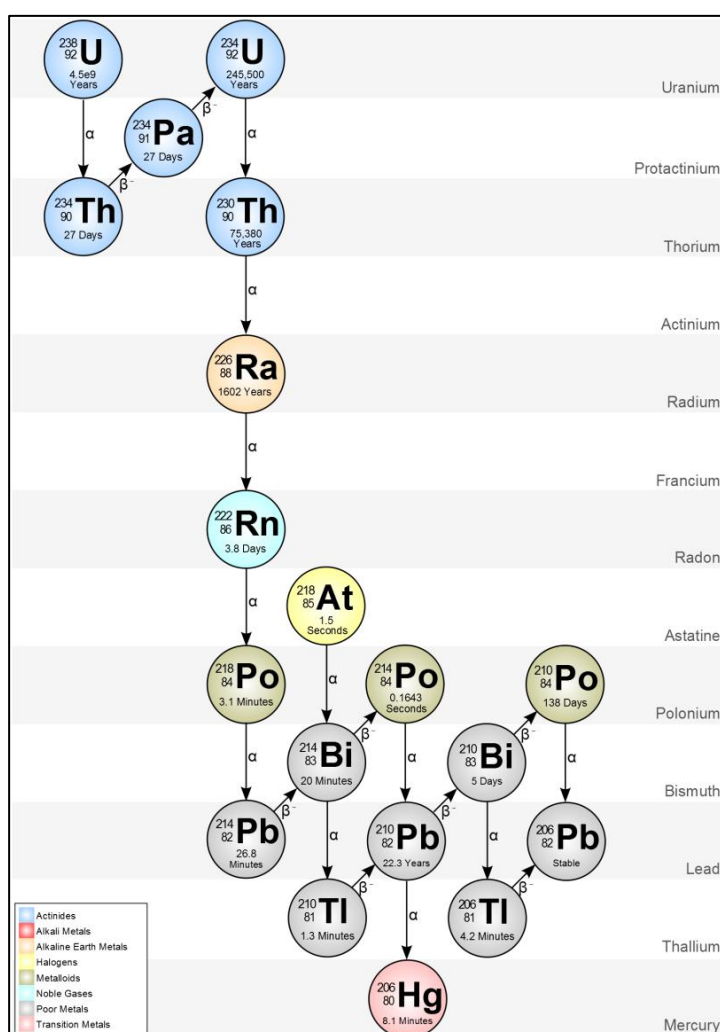
Filtraggio particolato presente all'esterno

Radio (^{226}Ra)



Il **radio** è un elemento chimico con simbolo **Ra** e numero atomico 88. È il sesto elemento nel gruppo 2 della tavola periodica, noto anche come i metalli alcalino-terrosi. Il colore di radio puro è quasi bianco puro, ma si ossida facilmente se esposto all'aria e diventa di colore nero. Tutti gli isotopi del radio sono altamente radioattivi, l'isotopo più stabile è il radio-226, che ha un tempo di dimezzamento di 1600 anni e decade in radon. Quando il radio decade emette radiazioni ionizzanti che possono eccitare sostanze chimiche fluorescenti e causare la radio luminescenza.

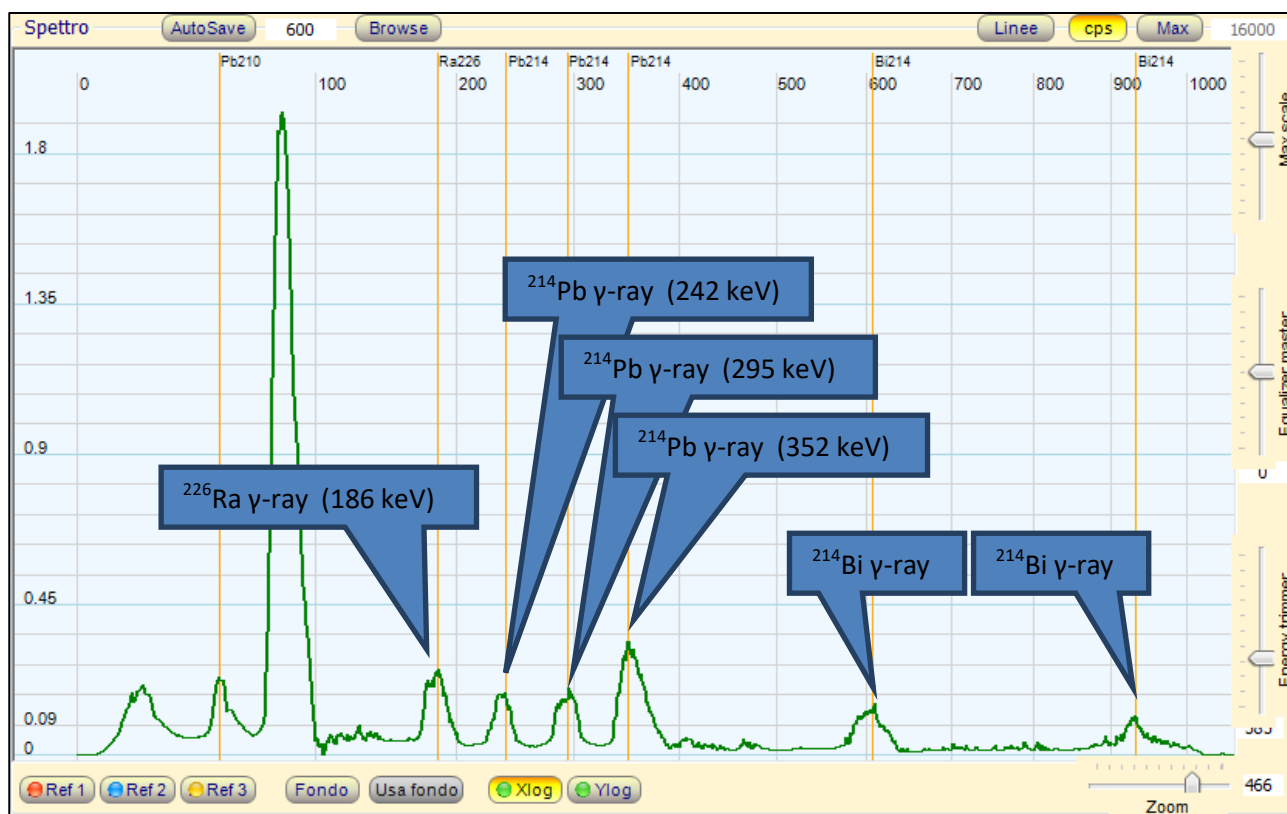
In natura, il radio è contenuto in tracce nell'uranio e nel torio, circa un settimo di un grammo per tonnellata di uraninite.



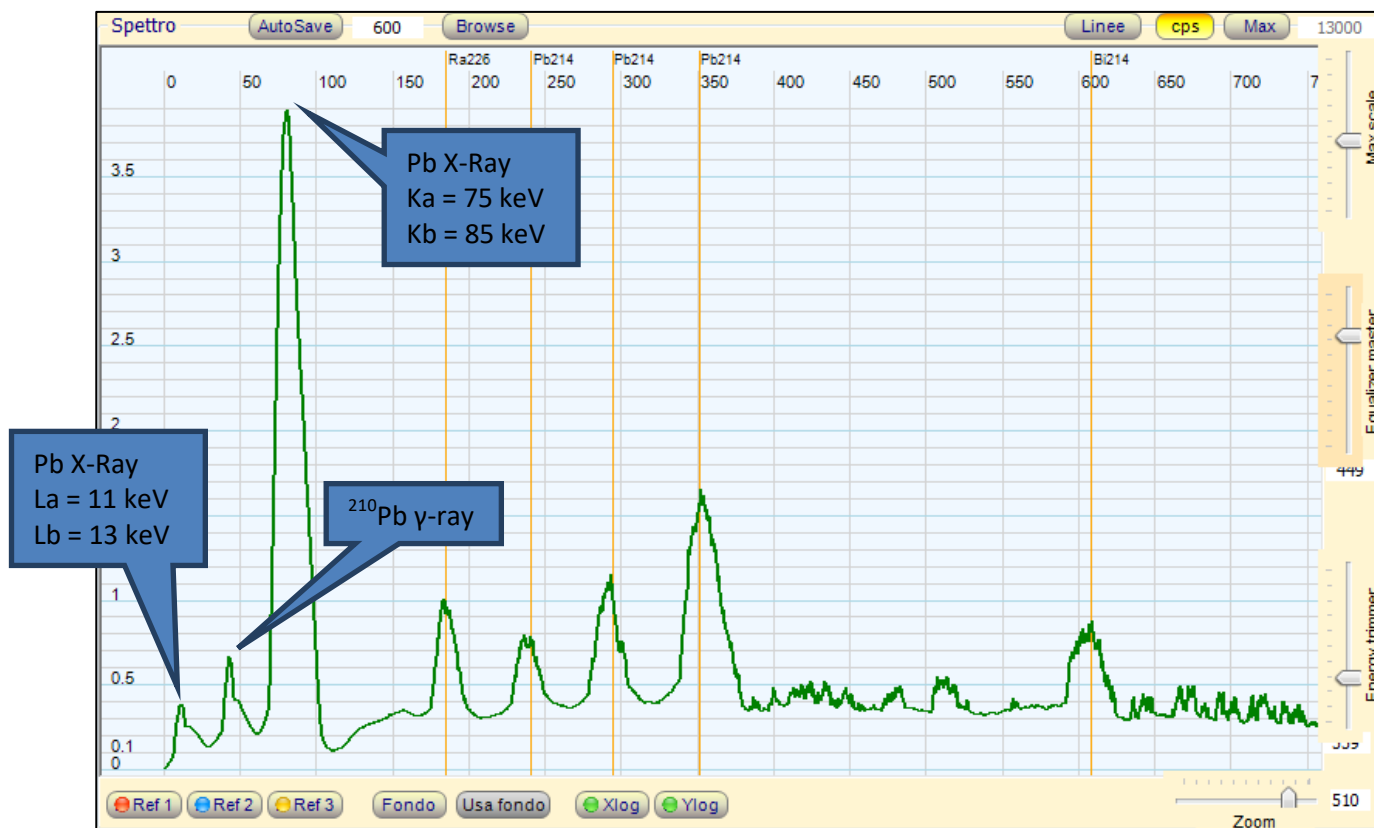
Il radio ha 33 isotopi noti, con i numeri di massa 202-234: tutti sono radioattivi. Quattro di questi - Ra-223 (emivita 11,4 giorni), Ra-224 (3,64 giorni), Ra-226 (1600 anni), e Ra-228 (5,75 anni) - si trovano naturalmente nelle catene di decadimento di torio-232, uranio-235 e uranio-238 (Ra-223 uranio-235, Ra-226 uranio-238, e gli altri due dalle torio-232). Questi isotopi tuttavia hanno emivita troppo breve per essere radionuclidi primordiali, ed esistono solo in natura da queste catene di decadimento. Insieme al Ra-225 artificiale (15 d), questi sono i cinque isotopi più stabili di radio. Tutti gli altri isotopi di radio noti hanno emivita inferiore a due ore, e la maggior parte hanno emivita inferiore al minuto. Sono stati segnalati almeno 12 isomeri nucleari; il più stabile di questi è radio-205m, con un'emivita compresa tra 130 e 230 millisecondi.

Ra-226 è l'isotopo più stabile del radio ed è l'ultimo isotopo nella $(4n + 2)$ catena di decadimento dell'uranio-238 con un tempo di dimezzamento di più di un secolo. Il suo immediato prodotto del decadimento radioattivo è il radon, denso gas nobile, che è responsabile di inquinamento ambientale. È 2,7 milioni di volte più radioattivo rispetto

alla stessa quantità molare di uranio naturale (principalmente uranio-238), a causa della sua proporzionalmente più breve emivita.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato



Sonda a Scintillazione Rap47 – cristallo CsI(Tl) 25.4 x 1.0mm - schermato

Torio – Reticella per lampade a gas (^{232}Th)

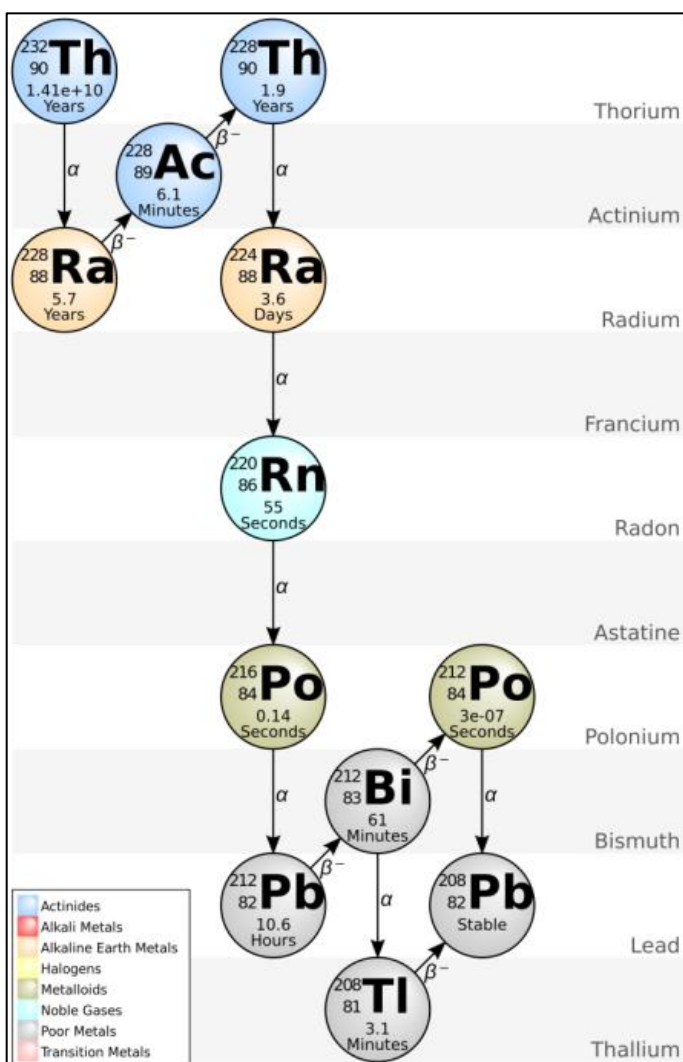


Il **torio** è un elemento chimico con simbolo **Th** e numero atomico 90. Un metallo radioattivo della serie degli attinidi, il torio è uno dei soli tre elementi radioattivi presenti ancora in quantità significative in natura come elemento primordiale (gli altri due sono di bismuto e uranio).

Un atomo di torio ha 90 protoni e quindi 90 elettroni, di cui quattro elettroni di valenza. Il torio metallico è argenteo e diventa nero se esposto all'aria. Il torio è debolmente radioattivo: tutti i suoi isotopi noti sono instabili, sei quelli naturali (torio-227, 228, 230, 231, 232, e 234) ed hanno emivita tra 25,52 ore e 14.050 milioni anni. Il torio-232, che dispone di 142 neutroni, è l'isotopo più stabile del torio e rappresenta quasi tutto il torio naturale, mentre gli altri cinque isotopi naturali si

trovano solo in tracce: decade molto lentamente attraverso decadimento alfa in radio-228, iniziando un decadimento chiamato la “serie torio” che termina al piombo-208. Il torio è stimato circa tre o quattro volte più abbondante dell'uranio nella crosta terrestre, ed è principalmente raffinato da sabbie di monazite e come un sottoprodotto di estrazione di metalli delle terre rare.

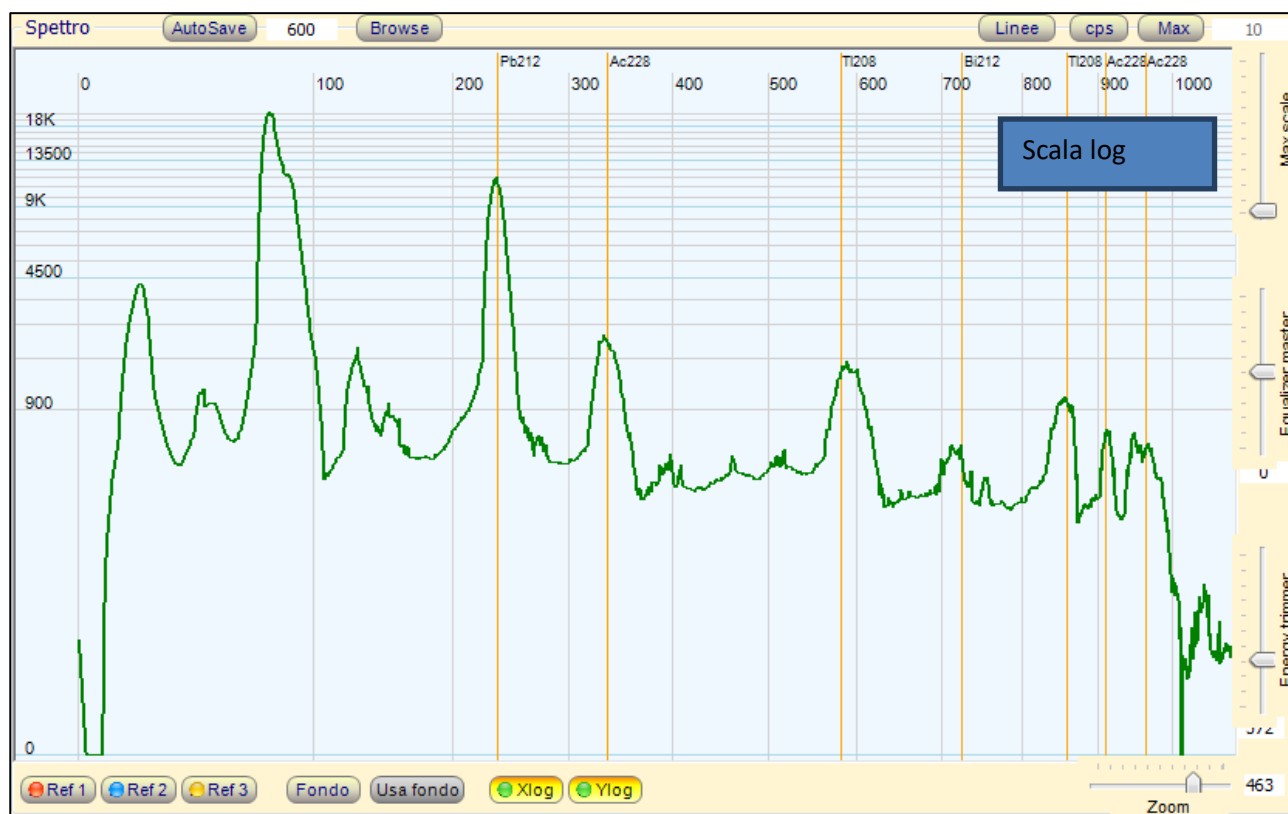
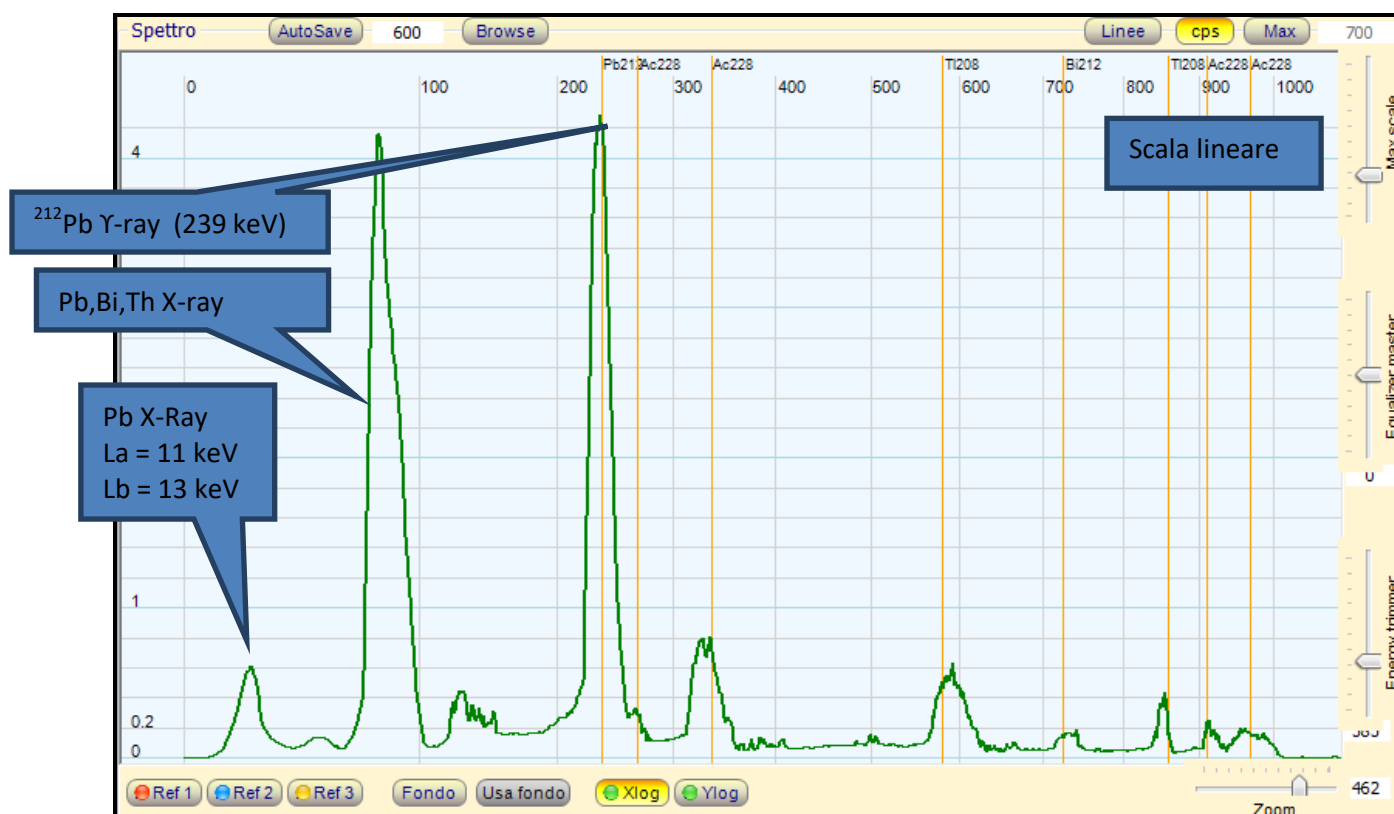
Catena Decadimento torio-232



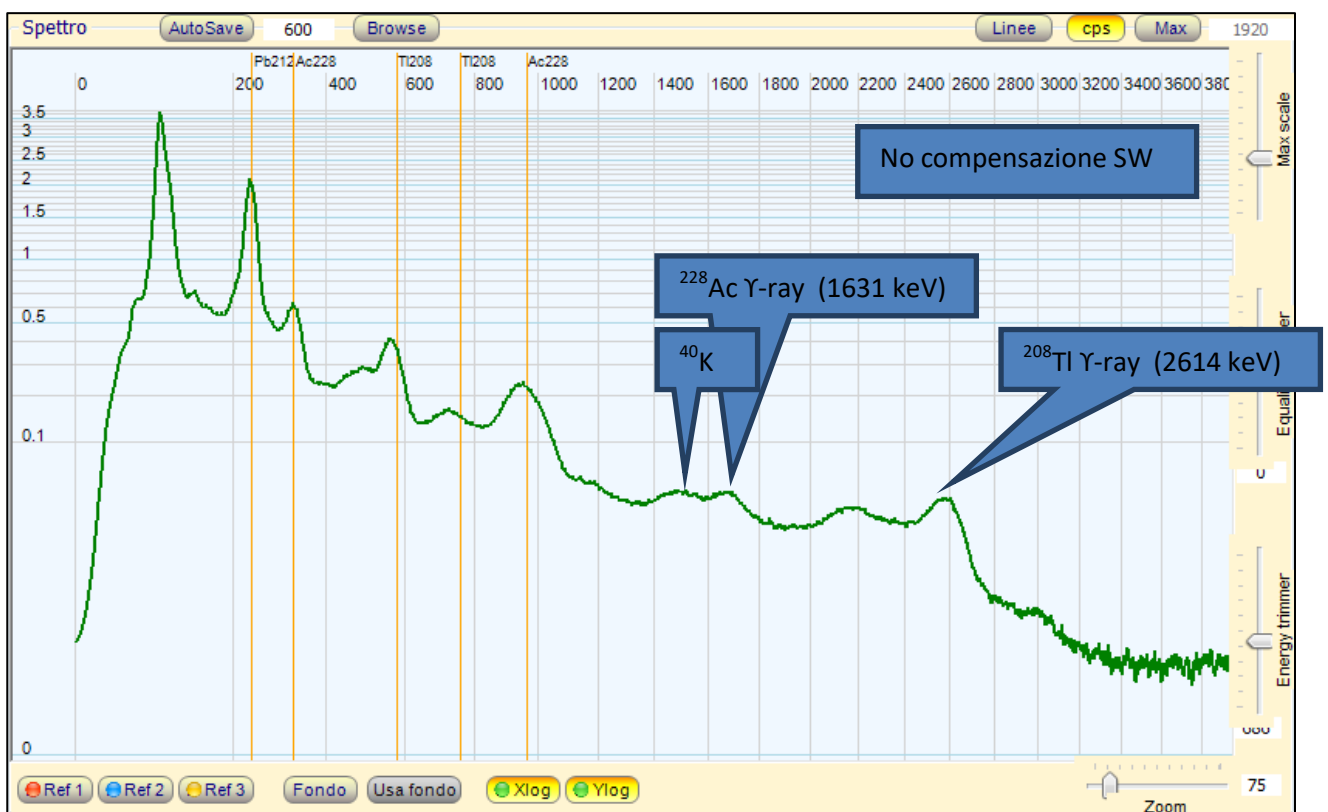
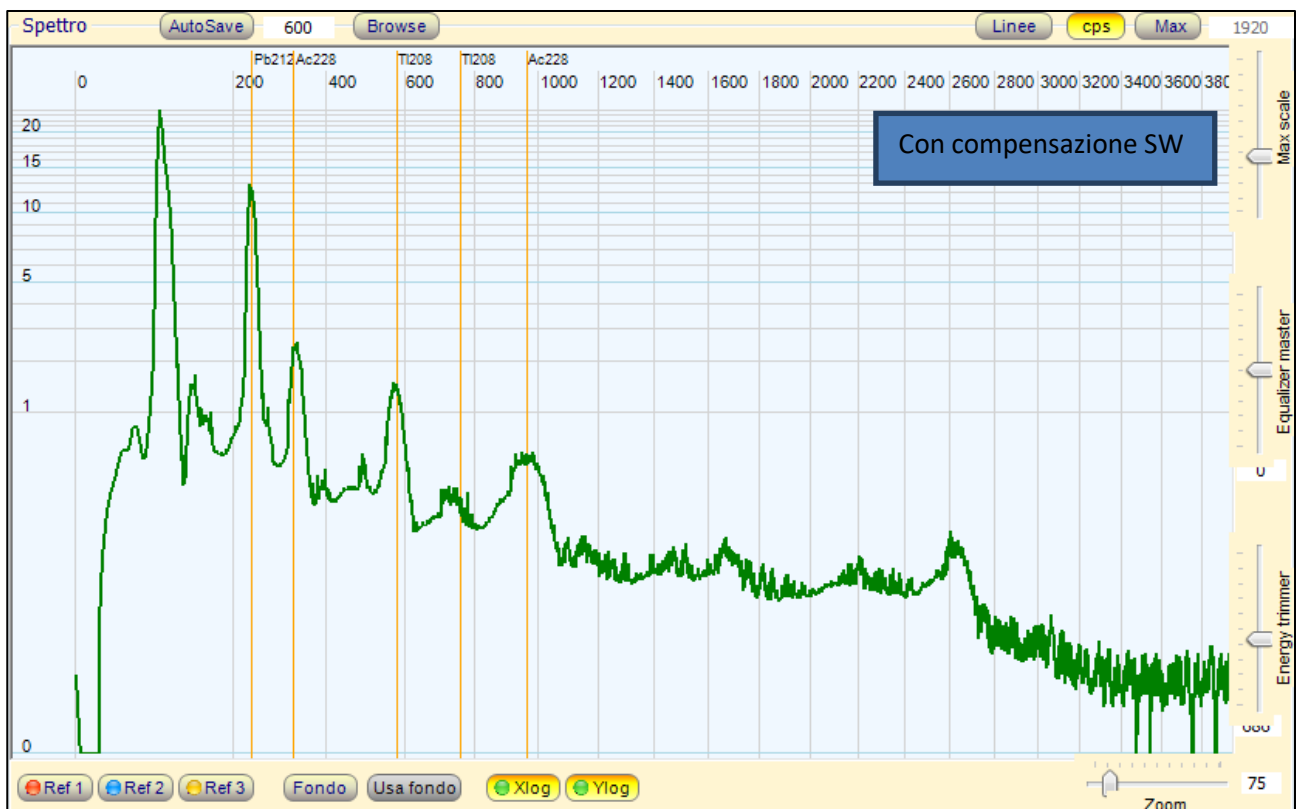
La catena 4n del **Th-232** viene comunemente chiamata "serie torio" o "cascata del torio".

A cominciare naturalmente con il **torio-232**, questa serie comprende i seguenti elementi: attinio, bismuto, piombo, polonio, radio e radon. Tutti sono presenti, almeno transitoriamente, in qualsiasi campione contenente torio naturale, sia in metallo, composto, o minerale. La serie termina con il piombo-208.

L'energia totale rilasciata dal torio-232 fino al piombo-208, compresa l'energia persa per neutrini, è 42,6 MeV.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato



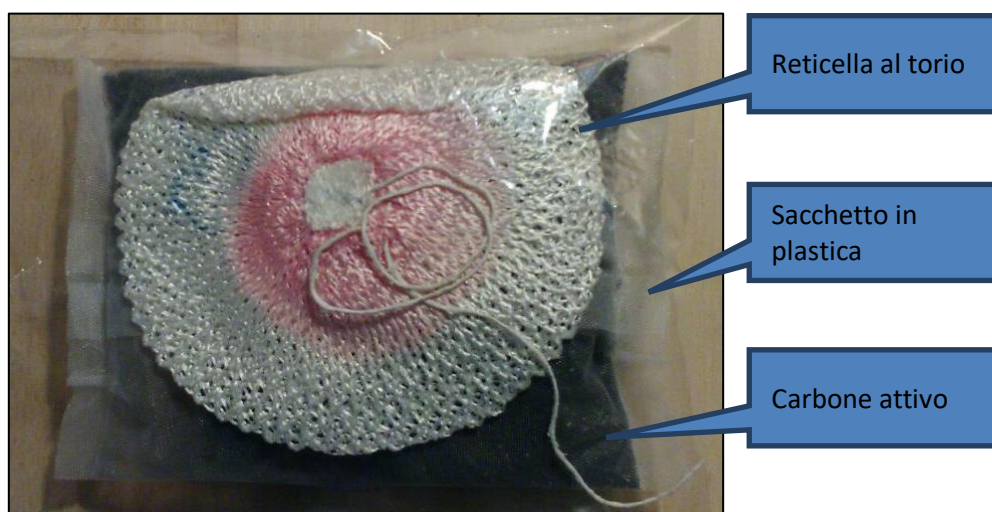
Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 63 x 63mm - schermato

Decadimento del "Thoron" (^{220}Rn)

"Thoron" è il nome che identifica l'isotopo del radon con peso atomico 220. Può risultare anch'esso dannoso per la salute umana in quanto, come il Rn-222 è un emettitore alfa e si presenta in stato di gas. Poiché il tempo di decadimento è di circa **55 secondi** si presuppone che la sua presenza nelle abitazioni sia mediamente minore rispetto al Rn-222 in quanto il contributo fornito dal suolo (principale sorgente del gas) viene notevolmente ridotto. In presenza però di rocce o materiali da costruzione che contengano elevati quantitativi di Torio si possono rilevare significativi accumuli di thoron.

Nella catena di decadimento del thoron si evidenzia l'isotopo **Pb-212**, con emivita di circa 10 ore, responsabile del principale foto picco gamma a 239 keV, caratteristico nello spettro gamma del torio, visibile ad esempio nello spettro gamma della classica reticella al torio.

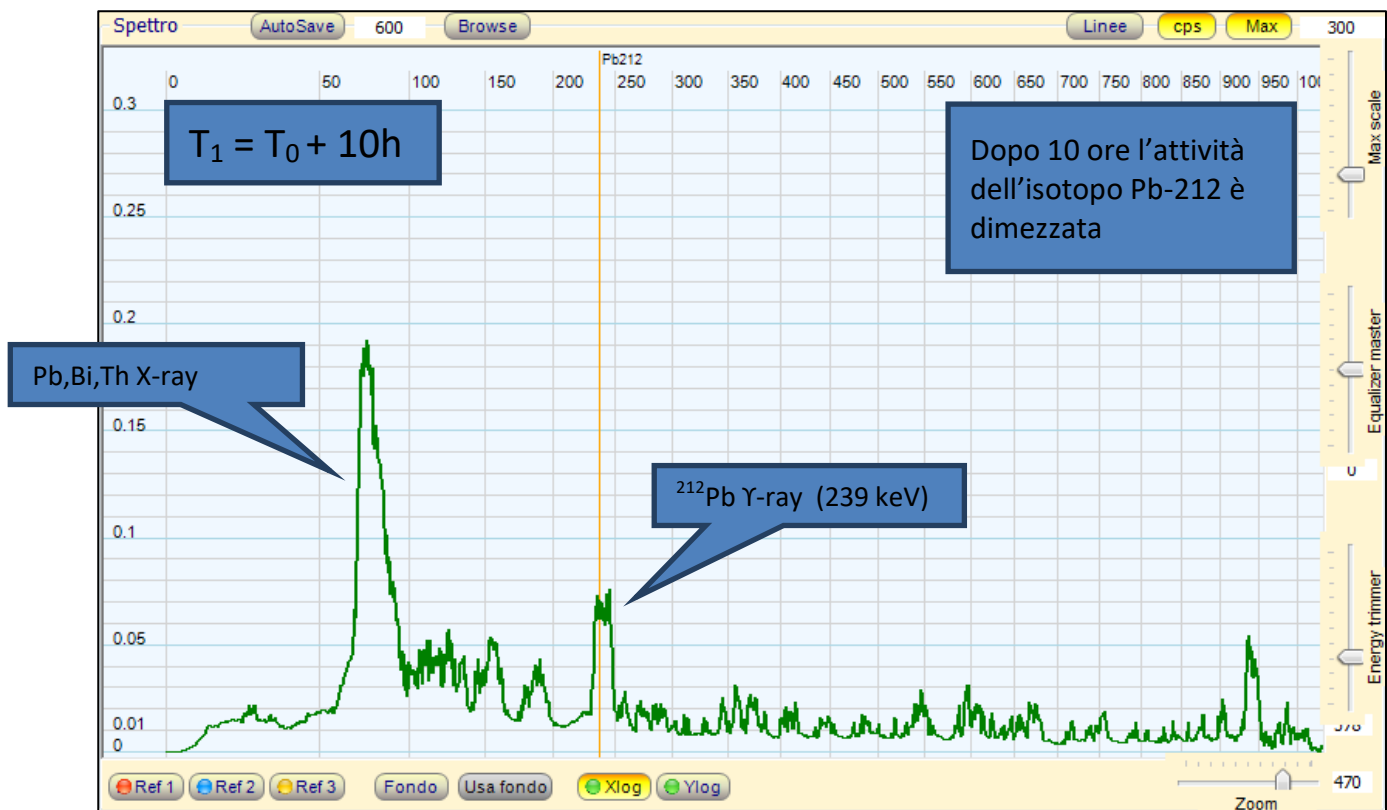
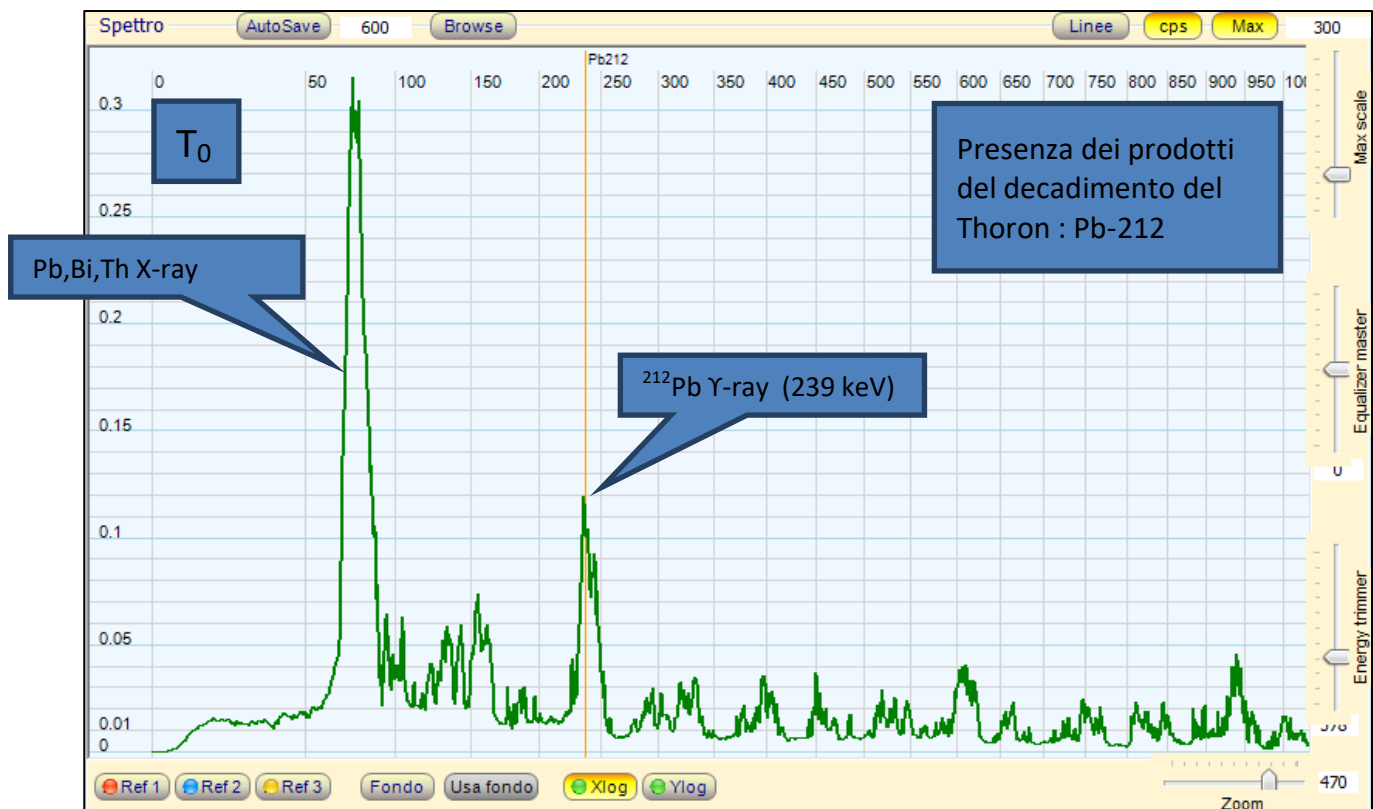
Gli altri isotopi hanno emivita più breve e foto picchi meno evidenti, i principali, evidenziabili nello spettro gamma, sono il Tl-208 ed il Bi-212. L'isotopo Ac-228 proviene direttamente dal torio e, nella catena di decadimento, viene generato prima del thoron.



Per effettuare la misurazione del decadimento del thoron abbiamo inserito in un sacchetto di plastica una reticella toriata insieme ad un sacchetto di carbone attivo, il sacchetto è stato posto in un luogo riscaldato per circa 24 ore. Durante questo periodo di tempo il thoron è fuoriuscito dalla reticella, anche grazie al calore, ed è stato assorbito dal carbone attivo. Il processo di decadimento del thoron si è quindi verificato anche all'interno del carbone attivo, producendo la sua progenie di isotopi.

Alla fine il carbone attivo è stato estratto dal sacchetto ed è stata fatta la misurazione del suo spettro gamma.

Come previsto si nota il principale picco del Pb-212, mentre gli altri fotopicchi sono praticamente assenti. Dopo un adeguato periodo di tempo, circa 10 ore, si vede come il picco del Pb-212 si è molto ridotto, proprio a causa del suo decadimento.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato
 Tempo di acquisizione 1000 sec

Monazite (minerale radioattivo contenente torio)



La **monazite** è un minerale fosfato di colore marrone-rossiccio, contenente metalli delle terre rare. Si presenta di solito in piccoli cristalli isolati. Ci sono in realtà almeno quattro diversi tipi di monazite, a seconda della composizione percentuale dei diversi elementi nel minerale:

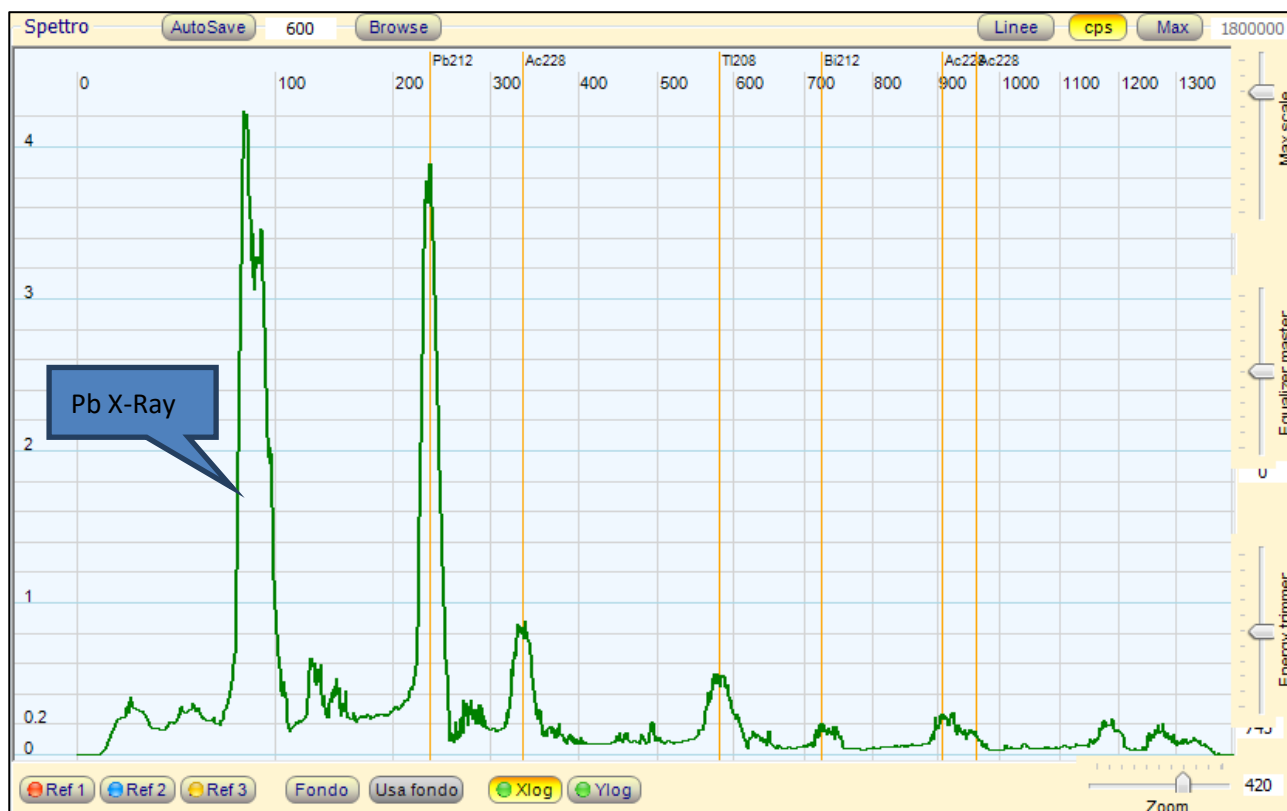
- monazite-(Ce) $\times$ (Ce, La, Pr, Nd, Th, Y)PO₄
- monazite-(La) $\times$ (La, Ce, Nd, Pr)PO₄
- monazite-(Nd) $\times$ (Nd, La, Ce, Pr)PO₄
- monazite-(Sm) $\times$ (Sm, Gd, Ce, Th)PO₄.

Gli elementi delle terre rare in parentesi sono elencati nell'ordine dato dalla proporzione relativa in cui si trovano all'interno del minerale, così che il lantanio è la terra rara più comune nella monazite (La), e via dicendo.

Il silicio, come biossido (SiO₂), sarà presente in tracce, come pure piccole quantità di uranio e torio. Per via del decadimento alfa del torio e dell'uranio, la monazite contiene una significativa quantità di elio, che può essere estratta mediante riscaldamento.

La monazite è un importante minerale grezzo per torio, lantanio e cerio. Si trova spesso in giacimenti alluvionali. I giacimenti in India sono particolarmente ricchi di monazite.

A causa della presenza di torio al suo interno, la monazite è discretamente radioattiva.

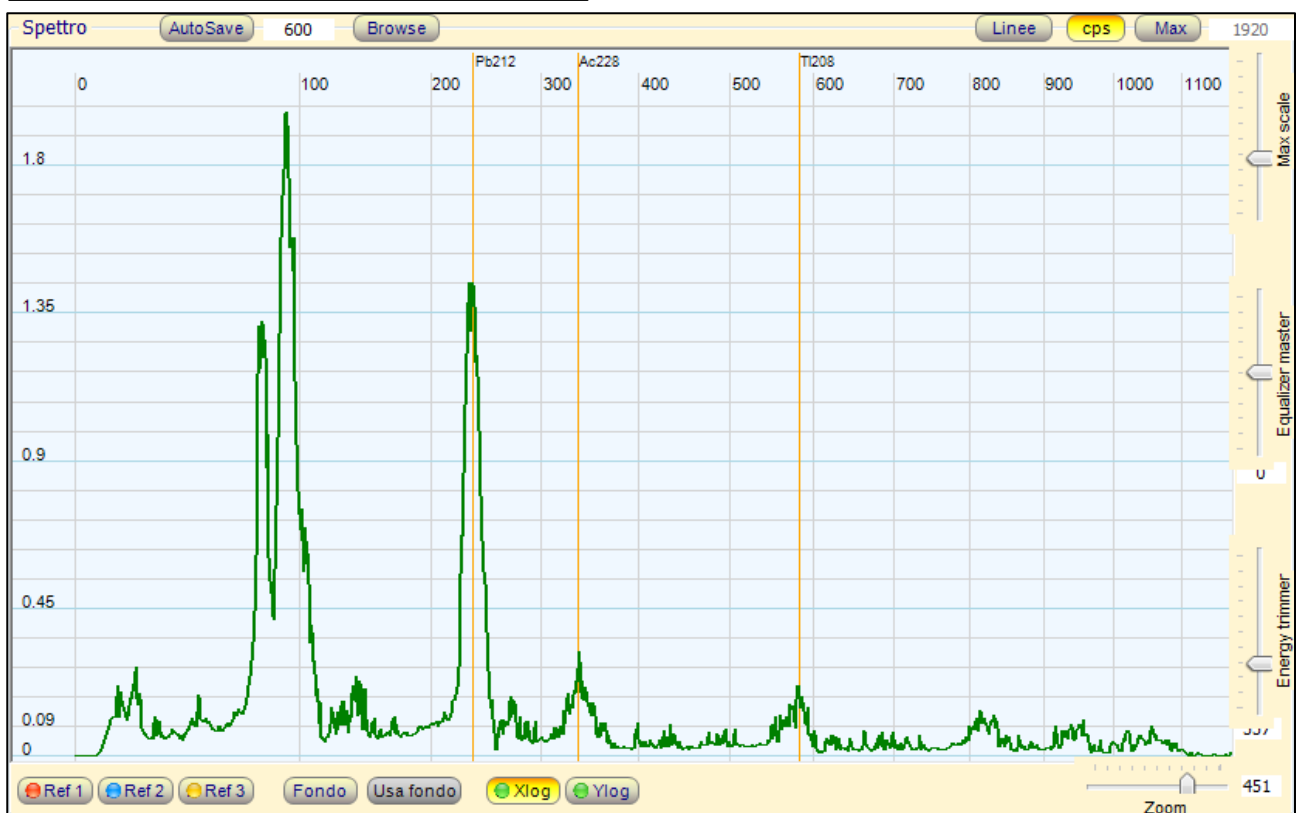


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermo

Thorianite (minerale radioattivo contenente torio)



La **thorianite** è un minerale contenente torio, dal quale prende il nome. Si trova nelle pegmatiti e nei depositi alluvionali.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato

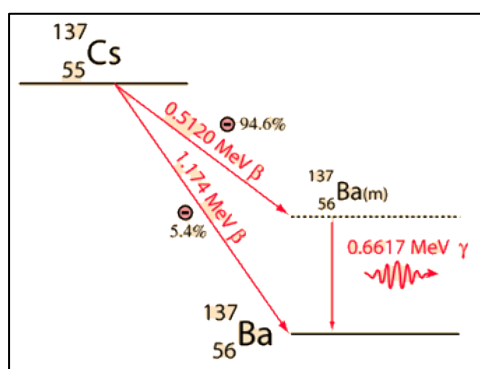
Cesio – Valvola di Scarica (^{137}Cs)



Cesio-137 (Cs-137), il cesio-137, o il radio cesio è un isotopo radioattivo del cesio che si forma come uno dei più comuni prodotti di fissione dalla fissione nucleare dell'uranio-235 e altri isotopi fissili nei reattori nucleari e le armi nucleari. E' tra i più problematici dei prodotti di fissione ad emivita medio-breve perché si diffonde facilmente in natura, a causa della elevata solubilità in acqua dei composti chimici più comuni di cesio.

Piccole quantità di cesio-134 e cesio-137 sono state rilasciate nell'ambiente durante quasi tutti i test di armi nucleari e di alcuni incidenti nucleari, in particolare l'incidente Goiânia, il disastro di Chernobyl e il disastro di Fukushima.

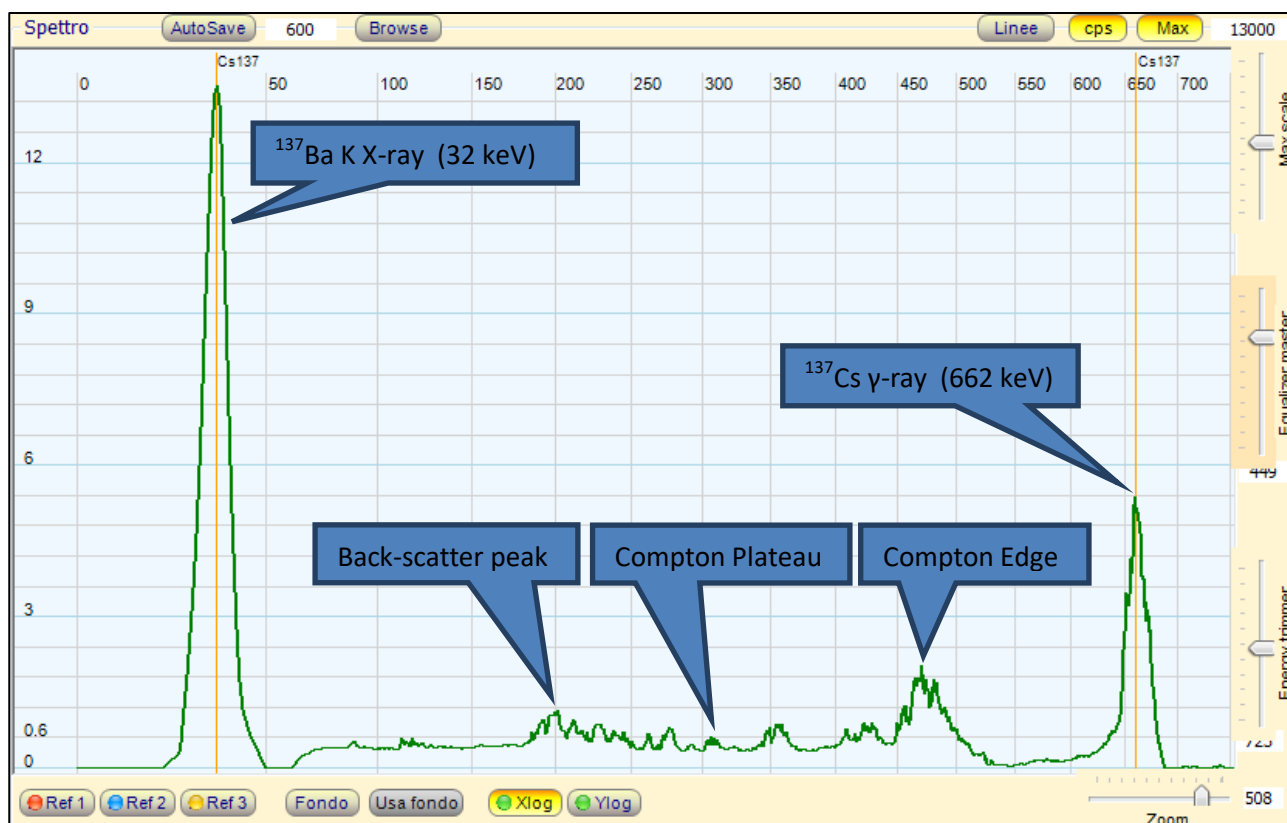
Catena Decadimento cesio-137



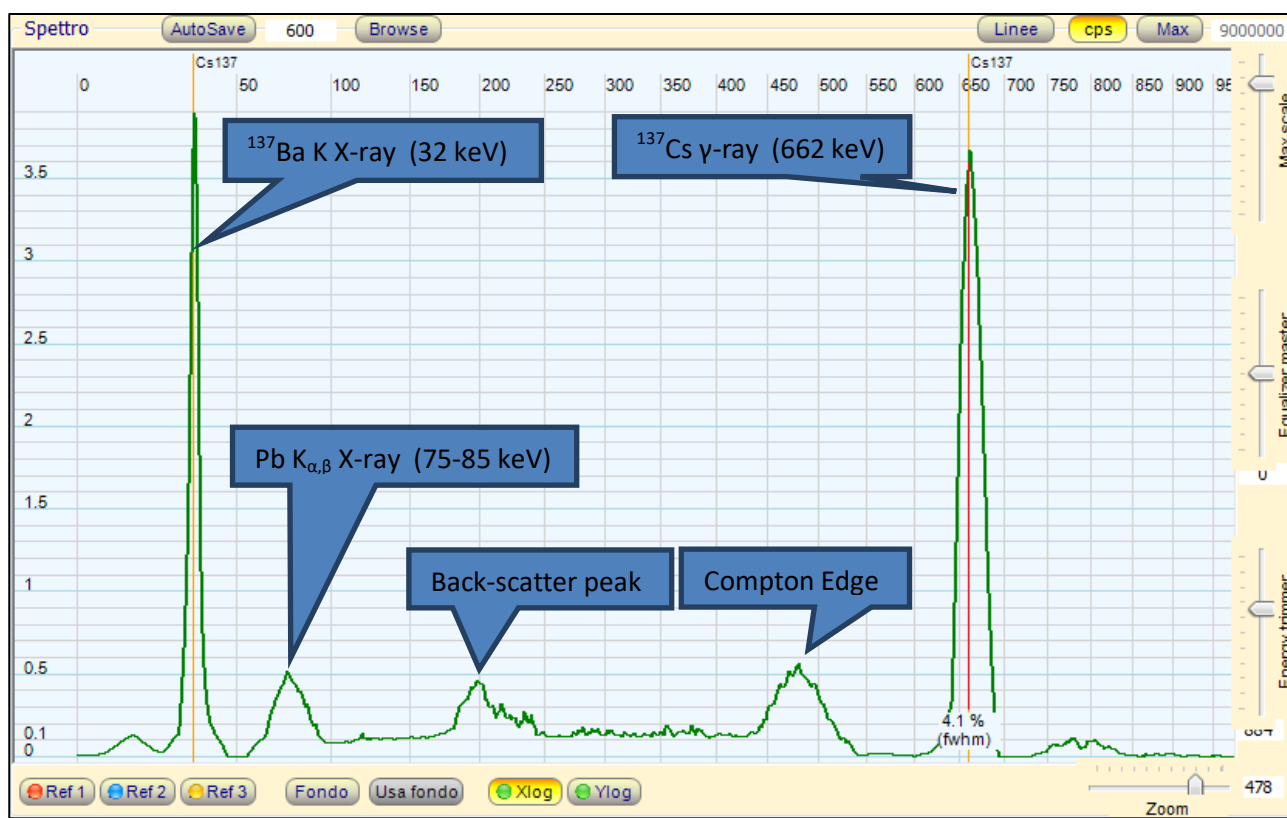
Il **cesio 137** ha un tempo di dimezzamento di circa 30,17 anni. Circa il 95 per cento decade per emissione beta ad un isomero nucleare metastabile di bario: bario-137m (Ba-137m). Il resto popola direttamente lo stato fondamentale di bario-137, che è stabile. Ba-137m ha una emivita di circa 153 secondi ed è responsabile per tutte le emissioni di raggi gamma in campioni di cesio-137.

Un grammo di cesio-137 ha una attività di 3.215 terabecquerel (TBq).

L'energia del fotone di Ba-137m è 662 keV.



Sonda a Scintillazione Rap47 – cristallo CsI(Tl) 25.4x1.0mm

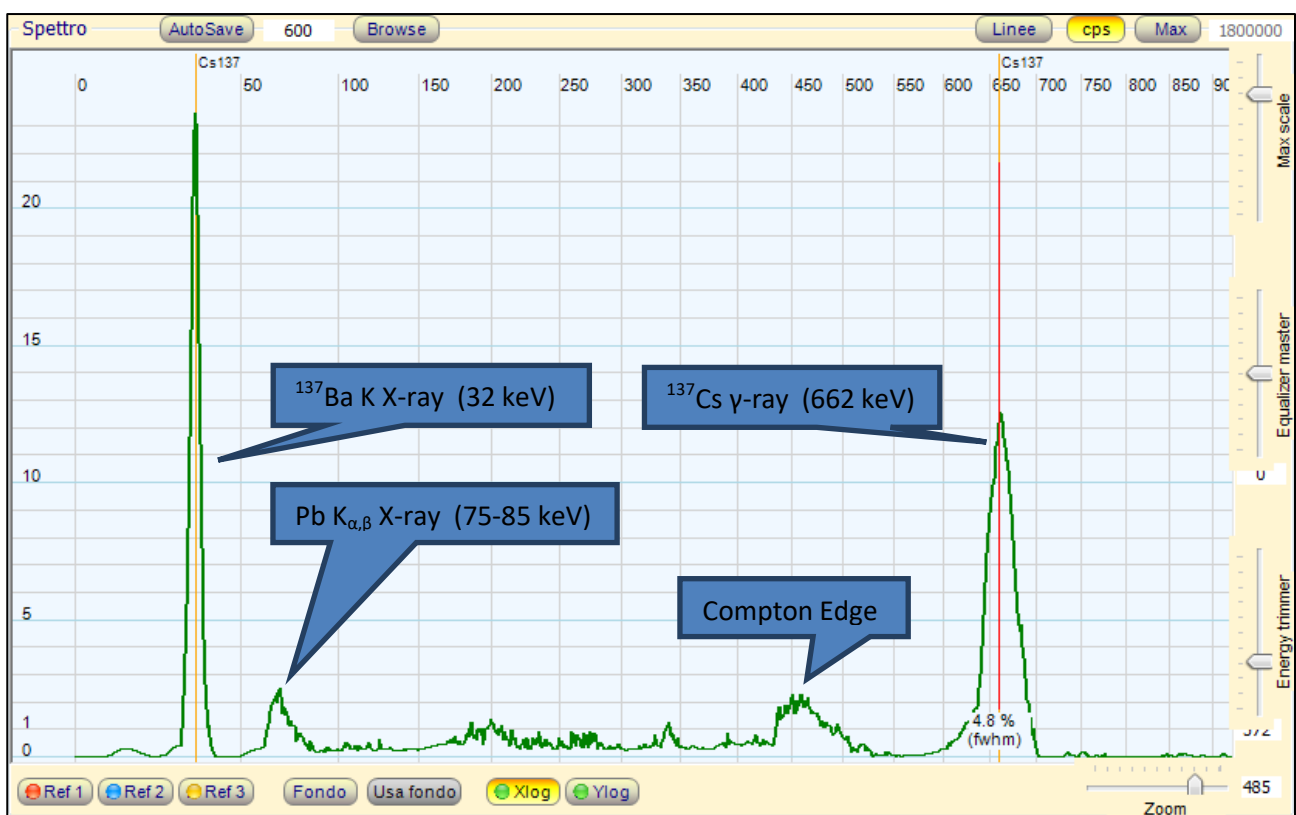


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato
(Presenza XRF da Pb K-L lines)

Cesio –Sorgente di Calibrazione (^{137}Cs)

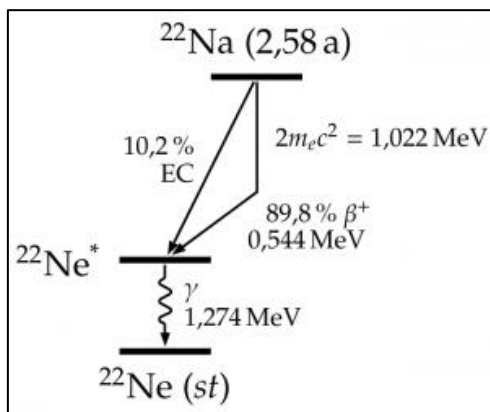


0,25 μCi isotopo ^{137}Cs .



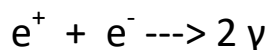
Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato
(Presenza XRF da Pb K-L lines)

Sodio-22 – Sorgente di Calibrazione (^{22}Na)

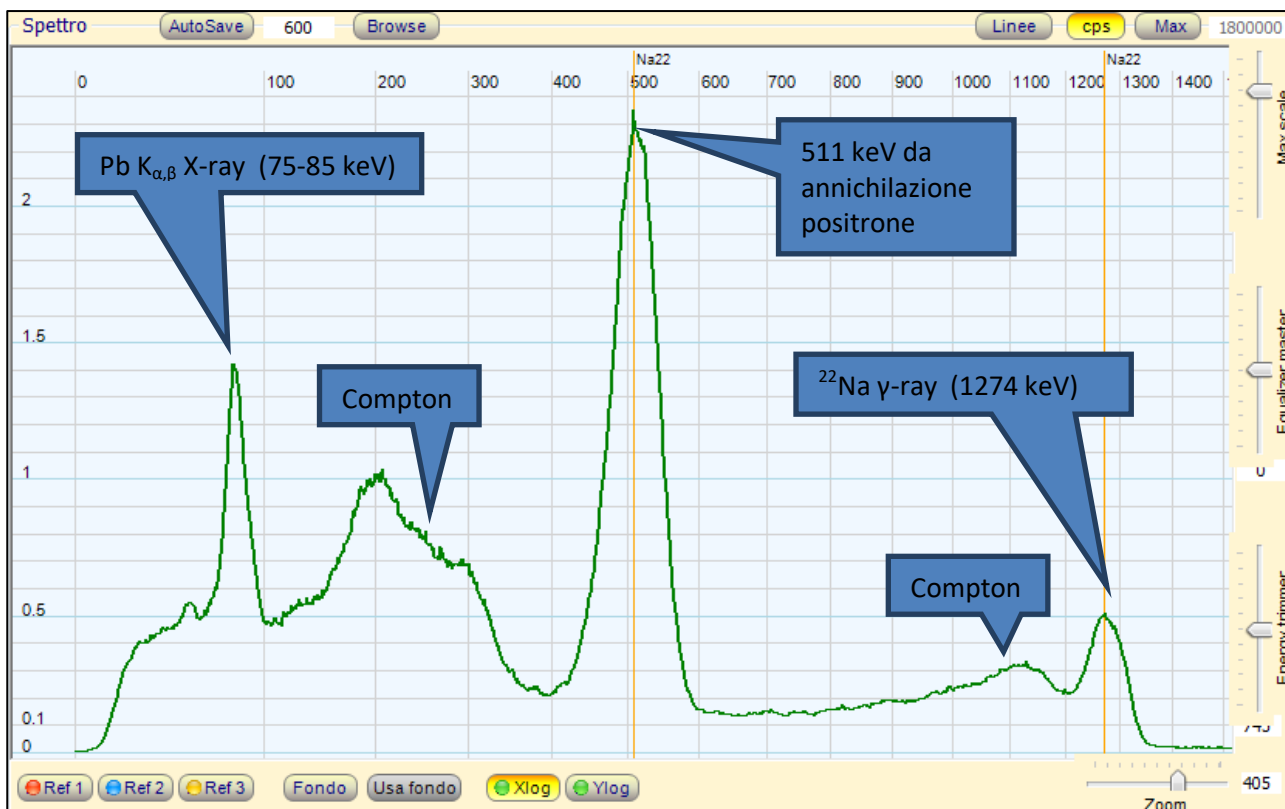


1 μCi isotopo ^{22}Na e relativo schema di decadimento

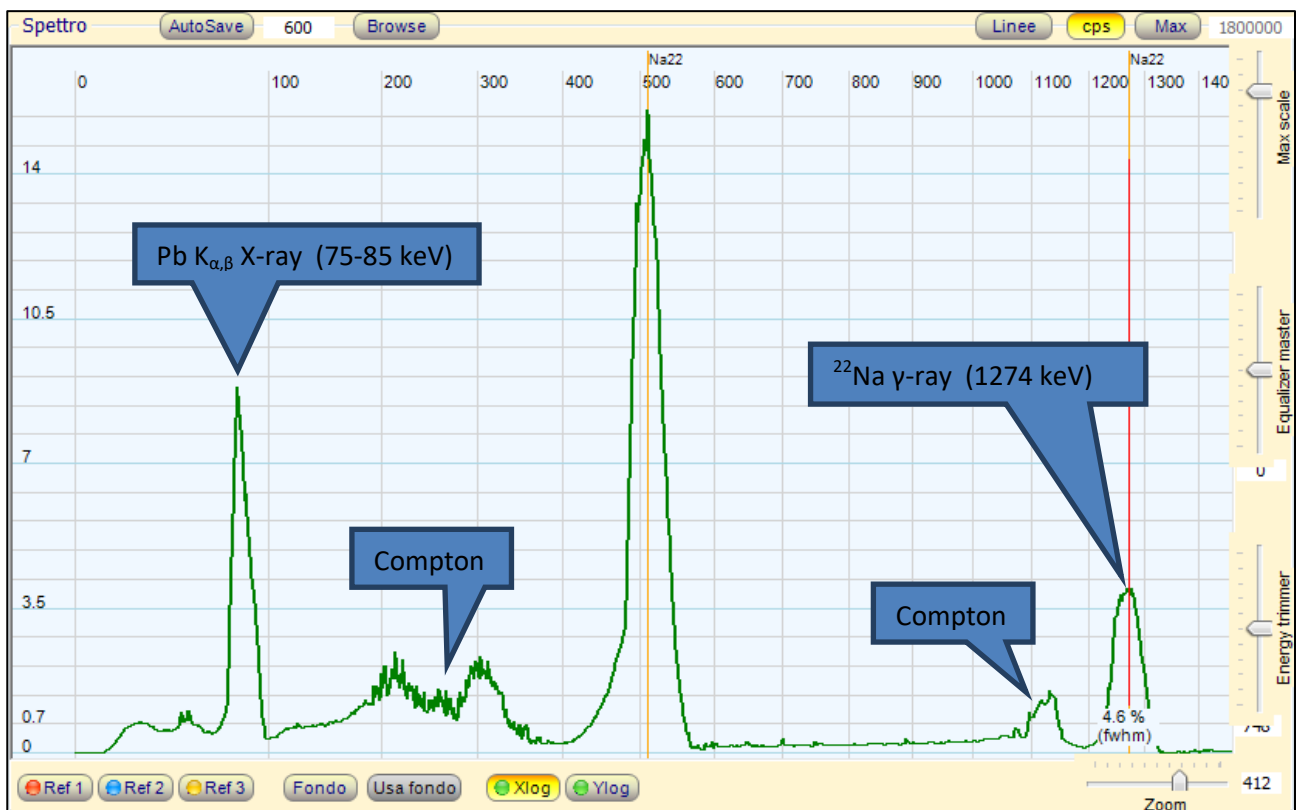
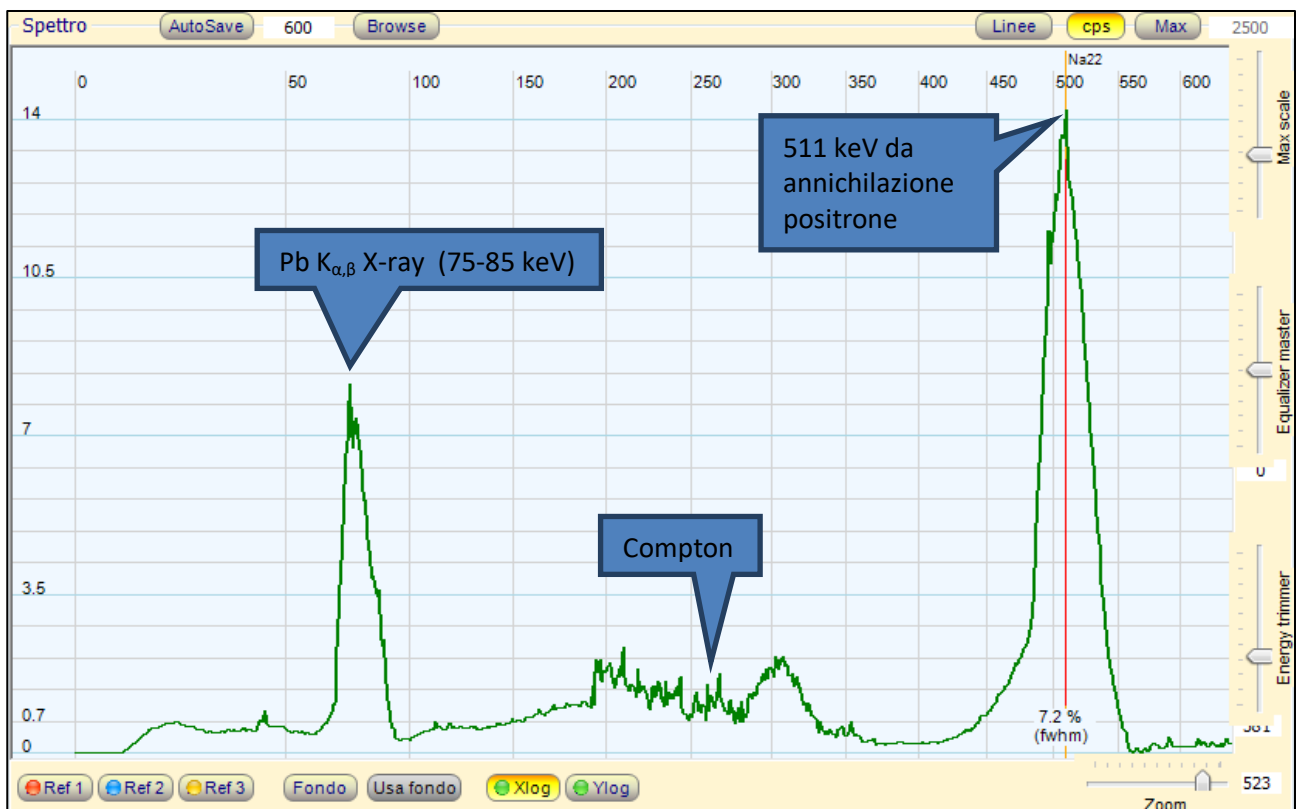
L'isotopo Na-22 decade (nel 99.95% dei casi) con emivita di 2,6 anni, per emissione di positroni o cattura elettronica verso il primo stato eccitato del ^{22}Ne a 1.274 MeV (il quale successivamente si rilassa per emissione di fotone gamma). I positroni emessi dalla sorgente si annichilano nel materiale che fa da supporto alla sorgente, producendo 2 gamma di energia 0.511 MeV ciascuno, secondo il processo :



I due fotoni gamma a 0.511 MeV vengono emessi a 180 gradi l'uno dall'altro. Questo permette di effettuare misure di correlazione e coincidenza.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato
Senza compensazione per allargamento linee



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato
Con compensazione per allargamento linee

Trinitite

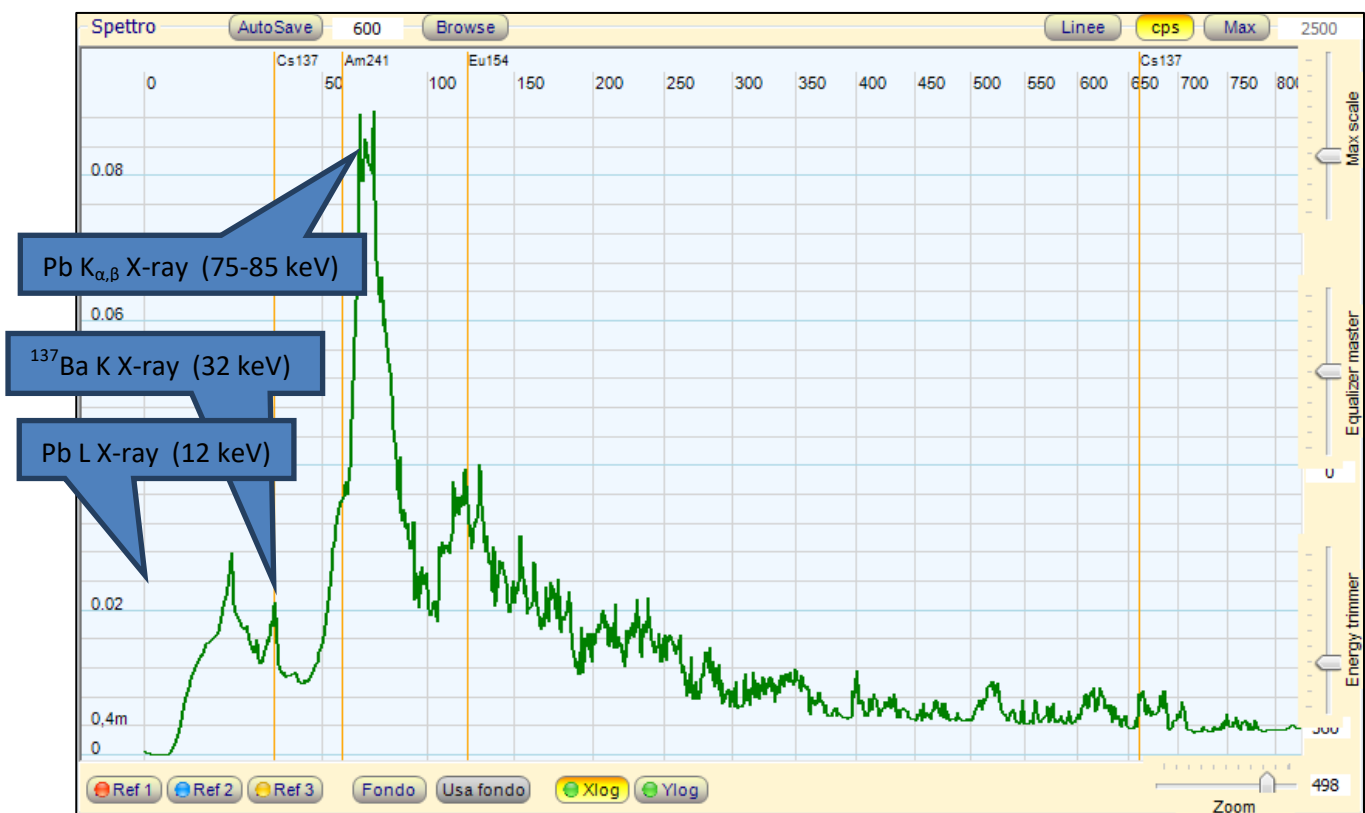


La **trinitite** (conosciuta anche come vetro di Alamogordo o atomite) è il nome dato al residuo vetroso formatosi nel deserto, vicino ad Alamogordo in Nuovo Messico, sul sito dell'esplosione avvenuta il 16 luglio 1945, del primo ordigno nucleare, chiamato in codice "Trinity" (Trinità) e basato sul plutonio.

Il vetro è costituito principalmente di silicio e di feldspato fusi dal calore generato dall'esplosione nucleare, è solitamente di colore verde chiaro, anche se in alcuni campioni si presenta di altri colori. È debolmente radioattivo.

Sono stati riconosciuti molti falsi tra i campioni in possesso dei collezionisti, per creare i quali è possibile usare molti metodi in grado di far assumere al silicio l'aspetto di vetro verde ed una

leggera radioattività; tuttavia solo materiale proveniente veramente dal sito di un'esplosione nucleare può contenere determinati isotopi, prodotti da attivazione neutronica, che non sono presenti nei minerali radioattivi di origine naturale. Una dettagliata spettrografia gamma può determinare il potenziale dell'esplosione nucleare che ha formato il campione di trinitite.1



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato

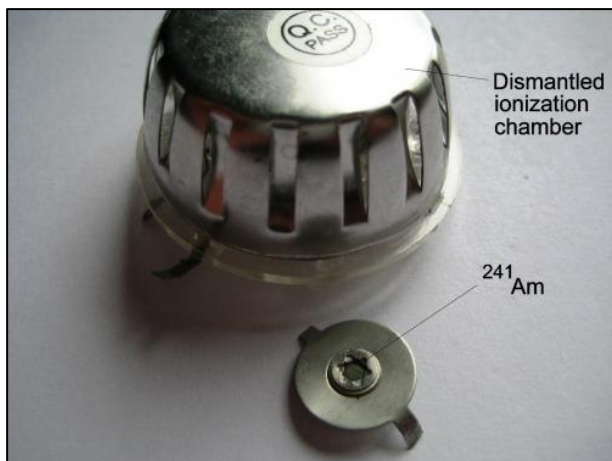


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato

Il campione di trinitite presenta una radioattività residua molto bassa. Per ottenere dei dati consistenti è necessario utilizzare una adeguata schermatura. Dallo spettro gamma del campione di trinitite e dal confronto con lo spettro del background si può evidenziare la presenza dei seguenti isotopi provenienti da frammenti di fissione ed attivazione neutronica :

- cesio-137
- americio-241
- europio-152 / europio-154

Americio (^{241}Am)



L'americio è l'elemento chimico di numero atomico 95. Il suo simbolo è **Am**.

L'americio è un elemento metallico sintetico della famiglia degli attinidi, ottenuto bombardando il plutonio con neutroni.

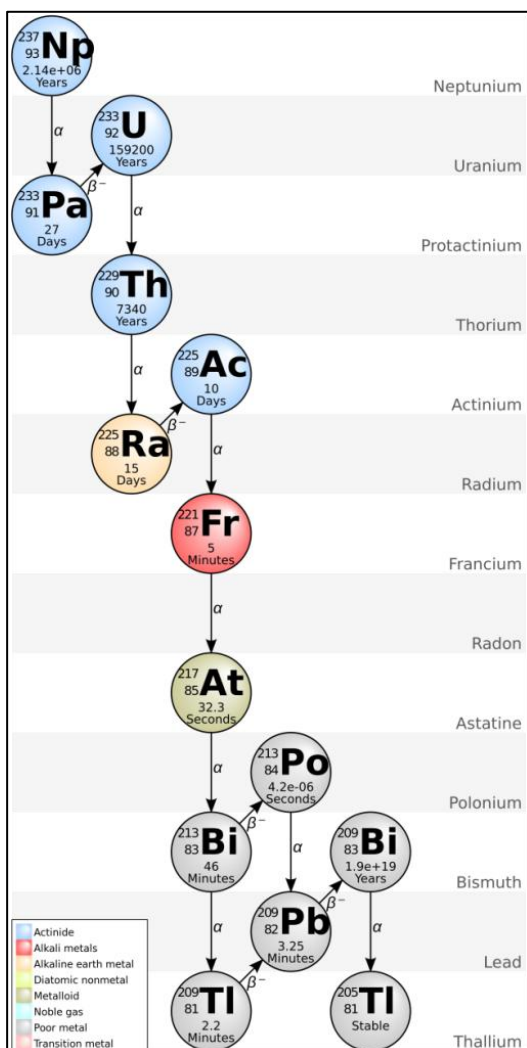
L'emissione alfa dell'Am-241 è circa il triplo di quella del radio. Pochi grammi di Am-241 emettono radiazione gamma intensa che crea seri problemi di esposizione a chi deve maneggiare l'elemento.

L'americio può essere prodotto in quantità dell'ordine dei chilogrammi, principalmente sotto forma dell'isotopo Am-241.

Trova applicazioni domestiche in alcuni modelli di

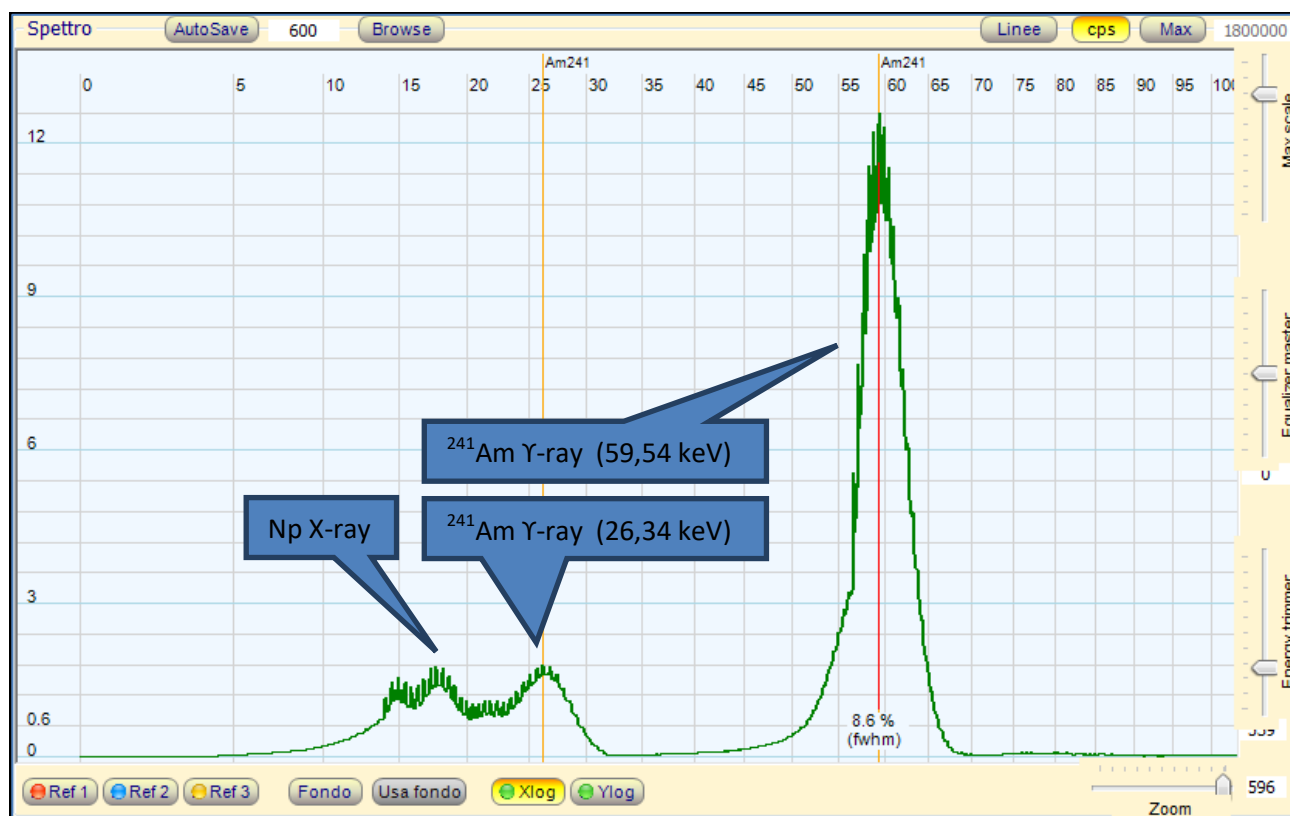
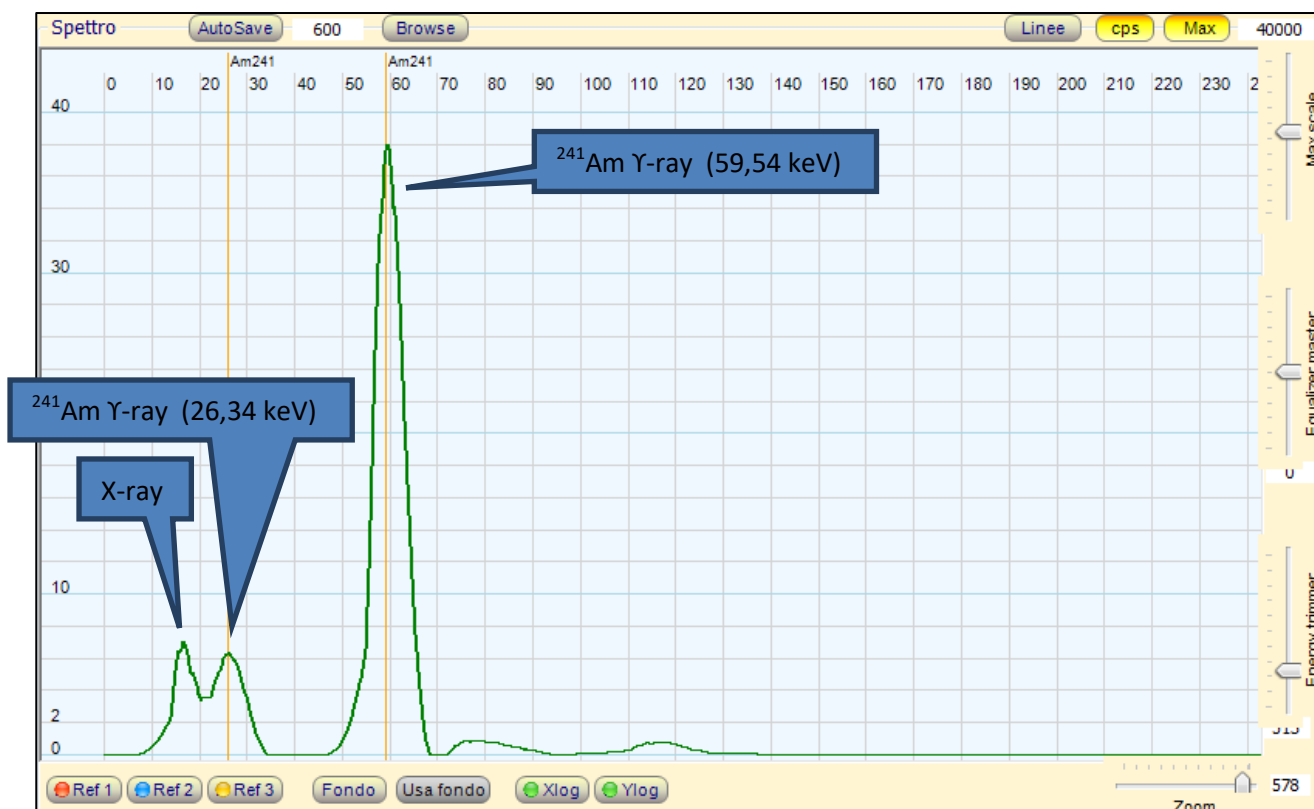
rivelatori di fumo, dove viene usato in qualità di sorgente di radiazioni ionizzanti. L'americio è usato per costruire alcuni tipi di parafulmine, grazie proprio a questa capacità di ionizzare l'aria circostante favorendo così il passaggio di corrente. Am-241 è stato anche usato come sorgente portatile di raggi gamma per l'uso in radiografia e come mezzo per misurare lo spessore del vetro.

Catena Decadimento americio-241



La catena $4n + 1$ del **Np-237** viene comunemente chiamata "serie nettunio" o "cascata nettunio". In questa serie, solo due degli isotopi coinvolti si trovano naturalmente, vale a dire gli ultimi due: bismuto-209 e tallio-205. Un rivelatore di fumo contenente americio-241 nella camera di ionizzazione accumula una quantità significativa di nettunio-237 come decadimento dell'americio. I seguenti elementi sono anche presenti, almeno transitoriamente, come prodotti di decadimento del nettunio: attinio, astato, bismuto, francio, piombo, polonio, protoattinio, radio, tallio, torio e uranio. Dato che questa serie è stata studiata solo recentemente, i suoi nuclidi non hanno nomi storici. Una caratteristica unica di questa catena di decadimento è che non include il gas nobile radon, e quindi non vi è la migrazione attraverso la roccia come nelle altre tre catene di disintegrazione.

L'energia totale rilasciata dal californio-249 al tallio-205, compresa l'energia persa per neutrini, è 66,8 MeV.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

Trizio (^3H)



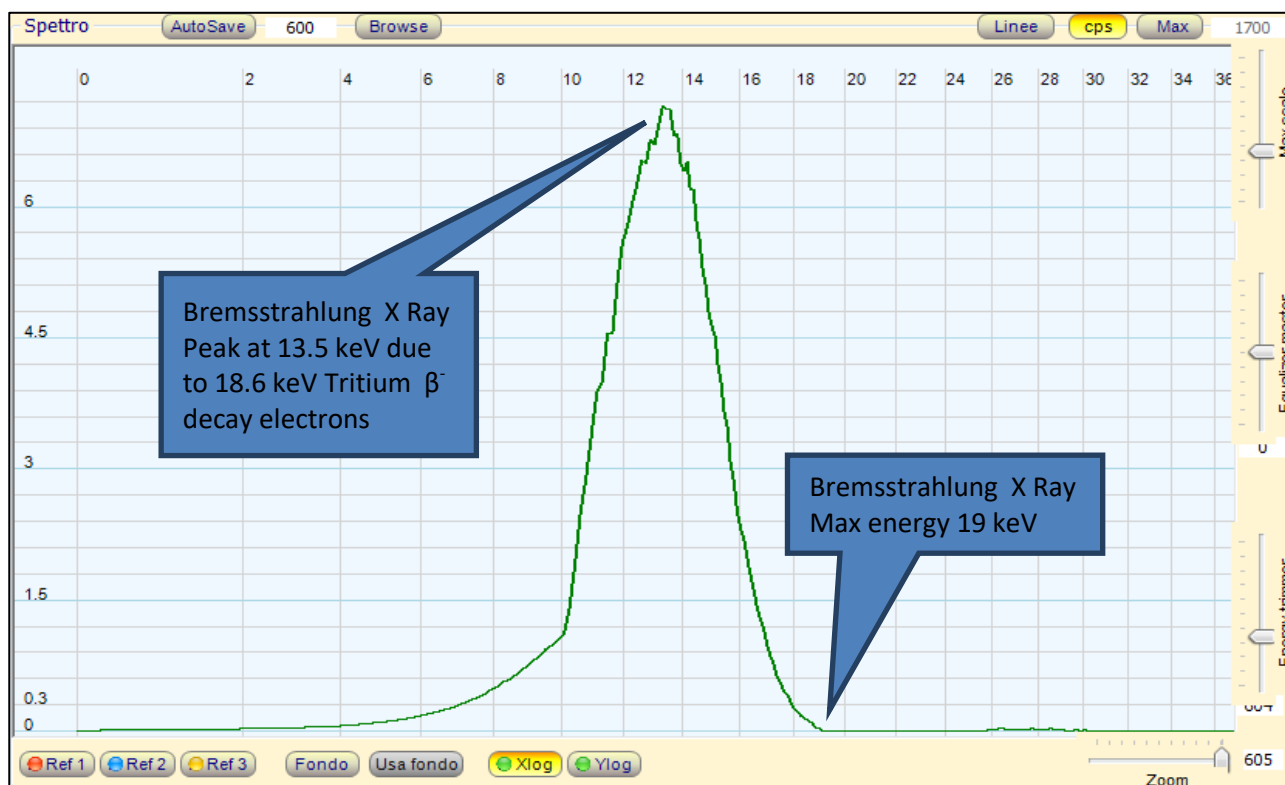
Trizio, (simbolo T, ^3H o H-3 noto anche come idrogeno-3) è un isotopo radioattivo di idrogeno. Il nucleo di trizio (talvolta chiamato triton) contiene un protone e due neutroni, mentre il nucleo di protium (di gran lunga il più abbondante isotopo dell'idrogeno) contiene un protone e nessun neutroni. In natura il trizio è estremamente raro sulla Terra, dove tracce si formano dall'interazione dell'atmosfera con raggi cosmici. Il nome di questo isotopo è formato dalla parola greca "tritōs" che significa "terzo".

Catena Decadimento Trizio

Mentre il trizio ha diversi valori di emivita determinati sperimentalmente, il National Institute of Standards and Technology la stabilisce in 4.500 ± 8 giorni ($12,32 \pm 0,02$ anni). Esso decade in elio-3 da decadimento beta come in questa equazione nucleare:



e rilascia **18,6 keV** di energia nel processo. L'energia cinetica dell'elettrone varia, con una media di 5,7 keV, mentre l'energia residua viene portata via dal quasi impercettibile antineutrino elettronico. Le particelle beta di trizio possono penetrare solo circa 6.0 mm di aria, e sono incapaci di passare attraverso lo strato più esterno della pelle umana. L'energia insolitamente bassa rilasciata nel decadimento beta del trizio rende il decadimento (insieme a quella di renio-187) appropriata per misure assolute di massa del neutrino in laboratorio (il più recente esperimento essere KATRIN). La bassa energia della radiazione del trizio rende difficile rilevare composti marcati con trizio se non utilizzando scintillazione liquida.



Sonda a Scintillazione Rap47 – cristallo CsI(Tl) 25.4 x 1.0mm

Potassio ^{40}K



L'isotopo radioattivo naturale del potassio subisce un duplice decadimento: per l'89% gli atomi di ^{40}K si trasformano in ^{40}Ca per decadimento β^- ; per il restante 11% gli atomi di ^{40}K si trasformano in ^{40}Ar per cattura elettronica. Dalla misura di quest'ultimo decadimento, ottenibile con speciali apparecchiature, è quindi possibile risalire al contenuto totale di potassio corporeo. Il processo di decadimento del ^{40}K in ^{40}Ar è anche utilizzato nelle scienze della Terra come misura del tempo geologico sulla base del rapporto $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$.

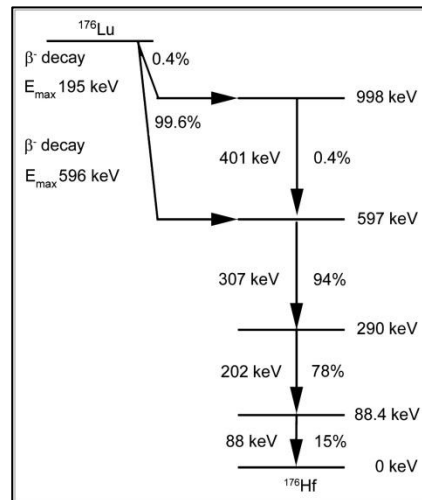
Per la misura è stata utilizzata la sonda con cristallo 63 x 63 mm, come campione sono stati utilizzati 800g di sale iposodico che corrispondono a 228g di potassio, che contengono lo 0,012% di ^{40}K :

228 g di potassio $\rightarrow$ 2,736 g di isotopo ^{40}K

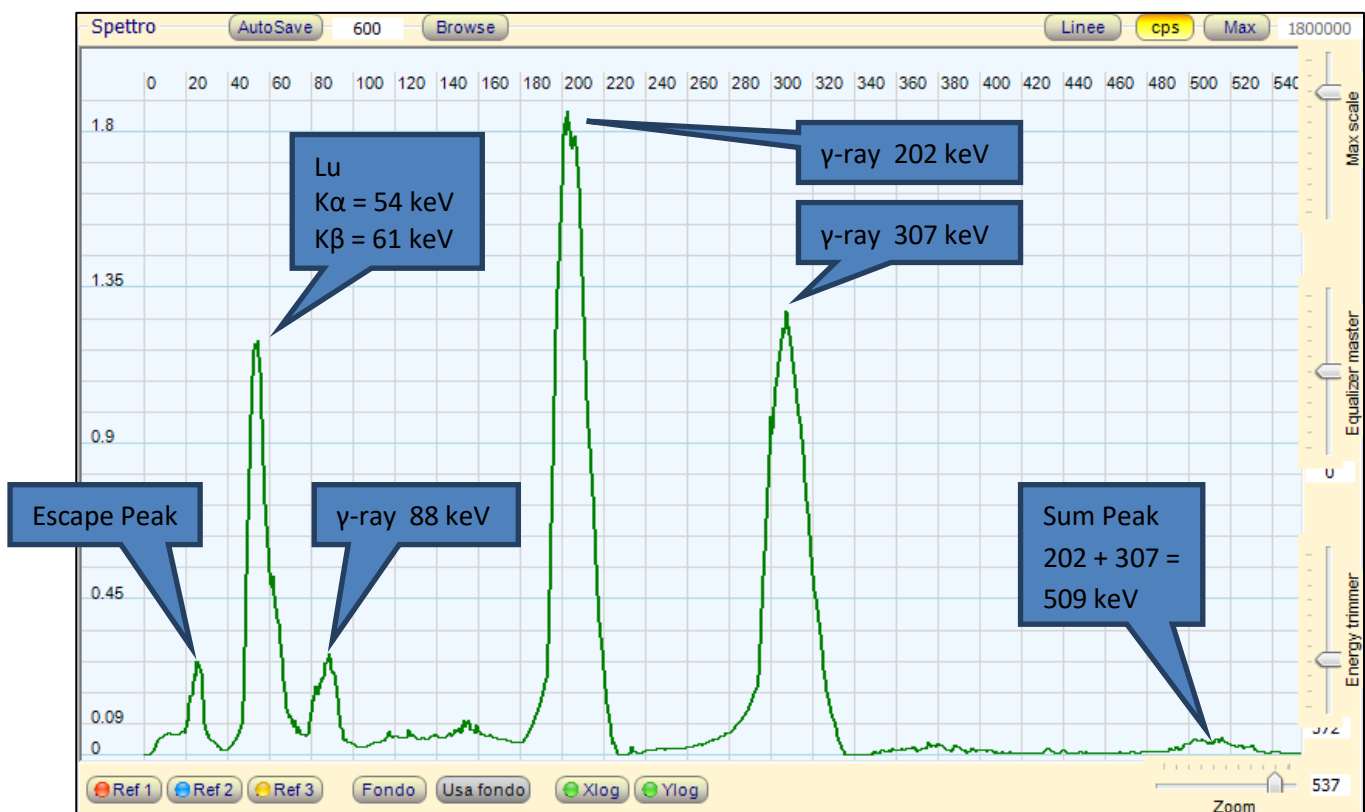


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 63 x 63mm

Lutezio ^{176}Lu

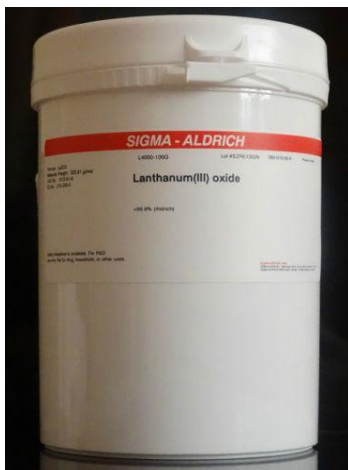


Il **lutezio** naturale è composto di due isotopi di cui solo uno è stabile, ^{175}Lu (abbondanza naturale 97,41%) mentre l'altro, il ^{176}Lu decade beta con emivita di $3,78 \times 10^{10}$ anni (2,59% abbondanza naturale). Nella immagine sopra si vede il campione contenente Lutezio e lo schema di decadimento beta del ^{176}Lu .



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermo

Lanthanum ^{138}La

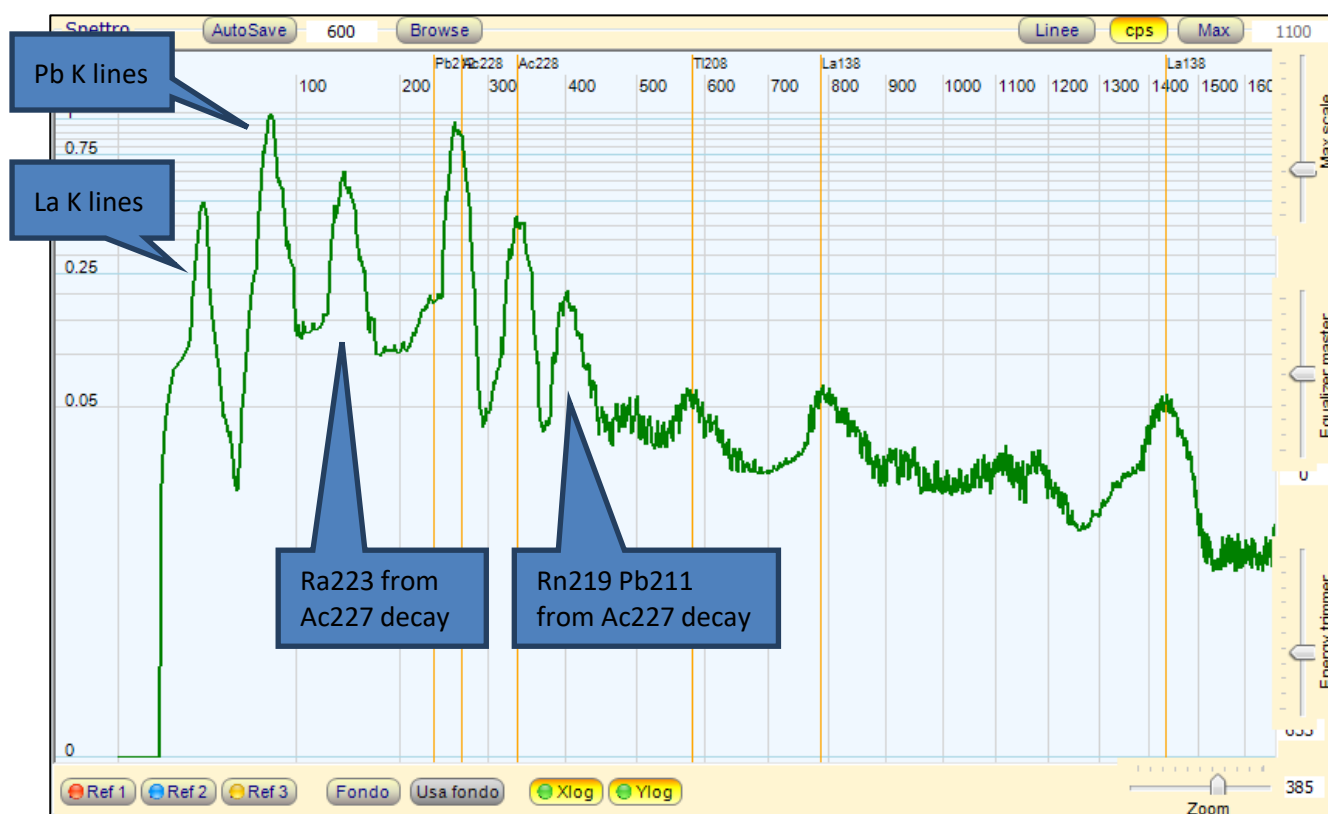


Lanthanum is a soft, ductile, silvery-white metallic chemical element with symbol La and atomic number 57. It tarnishes rapidly when exposed to air and is soft enough to be cut with a knife. It gave its name to the lanthanide series, a group of 15 similar elements between lanthanum and lutetium in the periodic table: it is also sometimes considered the first element of the 6th-period transition metals.

Lanthanum is usually found in combination with cerium and other rare earth elements.

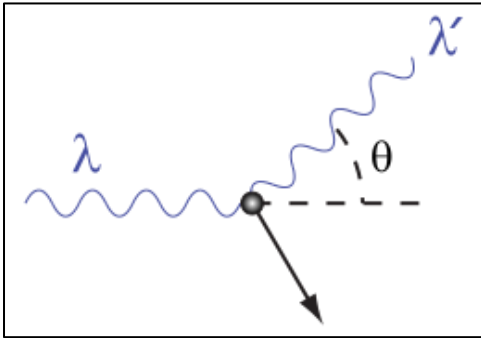
Naturally occurring lanthanum is composed of one stable (^{139}La) and **one radioactive (^{138}La) isotope**, with ^{139}La being the most abundant (99.91% natural abundance). 38 radioisotopes have been characterized – the most stable is ^{138}La with a half-life of 1.05×10^{11} years, followed by ^{137}La with a half-life of 60,000 years.

As a sample we have used 100g of lanthanum oxide (see the picture). Mixed with lanthanum there are some impurities of thorium and actinium 227 that leave their trace in the gamma spectrum below, together with the two gamma emissions of the ^{138}La isotope. We think that the emissions of Pb212 and Tl208 are so weak because the substance has been purified and there has not been enough time to reach secular equilibrium.



Diffusione Compton

La **diffusione compton** (compton scattering) è la diffusione anelastica di un fotone da parte di una particella carica, di solito un elettrone. Essa si traduce in una diminuzione dell'energia (aumento in lunghezza d'onda) del fotone (che può essere un fotone X o gamma), chiamato effetto Compton. Una parte dell'energia del fotone viene trasferita all'elettrone di rinculo.

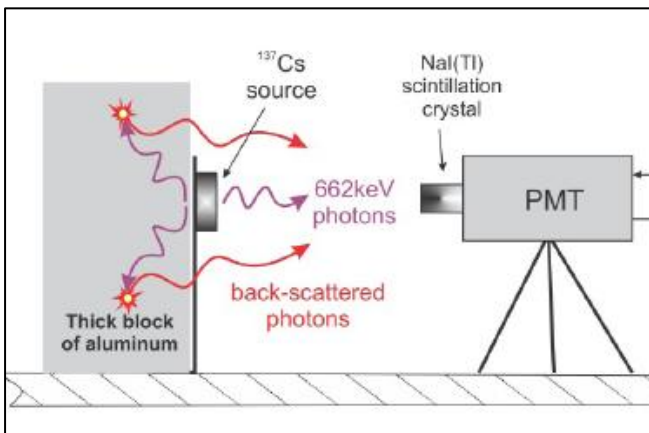


Un fotone di lunghezza d'onda λ arriva dalla sinistra, si scontra con un bersaglio a riposo, e un nuovo fotone di lunghezza d'onda λ' emerge ad un angolo θ .

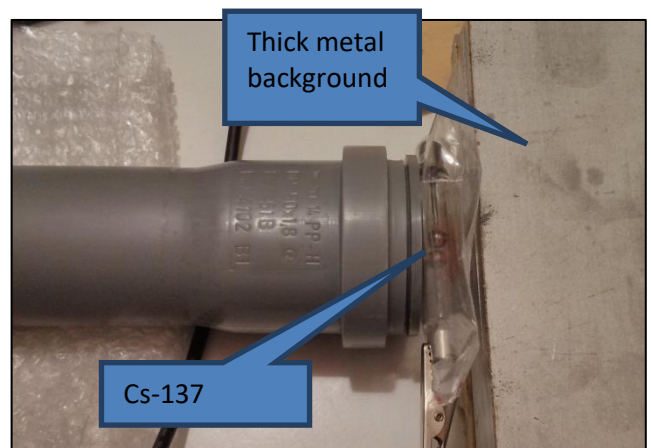
Poiché sia la massa-energia che il momento di un sistema devono entrambi essere conservati, generalmente non è possibile per l'elettrone semplicemente muoversi nella direzione del fotone incidente. L'interazione tra elettroni e fotoni ad alta energia (paragonabile all'energia a riposo dell'elettrone, 511 keV) comporta che all'elettrone venga data parte dell'energia (elettrone di rinculo), ed al fotone l'energia restante, ma emessa

in una **direzione diversa** dall'originale, in modo che la quantità di moto globale del sistema sia conservata.

L'effetto Compton può essere visto nello spettro gamma del cesio-137. Quando si rileva un bordo Compton a circa **490 keV**, un plateau e un picco di retrodiffusione Compton a **170 keV**. Quest'ultimo è dovuta ai fotoni compton-diffusi con un angolo di 180° .

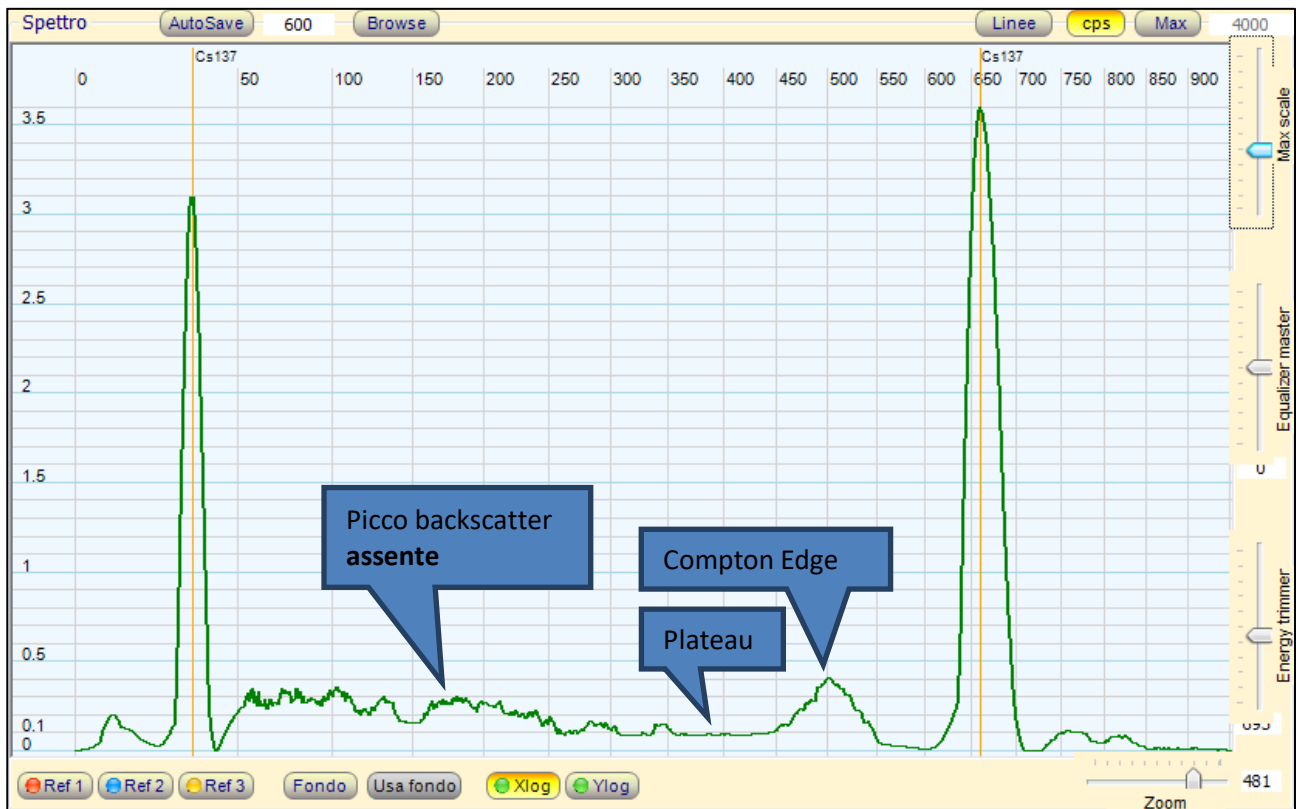


Mettendo un fondo di metallo dietro la sorgente radioattiva è come se venisse messa una fonte di elettroni liberi che possono agire come centri di diffusione Compton. Quindi ci aspettiamo un aumento dell'altezza del picco di backscatter quando mettiamo il fondo di metallo dietro la sorgente radioattiva di cesio.

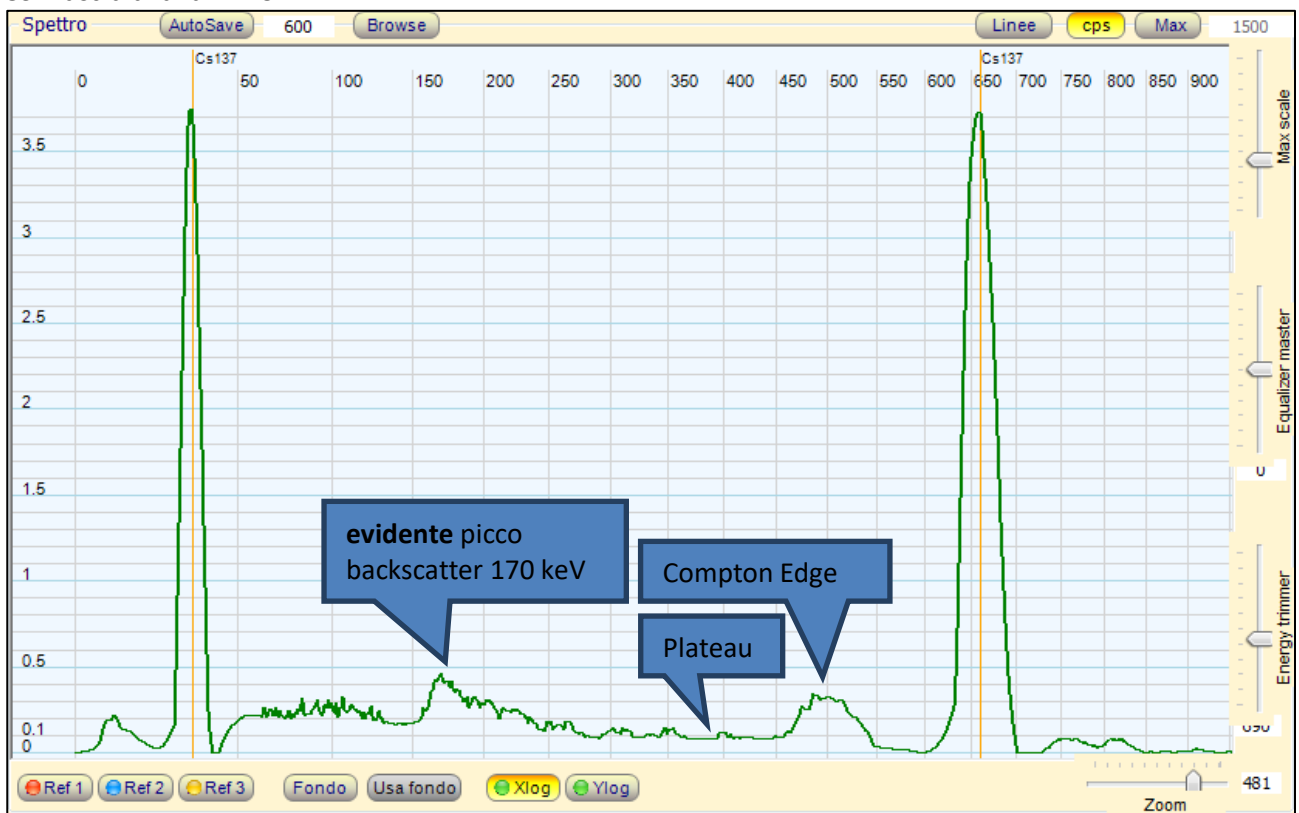


Setup esperimento : la prima misura è fatta senza background di alluminio, mentre la seconda è fatta mettendo dietro una spessa lastra di alluminio

Senza lastra di alluminio



Con lastra di alluminio



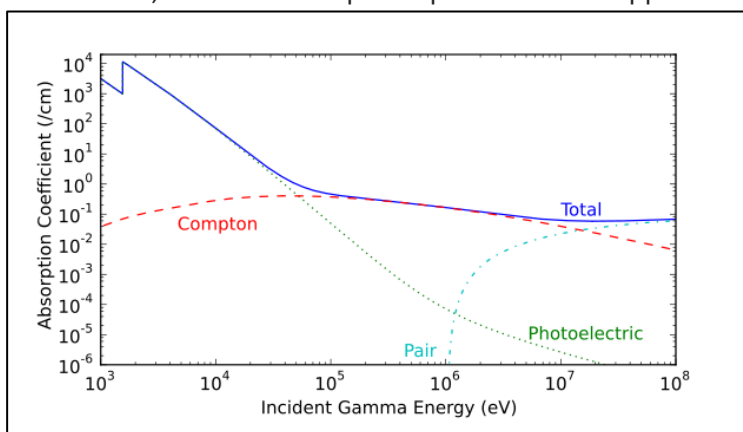
Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu

Assorbimento Radiazione Gamma

Quando un raggio gamma passa attraverso la materia, la probabilità di assorbimento è proporzionale allo spessore dello strato, la densità del materiale, e la cross-section di assorbimento del materiale. L'assorbimento totale mostra una diminuzione esponenziale di intensità al crescere della distanza dalla superficie incidente:

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

dove x è la distanza dalla superficie incidente, $\mu = n\sigma$ è il coefficiente di assorbimento, misurato in cm^{-1} , n il numero di atomi per cm^3 del materiale (densità atomica) e σ la sezione trasversale di assorbimento in cm^2 . Come passa attraverso la materia, la radiazione gamma perde energia attraverso tre processi: l'effetto fotoelettrico, diffusione Compton e produzione di coppie.



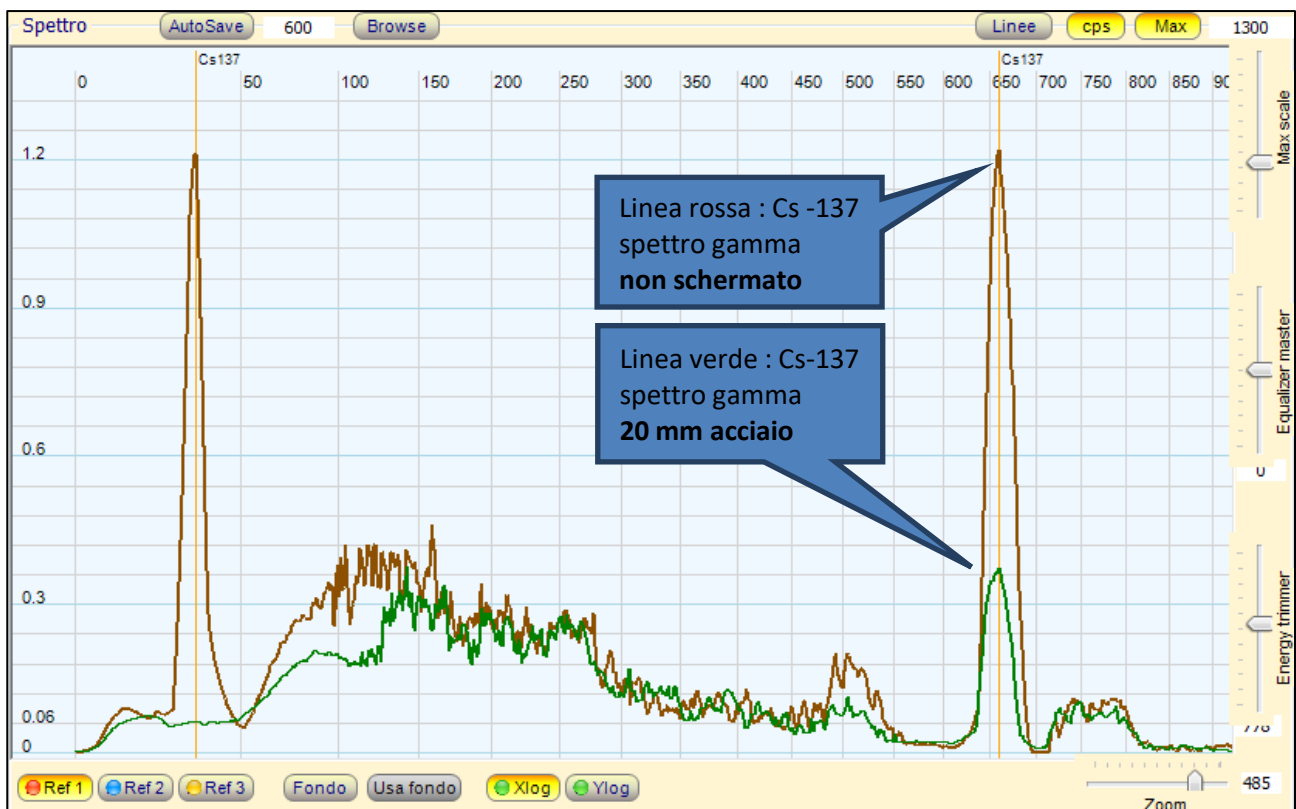
Coefficiente di assorbimento totale per l'alluminio (numero atomico 13) per raggi gamma : è tracciata la curva di assorbimento totale, e il contributo da parte dei tre effetti. Come al solito, l'effetto fotoelettrico è predominante a basse energie, diffusione Compton domina ad energie intermedie, e produzione di coppie domina ad alte energie.

Assorbimento di una lastra di alluminio da 10 mm



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu

Assorbimento acciaio da 10 mm e da 20 mm di spessore

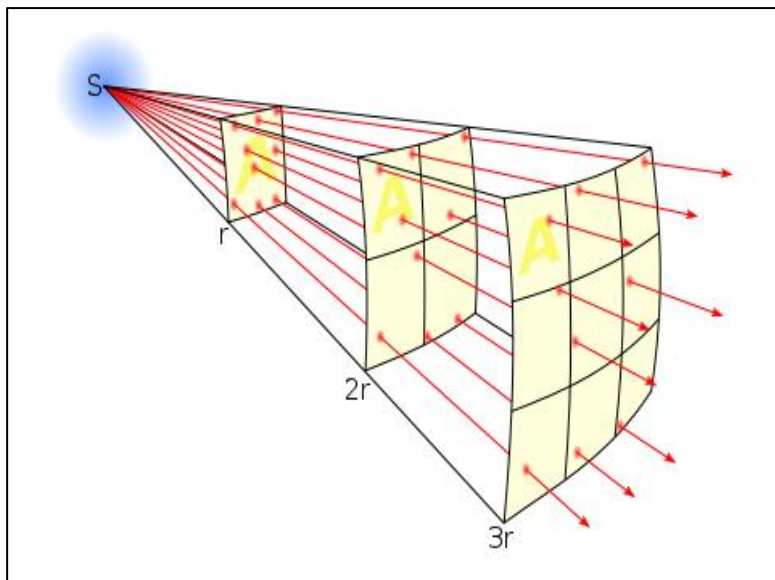


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu

Analizzando i due spettri gamma con lastra di acciaio di 10 mm e 20 mm è chiaro che la riduzione dell'intensità non è lineare. Una legge esponenziale dà migliore accordo con i dati.

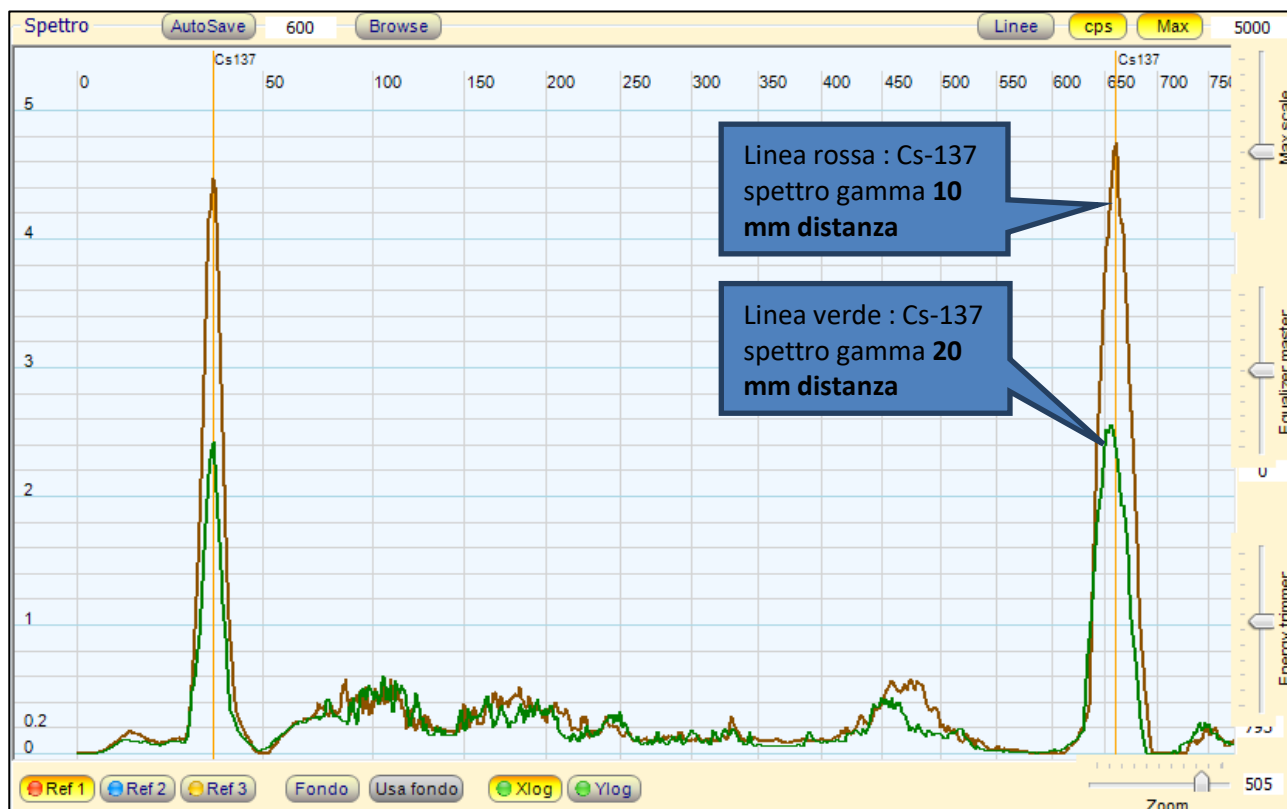
Legge del quadrato della distanza

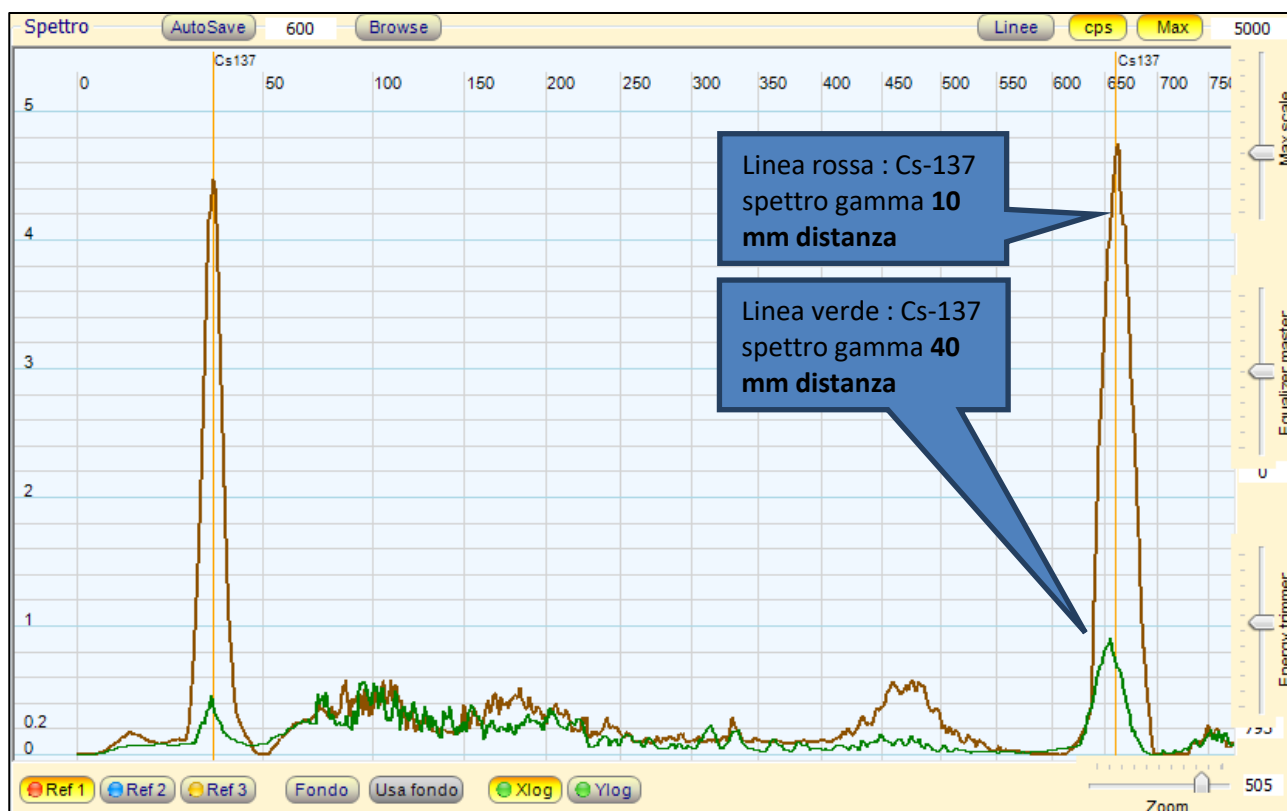
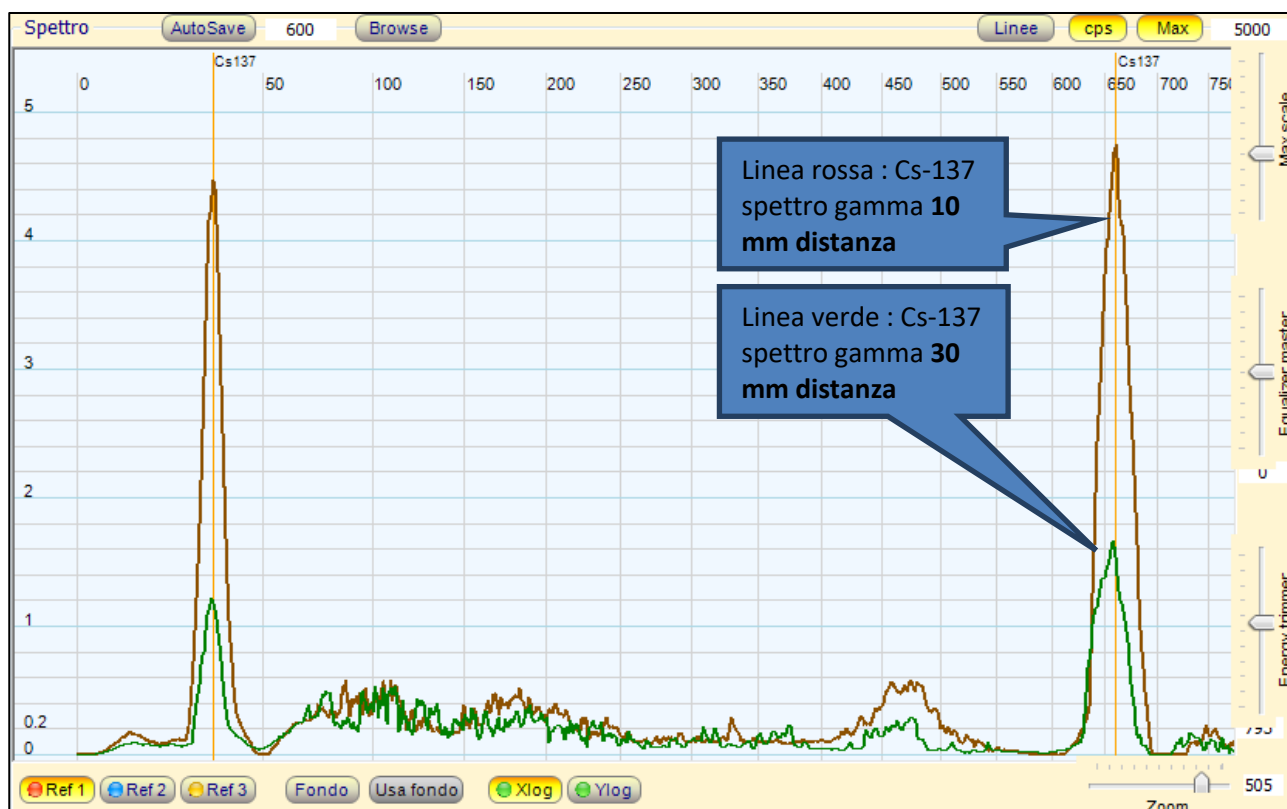
All'attenuazione con uno schermo viene aggiunto l'effetto angolo solido, che è puramente geometrico e afferma che il numero di fotoni che colpiscono un bersaglio diminuisce in maniera proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente.



La legge dell'inverso del quadrato si applica in genere quando una forza, l'energia, o altra quantità conservata è uniformemente irradiata verso l'esterno da una sorgente puntiforme in uno spazio tridimensionale. Poiché la superficie di una sfera ($4\pi r^2$) è proporzionale al quadrato del raggio, come la radiazione emessa si allontana dalla sorgente, si estende su una superficie che sta aumentando in proporzione al quadrato della distanza dalla fonte. Pertanto, l'intensità della radiazione che passa attraverso qualsiasi unità di superficie (direttamente di fronte alla sorgente puntiforme) è inversamente

proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente puntiforme.





La legge dell'inverso del quadrato è rispettata solo in parte, perché la fonte Cs-137 non è una sorgente puntiforme, ma piuttosto è un piccola superficie. Per questo motivo il tasso di diminuzione dell'intensità non è esattamente proporzionale al quadrato della distanza.

Risoluzione energetica e FWHM

L'assorbimento del raggio gamma all'interno del cristallo di scintillazione e la conseguente produzione di foto-elettroni all'interno del PMT sono processi essenzialmente casuali, così la distribuzione statistica di Poisson e la gaussiana possono essere applicate per spiegare l'allargamento delle linee. La risoluzione energetica viene misurata come la larghezza a metà altezza (FWHM) del corrispondente picco. In prima approssimazione l'ampiezza del picco di raggi gamma (FWHM) è 2.35σ , dove σ è la deviazione standard della distribuzione gaussiana relativo alle fluttuazioni statistiche del numero di foto-elettroni, Ne , che sono raccolti dal fotocatodo del fototubo.

Dalla distribuzione gaussiana abbiamo:

$$\sigma = \sqrt{Ne}$$

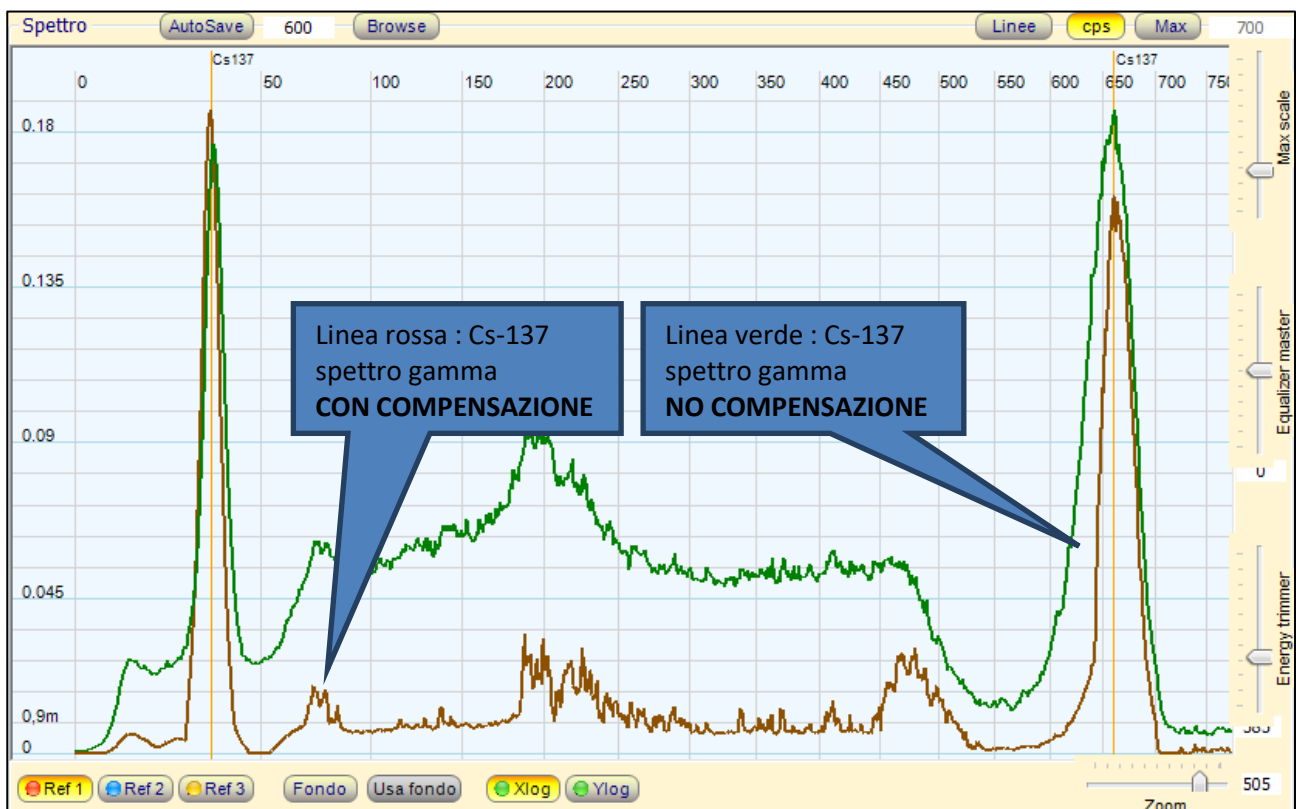
$$FWHM = 2.35 * \sqrt{Ne}$$

Il numero dei foto-elettroni Ne è proporzionale alla energia gamma: E_γ , quindi abbiamo per la risoluzione energetica R :

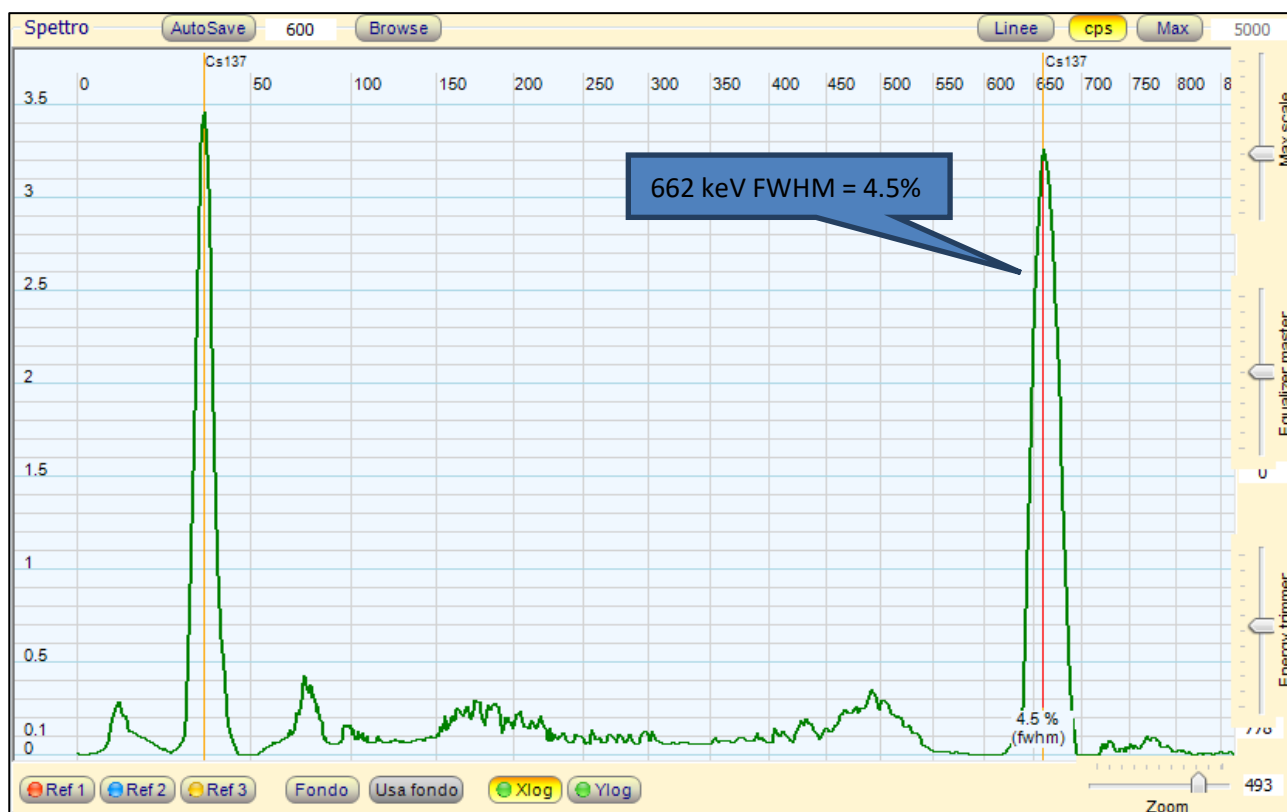
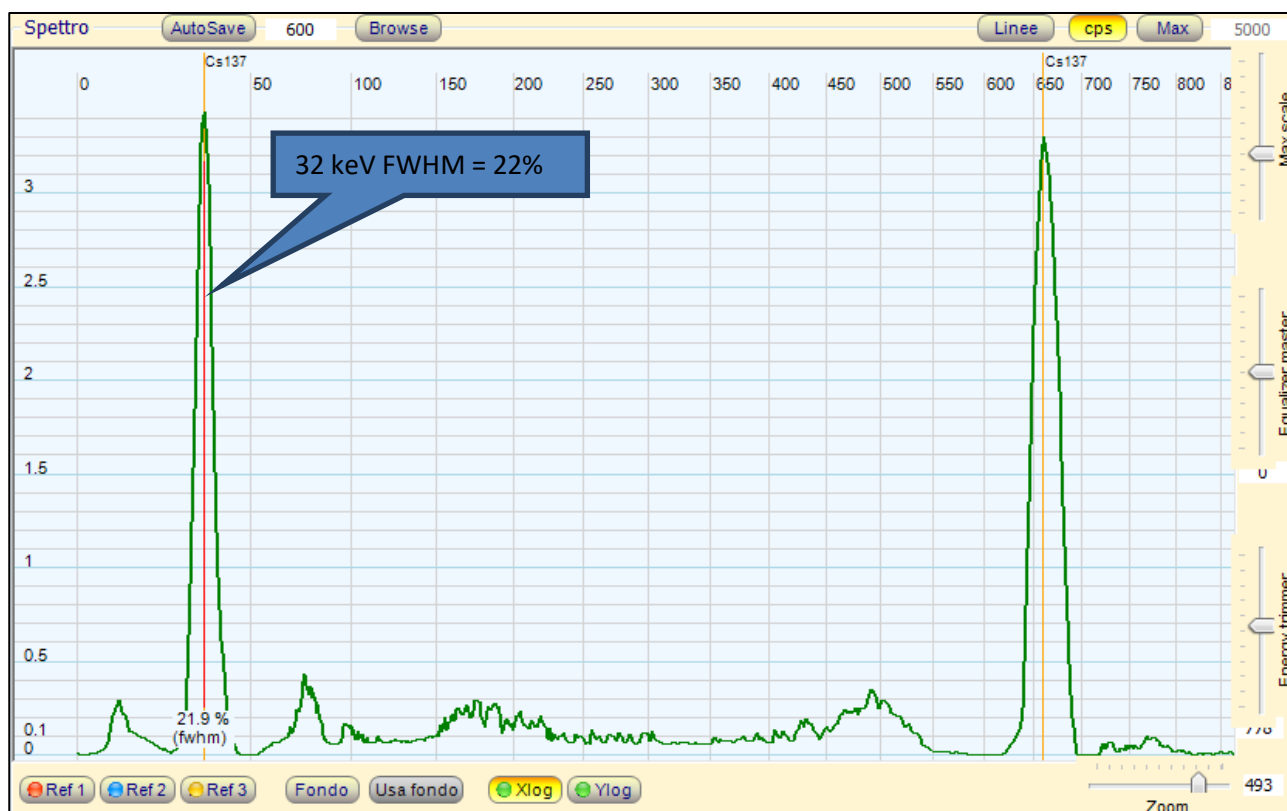
$$R = \frac{FWHM}{E_\gamma} = k \sqrt{E_\gamma} / E_\gamma = k / \sqrt{E_\gamma}$$

Quindi la risoluzione energetica risulta essere inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'energia del picco gamma. La risoluzione migliora all'aumentare dell'energia dei raggi gamma.

Per ii cristalli di scintillazione NaI(Tl) la risoluzione energetica è circa dal 5% al 10%, ma può essere migliorata con un algoritmo software che può parzialmente compensare l'allargamento del picco dovuto al cristallo.



Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

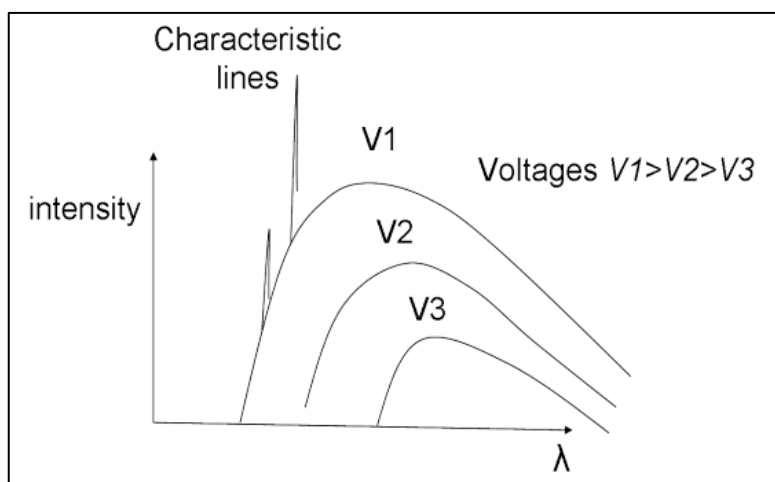


Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4 x 25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu - schermato

Spettrometria Sorgenti Raggi X

Teoria

Un tubo a raggi X è un tubo a vuoto che produce raggi X. Sono utilizzati nei generatori di raggi X. I raggi X sono parte dello spettro elettromagnetico, una radiazione ionizzante con lunghezze d'onda più corte della luce ultravioletta. I tubi a raggi X sono una evoluzione dei tubi sperimentali Crookes con i quale i raggi X sono stati scoperti alla fine del IXX secolo, da Wilhelm Röntgen. La disponibilità di questa fonte controllabile di raggi X ha creato il campo della radiografia, cioè la visualizzazione di oggetti opachi con radiazioni penetranti. I tubi a raggi X vengono utilizzati negli scanner CAT, negli scanner bagagli aeroportuali, nella cristallografia a raggi X, e per l'ispezione industriale.



Come con qualsiasi tubo a vuoto, vi è un catodo che emette elettroni nel vuoto e un anodo che raccoglie gli elettroni, stabilendo così un flusso di corrente elettrica, nota come il raggio, attraverso il tubo. Una fonte di alimentazione ad alta tensione, per esempio da 30 a 150 kilovolt (kV), è collegata attraverso catodo e anodo con lo scopo di accelerare gli elettroni. Lo spettro dei raggi X emessi dipende dal materiale anodico e dalla tensione di accelerazione. In molte applicazioni, il

flusso di corrente (tipicamente nell'intervallo da 1 mA a 1 A) può essere pulsato da circa 1 ms a 1 s. Ciò consente dosi consistenti di raggi X. Fino alla fine del 1980, i generatori di raggi X erano solo ad alta tensione, AC di alimentazione variabile. Alla fine del 1980 si è imposto un diverso metodo di controllo chiamato commutazione ad alta velocità. Ciò ha fatto seguito alla introduzione della tecnologia elettronica di alimentatori switching ed ha permesso un controllo più preciso della macchina a raggi X, risultati di qualità superiore, e una riduzione dell'esposizione a raggi X.

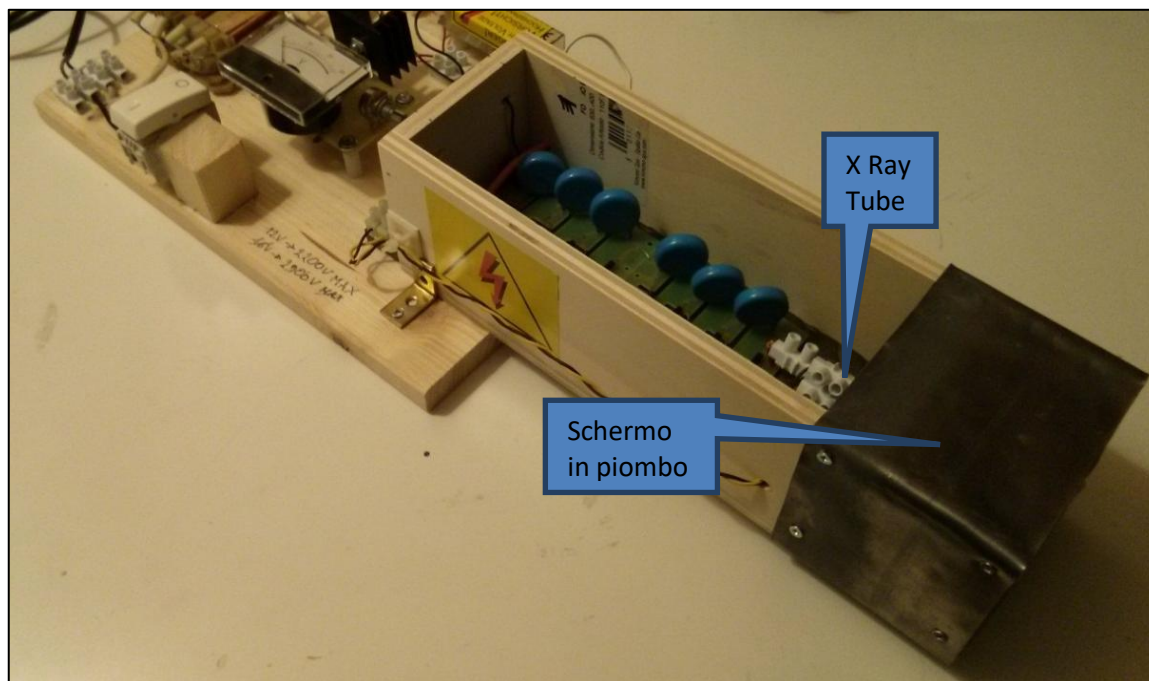
Gli elettroni emessi dal catodo si scontrano con il materiale anodico, di solito tungsteno, molibdeno o rame, e colpiscono altri elettroni, ioni e nuclei all'interno del materiale anodico. Circa 1% dell'energia generata viene emessa / irradiata sotto forma di raggi X, generalmente perpendicolarmente al percorso del fascio elettronico. Il resto dell'energia viene rilasciata sotto forma di calore. Nel corso del tempo, del tungsteno verrà depositato sulla superficie interna del tubo, compresa la superficie del vetro. Questo processo lentamente scurisce il tubo. Alla fine, il deposito di tungsteno può diventare sufficientemente conduttivo che ad un valore sufficientemente alto di tensioni, si verifica la formazione di archi. L'arco salterà dal catodo al deposito di tungsteno, e poi all'anodo. Questo arco provoca un effetto chiamato "crazing" sul vetro interno del tubo. Col passare del tempo, il tubo diventa instabile anche a tensioni più basse, e deve essere sostituito. A questo punto, il tubo viene rimosso dal sistema a raggi X, e sostituito con un dispositivo.

L'effetto di generazione di raggi X è generalmente chiamato effetto Bremsstrahlung, una contrazione della parola tedesca bremsen (frenatura), e Strahlung (radiazione).

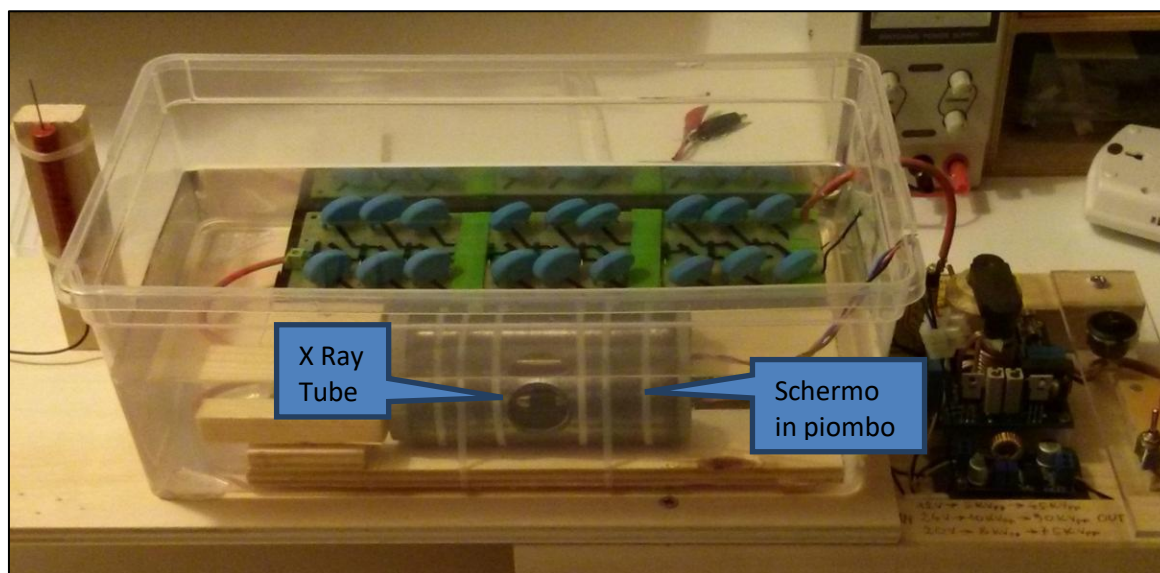
La gamma di energie emesse dal sistema può essere regolata cambiando la tensione applicata, e applicando dei filtri in alluminio di spessore variabile. Filtri in alluminio vengono inoltre inseriti nel percorso del fascio di raggi X per rimuovere le radiazioni "soft".

Apparecchiature

Generatore da 15 kV

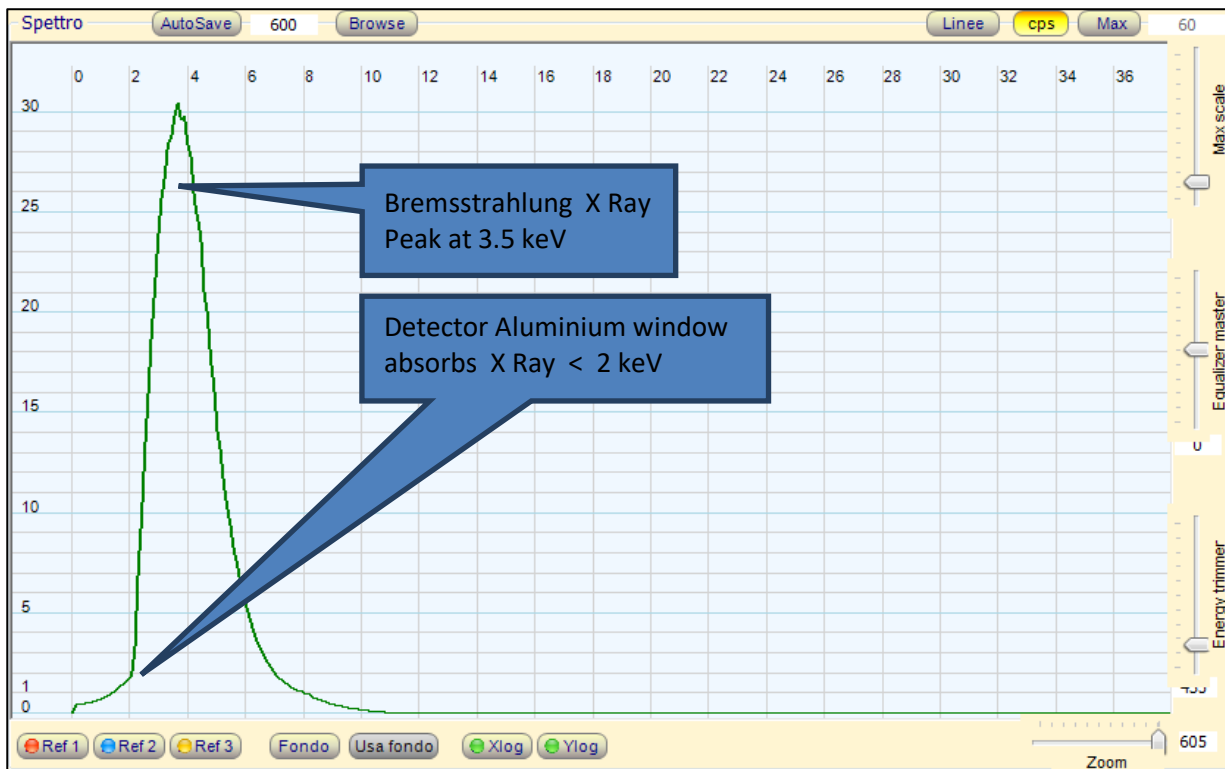


Generatore da 75 kV

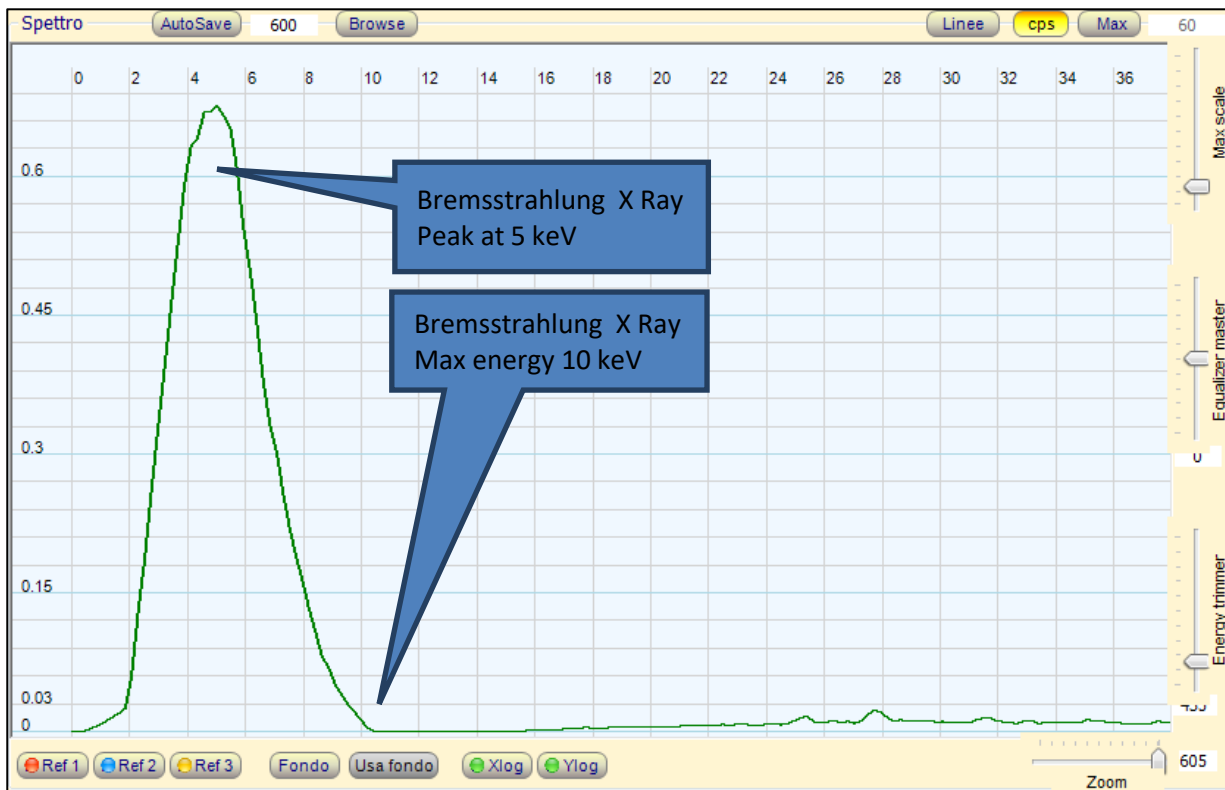


Sorgente X da 15 kV (Finestra in berillio – Catodo in tungsteno)

V ~ 10 kV



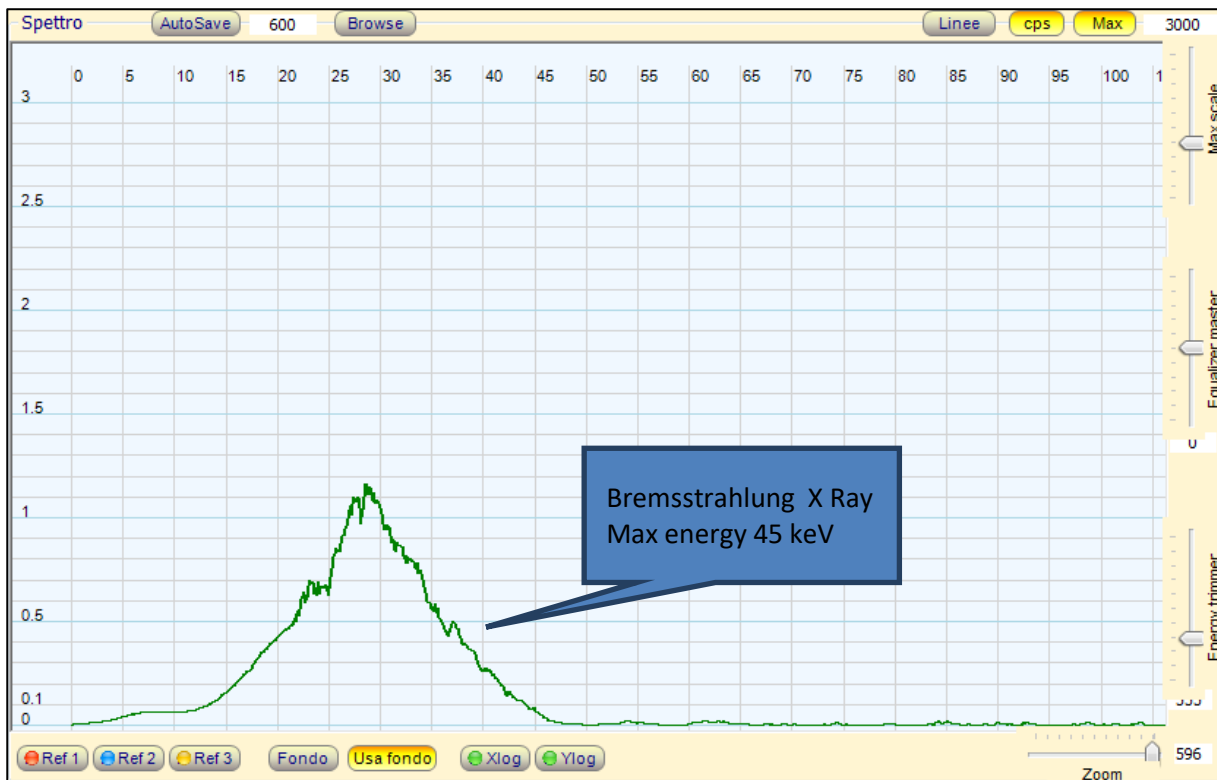
V ~ 15 kV



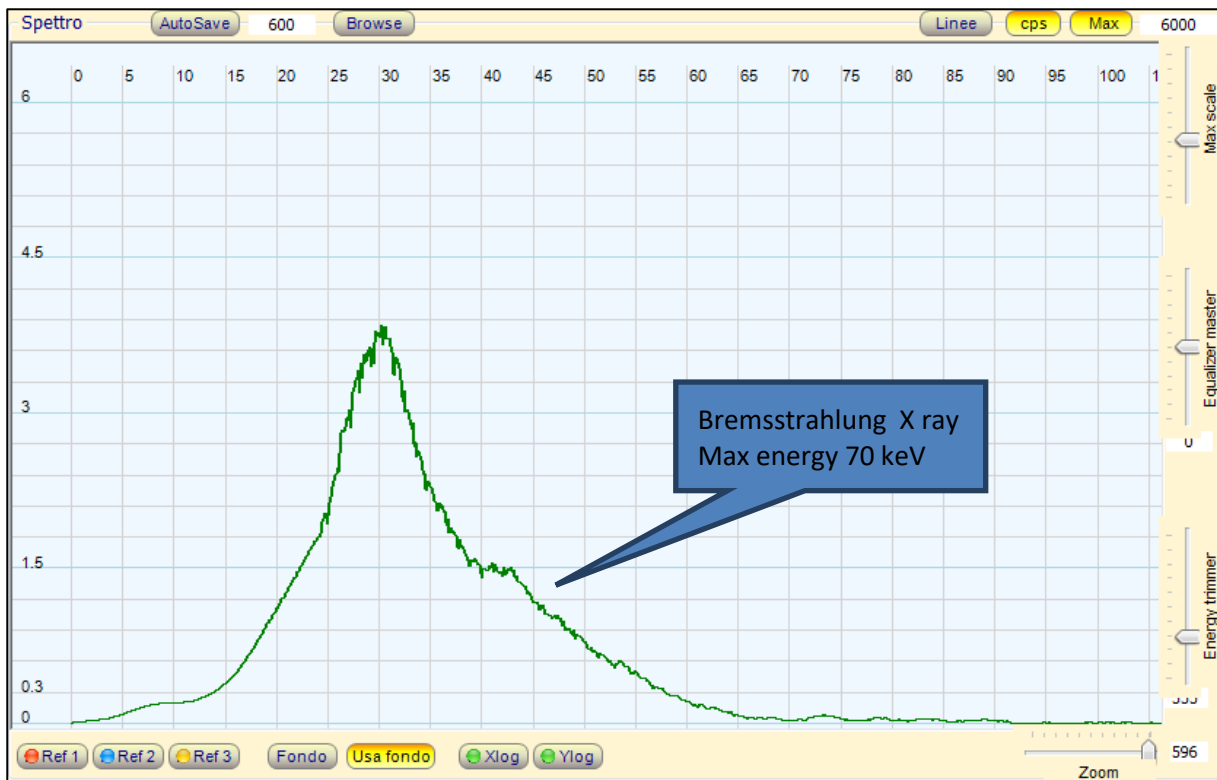
Sonda a Scintillazione Rap47 – cristallo CsI(Tl) 25.4 x 1.0mm

Sorgente X da 75 kV (Tubo in vetro – Catodo in tungsteno)

V ~ 45 kV



V ~ 70 kV



Sonda a Scintillazione Rap47 – cristallo CsI(Tl) 25.4 x 1.0mm

V ~ 100 kV



Sonda a Scintillazione Rap47 – cristallo CsI(Tl) 25.4 x 1.0mm – misura fatta con collimatore in piombo per ridurre il rateo di conteggio

Disclaimer e Avvertenze sulla Sicurezza

- **Prima di utilizzare qualsiasi sorgente radioattiva:** i regolamenti locali, nazionali e internazionali possono limitare l'acquisto, lo stoccaggio, la detenzione, il trasporto, l'uso o lo smaltimento di sorgenti radioattive. Si prega di consultare le normative locali per garantire piena conformità prima di gestire qualsiasi sorgente radioattiva, anche se di piccola intensità.
- **Mai manomettere** un rilevatore di fumo a ionizzazione o tentare di rimuovere la sorgente radioattiva. Non rimuovere il materiale radioattivo da un qualsiasi oggetto.
- Gli esperimenti riportati in questo documento sono destinati a scopi **didattici** e con il fine di **testare** gli strumenti di misura e non dovrebbe **mai essere replicati** senza adeguate conoscenze e senza il pieno rispetto delle normative.

Precauzioni con Sorgenti Radioattive

Tempo: Il modo più semplice per ridurre l'esposizione è quello di mantenere minimo il tempo speso nelle vicinanze di una sorgente radioattiva. Se il tempo è ridotto a metà, così sarà l'esposizione, mantenendo costanti tutti gli altri fattori.

Distanza: la distanza è un altro mezzo efficace per ridurre l'esposizione alle radiazioni. Una formula nota come "legge dell'inverso del quadrato" mette in relazione il tasso di esposizione alla distanza. Il raddoppio della distanza da una sorgente radioattiva riduce l'esposizione a un quarto del valore originale. Se la distanza è triplicata, l'esposizione è ridotta di un fattore nove.

Schermatura: La schermatura è costituita da un qualsiasi materiale utilizzato per ridurre le radiazioni che raggiungono l'utente. Mentre un singolo foglio di carta può bloccare alcuni tipi di radiazioni come le particelle alfa, altra radiazione come neutroni e fotoni gamma richiedono molta più schermatura. Materiali densi, quali piombo o acciaio, sono usati per proteggersi dai fotoni gamma. Materiali contenenti grandi quantità di idrogeno, come polietilene, vengono utilizzati per proteggersi dai neutroni.

Nessun alimento o bevanda è in assoluto ammessa in un laboratorio con sorgenti radioattive.