

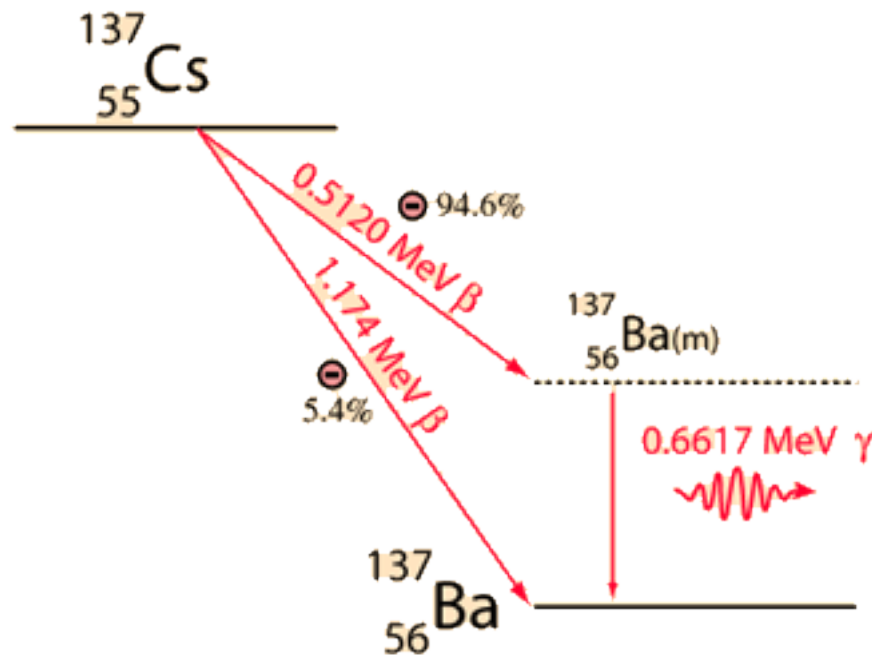


Presentazione dell'esperienza di laboratorio: misura di spettri di raggi gamma con sorgenti radioattive

CORSO DI FORMAZIONE «SCALA» A ROMA TOR VERGATA

11 FEBBRAIO 2020

Cesio-137 (^{137}Cs)

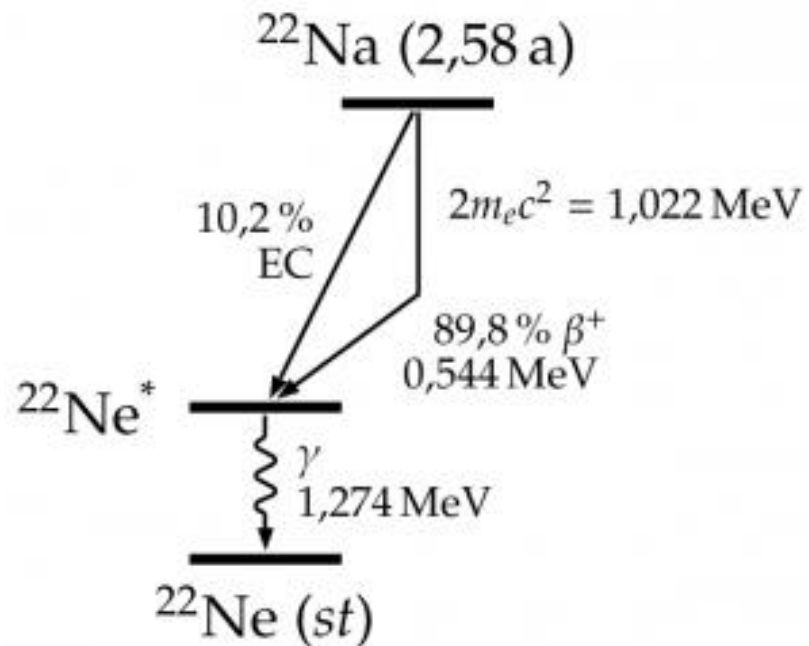


Il **Cesio-137** (Cs-137), o radio cesio è un isotopo radioattivo del cesio che si forma come uno dei più comuni prodotti di fissione dalla fissione nucleare dell'uranio-235 e altri isotopi fissili nei reattori nucleari e le armi nucleari. E' tra i più problematici dei prodotti di fissione ad emivita 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.

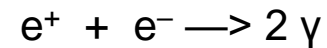
Il **Cesio 137** ha un tempo di dimezzamento di circa 30,17 anni. Circa il 95 per cento decade per emissione beta ad un isomero nucleare metastabile di bario: bario-137m (Ba-137m). Il resto popola direttamente lo stato fondamentale di bario-137, che è stabile. Ba-137m ha una emivita di circa 153 secondi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

Sodio-22 (^{22}Na)

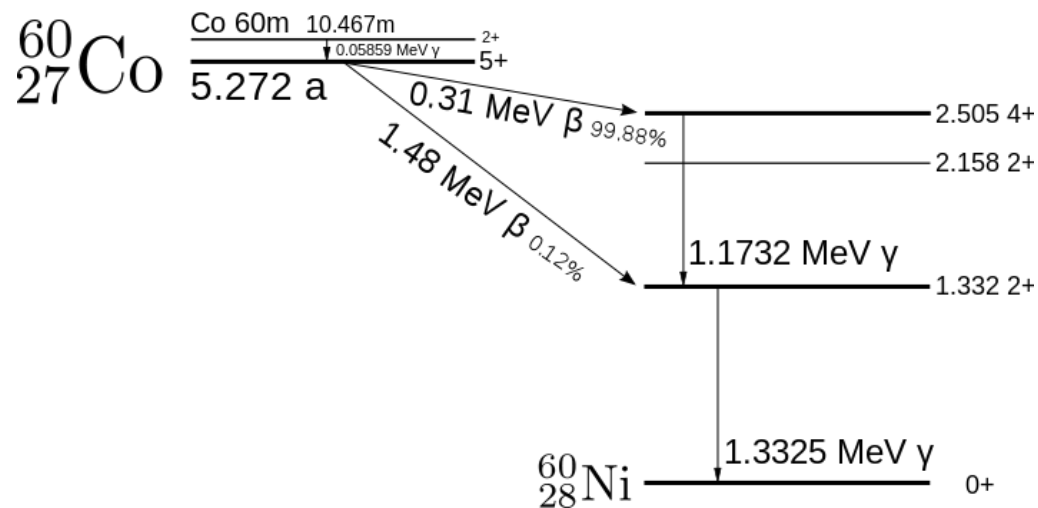


L'isotopo **Na-22** decade (nel 99,95% dei casi) con emivita di 2,6 anni, per emissione di positroni o cattura elettronica verso il primo stato eccitato del ^{22}Ne a 1,274 MeV (il quale successivamente si rilassa per emissione di fotone gamma). I positroni emessi dalla sorgente si annichilano nel materiale 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.

Cobalto-60 (^{60}Co)



Il **cobalto-60**, è un isotopo radioattivo sintetico del metallo cobalto.

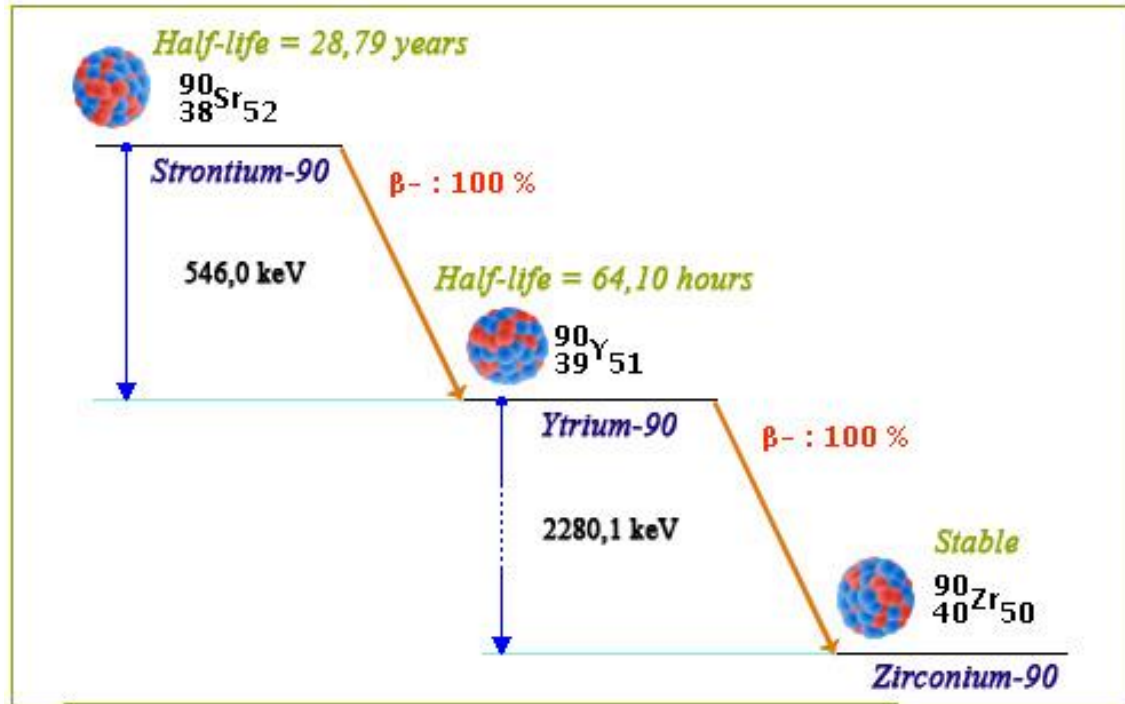
A causa della sua corta vita media, pari a 5,27 anni, il cobalto-60 non si trova in natura.

Viene prodotto artificialmente per attivazione neutronica del cobalto-59.

Il cobalto-60 decade per decadimento beta negativo nell'isotopo stabile nichel-60.

Il nucleo di nichel-60 energizzato emette due raggi gamma con energie di 1,17 e 1,33 MeV per diventare nichel-60 stabile.

Stronzio-90 (^{90}Sr)

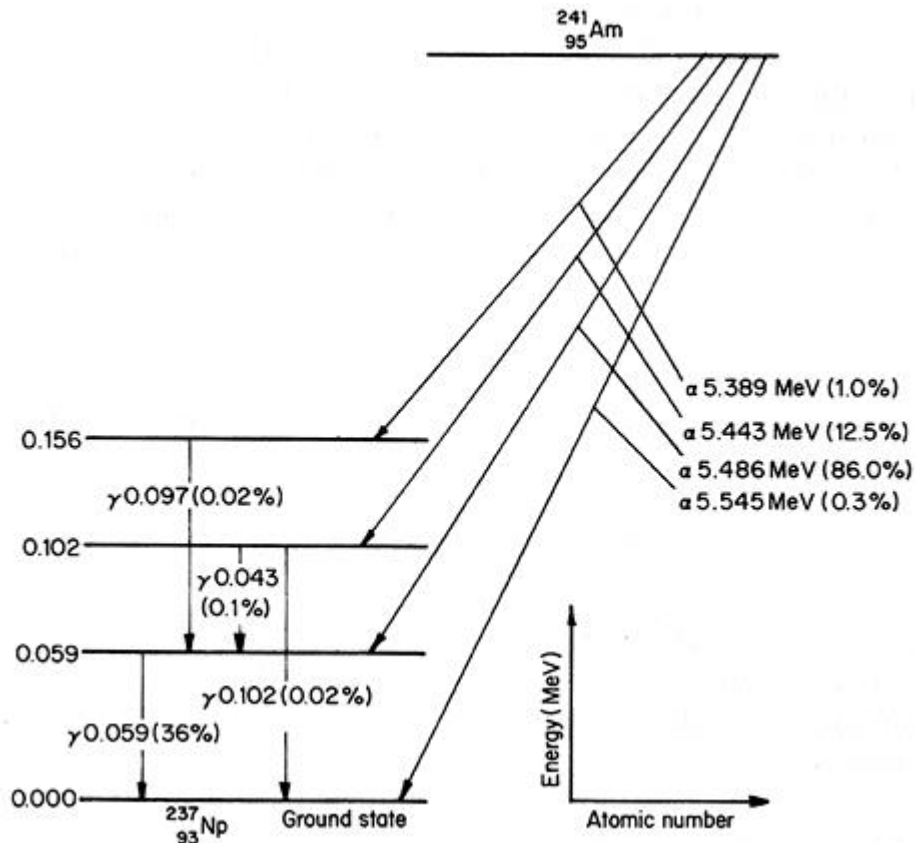


Sono noti 16 isotopi instabili, tra cui il più importante è ^{90}Sr , con la sua vita media di 29 anni.

^{90}Sr è un sotto-prodotto delle esplosioni nucleari ed è presente nel *fallout*, la caduta di polveri sulla superficie dopo un'esplosione nucleare. È pericoloso per la salute perché tende a sostituirsi al calcio delle ossa e quindi a permanervi per lungo tempo, provocando tramite la sua radioattività l'insorgere di forme tumorali.

^{90}Sr è uno dei più longevi emettitori noti di raggi beta ad alta energia ed è allo studio per poter essere impiegato in sistemi ausiliari di produzione di energia elettrica (*Systems for Nuclear Auxiliary Power, SNAP*) utilizzabili dove è richiesta una fonte di energia elettrica leggera, compatta e durevole.

Americio-241 (^{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.

Il decadimento dell'americio avviene per **emissione di particelle alfa con energia principalmente di 5443 KeV e 5486 KeV**.

L'energia dei fotoni gamma di decadimento degli stati eccitati di ^{237}Np è 59.5409 keV per la massima parte, con contributi di altri fotoni di decadimento con energie di 13.9 keV, 17.8 keV and 26.4 keV

Rivelazione di fotoni gamma in laboratorio

- ▶ Si utilizzano materiali «scintillatori»
- ▶ Passando attraverso il materiale la particella incidente cede parte della propria energia allo scintillatore causando, ad esempio, l'eccitazione di un elettrone che si sposta in un livello ad energia superiore. Quando l'elettrone decade al livello che occupava prima dell'eccitazione emette un fotone di energia relativamente bassa, tipicamente nel visibile. Tale impulso di luce viene poi rivelato ed amplificato da opportuni sensori, ad esempio da un fotomoltiplicatore.
- ▶ Sono composti in genere da alogenuri alcalini, ad esempio **Nal**. Si distinguono per l'elevato potere d'arresto (*stopping power*), che li rende particolarmente adatti a rivelare radiazione penetrante e per l'alta efficienza.
- ▶ I cristalli sono spesso **drogati**, per esempio lo ioduro di sodio con il **tallio**. Queste impurità sono essenziali per aumentare l'efficienza di scintillazione, ridurre l'autoassorbimento e avere la luce in uscita nella lunghezza d'onda voluta.

Rivelazione di fotoni gamma in laboratorio

- ▶ Il processo che porta all'emissione di luce è il seguente. La struttura regolare del cristallo forma delle bande energetiche (banda di conduzione e banda di valenza), separate da una banda proibita, dove non si possono trovare elettroni. La particella da rivelare cede dell'energia a un elettrone che può passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione, si forma una coppia elettrone-lacuna. L'elettrone e la lacuna migrano indipendentemente fino a quando l'elettrone non ha perso abbastanza energia e si diseccita tornando nella banda di valenza emettendo un fotone. Questo processo è inefficiente, e la probabilità di autoassorbimento è molto alta, in quanto lo spettro di emissione e di assorbimento sono molto simili.
- ▶ Con l'aggiunta di impurità si formano dei centri di attivazione, dove è maggiore la probabilità di ricombinazione tra l'elettrone nella banda di conduzione e una lacuna nella banda di valenza. Inoltre in prossimità dell'attivatore la struttura a bande è modificata, cioè si formano degli stati energetici tra la banda di conduzione e la banda di valenza. In questo modo un elettrone che si diseccita produce molti fotoni ad energie molto inferiori rispetto all'energia che separa le due bande e l'autoassorbimento diventa trascurabile.

Rivelazione di fotoni gamma in laboratorio

- ▶ Processi di interazione dei fotoni gamma con il materiale scintillatore:
 - ▶ **Effetto fotoelettrico**: tutta l'energia del fotone viene ceduta al materiale scintillatore
 - ▶ **Effetto Compton**: solo una parte dell'energia del fotone viene ceduta al materiale scintillatore
 - ▶ **Creazione di coppie $e^+ e^-$** : processo non importante a energie inferiori a 1.2 MeV

Rivelazione di fotoni gamma in laboratorio

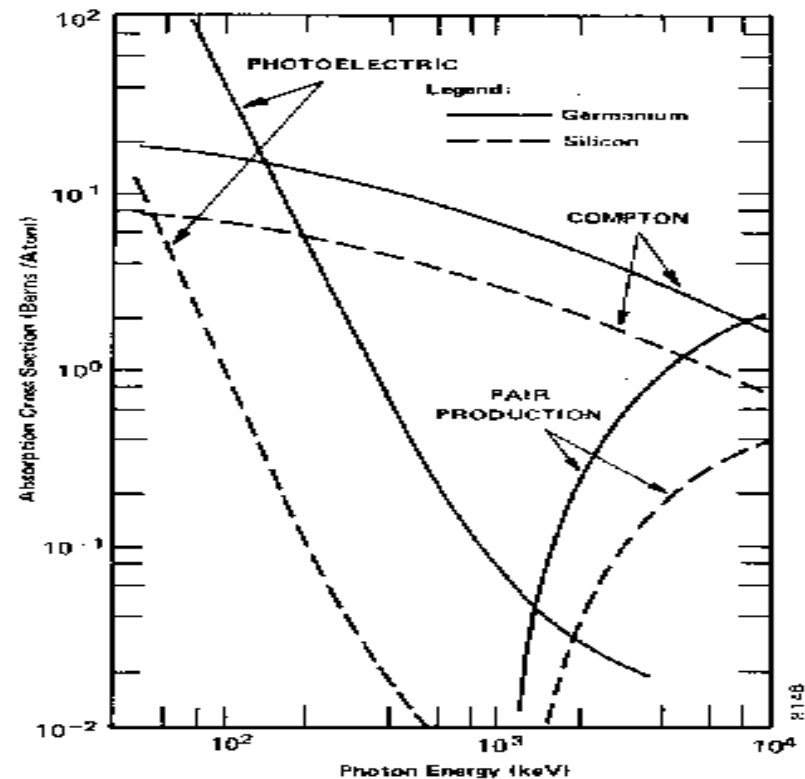


Fig. 7.2. Relative Probability of Each of the Three Types of Interactions as a Function of Energy.

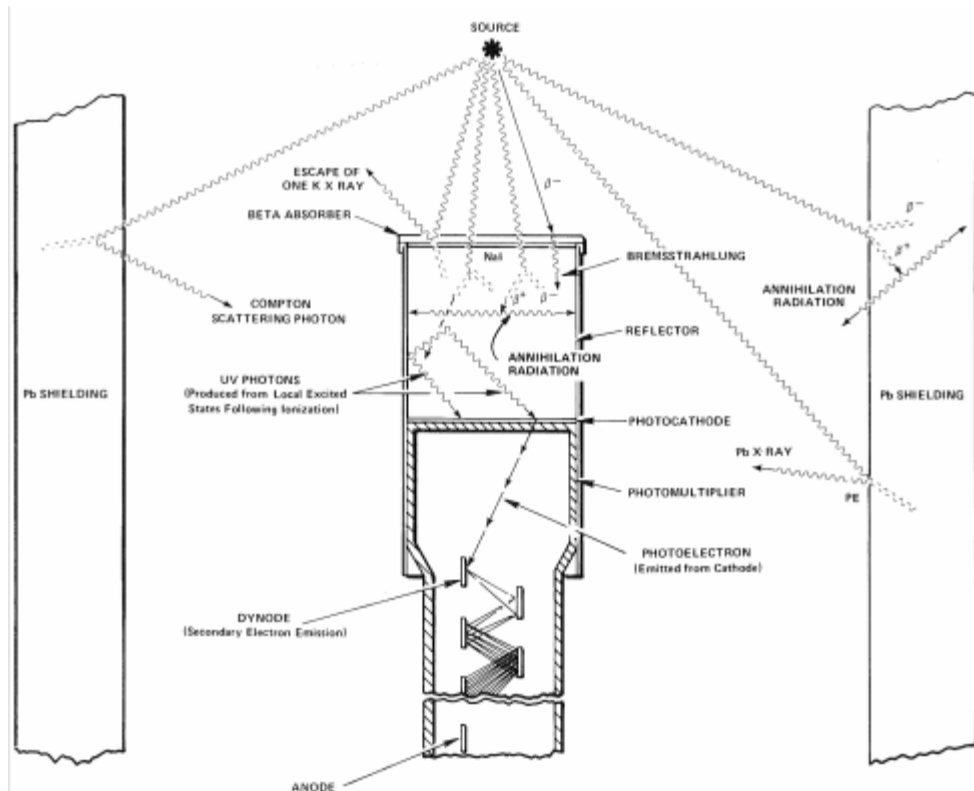
Effetto fotoelettrico

- ▶ L'**effetto fotoelettrico** consiste nell'emissione di elettroni da un materiale, quando questo viene colpito da fotoni aventi lunghezza d'onda minore di un valore ben definito, dipendente dal materiale.
- ▶ Come comprese Einstein (1905), riprendendo la teoria di Planck (1900), l'effetto fotoelettrico evidenzia la natura quantistica della luce. Nella radiazione elettromagnetica, l'energia non è distribuita in modo uniforme sull'intero fronte dell'onda ma è concentrata in singoli *quanti* (pacchetti discreti) di energia, i fotoni. Un solo fotone per volta, e non l'intera onda nel suo complesso, interagisce singolarmente con un elettrone, al quale cede la sua energia. Affinché ciò si verifichi è necessario che il singolo fotone abbia energia sufficiente a rompere il legame elettrico che tiene legato l'elettrone all'atomo. Questa "soglia minima" di energia del fotone si determina in base alla relazione di Planck $E = hf$
- ▶ In definitiva risulta, per l'energia cinetica dell'elettrone emesso: $E_e = hf - E_{legame}$
- ▶ *Sezione d'urto* di emissione di elettroni per effetto fotoelettrico: $\sigma_{fe} \propto Z^5 / E_\gamma^{7/2}$

Effetto Compton

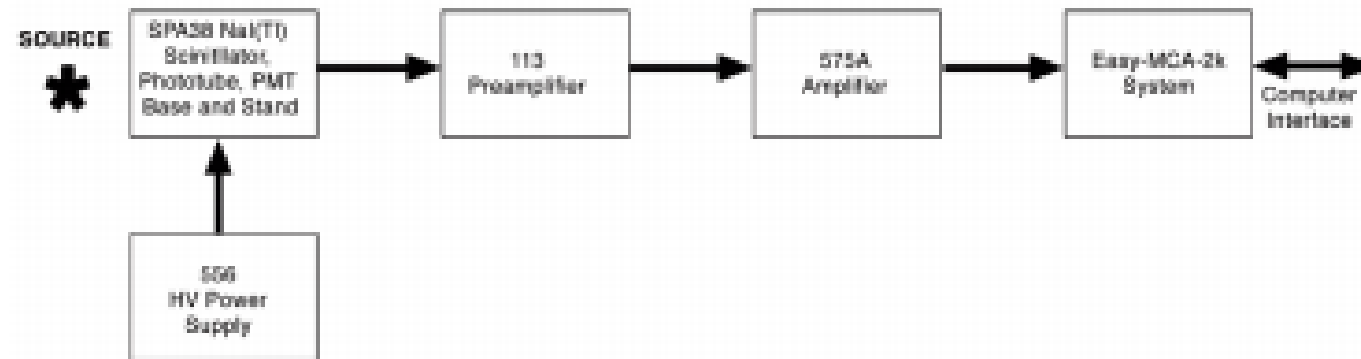
- ▶ La **diffusione Compton** o **effetto Compton** (*Compton scattering*) è un fenomeno di *scattering* interpretabile come un urto perfettamente elastico (l'energia meccanica totale si conserva) tra un fotone e un elettrone. Il fenomeno, osservato per la prima volta da Arthur Compton nel 1922, divenne ben presto uno dei risultati sperimentali decisivi in favore della descrizione quantistica della radiazione elettromagnetica.
- ▶ La differenza tra la lunghezza d'onda del fotone dopo l'urto e quella del fotone incidente è detta *Spostamento Compton*, e indica di quanto cambia la lunghezza d'onda del fotone diffuso, rispetto a quella del fotone incidente, in seguito all'interazione con la particella. Lo spostamento è tanto maggiore quanto è più ampio l'angolo di diffusione, ed è uguale a $\frac{h}{m_e c} (1 - \cos\varphi)$
- ▶ Sezione d'urto di diffusione di elettroni per effetto Compton: $\sigma_{Compton} \propto Z$

NaI accoppiato a un fotomoltiplicatore

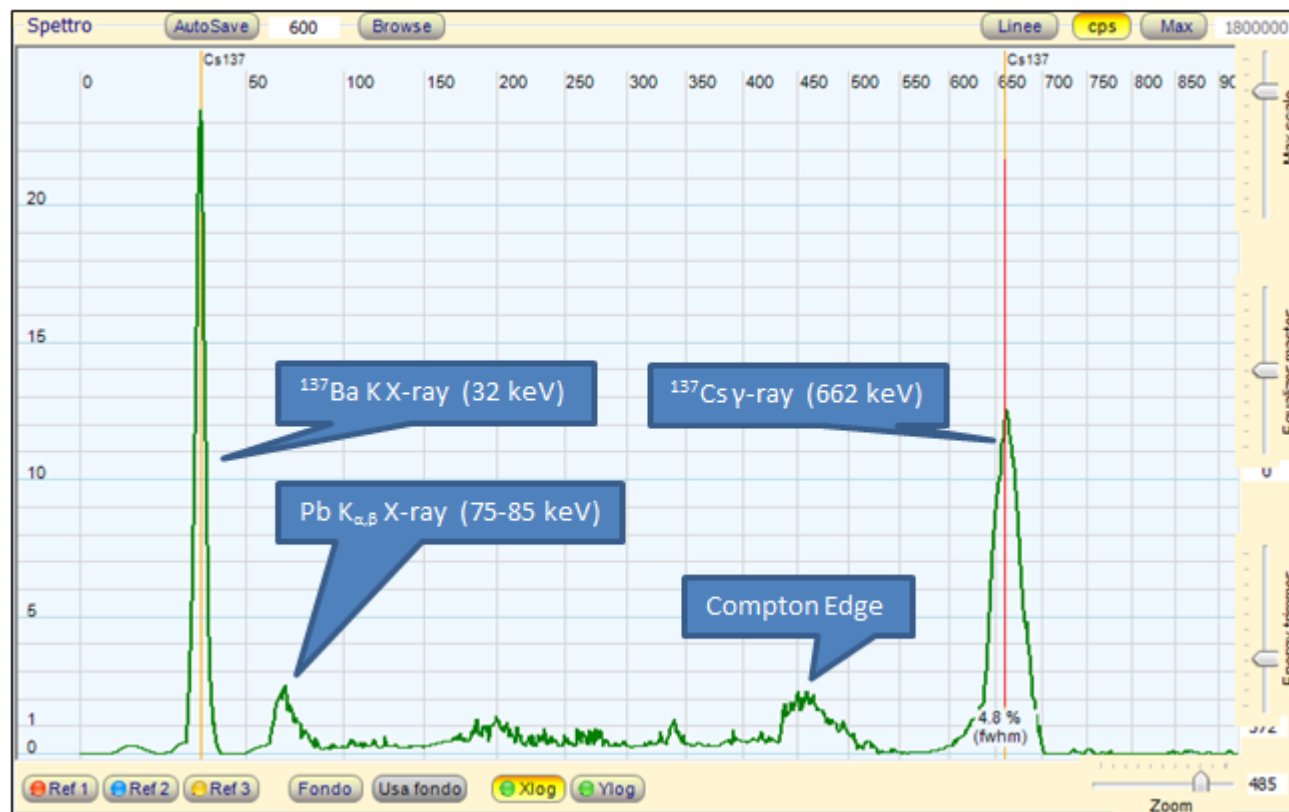


- I fotoni di scintillazione prodotti nel cristallo di NaI raggiungono il *fotocathode* e vengono convertiti in elettroni per effetto fotoelettrico («*fotoelettroni*»)
- I fotoelettroni vengono accelerati dal campo elettrico applicato tra elettrodi metallici opportunamente disposti nel tubo a vuoto del fotomoltiplicatore (*dinodi*)
- Ad ogni impatto con un elettrodo metallico, gli elettroni accelerati estraggono ulteriori elettroni, generando così una moltiplicazione in cascata della carica elettrica nel tubo a vuoto («cascata elettronica»)
- Sull'ultimo elettrodo (*anodo*) si raccoglie infine il segnale «finale» che viene quindi inviato ai successivi stadi di elaborazione del sistema di raccolta dei dati.

Diagramma a blocchi dell'esperimento

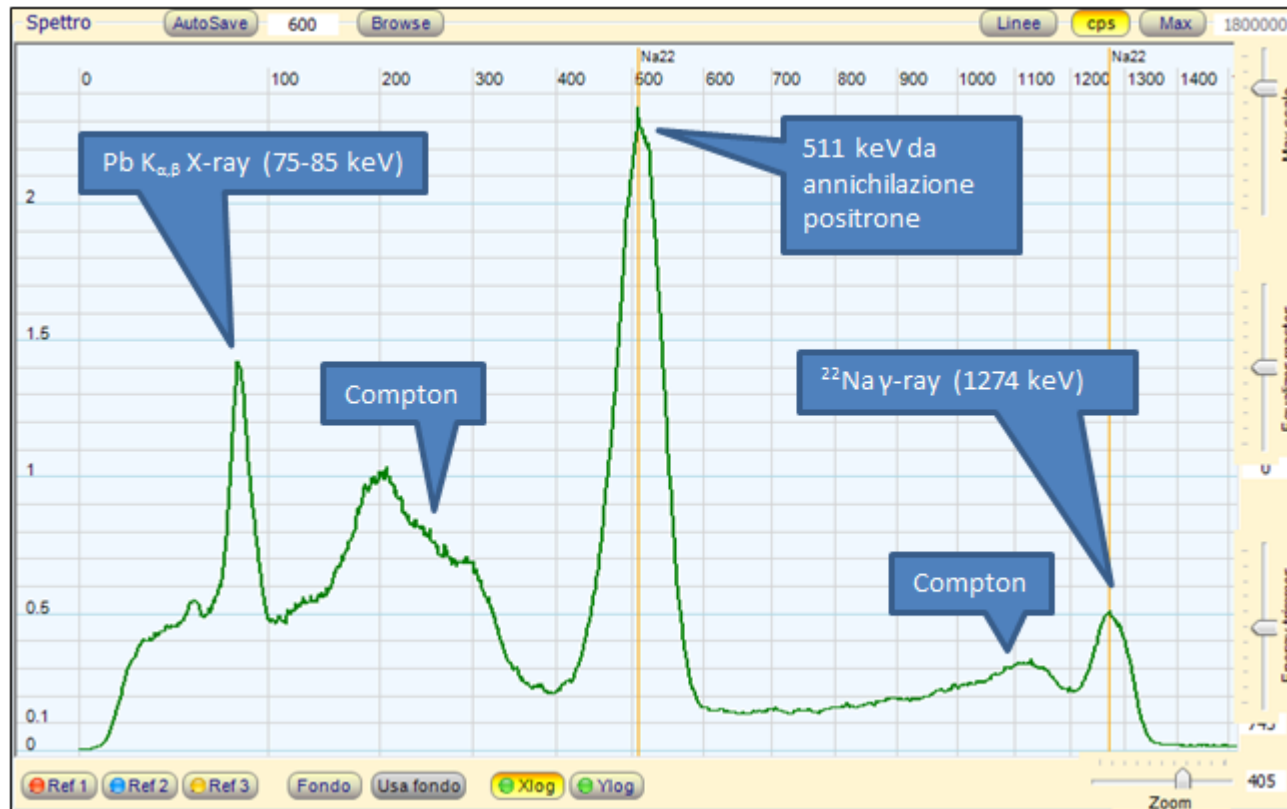


Spettro del ^{137}Cs



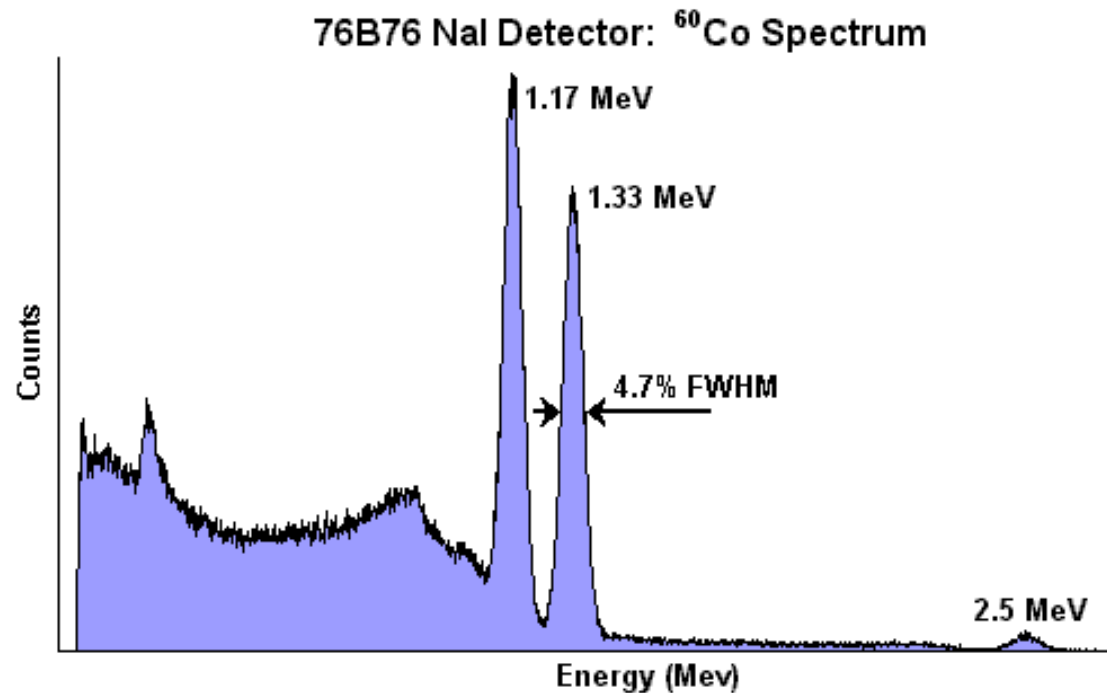
Si osserva il picco caratteristico del fotone gamma a 662 keV

Spettro del ^{22}Na



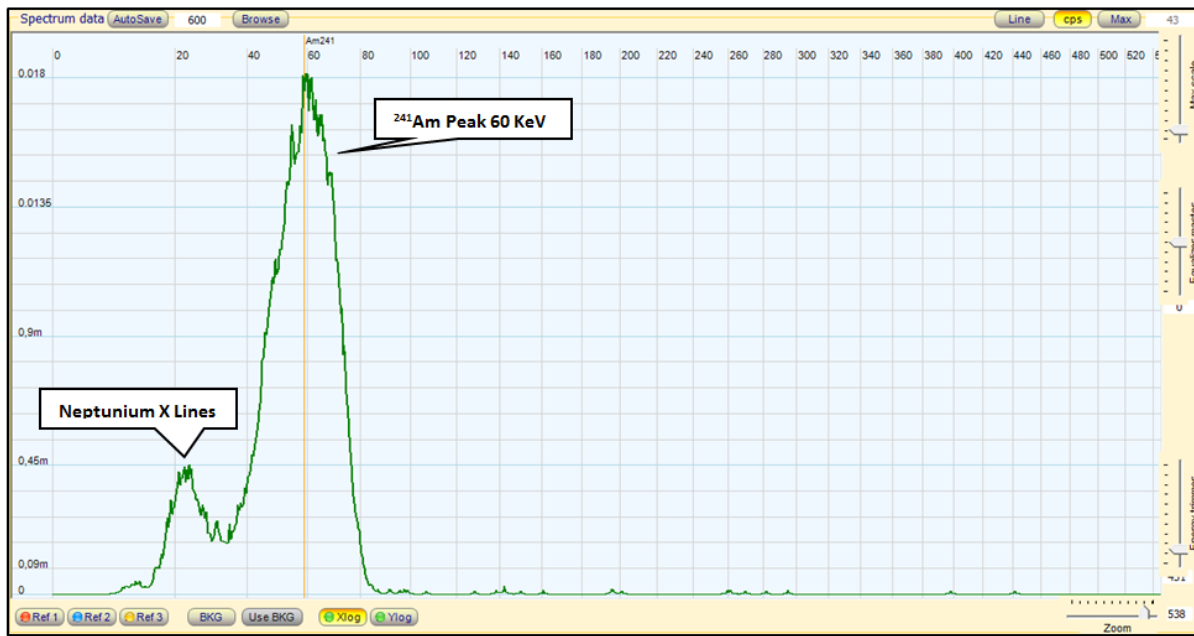
Si osserva il picco caratteristico del fotone gamma a 1274 keV, più il picco dell'energia di uno dei due fotoni derivanti dall'annichilazione del positrone prodotto nel decadimento β^+

Spettro del ^{60}Co



Si osservano i picchi caratteristici dei fotoni gamma a 1.17 e 1.33 MeV, oltre che un picco a 2.5 MeV (= 1.17 + 1.33) e un picco di «backscattering» a bassa energia.

Spettro di ^{241}Am



Si osserva il picco caratteristico del fotone gamma a circa 60 keV e il contributo allo spettro dei fotoni di decadimento di energia inferiore degli stati eccitati di ^{237}Np .

Assorbimento di fotoni gamma

- ▶ Indichiamo con $I(0)$ il numero di segnali raccolti dal fotomoltiplicatore in presenza di una data sorgente (ad es. ^{137}Cs) in un intervallo di tempo fissato (ad es. 1 minuto), e con $I(X)$ il numero di segnali raccolti dal fotomoltiplicatore in presenza della stessa sorgente ma con uno spessore X di materiale assorbente interposto tra la sorgente e il cristallo di NaI.
- ▶ Se interponiamo tra la sorgente e il cristallo di NaI uno spessore X di materiale assorbente, per il segnale osservato a valle del fotomoltiplicatore vale la legge $I(X) = I(0) e^{-X/L}$, dove L è un parametro costante caratteristico del materiale assorbente, chiamato «lunghezza di assorbimento»
- ▶ Calcolando il logaritmo naturale di entrambi i membri di questa equazione, otteniamo $\ln(I(X)/I(0)) = -X/L$
- ▶ Quindi, se al variare dello spessore X si rappresenta su un grafico la quantità $\ln(I(X)/I(0))$ in funzione di X , si dovrebbe riuscire a interpolare i punti sul grafico con una linea retta il cui coefficiente angolare è uguale a $-\frac{1}{L}$

Misura della sezione d'urto di assorbimento

- ▶ La sezione d'urto di assorbimento è legata alla lunghezza di assorbimento L e al numero di centri di assorbimento (nuclei degli atomi del materiale assorbitore) per unità di volume:

$$\sigma_{ass} = \frac{M}{\rho N_A L}$$

dove M è la massa molare del materiale assorbitore, ρ è la sua densità di massa e N_A è il numero di Avogadro.

Schema di svolgimento dell'esperienza

- ▶ Ricerca del «punto di lavoro» del fotomoltiplicatore, cioè del valore dell'alta tensione da applicare al sistema dei dinodi affinché il fotomoltiplicatore si trovi in condizioni di massima efficienza in assenza di «rumore»
- ▶ Misura dello spettro di «fondo» (misura fatta al punto di lavoro, in assenza di sorgenti)
- ▶ Misura degli spettri di ciascuna sorgente
- ▶ Ricerca dei valori dei picchi di ciascuno spettro e «*calibrazione*» energia – conteggi
- ▶ Tempo permettendo, misura della «*lunghezza di assorbimento*» dei fotoni gamma nel ferro.