

J9 - Badanie aktywności szkła uranowego

Celem doświadczenia jest identyfikacja promieniotwórczych domieszek w szkłe, z którego wykonano klosz starej lampy. Należy tego dokonać poprzez analizę promieniowania γ emitowanego przez ten klosz. Do pomiaru promieniowania γ stosuje się detektor germanowy o dużej rozdzielczości.

Materiał, który należy opanować do kolokwium wstępnego

1. Oddziaływanie kwantów γ z materią:

- a) efekt fotoelektryczny,
- b) efekt Comptona,
- c) tworzenie par, anihilacja pozytonów,
- d) zależność przekrojów czynnych na oddziaływanie kwantów γ z materią od energii kwantów gamma i liczby atomowej ośrodka.

2. Detekcja promieniowania γ :

- a) budowa i zasada działania detektora germanowego,
- b) kalibracja energetyczna detektora źródłami promieniowania γ ,
- c) widmo monoenergetycznej linii γ w detektorze,
- d) podstawowe układy elektroniczne współpracujące z detektorem: oscyloskop, zasilacz wysokiego napięcia, wzmacniacz, wielokanałowy analizator amplitudy.

3. Naturalne tło promieniowania γ . Szeregi promieniotwórcze. Do instrukcji dołączono fragment mapy nuklidów pomiędzy talem a uranem. Proszę wydrukować ten rysunek i zaznaczyć na nim przebieg trzech naturalnych szeregów promieniotwórczych.

Przebieg pomiarów

1. Zapoznanie się z układem pomiarowym i zrozumienie jego działania (warto zrobić rysunek!).
2. Optymalizacja warunków pracy układu (czas kształtowania impulsów).
Uwaga! Detektor powinien być pod napięciem, którego nie należy zmieniać. W razie wątpliwości konieczne skonsultuj się z prowadzącym!
3. Kalibracja energetyczna układu pomiarowego przy wykorzystaniu standardowych źródeł promieniowania γ .
4. Pomiar promieniowania γ tła w pomieszczeniu Pracowni.
5. Pomiar promieniowania γ klosza lampy .

Uwaga: należy zapisywać na dysku komputera wszystkie mierzone widma!

Opis

Opis powinien zawierać następujące elementy:

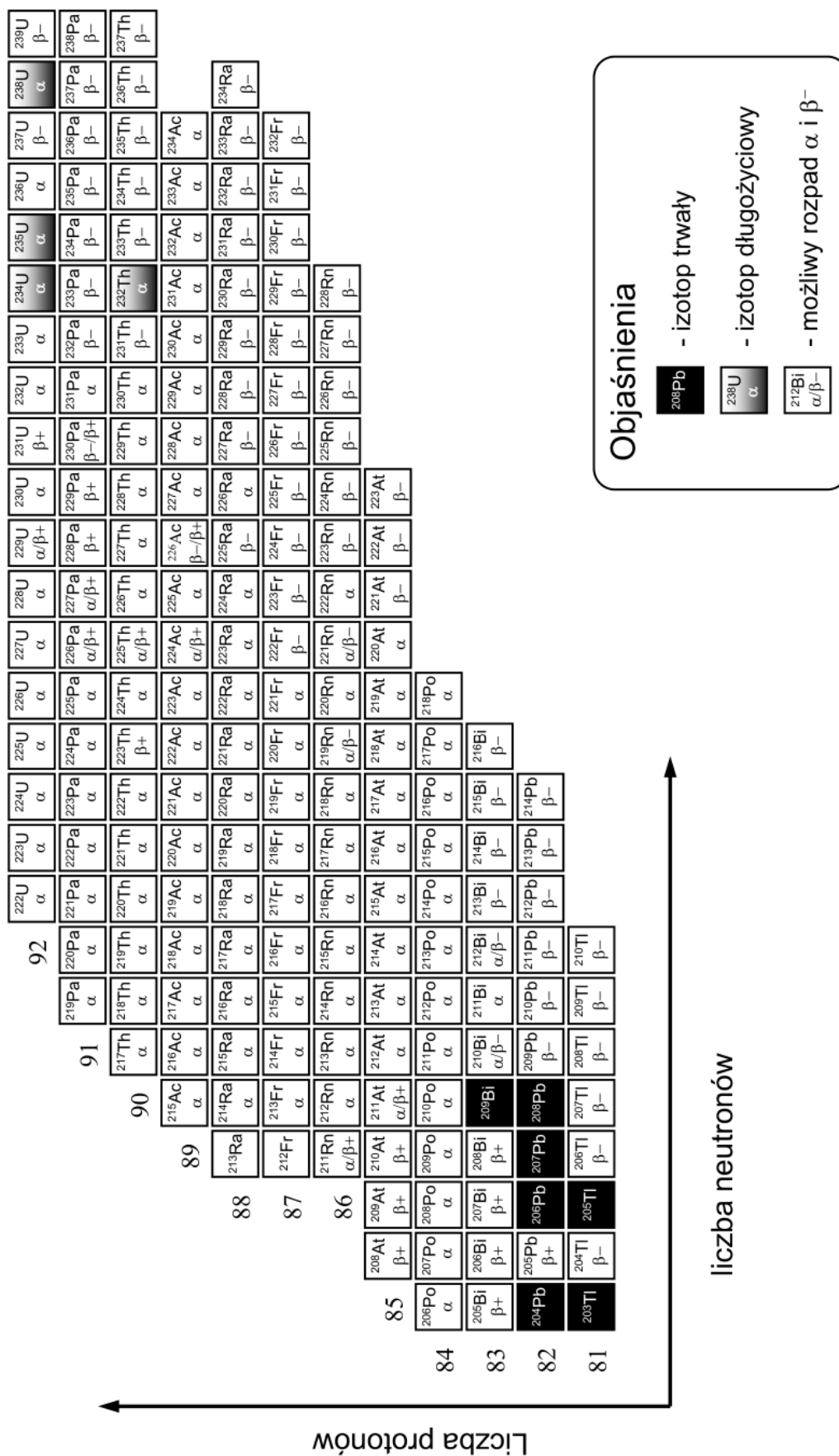
- Streszczenie.
- Krótki wstęp prezentujący ideę oraz cel pomiarów.
- Schemat układu doświadczalnego.
- Opis warunków pomiarowych (ew. ich optymalizacji).

- Opis samych pomiarów oraz ich wyniki.
- Analiza danych. Należy przeprowadzić dokładną kalibrację energetyczną detektora. Zazwyczaj jest ona z dobrym przybliżeniem liniowa. Zaleca się jednak stworzenie wykresu reszt, czyli różnicy między wartością tablicową linii γ a wartością jaka wynika z linii kalibracyjnej. Jeśli wykres reszt sugeruje, że poprawki nieliniowe mogą poprawić dokładność kalibracji, to należy je wprowadzić. Warto też stworzyć wykres zdolności rozdzielczej detektora (FWHM) w funkcji energii promieniowania γ . Następnie od widma promieniowania γ klosza lampy należy odjąć widmo tła.
- Wyniki i ich dyskusja. Należy zidentyfikować linie γ w widmie klosza po odjęciu tła. Trzeba określić czy są linie widoczne w widmie klosza, których nie było w widmie tła oraz wyznaczyć te linie w widmie klosza, których intensywność jest w statystycznie istotnym stopniu wyższa niż w widmie tła. Wybrane w ten sposób linie γ należy zebrać w tabeli a następnie określić z rozpadu jakich promieniotwórczych nuklidów pochodzą. Jakie domieszki znajdują się w szkło, z którego zrobiono klosz?
- Krótkie podsumowanie.

Należy unikać opisu zasad działania aparatury - znajomość ta będzie sprawdzana w trakcie kolokwium. Prosimy nie przepisywać informacji z instrukcji. Zbędne jest wyprowadzanie jakichkolwiek wzorów (z wyjątkiem ew. własnych).

LITERATURA

1. A. Strzałkowski - „Wstęp do fizyki jądra atomowego”
2. T. Mayer-Kuckuk - „Fizyka jądrowa”
3. K.N. Muchin - „Doświadczalna fizyka jądrowa” cz. I „Fizyka jądra atomowego”
4. W.R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments".
5. G.F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement".
6. Chart of Nuclides, <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>



Rys. 1. Fragment tablicy nuklidów. Proszę go wydrukować i zaznaczyć na nim przebieg naturalnych szeregów promieniotwórczych.

Informacje dodatkowe

Detekcja promieniowanie gamma

Warunkiem zarejestrowania promieniowanie gamma jest jego oddziaływanie z materiałem detektora. Promieniowanie gamma może oddziaływać zarówno z elektronami jak i z jądrami i polami elektrycznymi elektronów i jąder atomowych. Oddziaływania te mogą prowadzić do całkowitej absorpcji lub też elastycznego bądź nieelastycznego rozpraszania kwantów promieniowania gamma. W praktyce znaczenie mają trzy zjawiska:

Zjawisko fotoelektryczne – w procesie tym kwant gamma oddziałuje z elektronem związanym w atomie ośrodka i przekazuje mu całą swoją energię. Kwant gamma zostaje całkowicie zaabsorbowany natomiast elektron uzyskuje energię równą:

$$E_e = E_\gamma - E_B \quad (1)$$

gdzie

E_B – energia wiązania elektronu na orbicie atomowej, z której został wybity,
zwykle $E_B \ll E_\gamma$.

Efekt Comptona – w procesie tym kwant gamma ulega nieelastycznemu rozproszeniu na swobodnym (słabo związanym elektronie) i przekazuje mu część swojej energii. Energia kinetyczna przyspieszonego elektronu określona jest wzorem wynikającym z zasady zachowania energii i pędu:

$$E'_e = E_\gamma \frac{\alpha(1 - \cos \theta)}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

gdzie

θ - kąt pod jakim nastąpiło rozproszenie kwantu gamma,
 $\alpha = E_\gamma / m_e c^2$.

Jak wynika ze wzoru (2), energia elektronu zależy od kąta pod jakim nastąpiło rozproszenie kwantu gamma i przyjmuje wartości od 0 - dla kątów rozproszenia równych zero do wartości maksymalnej - dla kwantów gamma rozproszonych do tyłu ($\theta = 180^\circ$).

Zjawisko kreacji par – w procesie tym kwant gamma zamienia się na parę e^+e^- (elektron-pozyton). Proces ten może zachodzić jedynie dla kwantów gamma o energii większej niż $2m_e c^2 = 1022 \text{ keV}$. Łączna energia kinetyczna wytworzonej pary e^+e^- wynosi:

$$E_{e^+} + E_{e^-} = E_\gamma - 2m_e c^2 \quad (3)$$

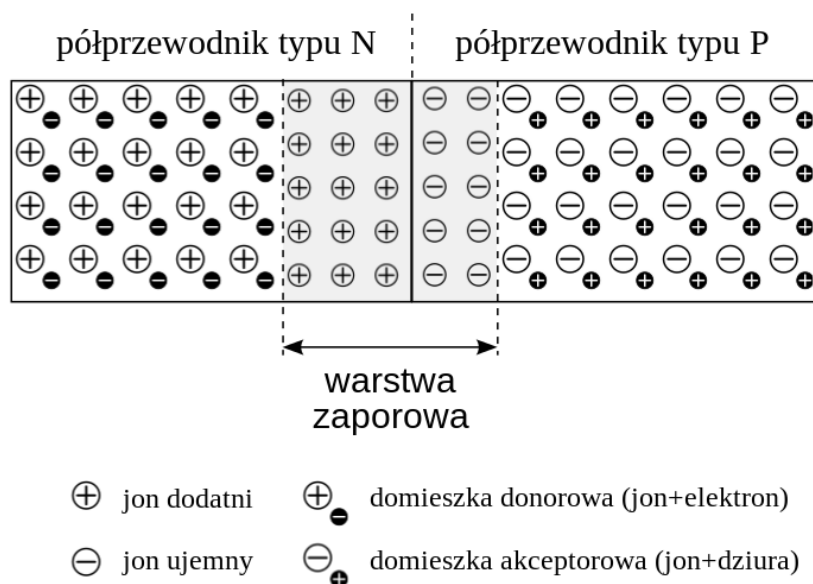
Konwersja kwantu gamma na parę e^+e^- może zachodzić jedynie w polu jądra atomowego (rzadziej elektronu), gdyż tylko wtedy możliwe jest spełnienie zasady zachowania energii i pędu.

Prawdopodobieństwo zajścia każdego z wymienionych procesów silnie zależy od energii kwantu gamma oraz liczby atomowej materiału ośrodka.

Detektor germanowy

Detektor germanowy należy do klasy detektorów półprzewodnikowych. Ich zasada działania opiera się na własnościach tzw. złącza p-n. Złącze takie powstaje na styku dwóch typów półprzewodnika: w jednym swobodnymi nośnikami ładunku są elektrony (typ n), a w drugim dziury (typ p). Półprzewodniki takie uzyskuje się w wyniku specjalnego domieszkowania kryształu (np. germanu). Na złączu swobodne, większościowe nośniki dyfundują do warstwy sąsiedniej i rekombinują. W ten sposób, samoistnie tworzy się tzw. warstwa zaporowa (ang. *depletion region*), w której brak jest swobodnych nośników ładunku, i w której występuje pole elektryczne wytworzone przez jony sieci krystalicznej (patrz rys. 2). Złącze takie ma charakter prostowniczy - zasadniczo przewodzi prąd elektryczny tylko w jednym kierunku. Po przyłożeniu napięcia w kierunku zaporowym ("+" po stronie n, "-" po stronie p), warstwa zaporowa rozszerza się, a pole elektryczne w niej się zwiększa. Obszar ten stanowi aktywną objętość detektora. Promieniowanie jonizujące wewnątrz tego obszaru, np. elektron wybity wskutek zjawiska fotoelektrycznego, kreuje w nim pary elektron-dziura, które w polu elektrycznym poruszają się w stronę zewnętrznych elektrod, tworząc impuls elektryczny. Wielkość tego impulsu, czyli liczba par elektron-dziura, jest proporcjonalna do energii zdeponowanej w detektorze przez cząstkę jonizującą. Impuls ten, po wstępnym wzmacnieniu w przedwzmacniaczu, może być przetwarzany przez następne układy elektroniczne w celu jego analizy i rejestracji.

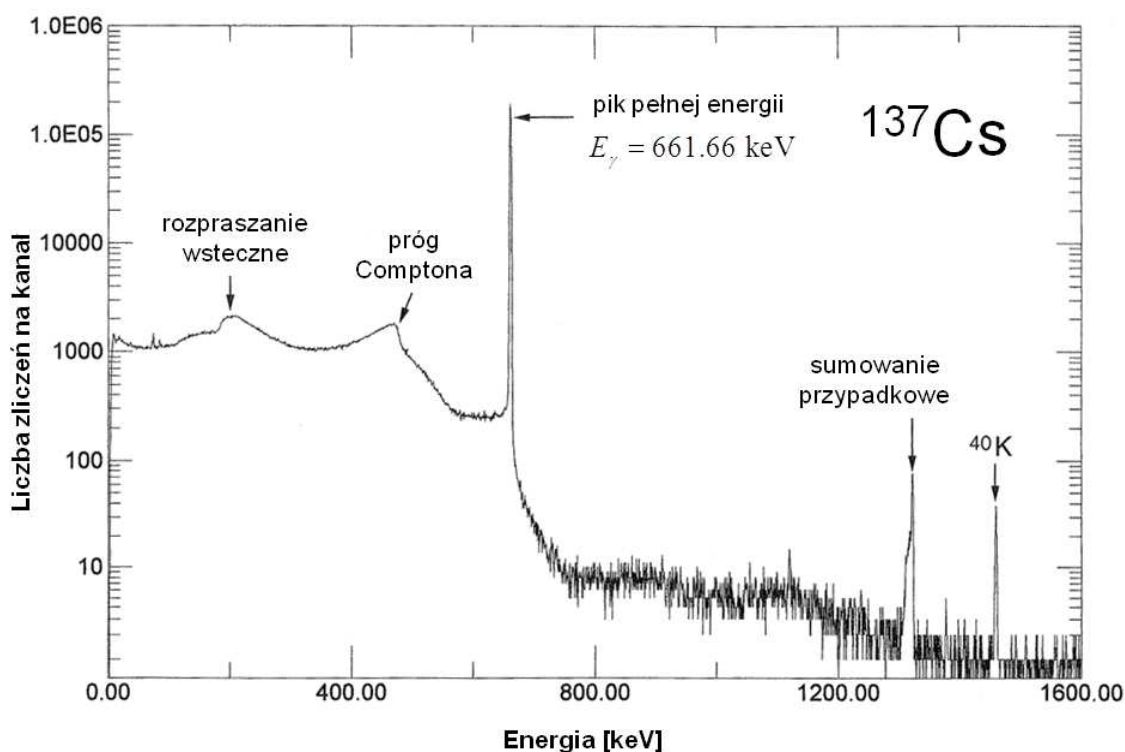
Przerwa energetyczna między pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa w kryształ germanu wynosi ok. 0.7 eV. Jest ona na tyle mała, że w temperaturze pokojowej, wskutek ruchów termicznych, tworzyłaby się znaczna liczba par elektron-dziura tworząc szum zakłócający pracę detektora. Aby temu przeciwdziałać, detektor germanowy musi pracować w bardzo niskiej temperaturze, co osiąga się poprzez kontakt z ciekłym azotem (77 K). Dlatego zawsze detektor germanowy połączony jest ze zbiornikiem na ciekły azot.



Rys.2 Schemat półprzewodnikowego złącza n-p.

Rysunek 3 przedstawia widmo (rozkład) amplitud sygnałów z detektora germanowego zarejestrowane podczas pomiaru źródła ^{137}Cs emitującego kwanty gamma o energii 662 keV. Pik o największej amplitudzie odpowiada pełnej absorpcji promieniowania gamma o energii 662 keV w kryształ germanu. Jest to możliwe np. wskutek zajścia zjawiska fotoelektrycznego w materiale detektora.

Przedział amplitud rozciągający się od zerowej energii do tzw. krawędzi Comptona odpowiada zdarzeniom, w których jedynie część energii kwantu gamma została zaabsorbowana w detektorze. Główny wkład do tej części widma daje efekt Comptona, w którym kwant gamma przekazuje część swojej energii jednemu z elektronów materiału detektora, natomiast kwant rozproszony z niego ucieka. Energia jaką uzyskuje elektron zależy od wartości kąta pod jakim nastąpiło rozproszenie. Krawędź Comptona odpowiada przypadkom, w których w procesie rozpraszania kwant gamma przekazał elektronowi w kryształ detektora maksymalną energię (rozproszenie pod kątem $\theta = 180^\circ$, zobacz wzór (2)).



Rys. 3 Widmo amplitud sygnałów z detektora germanowego, w skali logarytmicznej, zarejestrowane podczas pomiaru promieniowania gamma emitowanego ze źródła ^{137}Cs . Widoczna jest także linia tła pochodząca z izotopu potasu ^{40}K .

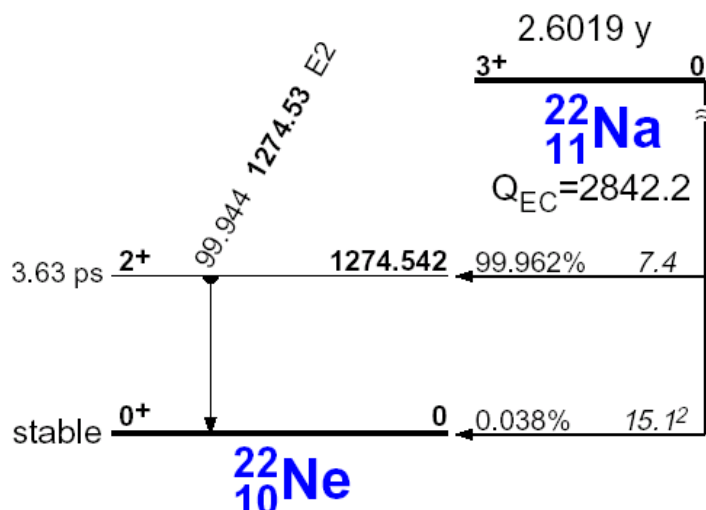
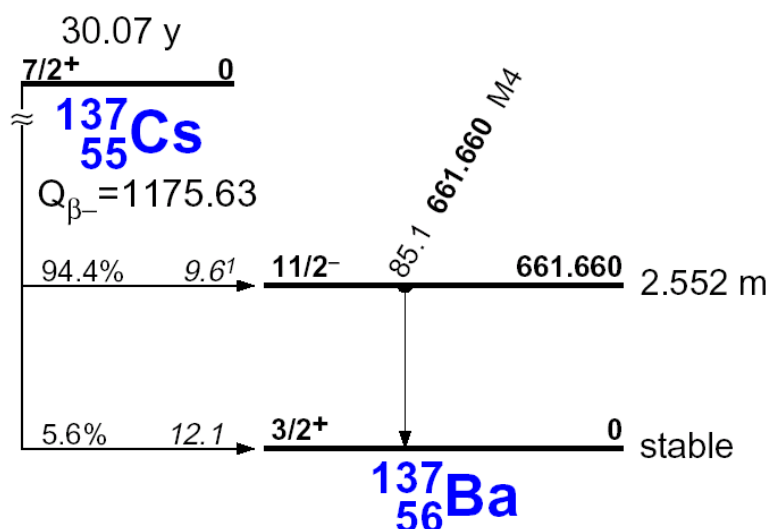
Podstawowe wielkości określające własności układu spektrometrycznego

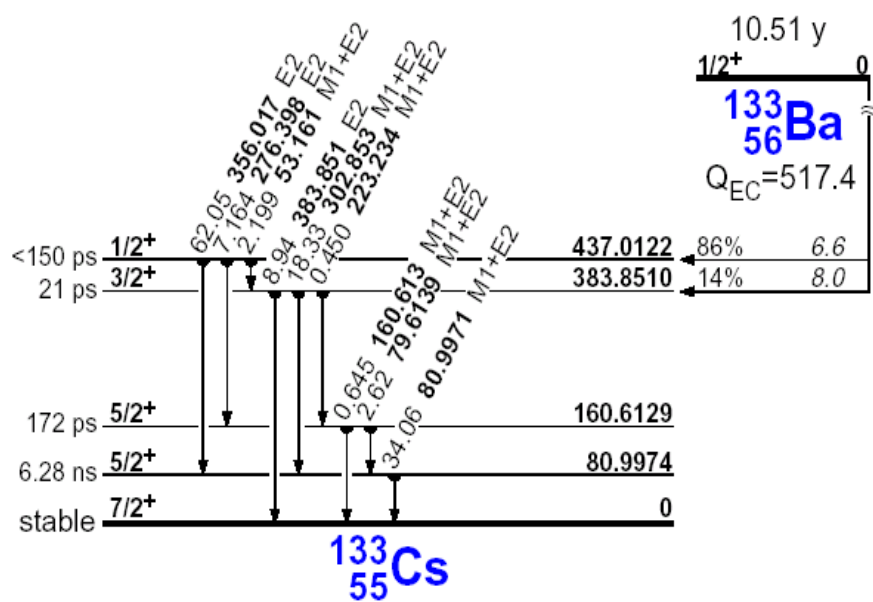
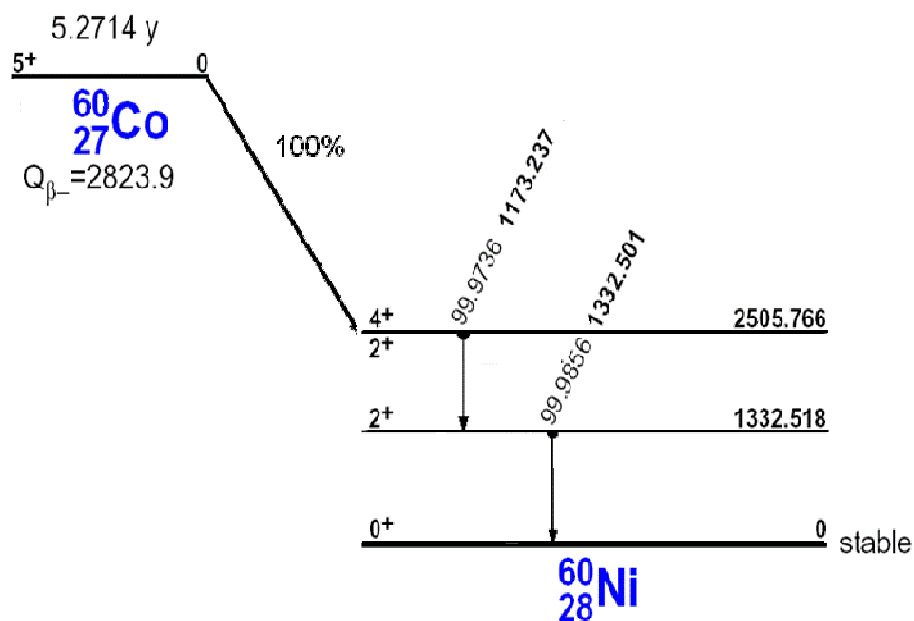
- 1) Energetyczna zdolność rozdzielcza określająca zdolność układu detekcyjnego do obserwacji przejść gamma o bardzo bliskich energiach. Detektory germanowe mają znacznie lepszą zdolność rozdzielczą niż detektory scyntylacyjne. Całkowita szerokość w połowie wysokości (FWHM) dla linii gamma o energii 662 keV (^{137}Cs) wynosi typowo ok. 2 keV.

- 2) Wydajność rejestracji promieniowania gamma. Z praktycznego punktu widzenia interesująca jest wydajność rejestracji pełnej energii emitowanych kwantów gamma. Wielkość tę definiuje się jako stosunek liczby zliczeń zarejestrowanych w pikie odpowiadającym rejestracji pełnej energii kwantu gamma do całkowitej liczby kwantów gamma wyemitowanych ze źródła w czasie trwania pomiaru. Wydajność spektrometru silnie zależy od energii rejestrowanych kwantów oraz od geometrii pomiaru (kształtu i położenia źródła względem kryształu detektora).
- 3) Kalibracja energetyczna określa związek pomiędzy energią kwantów gamma a amplitudą rejestrowanych sygnałów. W przypadku kalibracji liniowej zależność tę opisuje się jako $E_\gamma = a + bk$, gdzie k – numer kanału, a , b – współczynniki kalibracyjne.

Kalibrację energetyczną oraz kalibrację wydajnościową spektrometru wykonuje się wykorzystując źródła kalibracyjne o bardzo dobrze znanych energiach kwantów gamma i prawdopodobieństwach emisji.

Schematy rozpadu źródeł kalibracyjnych





Energie wzbudzenia poziomów i energie przejść gamma podano w keV.