

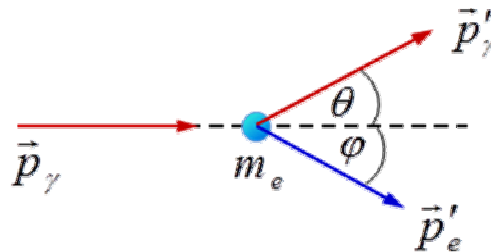
ĆWICZENIE J15

Badanie efektu Comptona

Celem ćwiczenia jest zbadanie efektu Comptona poprzez pomiar zależności energii rozproszonych kwantów gamma od kąta rozproszenia.

Wstęp

Efekt Comptona to proces nieelastycznego rozproszenia kwantów gamma na spoczywających elektronach. W procesie tym kwant gamma przekazuje część swojej energii elektronowi. Zachodzenie zjawiska Comptona jest bezpośrednim przejawem korpuskularnej natury promieniowania elektromagnetycznego. W historii rozwoju fizyki odkrycie i wyjaśnienie tego procesu przyczyniło się do powstania mechaniki kwantowej. Za odkrycie zjawiska nieelastycznego rozpraszania kwantów gamma na elektronach A. Compton w 1927 roku otrzymał Nagrodę Nobla.



Zasady zachowanie energii i pędu prowadzą do następującego układu równań:

$$\begin{cases} E_\gamma + m_e c^2 = E'_\gamma + m_e \gamma'_e c^2 \\ cp_{\gamma x} = cp'_{\gamma x} + cp'_{ex} \\ 0 = cp'_{\gamma y} + cp'_{ey} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie

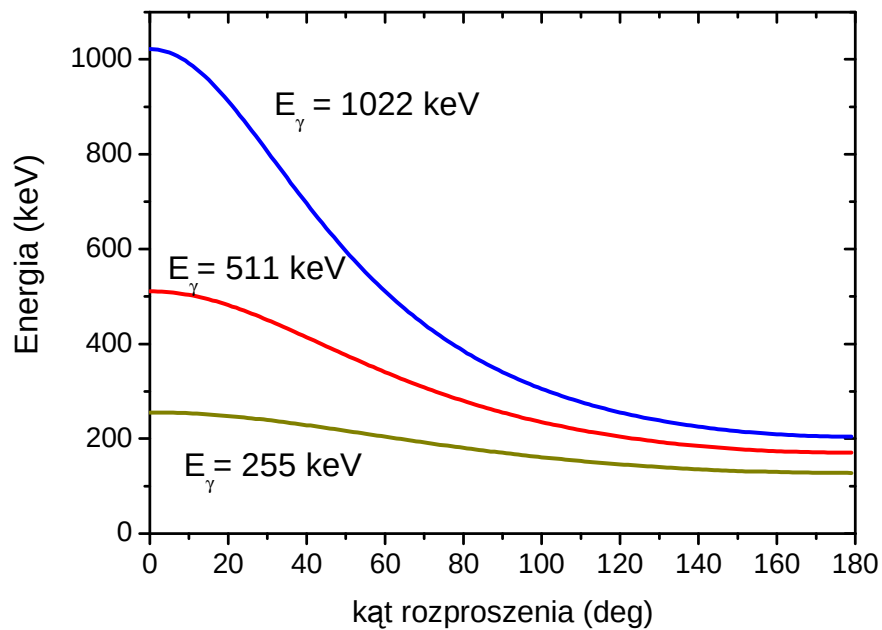
$$(m_e \gamma'_e c^2)^2 = (m_e c^2)^2 + (cp'_e)^2$$

$$\gamma'_e = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_e^2}}$$

Rozwiązując układ równań (1) otrzymujemy zależność pomiędzy energią rozproszonych kwantów gamma i kątem rozproszenia:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + E_\gamma/m_e c^2 (1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

Zależność tę dla wybranych energii padających kwantów gamma przedstawiono na rys.1.

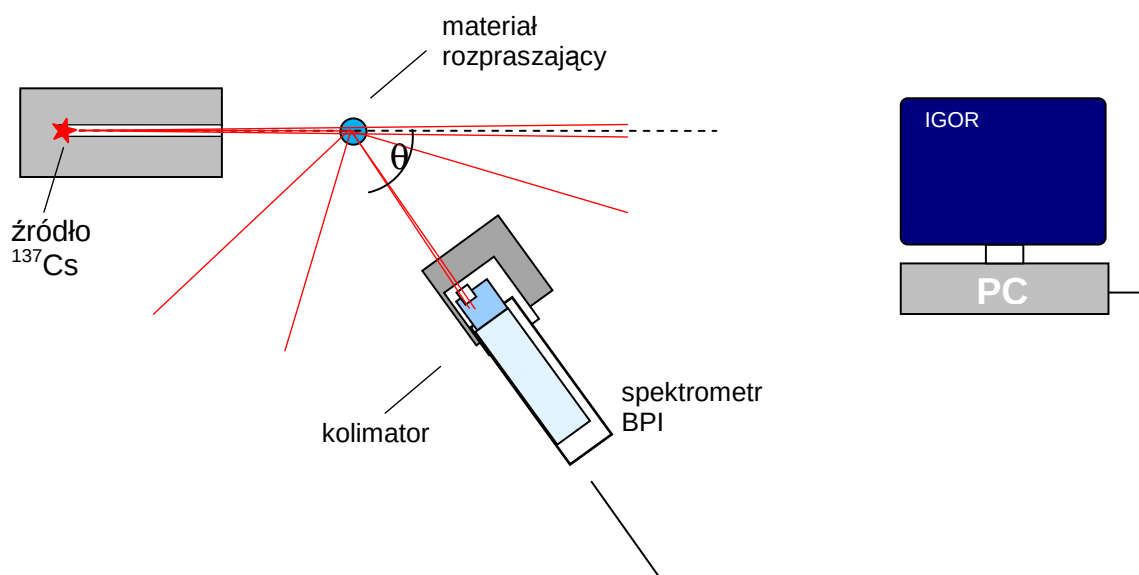


Rys. Zależność energii rozproszonego kwantu gamma od kąta rozproszenia.

Celem ćwiczenia jest sprawdzenie zależności opisywanej równaniem (2) dla kwantów gamma o energii 662 keV emitowanych ze źródła ^{137}Cs .

Układ pomiarowy

Do rejestracji i pomiaru energii promieniowania gamma wykorzystujemy spektrometr BPI.



Rys. 4 . Schemat układu pomiarowego.

Spektrometr BPI zawiera następujące elementy:

- 1) detektor scyntylacyjny z kryształem NaI(Tl) o wymiarach 2"x2",
- 2) zasilacz wysokiego napięcia wykorzystywany do wytworzenia odpowiednich różnic potencjału pomiędzy elektrodami fotopowielacza detektora ,
- 3) analogowy układ formujący sygnał z fotopowielacza,
- 4) cyfrowy układ analizy sygnałów odpowiedzialny za pomiar amplitud rejestrowanych impulsów,
- 5) układ histogramujący, który tworzy histogramy (widma) rejestrowanych amplitud. Poszczególne przedziały histogramu nazywa się kanałami (z ang. *channels*).
- 6) modułu komunikacji szeregowej umożliwiający zarządzanie ustawieniami spektrometru oraz przesyłanie histogramów ze spektrometru BPI do komputera.

Oprogramowanie działające w środowisku IGOR umożliwia sterowanie ustawieniami spektrometru, wizualizację zarejestrowanych widm oraz ich analizę.

Przebieg pomiarów

- 1) Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy zapoznać się z instrukcją obsługi programu eMorpho obsługującego detektor NaI(Tl).
- 2) Uruchomić układ eMorpho, włączyć wysokie napięcie zasilające fotopowielacz.
- 3) Zarejestrować widmo sygnałów dla kwantów gamma emitowanych ze źródła ^{137}Cs .
Określić położenie linii 662 keV w widmie.
- 4) Zarejestrować widmo sygnałów dla kwantów gamma emitowanych ze źródła ^{133}Ba .
Określić położenia zidentyfikowanych linii.
- 5) Umieścić na osi wiązki promieniowania gamma materiał rozpraszający (walec aluminiowy).
- 6) Zaplanować i wykonać serię pomiarów promieniowania gamma rejestrowanego przez detektor dla różnych kątów rozproszenia. Dla każdej wartości kąta wykonać pomiar efektu (z materiałem rozpraszającym na osi wiązki) i pomiar tła (bez materiału rozpraszającego).

Analiza danych

- 1) W oparciu o zarejestrowane widma promieniowania emitowanego ze źródeł ^{137}Cs i ^{133}Ba wykonać kalibrację energetyczną spektrometru.
- 2) Określić energetyczną zdolność rozdzielczą spektrometru dla linii 662 keV.
- 3) Określić zależność energii rozproszonych kwantów gamma od kąta rozproszenia. Podczas analizy wykorzystać zmierzone widma tła.
- 4) Porównać otrzymaną zależność $E'_{\gamma}(\theta)$ z zależnością teoretyczną.

Rachunek błędów

Niepewność liczby zliczeń zarejestrowanych w danym przedziale energii (kanałów) wynosi $\pm \sqrt{N}$, gdzie N jest liczbą zliczeń w rozważanym przedziale energii.

Na niepewność określenia energii danej linii składa się błąd określenia położenia pików w widmie oraz niepewność kalibracji energetycznej.

Literatura

- A. Strzałkowski, Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN 1979
E. Skrzypczak, Z. Szepliński, Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych, PWN 1995

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.

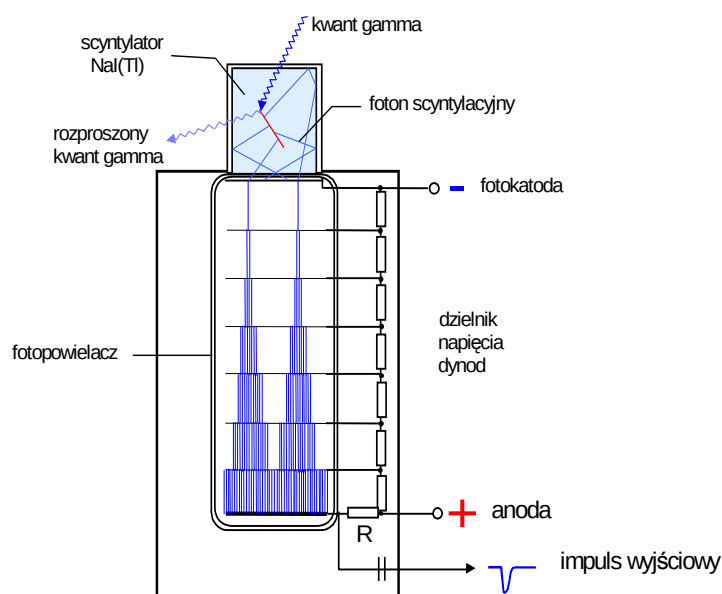
Detektor scyntylacyjny

Rysunek 2 przedstawia schemat budowy detektora, w którym jako scyntylator zastosowano kryształ NaI(Tl) (jodek sodu aktywowany talem).

Kryształ NaI(Tl) jest połączony optycznie z oknem wejściowym tzw. fotopowielacza.

Promieniowanie gamma oddziałuje z kryształem NaI(Tl) poprzez proces fotoelektryczny, rozproszenie komptonowskie lub konwersją na parę elektron-pozyton. Elektrony przyspieszone w wyniku zajścia któregoś z tych procesów poruszają się w kryształach i tracą swoją energię powodując jonizację i wzbudzenia atomów ośrodka. Procesom deekscytacji tych wzbudzeń towarzyszy emisja kwantów światła. W scyntylatorach używanych do celów spektrometrycznych (tzn. do pomiaru energii promieniowania) całkowita liczba wyemitowanych fotonów jest proporcjonalna do energii początkowej elektronu. Strumień fotonów scyntylacyjnych jest rejestrowany przez fotopowielacz.

Fotopowielacz jest to lampa elektronowa, której katoda wykonana jest z materiału światłoczułego. Między katodą i anodą fotopowielacza znajduje się układ kilku odpowiednio ukształtowanych elektrod zwanych dynodami. Między kolejnymi elektrodami przy pomocy odpowiednio skonstruowanego dzielnika napięcia wytwarzane jest pole elektryczne. Fotony docierające do fotokatody wybijają elektrony (efekt fotoelektryczny), które są przyspieszane w kierunku pierwszej dynody. Elektron uderzający w dynodę powoduje wybite 3-4 elektronów wtórnych, które są przyspieszane w kierunku kolejnej dynody itd. Proces ten prowadzi do szybkiego powielenia początkowej liczby elektronów i dzięki temu w fotopowielaczach osiąga się wzmocnienia rzędu 10^5 - 10^8 . Amplituda sygnału wyjściowego fotopowielacza jest proporcjonalna do energii zaabsorbowanej przez kryształ scyntylatora. Zwróćmy uwagę, że energia ta jest absorbowana za pośrednictwem elektronów przyspieszanych w wyniku oddziaływania kwantów gamma z materiałem scyntylatora.

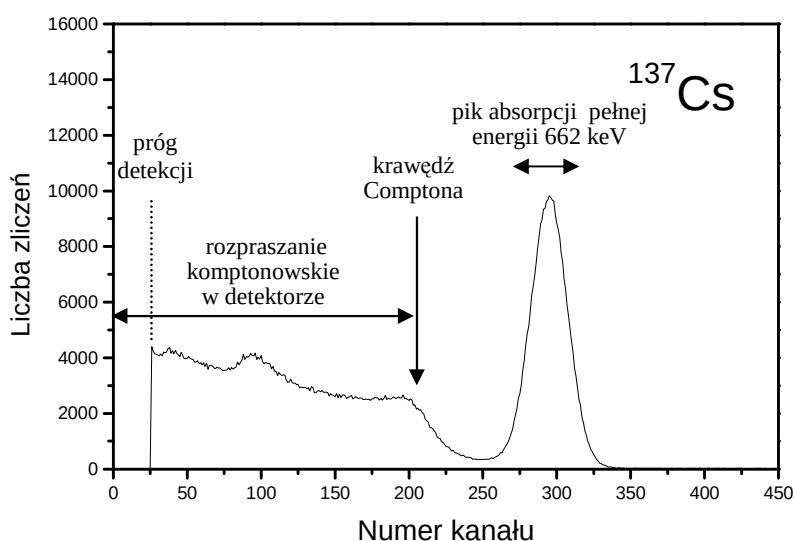


Rys.2 Schemat budowy detektora scyntylacyjnego.

Rysunek 3 przedstawia widmo (rozkład) amplitud sygnałów z detektora scyntylacyjnego zarejestrowane podczas pomiaru źródła ^{137}Cs emitującego kwanty gamma o energii 662 keV. Pik, którego środek leży w kanale ~ 300 odpowiada pełnej absorpcji promieniowania gamma

o energii 662 keV w kryształcie NaI(Tl). Jest to możliwe np. wskutek zajścia zjawiska fotoelektrycznego w materiale scyntylatora.

Przedział amplitud rozciągający się od kanału 0 do tzw. krawędzi Comptona odpowiada zdarzeniom, w których jedynie część energii kwantu gamma została zaabsorbowana w kryształcie scyntylatora. Główny wkład do tej części widma daje efekt Comptona, w którym kwant gamma przekazuje część swojej energii jednemu z elektronów materiału scyntylatora natomiast kwant rozproszony ucieka z kryształu. 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 kryształcie scyntylatora maksymalną energię (rozproszenie pod kątem $\theta = 180^\circ$, zobacz wzór (2)).



Rys. 3 Widmo amplitud sygnałów z detektora NaI(Tl) zarejestrowane podczas pomiaru promieniowania gamma emitowanego ze źródła ^{137}Cs .

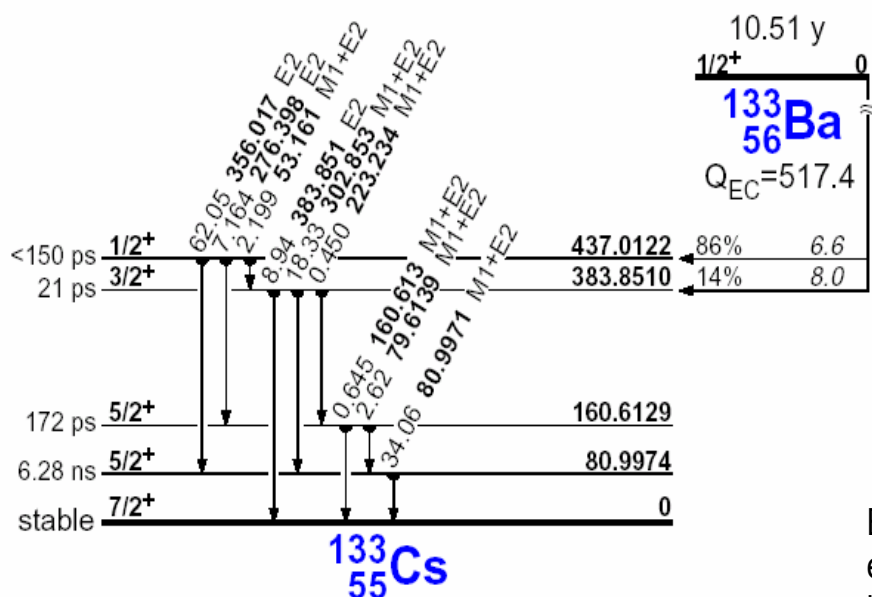
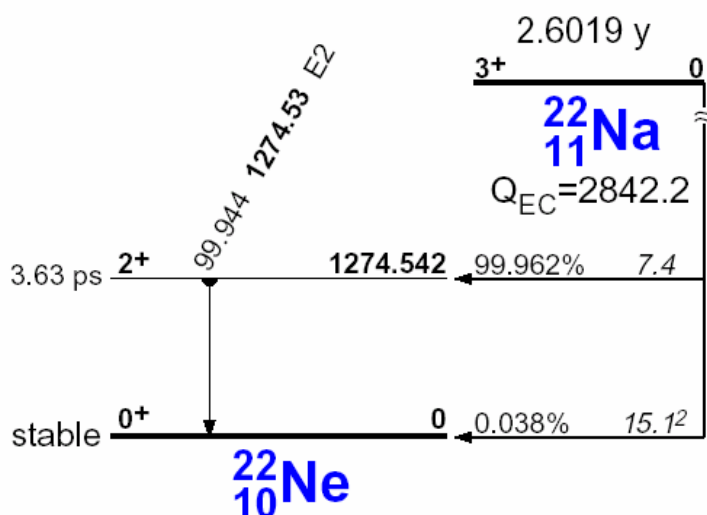
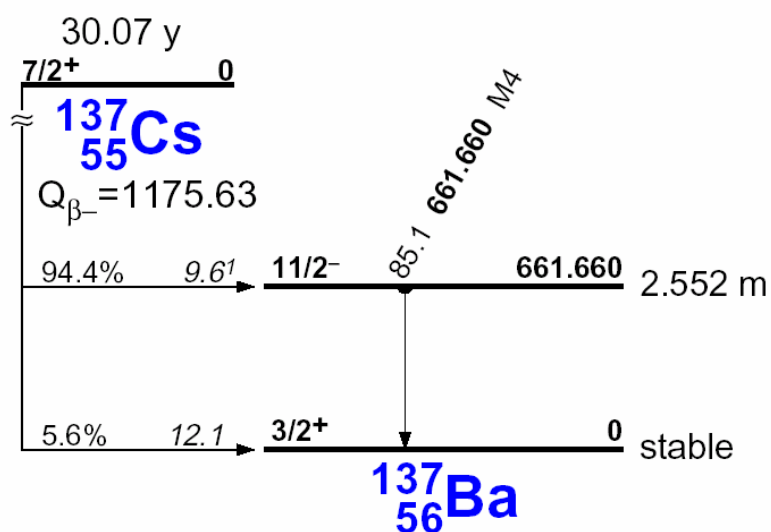
Podstawowe wielkości określające własności układu spektrometrycznego

- 1) Energetyczna zdolność rozdzielcza określająca zdolność układu detekcyjnego do obserwacji przejść gamma o bardzo bliskich energiach. W przypadku detektorów z kryształem NaI(Tl) energetyczną zdolność rozdzielczą przyjęto określać mierząc, w połowie wysokości, całkowitą szerokość piku odpowiadającego rejestracji promieniowania gamma o energii 662 keV, emitowanego ze źródła ^{137}Cs . Dla spektrometrów NaI(Tl) energetyczna zdolność rozdzielcza, określona jako stosunek szerokości połówkowej piku do jego położenia, wynosi 6-8 %.
- 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 piku 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 aktywnościach.

Schematy rozpadu źródeł kalibracyjnych



Energie wzbudzenia poziomów i energie przejść gamma podano w keV.