

Wyznaczanie energii promieniowania gamma metodą scyntylacyjną

Wiesław Tłaczała i Krystyna Wosińska

Wprowadzenie

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie energii promieniowania gamma oraz pokazanie zjawisk, towarzyszących promieniowaniu jonizującemu, które często występuje w naszym otoczeniu niezależnie od naszej woli. Aby móc je wykorzystywać lub skutecznie się przed nim chronić konieczne jest zapoznanie się z jego podstawowymi właściwościami. Znajomość praw fizyki i praw rządzących rozpadem promieniotwórczym oraz zjawisk towarzyszących oddziaływaniu promieniowania jonizującego z materią jest niezbędna w celu ochrony radiologicznej, która polega m.in. na stosowaniu odpowiednich osłon, niwelujących niepożądane skutki promieniowania jonizującego, przez całkowite lub częściowe jego pochłanianie.

Promieniowanie gamma to fale elektromagnetyczne o długości fali mniejszej od 10^{-10} m. Kwanty gamma mają, więc energię większą niż kwanty promieniowania elektromagnetycznego w innych zakresach (światło widzialne, nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie). Źródłem promieniowania gamma są wzbudzone jądra atomowe, a także gwałtowne procesy zachodzące w gwiazdach (wybuchy supernowych, gwiazdy neutronowe).

Głównym celem doświadczenia jest poznanie:

- charakterystycznych widm izotopów promieniotwórczych i ich schematów rozpadów,
- metody wyznaczania energii promieniowania gamma za pomocą wielokanałowego spektrometru scyntylacyjnego,
- sposobu identyfikacji nieznanych izotopów.

Ponadto, doświadczenie umożliwia poznanie:

- scyntylacyjnego sposobu rejestracji widm energetycznych,
- budowy wielokanałowego spektrometru scyntylacyjnego; jego cechowania i sposobu wyznaczania zdolności rozdzielczej.

Wyznaczanie energii kwantów gamma jest ważnym elementem badań realizowanych za pomocą spektrometrii promieniowania gamma. Badając widmo promieniowania nieznanego źródła oraz określając energię kwantów gamma emitowanych przez badane źródło promieniowania można zidentyfikować izotop lub mieszaninę izotopów, wchodzących w skład tego źródła.

Klasyczny zakres badań spektroskopii gamma dotyczy oprócz wyznaczania energii kwantów gamma, wyznaczanie względnych natężeń grup kwantów gamma w widmie, korelacji kątowych oraz czasów życia jąder w stanie wzbudzonym. Po zderzeniu z jądrem cząstka ma mniejszą energię niż przed zderzeniem. Różnica energii zostaje przekazana jądru, które ulega wzbudzeniu. Ponieważ jądro może przyjmować tylko określone i charakterystyczne dla danego jądra kwanty energii to mierząc energie cząstek po oddziaływaniu z jądrem i wyznaczając energie pochłonięte przez jądro można określić stany energetyczne, w jakich znajduje się wzbudzone jądro, natomiast pomiar natężenia poszczególnych kwantów gamma umożliwia określenie spinu i parzystości.

Promieniowanie jonizujące powszechnie kojarzy się z produkcją bomb lub zagrożeniami w przypadku awarii w elektrowniach jądrowych. Tymczasem promieniowanie jonizujące wykorzystuje się z pożytkiem w takich dziedzinach jak ochrona środowiska, medycyna, badania naukowe czy też procesy produkcyjne.

1. Promieniowanie jonizujące

Promieniowaniem jonizującym określa się takie promieniowanie, które oddziałując z ośrodkiem materialnym powoduje jonizację jego atomów, polegającą na oderwaniu pojedynczych elektronów od elektrycznie obojętnych atomów, w wyniku, czego powstają *swobodne elektrony* i *dodatnio zjonizowane atomy – jony dodatnie*.

Jonizacja ośrodka może przebiegać w różnoraki sposób w zależności od rodzaju promieniowania. Promieniowanie jonizujące mogą stanowić strumienie cząstek (promieniowanie korpuskularne); mogą nim być również niektóre rodzaje fal elektromagnetycznych (krótkofalowe promieniowanie elektromagnetyczne). Cząstki elementarne obdarzone ładunkiem mogą jonizować atomy ośrodka w sposób bezpośredni, natomiast promieniowanie elektromagnetyczne jonizuje atomy ośrodka pośrednio, przekazując energię elektronom, uwalnianym lub kreowanym w wyniku procesów oddziaływania fotonów (kwantów gamma – cząstek elektrycznie obojętnych,

o zerowej masie i jednostkowym spinie) z ośrodkiem materialnym, które następnie powodują jonizację ośrodka.

Promieniowanie jonizujące występuje w przyrodzie przede wszystkim w sposób naturalny, chociaż może być również wytworzone sztucznie przez człowieka. Naturalnymi źródłami promieniowania jonizującego są substancje promieniotwórcze, które wskutek samoistnych przemian promieniotwórczych wysyłają cząstki α lub cząstki β i neutrino, a także kwanty γ . Naturalnym źródłem promieniowania jonizującego jest również promieniowanie kosmiczne docierające z Kosmosu.

Sztucznymi źródłami promieniowania jonizującego są urządzenia skonstruowane przez człowieka, które służą wytworzeniu jąder promieniotwórczych lub promieniowania rentgenowskiego (X). Sztuczne substancje promieniotwórcze można wytworzyć w reakcjach jądrowych, wymuszonych przez bombardowanie jąder substancji niepromieniotwórczych jądrami helu, deuteru lub innymi jądrami, również innymi cząstkami, na przykład, protonami lub neutronami, a także fotonami. Cząstka bombardująca (pocisk) o wielkiej energii przenikając do wnętrza jądra (tarczy) wywołuje reakcję jądrową, w wyniku, której następuje przemiana jednego pierwiastka w inny.

Promieniowanie rentgenowskie powstaje poza jądrem atomowym w wyniku zamiany energii kinetycznej cząstki naładowanej na energię kwantów. Na przykład, elektrony o energii $50 \div 100$ keV, uzyskanej w przyspieszającym polu elektrycznym lampy rentgenowskiej w wyniku gwałtownego hamowania w materiale antykatody powodują wytworzenie promieniowania X .

Do sztucznych źródeł promieniowania zalicza się również odpady promieniotwórcze i opad promieniotwórczy. *Odpadem promieniotwórczym* nazywane są substancje promieniotwórcze nie nadające się do wykorzystania. *Opadem promieniotwórczym*, z kolei, nazywane są substancje promieniotwórcze, powstałe w wyniku próbnych wybuchów jądrowych lub w czasie awarii elektrowni jądrowych, które krążąc pod wpływem wiatru po pewnym czasie opadają na Ziemię.

1.1. Spontaniczne przemiany jądrowe

Zjawisko promieniotwórczości naturalnej jest konsekwencją występowania w naturze nietrwałych jąder atomowych – jąder promieniotwórczych, które rozpadając się wysyłają (emitują) promienie α , β lub γ . Jądra promieniotwórcze ulegając rozpadowi przemieniają się w jądra innego pierwiastka, które mogą być trwałe lub nietrwałe – promieniotwórcze.

Samorzutna przemiana jąder atomowych jednego pierwiastka w jądra innego pierwiastka jest nazywana *rozpadem promieniotwórczym*.

Przemianę jądrową można zapisać symbolicznie w następujący sposób:



gdzie: ${}_{Z_i}^{A_i}\text{X}$, ${}_{Z_f}^{A_f}\text{Y}$ – nuklidy; jądra o określonej liczbie masowej A_i (A_f) i ładunku, przy czym

wartość Z_i (Z_f) określa odpowiedni pierwiastek chemiczny o symbolu X (Y) i oznacza liczbę protonów w nuklidzie, natomiast A_i (A_f) liczbę nukleonów (protonów i neutronów),

X, Y – symbole chemiczne pierwiastków chemicznych,

A_i , A_f – liczby masowe, odpowiednio jądra początkowego i jądra pochodnego,

Z_i , Z_f – liczby atomowe, odpowiednio jądra początkowego i jądra pochodnego,

$a_1 \div a_n$ – cząstki wysyłane w czasie przemiany jądrowej.

Jądro pochodne i cząstki wysyłane w czasie przemiany jądrowej określa się mianem *produktów rozpadu*.

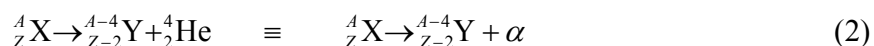
Szczególnym rodzajem przemiany jądrowej towarzyszącej rozpadowi promieniotwórczemu jest przejście jądra atomowego od wyższego stanu energetycznego do niższego.

Przemianom jądrowym towarzyszy emisja promieniowania jądrowego w postaci cząstek naładowanych lub kwantów gamma. W czasie przemian jądrowych obowiązują zasady zachowania wielkości fizycznych charakteryzujące rozpadające się jądra i produkty rozpadów.

1.1.1. Podstawowe typy przemian jądrowych

Do podstawowych typów przemian jądrowych należą: rozpad alfa, rozpad beta (rozpad beta minus, rozpad beta plus), wychwyt elektronu i przemiana gamma. Określenie typu przemiany jądrowej jest determinowane przez rodzaj cząstek emitowanych w czasie przemiany.

Rozpad alfa jest przemianą jądrową, podczas której z rozpadającego się jądra jest emitowane jądro helu (${}^4_2\text{He}$) – cząstka α . W czasie rozpadu alfa (2) jądro początkowe przemienia się w jądro o liczbie atomowej pomniejszonej o 2 i liczbie masowej pomniejszonej o 4.



Rozpad beta minus jest przemianą jądrową, podczas której z rozpadającego się jądra jest emitowany elektron – cząstka e^- , oraz antyneutrino elektronowe - $\bar{\nu}_e$. W czasie rozpadu beta

minus (3) jądro początkowe przemienia się w jądro o liczbie atomowej powiększonej o 1 i niezmięniętej liczbie masowej, czyli liczba protonów zwiększa się o 1 i o tyle samo zmniejsza się liczba neutronów.



Rozpad beta plus jest przemianą jądrową, podczas której z rozpadającego się jądra jest emitowany pozyton – cząstka e^+ , oraz neutrino elektronowe - ν_e . W czasie rozpadu beta plus (4) jądro początkowe przemienia się w jądro o liczbie atomowej pomniejszonej o 1 i niezmięniętej liczbie masowej, a więc liczba protonów zmniejsza się o 1 i o tyle samo zwiększa się liczba neutronów.



Wychwyt elektronu jest procesem alternatywnym do rozpadu beta plus, polegającym na wchłonięciu przez jądro jednego elektronu z powłoki atomowej, zazwyczaj z powłoki K , czasami z powłoki L , lecz z dużo mniejszym prawdopodobieństwem. W czasie tego procesu (5) jądro początkowe przemienia się w jądro o liczbie atomowej pomniejszonej o 1 i niezmięniętej liczbie masowej, podobnie jak w przypadku rozpadu beta plus, oraz ma miejsce emisja neutrino elektronowego. Wolne miejsce po wychwyconym elektronie zajmuje elektron z dalszej powłoki, czemu towarzyszy wysłanie charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego.



Rozpady beta minus i beta plus oraz wychwyt elektronu klasyfikuje się łącznie jako przemiany beta.

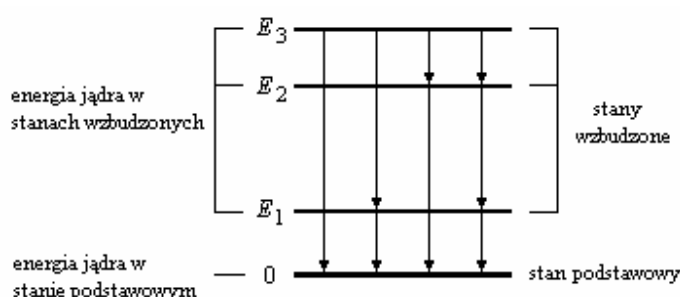
Przemiana gamma jest procesem (6), w wyniku, którego jądro wzbudzone przechodzi do stanu o niższej energii, którym może być zarówno stan podstawowy jak i pośredni wzbudzony. W czasie takiej przemiany zmienia się tylko struktura jądra wywołana przegrupowaniem nukleonów w jądrze, od konfiguracji odpowiadającej wyższej energii do konfiguracji odpowiadającej niższej energii, natomiast liczby atomowa i masowa pozostają bez zmian.



Stanem wzbudzonym określa się stan jąder, w którym ich wewnętrzna energia jest większa od energii jądra w stanie podstawowym. W przypadku, który pokazano na rys. 1, istnieją cztery

możliwości powrotu wzbudzonego jądra do stanu podstawowego, którym towarzyszy emisja kwantów gamma, a mianowicie:

- przez emisję jednego kwantu o energii E_3 ,
- przez emisję kwantu o energii $E_3 - E_1$ oraz kwantu o energii E_1 ,
- przez emisję kwantu o energii $E_3 - E_2$ oraz kwantu o energii E_2 ,
- przez kaskadową emisję trzech kwantów o energiach $E_3 - E_2$, $E_2 - E_1$ i E_1 .



Rys. 1 Schematyczne przedstawienie struktury jądrowych poziomów energetycznych i możliwych przejść energetycznych

Do ilustracji możliwych sposobów przejść od stanu wzbudzonego do stanu podstawowego z równoczesną emisją kwantów energii posłużono się schematem przejść energetycznych, pokazanym na rys. 1. Zaprezentowany sposób ilustracji przejść energetycznych jest zbieżny ze schematami energetycznymi rozpadów, które konstruuje się na podstawie zależności energetycznych obowiązujących w czasie przemian jądrowych. Każdej z wymienionych wcześniej przemian jądrowych odpowiada charakterystyczny schemat energetyczny, wynikający z równania bilansu energii, który obowiązuje dla konkretnej przemiany.

1.1.2. Podstawowe prawa obowiązujące w przemianach jądrowych

Reguła przesunięć Soddy'ego-Fajansa pozwala określić miejsce w układzie okresowym pierwiastków, jakie zajmie powstający w wyniku przemiany jądrowej nowy pierwiastek.

W wyniku rozpadu alfa liczba masowa (A) jądra zmniejsza się o 4, a liczba atomowa (Z) zmniejsza się o 2 i pierwiastek cofa się o dwa miejsca w układzie okresowym. W czasie rozpadu

beta liczba masowa (A) pozostaje bez zmian, a liczba atomowa (Z) zwiększa się o 1 w przypadku rozpadu beta minus lub zmniejsza o 1 w przypadku rozpadu beta plus.

Okresem połowicznego zaniku (półrozpadu) – $T_{1/2}$, określa się czas, po upływie, którego połowa jąder danego izotopu promieniotwórczego ulega rozpadowi. Jest to wielkość charakterystyczna dla danego izotopu promieniotwórczego.

Prawo rozpadu promieniotwórczego (7) określa zmianę aktywności źródła promieniotwórczego w funkcji czasu. Jest to zależność wykładnicza

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

gdzie: N_0 – jest liczbą atomów izotopu promieniotwórczego w momencie czasu $t=0$,

$N(t)$ – jest liczbą atomów po upływie czasu t ,

λ – jest stałą rozpadu charakterystyczną dla danego izotopu promieniotwórczego.

Stała rozpadu – λ , określa szybkość spadku aktywności źródła promieniotwórczego i łączy ją z okresem połowicznego zaniku zależność

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cong \frac{0,693}{T_{1/2}}. \quad (8)$$

Odwrotnością stałej rozpadu λ jest średni czas życia jądra promieniotwórczego τ .

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

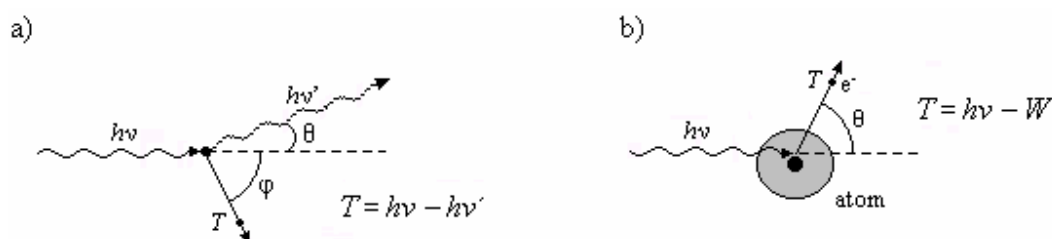
Aktywnością próbki promieniotwórczej – A , określa się liczbę rozpadów zachodzących w jednostce czasu

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}. \quad (10)$$

Zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego aktywność próbki promieniotwórczej maleje z czasem w sposób wykładniczy.

1.1.3. Oddziaływanie promieniowania gamma z materią

Oddziaływanie promieniowania gamma (fotonów) z atomami lub jądrami absorbentu zależy od energii promieniowania oraz rodzaju absorbentu. Pochłanianie promieniowania gamma przy przejściu przez materię jest spowodowane, przede wszystkim, trzema podstawowymi rodzajami oddziaływania kwantów gamma z materią, a mianowicie: *rozpraszaniem (efektem) comptonowskim, zjawiskiem (efektem) fotoelektrycznym i produkcją (kreacją) par elektron-pozyton.*



Rys. 2. Kinematyka oddziaływania fotonów z materią: a) w efekcie Comptona, b) w zjawisku fotoelektrycznym

Wymienione oddziaływania pozwalają wyjaśnić dwie podstawowe właściwości promieniowania gamma: 1) promieniowanie gamma znacznie łatwiej przenika materię (jest bardziej przenikliwe) aniżeli cząstki naładowane, oraz; 2) w czasie przejścia przez materię natężenie wiązki promieniowania gamma ulega osłabieniu, natomiast jego energia nie zmienia się. Zmniejszenie natężenia wiązki następuje zarówno w wyniku całkowitego pochłaniania energii fotonów w zjawisku fotoelektrycznym i w czasie kreacji par, jak również w efekcie Comptona, w którym fotony tylko częściowo tracą swoją energię, a rozproszony foton o mniejszej energii przemieszcza się pod pewnym kątem – θ (ulega odchyleniu), w stosunku do padającej wiązki. Rysunek 2 pokazuje schematycznie kinematykę rozproszenia comptonowskiego (rys. 2a) oraz kinematykę oddziaływania kwantów gamma z materią w zjawisku fotoelektrycznym (rys. 2b).

Efekt fotoelektryczny odgrywa główną rolę w pochłanianiu kwantów gamma o energii do kilkuset kiloelektronowoltów. W zjawisku fotoelektrycznym kwant gamma oddziałuje z elektronem atomu przekazując mu całą swoją energię, z której część jest tracona na uwolnienie związanego z atomem elektronu, natomiast reszta stanowi energię kinetyczną uwolnionego elektronu. Energia

uwolnionego elektronu T (11) jest mniejsza od energii kwantu gamma $h\nu$ o energię W równą energii wiązania elektronu na powłoce, z której został uwolniony.

$$T = h\nu - W \quad (11)$$

Efekt Comptona polega na rozproszeniu kwantu gamma na elektronie, który jest traktowany jak elektron swobodny. Takie założenie jest możliwe do przyjęcia w przypadku kwantów gamma o energiach rzędu megaelektronowoltów, przy których energia wiązania elektronu w atomie, rzędu elektronowoltów, jest pomijalnie mała. Kinematykę oddziaływań charakterystyczną dla rozproszenia comptonowskiego opisują analitycznie, z uwzględnieniem prawa zachowania energii i pędu, następujące zależności:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}, \quad \text{ctg}\varphi = \left(1 + \frac{h\nu}{m_e c^2}\right) \tan\frac{\theta}{2}, \quad (12)$$

gdzie $m_e c^2$ jest energią spoczynkową elektronu.

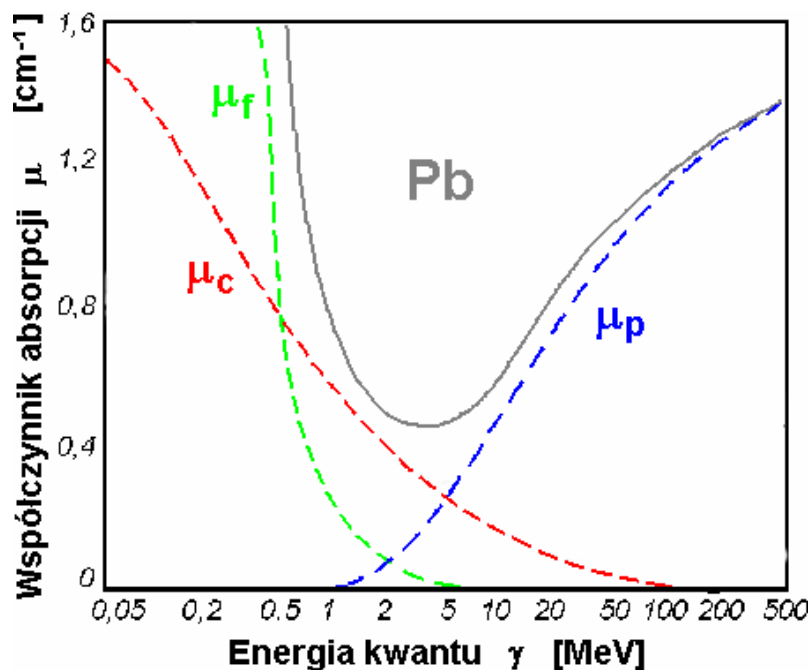
Zjawisko kreacji par może mieć miejsce, jeżeli energia kwantu gamma jest większa od sumy energii spoczynkowych elektronu i pozytonu, a więc 1,022 MeV (0,511 + 0,511 MeV). Kwant gamma znika, a w jego miejsce pojawia się para cząstek – elektron i pozyton (pozyton jest antycząstką elektronu). Cała energia kwantu gamma, przekazana powstałej parze, równa jest sumie ich energii kinetycznych T i energii spoczynkowych. Podział energii kinetycznych T między elektron i pozyton może być różny, chociaż dla kwantów gamma o energii E_γ do kilkuset megaelektronowoltów najbardziej prawdopodobny jest równy podział.

Warunkiem koniecznym kreacji par elektron-pozyton jest obecność jeszcze jednej cząstki (elektronu lub jądra), która odbierając pewną część pędu fotonu zapewnia spełnienie zasad zachowania pędu i energii. Sumę energii kinetycznych elektronu i pozytonu T przedstawia wyrażenie (13), w którym E_γ - to energia pierwotnego kwantu gamma, $m_e c^2$ - energia spoczynkowa elektronu, T_j – energia kinetyczna jądra, które wzięło udział w zjawisku kreacji.

$$T = E_\gamma - 2m_e c^2 - T_j \quad (13)$$

Prawdopodobieństwo zajścia jednego z trzech zjawisk: fotoelektrycznego, Comptona i kreacji par zależy od liczby masowej ośrodka i od energii kwantu gamma. Rys. 3 przedstawia zależność od energii współczynników absorpcji kwantów gamma w ołowiu dla tych trzech zjawisk. Widać, że zjawisko fotoelektryczne dominuje przy mniejszych energiach i jego prawdopodobieństwo silnie

maleje ze wzrostem energii. Natomiast kreacja par odgrywa dużą rolę przy wysokich energiach kwantów gamma. Z tego powodu nie obserwujemy w widmie energii maksimum pochodzących z kreacji par, jeśli energia kwantu gamma niewiele przewyższa próg energetyczny na to zjawisko.



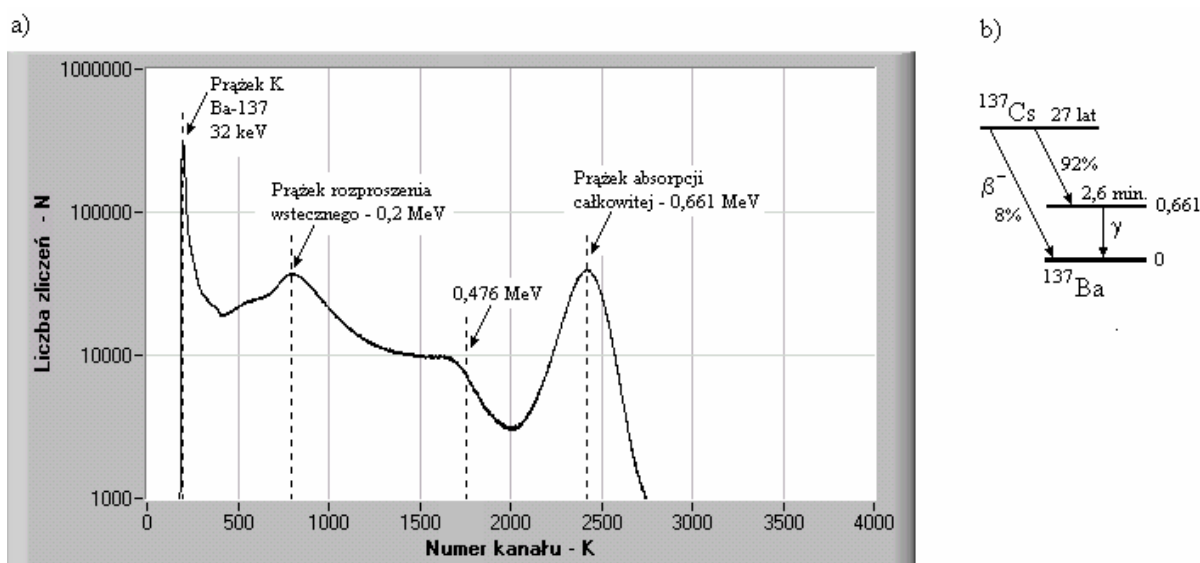
Rys. 3 Zależność współczynników absorpcji kwantów gamma od energii w ołowiu dla zjawiska fotoelektrycznego (μ_f), Comptona (μ_c) i kreacji par (μ_p).

1.1.4. Charakterystyczne widma promieniowania gamma

Emitowane w wyniku przemiany jądrowej cząstki opuszczając jądro unoszą pewną ilość energii. Rozkład energii promieniowania nazywane jest *widmem energii* (widmem energetycznym). Rozpadowi każdego izotopu gamma promieniotwórczego odpowiada charakterystyczne dla niego widmo energii, które odwzorowuje zależność liczby cząstek emitowanych w czasie przemiany jądrowej od ich energii.

Badaniem widm izotopów promieniotwórczych zajmuje się spektroskopia promieniowania jądrowego, uważana za jedną z najczulszych metod badawczych. Badając widmo promieniowania nieznanego źródła można zidentyfikować izotop lub mieszaninę izotopów wchodzących w skład tego źródła. W źródłach zawierających znany izotop można, z kolei, określić stopień czystości preparatu analizując ilość domieszek innych izotopów.

Metody spektrometrii gamma wykorzystuje się, na przykład, do wyznaczenia wartości energii kwantów gamma pochodzących z rozpadu izotopów promieniotwórczych, bądź energii reakcji jądrowej, a także energii poziomów wzbudzonych jądra atomowego. Analiza energii prążków (grup kwantów gamma) występujących w widmie promieniowania gamma umożliwia odtworzenie poziomów energetycznych występujących w jądrze, natomiast częstość występowania określonych przejść można wykorzystać do określenia *spinu* (własnego momentu pędu cząstki) i *parzystości* (wielkości charakterystycznej dla opisu obiektów kwantowych).



Rys. 4 Izotop promieniotwórczy ^{137}Cs : a) spektrogram, b) schemat rozpadu

Widmo energii izotopu ^{137}Cs – widmo proste. Jedną z ważniejszych metod stosowanych w spektroskopii promieniowania gamma jest metoda scyntylacyjna. Na rysunku 3a pokazano w skali półlogarytmicznej spektrogram (odzworowujący energetyczne widmo promieniowania) izotopu ^{137}Cs zarejestrowane za pomocą licznika scyntylacyjnego. Rejestracja promieniowania gamma z wykorzystaniem licznika scyntylacyjnego odbywa się za pośrednictwem zjawisk towarzyszących oddziaływaniu promieniowania gamma ze scyntylatorem. Kwanty monoenergetycznego promieniowania gamma emitowanego przez ^{137}Cs w wyniku oddziaływania ze scyntylatorem, za pośrednictwem zjawiska fotoelektrycznego, zjawiska Comptona, tracą w nim różną część swojej pierwotnej energii. Powoduje to powstanie na wyjściu licznika scyntylacyjnego widma impulsów o różnych amplitudach; impulsów odpowiadających

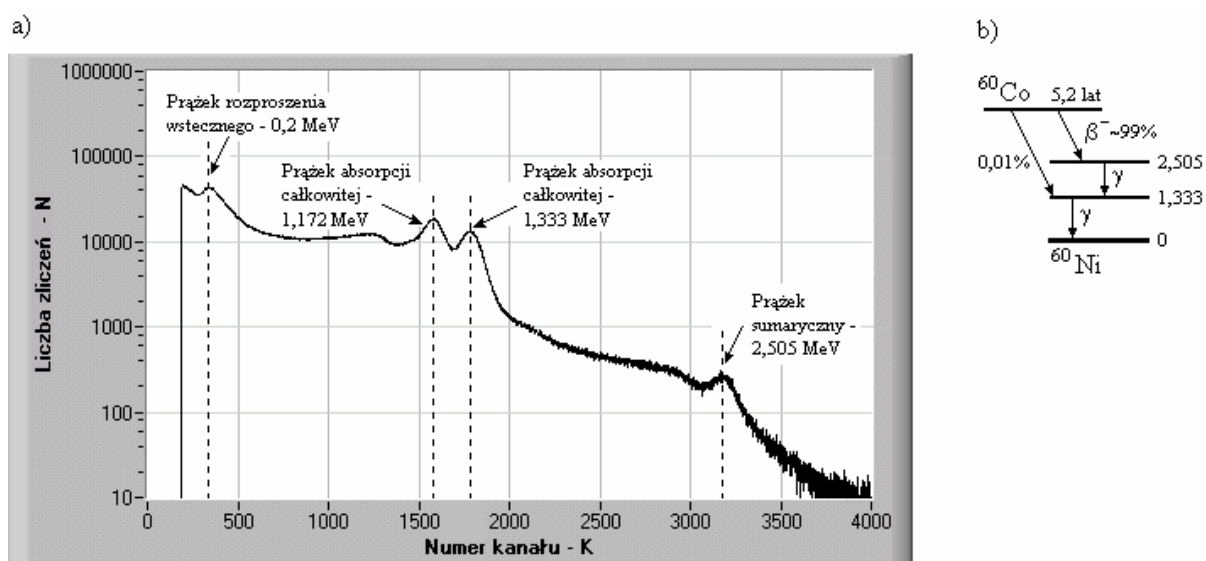
całkowitemu pochłonięciu kwantu gamma oraz impulsów wytworzonych w rezultacie utraty przez kwant gamma tylko części energii.

Rozpad izotopu ^{137}Cs jest rozpadem typu beta minus. Ze schematu rozpadu tego izotopu (rys. 3b) wynika, że 92% przemian powoduje utworzenie wzbudzonych atomów ^{137}Ba , które z półokresem 2,6 min. przechodzą w stan podstawowy emitując jednocześnie kwant gamma o energii 0,661 MeV.

W skrajnej prawej części widma ^{137}Cs (rys. 3a) występuje wyraźnie zarysowany prążek, którego maksimum przypada na kanał odpowiadający energii 0,661 MeV. Jest to prążek odpowiadający całkowitemu pochłonięciu w scyntylicyjze kwantu gamma o energii 0,661 MeV. Powstanie prążka całkowitego pochłaniania jest związane z procesami, podczas których kwant gamma traci całkowicie energię w scyntylicyjze. Dzieje się tak w zjawisku fotoelektrycznym, w którym kwant gamma całą energię przekazuje wybitemu z atomu elektronowi. Z równania (11) wynika, że monoenergetyczne kwanty gamma wybijają z ośrodka monoenergetyczne elektrony. Wybiciu elektronu z powłoki K towarzyszy emisja promieniowania rentgenowskiego, które jest pochłaniane w ośrodku na skutek wtórnych oddziaływań fotoelektrycznych. W wyniku tych wszystkich zjawisk energia tracona w scyntylicyjze jest równa energii kwantu gamma. Zjawisku fotoelektrycznemu odpowiada prążek całkowitej absorpcji promieniowania gamma (maksimum fotoelektryczne), którego obserwację znacznie ułatwiają relatywnie duże rozmiary scyntylicyja. Na lewo od prążka całkowitej absorpcji, a przed comptonowskim zakresem widma, widoczny jest obszar (w okolicy kanału 2000), w którym prawie nie obserwuje się pochłaniania energii. Dalej, w kierunku mniejszych energii, obserwuje się comptonowski zakres widma. Zakres ten odpowiada pochłanianiu energii elektronów odrzutu, wybitych podczas zjawiska comptonowskiego rozpraszania kwantów gamma w scyntylicyjze. Elektrony odrzutu mają różne energie zależne od kąta rozproszenia θ (rys. 2a) – od maksymalnej dla kąta $\theta = 0$ do coraz mniejszych, gdy kąt θ rośnie. Comptonowska część widma to widmo ciągłe, którego zakres wyznacza maksymalna energia elektronów comptonowskich (0,476 MeV dla ^{137}Cs) i energia zerowa. W tym zakresie występują również kwanty comptonowskie, które powstają w pobliżu scyntylicyja i w wyniku rozpraszania wstecznego przenikają do scyntylicyja, gdzie są pochłaniane częściowo lub całkowicie. Kwanty te, nazywane kwantami rozproszenia wstecznego, tworzą prążek rozproszenia wstecznego (0,2 MeV), którego stosunkowo duża szerokość wynika z ciągłości widma i różnych kątów rozpraszania kwantów gamma na oknie

fotopowielacza i ściankach obudowy scyntylatora. W jego skład wchodzi również promieniowanie charakterystyczne wysyłane przez atomy obudowy licznika. W początkowej części widma, w zakresie bardzo małych energii, występuje ostro zarysowany prążek, którego maksimum przypada na kanał odpowiadający energii 32 keV. Jest to prążek K charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego izotopu ^{137}Ba , powstającego w rozpadzie ^{137}Cs i zjonizowanego przez cząstki beta emitowane w rozpadach jąder. W rzeczywistości jest to prążek, składający się z czterech prążków $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$, $K_{\beta 1}$ i $K_{\beta 2}$, które zlewają się w jeden na skutek ograniczonej zdolności rozdzielczej spektrometru.

Widmo zawierające tylko jeden prążek absorpcji całkowitej nazywa się widmem prostym i jest charakterystyczne dla izotopów emitujących monoenergetyczne promieniowanie gamma. W przypadku rejestracji promieniowania pochodzącego od izotopów, emitujących kwanty gamma o dwóch lub więcej wartościach energii, a także źródeł złożonych, zawierających kilka pierwiastków emitujących promieniowanie monoenergetyczne, otrzymuje się widma złożone. Typowym widmem złożonym jest widmo izotopu ^{60}Co .



Rys. 5 Izotop promieniotwórczy ^{60}Co : a) spektrogram, b) schemat rozpadu

Widmo energii izotopu ^{60}Co – widmo złożone. Na rysunku 4a pokazano spektrogram izotopu ^{60}Co zarejestrowany za pomocą licznika scyntylacyjnego. Jak wynika ze schematu rozpadu (rys. 4b), główny udział (~99%) ma w tym przypadku przemiana ^{60}Co w ^{60}Ni w stanie wzbudzonym

o energii 2,505 MeV. Następnie w wyniku przejścia kaskadowego powstają dwa kwanty gamma o energiach 1,172 MeV oraz 1,333 MeV z identycznym prawdopodobieństwem występowania. Wynika stąd, że oba prążki odpowiadające energiom 1,172 MeV oraz 1,333 MeV powinny mieć jednakową wysokość. Jednak w rzeczywistości prążek odpowiadający energii 1,172 MeV ma wysokość większą od prążka 1,333 MeV. Można to uzasadnić tym, że w skład prążka 1,172 MeV wchodzi również rozproszone promieniowanie comptonowskie o maksymalnej energii 1,13 MeV, które pochodzi od kwantów gamma o energii pierwotnej 1,333 MeV. Dodatkowo, prawdopodobieństwo zajścia zjawiska fotoelektrycznego silnie maleje ze wzrostem energii kwantu gamma (Rys. 3), więc kwanty o mniejszej energii rejestrowane są częściej. W schemacie rozpadu nie pokazano bezpośredniej przemiany beta o energii 2,158 MeV, która jest dopuszczalna. Bezpośrednie przemiany beta o energiach 2,158 MeV (0,004%) oraz 1,333 MeV (0,01%) nie są widoczne w widmie ze względu na bardzo małe prawdopodobieństwo ich występowania.

Od prążka 1,172 MeV w kierunku mniejszych energii rozciąga się zakres ciągłego widma rozproszenia comptonowskiego z nieznacznie uwidocznionym prążkiem rozproszenia wstecznego o energii 0,21 MeV. Prążek K izotopu ^{60}Co , któremu odpowiada bardzo niewielka energia (około 7 keV), jest niewidoczny w widmie pokazanym na rys. 4a.

W widmach izotopów, w których zachodzi kaskadowe przejście gamma, można zaobserwować prążek sumaryczny, występujący wówczas, gdy scyntylator rejestruje promieniowanie emitowane przez źródło o dużej intensywności w dużym kącie bryłowym. Podczas przejścia kaskadowego kwanty gamma powstają prawie równocześnie. Opóźnienie ich powstania jest bardzo małe w porównaniu z czasem ich rejestracji w liczniku scyntylacyjnym i dlatego jest reprezentowane przez prążek sumaryczny. W widmie, pokazanym na rys. 4a, występuje prążek dla energii 2,505 MeV, chociaż izotop ^{60}Co nie emituje, podczas rozpadów (rys. 4b), kwantów o takiej energii. Jest to, więc prążek odpowiadający sumie energii 1,172 i 1,333 MeV i powstaje w tych stosunkowo rzadkich przypadkach, kiedy dwa kwanty gamma o energiach 1,172 i 1,333 MeV jednocześnie zdeponują całkowitą energię w scyntylatorze. Brak prążków sumarycznych wykorzystuje się niekiedy do identyfikacji izotopów, kiedy wiadomo, że przejścia kaskadowe nie występują w czasie ich przemiany. Przykładem tego może być identyfikacja izotopów ^{60}Co i ^{59}Fe , które emitują kwanty gamma o bardzo podobnych energiach (w przypadku ^{59}Fe są to energie 1,10 MeV i 1,29 MeV), ale w przypadku ^{59}Fe nie mają miejsca

przejścia kaskadowe, a więc nie można zaobserwować sumowania się energii traconej w scyntylatorze i powstawania prążka sumarycznego.

Widmo energii izotopu ^{22}Na – widmo źródła pozytonowego (rys. 5a). Rozpad izotopu ^{22}Na jest rozpadem typu beta plus. Ze schematu rozpadu tego izotopu (rys. 5b) wynika, że ponad 99% rozpadów następuje z emisją pozytonu i powoduje utworzenie wzbudzonych atomów ^{22}Ne , które przechodzą w stan podstawowy emitując jednocześnie kwant gamma o energii 1,274 MeV, a tylko 0,96% przemian powoduje bezpośrednie uzyskanie stanu stabilnego. Charakterystyczną cechą tego widma jest występowanie, oprócz prążka całkowitej absorpcji o energii 1,274 MeV, prążka anihilacyjnego o energii 0,511 MeV.

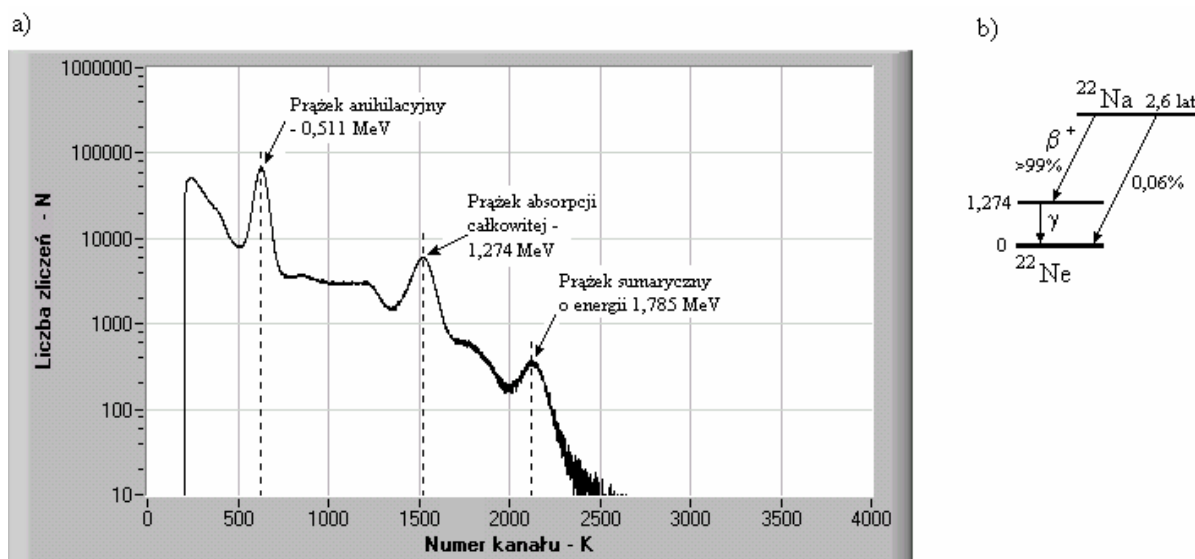
Anihilacja pozytonu ma miejsce zazwyczaj poza scyntylatorem, w materiale absorbującym, którym może być, na przykład, osłona źródła. Anihilacja jest procesem odwrotnym do tworzenia pary elektron-pozyton. W jej wyniku ma miejsce zamiana masy pary pozyton-elektron na dwa kwanty gamma o energiach 0,511 MeV, zgodnie z równaniem Einsteina $E=mc^2$. Ponieważ kwanty anihilacji są emitowane w przeciwnych kierunkach, tylko jeden może trafić do scyntylatora i zostać w nim pochłonięty, czego wynikiem jest widoczny w widmie prążek o energii 0,511 MeV. Ponieważ w scyntylatorze może mieć miejsce równoczesna absorpcja jednego z kwantów anihilacji oraz kwantu pierwotnego o energii 1,274 MeV, to w widmie izotopu ^{22}Na można zaobserwować również prążek o energii około 1,785 MeV.

Zwróćmy uwagę, że zjawisko anihilacji pozytonu wyemitowanego z jądra z napotkanym elektronem towarzyszy każdej emisji kwantu gamma z jądra ^{60}Co . Wynika z tego, że do scyntylatora dociera średnio tyle samo kwantów gamma o energii 0,511 MeV i 1,274 MeV. Jednak prawdopodobieństwo rejestracji tych kwantów jest różne (Rys. 3) i dlatego obserwujemy znaczną różnicę wysokości obu maksimów.

Zdolność rozdzielcza spektrometru określa dokładność, z jaką możliwe jest wykonanie pomiaru i rejestracji widma. Zdefiniowana jest jako:

$$R = \frac{\Delta E}{E} 100\%$$

gdzie E_f odpowiada położeniu maksimum prążka całkowitego pochłaniania, ΔE jest szerokością połówkową tego prążka, czyli szerokością prążka w połowie jego wysokości.



Rys. 6 Izotop promieniotwórczy ^{22}Na : a) spektrogram, b) schemat rozpadu

Spektrometria promieniowania jądrowego znalazła zastosowanie nie tylko do analizy pierwiastków o promieniotwórczości naturalnej. Pierwiastki, niewykazujące własności promieniotwórczych, można poddać aktywacji, np. w reaktorach jądrowych, a następnie już jako izotopy promieniotwórcze analizować metodami spektrometrycznymi.

Spektrometrię promieniowania jądrowego stosuje się również w wielu innych dziedzinach nauki, w medycynie, ochronie środowiska i procesach produkcyjnych. W astrofizyce jest stosowana do określenia składu chemicznego meteorytów, a w geologii i archeologii do określenia wieku próbek. W medycynie substancje promieniotwórcze wykorzystuje się do celów diagnostycznych (na przykład, za pomocą scyntygrafii izotopowej lub Pozytonowego Emisyjnego Tomografu – PET), jak również, terapeutycznych (leczenie nowotworów), a w technice, między innymi, do kontroli jakości spawów przy budowie rurociągów. W ochronie środowiska substancje promieniotwórcze znalazły zastosowanie do badania skażeń rzek i zbiorników wodnych.

1.1.5. Detekcja promieniowania gamma za pomocą licznika scyntylacyjnego

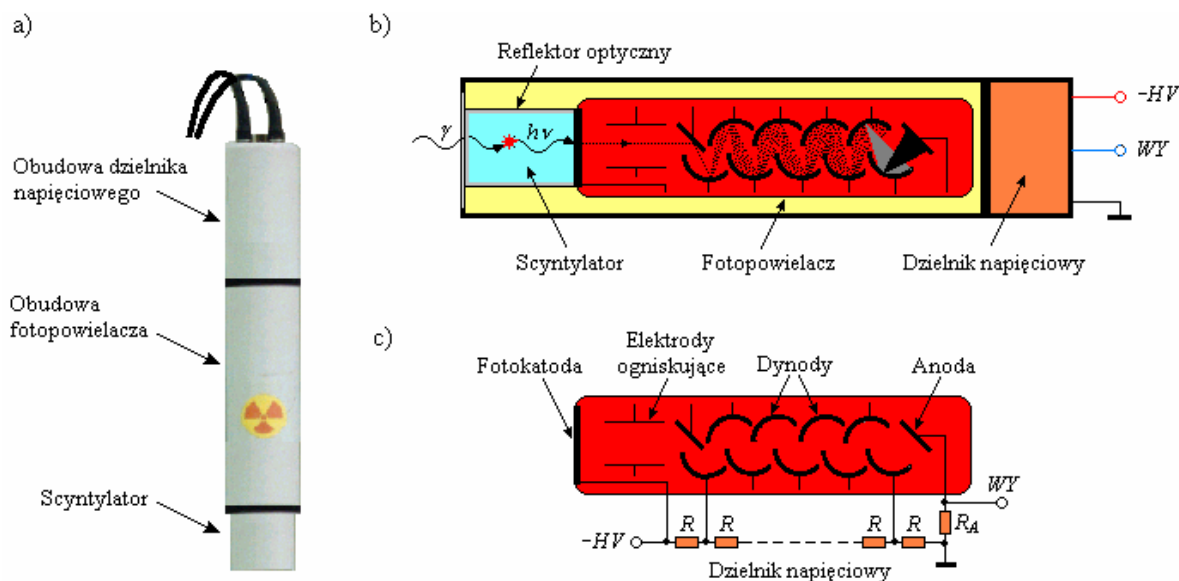
Zjawisko powstawania błysków świetlnych (scyntytacji) w scyntylatorach pod wpływem promieniowania jądrowego wykorzystano do budowy liczników scyntylacyjnych. Licznikiem

scyntylicyjnym (rys. 6a i b) nazywa się urządzenie złożone ze scyntylatora i fotopowielacza, niekiedy połączonych światłowodem.

Scyntylatory. W materiałach scyntylacyjnych obserwuje się świecenie luminescencyjne pod wpływem promieniowania jądrowego. Cząstki elementarne przechodząc przez scyntylator tracą energię, która wydziela się w postaci impulsu światła – scyntylacji. W scyntylatorach w wyniku zaabsorbowanej energii promieniowania ma miejsce przejście w stan wzbudzenia atomów lub molekuł, które powracając do stanu podstawowego emitują energię w postaci światła widzialnego lub promieniowania ultrafioletowego. W niektórych scyntylatorach obserwuje się liniową zależność amplitudy emitowanego impulsu świetlnego od utraconej w scyntylatorze energii cząstki, co wykorzystuje się do wyznaczania rozkładu energii cząstek.

W spektrometrii gamma, jako scyntylatory, najczęściej stosuje się kryształy jodku sodowego aktywowanego talem – NaJ(Tl). W wyniku oddziaływania promieniowania gamma za pośrednictwem zjawiska fotoelektrycznego, rozpraszania Comptonowskiego i zjawiska tworzenia par elektron-pozyton (kwanty promieniowania gamma, podobnie jak promieniowanie rentgenowskie, nie powodują bezpośredniej jonizacji materii), w kryształach NaJ(Tl) powstają elektrony obdarzone energią, którą następnie tracą na jonizację i wzbudzenie atomów i molekuł ośrodka. Wzbudzone atomy emitują kwanty światła w zakresie długości fal od około 320 do około 530 nm z maksimum w okolicy 410 nm. W wyszczególnionym zakresie długości fal kryształy NaJ(Tl) charakteryzują się dużą przezroczystością, bowiem ich widmo absorpcji przypada na zakres nadfioletu.

W przypadku spektrometrii promieniowania jądrowego istotne znaczenie ma proporcjonalność energii kwantów światła do energii rejestrowanych cząstek. Taką zależność uzyskuje się w sytuacji, kiedy cząstka wytraca w scyntylatorze całkowicie swoją energię, co ma miejsce wówczas, gdy wymiary scyntylatora są porównywalne z jej zasięgiem. W celu obniżenia strat światła scyntylatory osłania się reflektorami optycznymi.



Rys. 7. Licznik scyntylacyjny : a) widok sondy scyntylacyjnej, b) ilustracja zasady działania licznika, c) schemat funkcjonalny fotopowielacza

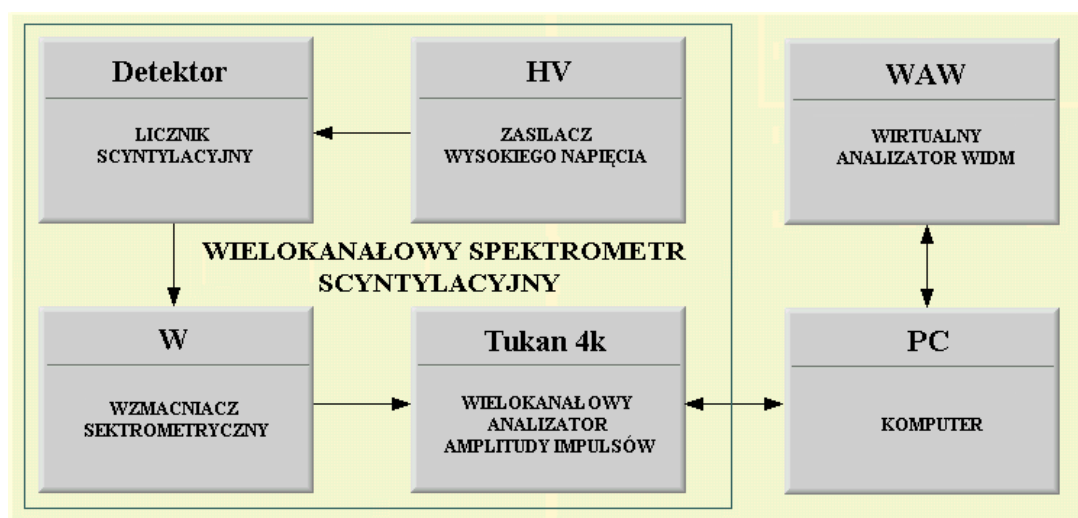
Fotopowielacz – PM (ang. *photomultiplier*). Budowę fotopowielacza ilustruje schematycznie rys. 6c. Fotokatoda, wykonana z materiału światłoczułego, pod wpływem padających na nią kwantów światła emituje elektrony (rys. 6b), które dzięki systemowi ogniskującemu, w postaci jednej lub dwóch elektrod umieszczonych między fotokatodą a pierwszą dynodą, poruszają się w kierunku pierwszej dynody, zwiększając po drodze swoją energię kinetyczną w przyspieszającym polu elektrycznym. Jeżeli elektrony docierające do pierwszej dynody mają wystarczającą energię by bombardując jej powierzchnię spowodować emisję wtórną, na przykład, $2\div4$ nowych elektronów, to jest to równoznaczne ze wzmocnieniem prądu. Jeśli za pierwszą dynodą znajdują się kolejne, między którymi wytworzone jest odpowiednie pole elektryczne, to opisany mechanizm powielania liczby elektronów jest kontynuowany i w rezultacie do ostatniej elektrody - anody, dociera znaczna ilość elektronów, wymuszając przepływ prądu w obwodzie zewnętrznym, możliwy do zmierzenia. System stopni powielających liczbę elektronów stanowi zwykle $9\div15$ dynod, dzięki czemu można uzyskać wzmocnienie prądowe rzędu $10^5\div10^9$. Napięcie między dynodami, wytwarzające wystarczająco silne przyspieszające pole elektryczne, uzyskuje się dzięki rezystorowemu dzielnikowi napięć, który polaryzuje się wysokim napięciem - HV.

Liczniki scyntylacyjne stosuje się najczęściej do rejestracji pojedynczych cząstek i analizy czasowej zjawisk im towarzyszących oraz do wyznaczania rozkładu energii rejestrowanych cząstek. W pierwszym przypadku liczniki scyntylacyjne wykorzystuje się do określenia momentu czasu odpowiadającego pojawieniu się cząstki w scyntylatorze, natomiast w drugim do zdejmowania widm energetycznych w szerokim zakresie energii i intensywności promieniowania.

2. Wykonanie doświadczenia

2.1. Aparatura pomiarowa

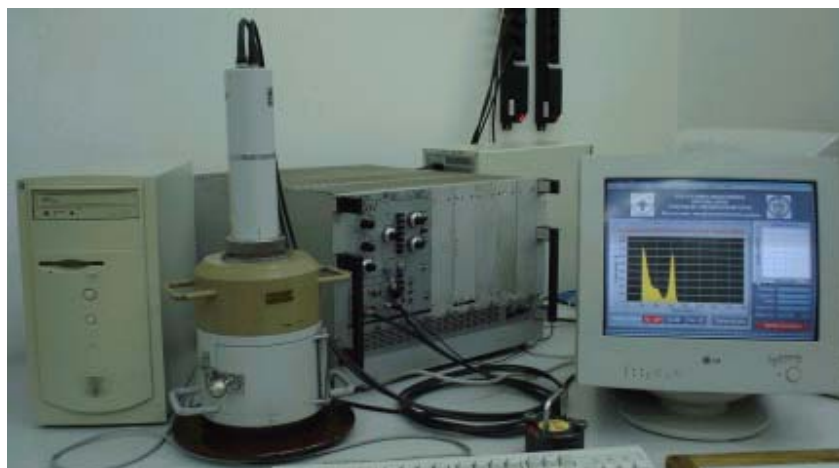
W doświadczeniu stosuje się wielokanałowy spektrometr scyntylacyjny, którego schemat blokowy pokazano na rys. 7. Spektrometrem nazywa się urządzenie, które pozwala nie tylko rejestrować cząstki, lecz również mierzyć wybrane wielkości podstawowe, na przykład,



Rys. 8. Schemat blokowy wielokanałowego spektrometru scyntylacyjnego

energię cząstek. Spektrometrami scyntylacyjnymi są spektrometry, w których aparatura analizująca amplitudy impulsów współpracuje z licznikiem scyntylacyjnym. W wielokanałowym spektrometrze scyntylacyjnym do analizy amplitudy impulsów dostarczanych przez licznik scyntylacyjny wykorzystuje się wyspecjalizowany wielokanałowy analizator amplitudy impulsów (MCA).

Na rysunku 8 pokazano widok rzeczywistego wielokanałowego spektrometru scyntylacyjnego, w którym zastosowano wielokanałowy analizator amplitudy impulsów - Tukan 4k.

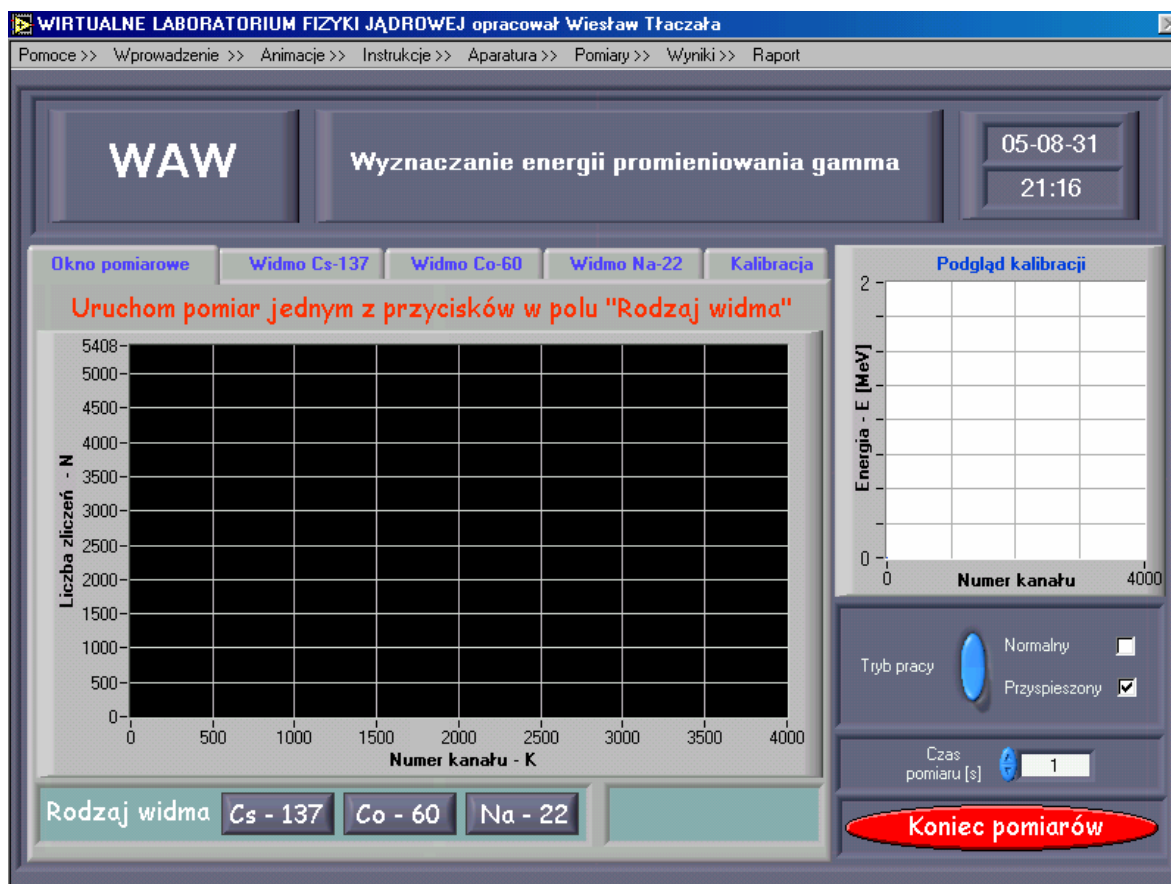


Rys. 9. Spektrometr scyntylacyjny

2.2. Wirtualny analizator widm

Do wykonania eksperymentu, poświęconego wyznaczeniu energii promieniowania gamma, służy wirtualny analizator widm, który pełni funkcję programu głównego obsługującego doświadczenie.

Wirtualny analizator widm, którego panel sterowania pokazano na rys. 9, jest urządzeniem, umożliwiającym w sposób zintegrowany zrealizowanie wszystkich zadań towarzyszących wykonaniu eksperymentu, a więc rejestrację widm - kalibracyjnych i „nieznanego” preparatu (^{22}Na), kalibrację spektrometru i ostatecznie wyznaczenie poszukiwanej energii kwantów gamma emitowanych przez izotop ^{22}Na .



Rys. 10. Wirtualny analizator widm – panel sterowania

Po otwarciu panelu sterowania analizatora zalecane jest zapoznanie się z najważniejszymi informacjami dotyczącymi doświadczenia, w tym, jego celem, podstawami fizycznymi oraz sposobem wykonania eksperymentu. Te informacje można uzyskać w stosownych oknach otwieranych za pomocą poleceń dostępnych w menu *Wprowadzenie*, *Instrukcje* i *Aparatura*, rozwijanych z paska menu analizatora.

Analizator Tukan 4k, po uruchomieniu, działa w tle analizatora i dostarcza mu zarejestrowane widma na bieżąco z częstotliwością 1 widmo/jednostkę czasu.

2.3. Plan pracy

Realizacja zadań przewidzianych do wykonania w czasie doświadczenia wymaga przeprowadzenia cechowania spektrometru, oszacowania jego zdolności rozdzielczej i wyznaczenia energii promieniowania gamma emitowanego w czasie rozpadu izotopu ^{22}Na .

W celu realizacji wymienionych zadań należy:

- przygotować aparaturę do pomiarów,
- umieścić źródło ^{137}Cs w domku osłonowym,
- zdjąć widmo izotopu ^{137}Cs ,
- zdjąć widmo izotopu ^{60}Co , po uprzednim zastąpieniu źródła ^{137}Cs źródłem ^{60}Co ,
- przeprowadzić cechowanie spektrometru,
- zdjąć widmo izotopu ^{22}Na , po uprzednim zastąpieniu źródła ^{60}Co źródłem ^{22}Na ,
- wyznaczyć poszukiwaną energię kwantów gamma, emitowanych w czasie rozpadu jąder izotopu ^{22}Na ,
- oszacować zdolność rozdzielczą spektrometru.

Do włączenia zasilania kasety służy wyłącznik **ON/OFF** umieszczony w dolnym prawym rogu kasety. Napięcie pracy detektora wynosi 900V (ustawioną wartość wysokiego napięcia pokazuje woltomierz oraz, umieszczony nad nim, wyświetlacz cyfrowy), natomiast w przypadku wzmacniacza pokrętko **Gain** należy ustawić w pozycji **1** (skrajne lewe położenie), a zespolony przełącznik skokowej zmiany wzmocnienia w pozycji **10** (wciśnięty dolny przełącznik). Ponadto należy wybrać stałą czasową równą 4,5 μs wciskając przełącznik **4,5** w polu **Time shaping**. Po włączeniu komputera na jego ekranie pojawi się ikona skrótu, której kliknięcie otwiera program obsługujący wielokanałowy analizator amplitudy impulsów Tukan 4k.

2.4. Pomiary

W celu zrealizowania zadań sformułowanych we wstępie do doświadczenia należy zdjąć widma ^{137}Cs i ^{60}Co , które posłużą do wykonania cechowania spektrometru, przy czym widmo ^{137}Cs wykorzystuje się także do wyznaczenia zdolności rozdzielczej spektrometru. W doświadczeniu

zdejmuje się również widmo ^{22}Na , traktowane jako widmo nieznanego źródła promieniotwórczego, dla którego przeprowadza się wyznaczanie energii kwantów gamma emitowanych w czasie rozpadu tego izotopu i identyfikację nieznanego nuklidu.

Rejestracja widma ^{137}Cs . Po przygotowaniu aparatury do pomiarów i umieszczeniu w domku osłonowym źródła ^{137}Cs powracamy do programu głównego (wirtualny analizator widm) i otwieramy podprogram służący akwizycji danych klikając zakładkę **Okno pomiarowe** (jeżeli nie jest aktywne), a następnie uruchamiamy pomiar klikając klawisz **Cs – 137** w polu *Rodzaj pomiaru*. Od tego momentu rozpoczyna się akwizycja danych. Zakończeniu akwizycji danych towarzyszy otwarcie okna dialogowego informującego o konieczności zapisania danych do pliku tekstowego z propozycją nazwy uzupełnionej rozszerzeniem *.wdm*. Kliknięcie klawisza **Dalej** spowoduje otwarcie systemowego okna dialogowego, umożliwiającego wybór miejsca, w którym plik z danymi zostanie zachowany. Zarejestrowane w oknie pomiarowym widmo jest automatycznie przesyłane do okna, w którym można przeprowadzić jego analizę. W przypadku cezu ^{137}Cs jest to okno udostępniane kliknięciem zakładki **Widmo Cs-137**. W oknach przeznaczonych do analizy poszczególne widma są przechowywane do czasu zakończenia eksperymentu.

Rejestracja widma ^{60}Co . Rejestracja widma kobaltu przebiega w sposób analogiczny jak w przypadku widma cezu, z tą różnicą, że przed pomiarem należy zastąpić w domku osłonowym źródło ^{137}Cs źródłem ^{60}Co , a w celu uruchomienia akwizycji danych trzeba, tym razem, w polu *Rodzaj pomiaru* kliknąć klawisz **Co – 60**. Pozostałe czynności są analogiczne do tych dotyczących rejestracji widma ^{137}Cs . Widmo ^{60}Co po zakończeniu rejestracji, udostępnione w oknie do analizy.

Rejestracja widma ^{22}Na . Widmo sodu rejestruje się analogicznie jak dwa poprzednie widma, po uprzednim umieszczeniu źródła w domku osłonowym. Uruchomienie pomiaru następuje za pomocą klawisza **Na – 22** w polu *Rodzaj pomiaru*.

Omówienie sposobów rejestracji poszczególnych widm jest dostępne również w oknach otwieranych z paska menu poleceniami **Pomiary>>Jak zdjąć widmo cezu Cs-137?/ Jak zdjąć widmo kobaltu Co-60?/ Jak zdjąć widmo sodu Na-22?**.

Po zarejestrowaniu widm można przystąpić do ich analizy i opracowania wyników pomiarów.

2.5. Wyniki pomiarów

Opracowanie wyników pomiarów dotyczy kalibracji spektrometru, wyznaczenia widm energetycznych ^{137}Cs , ^{60}Co i ^{22}Na , wyznaczenia poszukiwanej energii kwantów gamma emitowanych przez ^{22}Na wraz z niepewnością pomiarową oraz oszacowania zdolności rozdzielczej spektrometru.

Cechowanie spektrometru. W spektroskopii gamma do wyznaczenia energii nieznanymi kwantów gamma wykorzystuje się maksima fotoelektryczne (maksima całkowitego pochłaniania), zazwyczaj dużo silniejsze niż ciągłe widmo Comptonowskie, występujące w widmach znanych izotopów, a więc mogących służyć za wzorce. W doświadczeniu do kalibracji spektrometru wykorzystuje się widma ^{137}Cs i ^{60}Co . W tym celu należy otworzyć okno z widmem ^{137}Cs , klikając zakładkę **Widmo Cs-137** na panelu sterowania analizatora. W oknie z widmem cezu jest widoczny czerwony kursor, którego krzyż należy przesunąć do położenia odpowiadającego maksimum fotoelektrycznemu. Współrzędne N i K położenia krzyża (przyjmijmy dla cezu $K=K_1$) są można odczytać w przyporządkowanych im wyświetlaczach numerycznych. Ponieważ energia kwantów gamma E_1 emitowanych przez ^{137}Cs jest znana ($E_1=0,661\text{ MeV}$) to punkt o współrzędnych (E_1, K_1) jest pierwszym z trzech punktów wykorzystywanych do wyznaczenia prostej cechowania spektrometru. Dwa kolejne punkty uzyskuje się w analogiczny sposób wykorzystując do tego celu widmo ^{60}Co (w oknie z widmem kobaltu ^{60}Co , otwieranym kliknięciem zakładki **Widmo Co-60**), dla którego energie $E_2=1,17\text{ MeV}$ i $E_3=1,33\text{ MeV}$, odpowiadające maksimum fotoelektrycznym (patrz widmo wzorcowe dla ^{60}Co) przyjmujemy jako znane. Odczytując położenia tych maksimów, odpowiednio K_2 i K_3 dla energii E_2 i E_3 , uzyskujemy współrzędne tych punktów. Dysponując trzema punktami o współrzędnych (E_1, K_1) , (E_2, K_2) i (E_3, K_3) można do nich dopasować prostą za pomocą *metody najmniejszych kwadratów*, której równanie (14) jest równaniem prostej cechowania spektrometru.

$$E = aK + b. \quad (14)$$

Analizator pozwala wyznaczyć prostą cechowania w sposób automatyczny. W tym celu w oknach z widmami kalibracyjnymi, otwieranych kliknięciem zakładek **Widmo Cs-137** i **Widmo Co-60**, po przesunięciu krzyża kursora w miejsca odpowiadające położeniu maksimów fotoelektrycznych i przyporządkowaniu im odpowiednich wartości energii w rozwijanym okienku tekstowym **Energia**, należy kliknąć każdorazowo klawisz **Dodaj do wykresu/Dopasuj**,

co spowoduje umieszczenie punktu na wykresie kalibracyjnym. (**Uwaga:** po wybraniu wartości energii w okienku **Energia** należy ją **zawsze** zaakceptować kliknięciem w dowolnym miejscu panelu). Podgląd prostej cechowania jest widoczny na panelu sterowania, natomiast w oknie, otwieranym kliknięciem zakładki **Kalibracja**, dostępny jest powiększony wykres z prostą cechowania, którą można wykorzystać do wyznaczenia energii kwantów gamma sodu ^{22}Na na podstawie jego widma. Poprawnie wyznaczona prosta cechowania powinna rzeczywiście być prostą bez załamań. Jeżeli na prostej pojawi się załamanie to oznacza, że zlekceważyliśmy informację zawartą w komentarzu **Uwaga**. W takiej sytuacji kalibrację należy powtórzyć. W tym celu w oknie *Kalibracja* należy kliknąć klawisz **Kasuj wykres kalibracyjny**, a następnie powtórzyć od początku całą procedurę cechowania spektrometru

Omówienie sposobu wyznaczenia prostej cechowania jest dostępne także w oknie, które można otworzyć z paska menu poleceniem **Pomiary>>Jak przeprowadzić cechowanie spektrometru?**

Prostą cechowania można wykorzystać również do przekształcenia widm amplitudowych impulsów elektrycznych w widma energetyczne charakterystyczne dla poszczególnych preparatów.

Wyznaczanie widm energetycznych ^{137}Cs , ^{60}Co i ^{22}Na . Wyznaczenie widm energetycznych dla poszczególnych preparatów można przeprowadzić analitycznie podstawiając do równania kalibracyjnego (14) wartości numerów kanałów. W ten sposób można otrzymać zbiór wartości energii odpowiadający zbiorowi numerów kanałów w danym widmie. Zbiór liczby zliczeń dla poszczególnych kanałów w połączeniu ze zbiorem wartości energii odpowiadających tym kanałom umożliwia wyznaczenie poszukiwanego widma energetycznego.

Uwaga: Wyznaczenie widm energetycznych musi poprzedzić cechowanie spektrometru. Oczywiście jest, że możemy przyporządkować energie także pozostałym kanałom.

Wyznaczanie energii kwantów gamma emitowanych przez ^{22}Na . Wyznaczanie poszukiwanej energii kwantów gamma emitowanych przez izotop ^{22}Na można przeprowadzić w trojaki sposób. Korzystając z równania prostej cechowania, po wstawieniu do tego równania numeru kanału K_4 odpowiadającego maksimum fotoelektrycznemu w widmie sodu ^{22}Na (patrz widmo wzorcowe dla ^{22}Na), można wyznaczyć poszukiwaną energię w sposób analityczny. Można ją również wyznaczyć graficznie. W tym celu należy w oknie z widmem sodu ^{22}Na przesunąć kursor w

miejsce odpowiadające maksimum fotoelektrycznemu, co **automatycznie** wymusza współrzędną X kursora w oknie **Kalibracja**. Po otwarciu okna z prostą kalibracyjną, należy przesunąć kursor do punktu przecięcia prostej cechowania ze składową X (pionową) kursora. Po wykonaniu wymienionych czynności możliwy jest odczyt tej wartości na osi energii (Y) lub w okienku numerycznym pod wykresem.

Omówienie sposobu wyznaczania energii kwantów gamma jest dostępne z paska menu poleceniem **Pomiary>>Jak wyznaczyć poszukiwaną energię kwantów gamma?**

Wyznaczenie niepewności pomiarowej energii kwantów gamma emitowanych przez ^{22}Na . Korzystamy ze wzoru na błąd średni kwadratowy wielkości złożonej $E = f(a, b, K)$ - równanie (14):

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial a} \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial b} \cdot \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial K} \cdot \Delta K\right)^2} \quad (15)$$

gdzie a i b to współczynniki prostej kalibracyjnej wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów wraz z niepewnościami Δa i Δb , K – numer kanału odpowiadający maksimum fotoelektrycznemu, ΔK – niepewność pomiarowa wyznaczenia tego maksimum równa połowie szerokości połówkowej maksimum (czyli szerokości maksimum w połowie wysokości).

Wyznaczanie zdolności rozdzielczej spektrometru. W doświadczeniu do wyznaczenia zdolności rozdzielczej spektrometru, wykorzystuje się widmo ^{137}Cs analizując prążek całkowitego pochłaniania charakterystyczny dla tego izotopu. W celu wyznaczenia współczynnika R , należy odczytać położenia kursora, odpowiadające przecięciu linii $N/2$ z widmem ^{137}Cs , a więc w połowie wysokości prążka całkowitego pochłaniania.

Literatura obowiązkowa

1. W. Tłaczała.: *Wirtualne laboratorium fizyki jądrowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.

Literatura uzupełniająca

1. E. Skrzypczak, Z. Szepliński.: *Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
2. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker.: *Podstawy fizyki – Tom 5*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
3. W. Bogusz, J. Garbarczyk, F. Krok.: *Podstawy Fizyki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
4. B.M. Jaworski, A.A. Dietłaf.: *Fizyka – poradnik encyklopedyczny*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
5. *Encyklopedia fizyki współczesnej – zjawisko Mössbauera*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1983.