

Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Wdział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Anna Miś

Numer albumu: 1127965

BADANIE WŁASNOŚCI WYBRANYCH MATERIAŁÓW
SCYNTYLACYJNYCH POD KĄTEM ZASTOSOWANIA W
IDENTYFIKACJI SUBSTANCJI NIEBEZPIECZNYCH.

Praca licencjacka
na kierunku Zaawansowane Materiały i Nanotechnologia

Praca napisana pod kierunkiem
doktora Michała Silarskiego
Zakład Doświadczalnej Fizyki Cząstek i jej Zastosowań

Kraków, 2018 r.

Kraków, dnia

Oświadczenie autora pracy

Świadoma odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

.....

Kraków, dnia

Oświadczenie kierującego pracą

Potwierdzam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i kwalifikuje się do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

.....

Składam serdeczne podziękowania

*Panu doktorowi Michałowi Silarskiemu
za możliwość wykonania pracy licencjackiej,
inspirację, przekazaną wiedzę, wyrozumiałość
i cierpliwość oraz sympatyczną atmosferę,*

*Panu Szymonowi Niedźwiedzkiemu
za pomoc przy wykonywaniu badań oraz cenne rady i wskazówki,
Pani Ewelinie Kubicz
za umożliwienie pracy w laboratorium,*

*Rodzicom, którzy we mnie wierzyli, mobilizowali
oraz wspierali na każdym etapie trwania studiów.*

Streszczenie

Celem pracy było zbadanie energetycznej zdolności rozdzielczej wybranych materiałów scyntylacyjnych: jodku sodu aktywowanego talem (NaI:Tl), fluorku baru (BaF_2), germanku bizmutu (BGO), krzemianu lutetu domieszkowanego cerem (LSO:Ce) oraz bromku lantanu domieszkowanego cerem i strontem ($\text{LaBr}_3\text{:Ce:Sr}$), które można wykorzystać do pomiaru widm aktywacyjnych. Badane były widma energetyczne standardowych źródeł promieniotwórczych kwantów gamma (^{22}Na , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{60}Co). Wybrano najlepszy materiał scyntylacyjny, z którego będzie wykonany detektor kwantów gamma w urządzeniu do nieinwazyjnego wykrywania materiałów niebezpiecznych w środowisku wodnym budowanego w Instytucie Fizyki UJ w ramach projektu SABAT. Zgodnie z oczekiwaniami, okazał się nim bromek lantanu domieszkowany cerem. Ponadto, został wykonany pomiar widm energii powstałych z wewnętrznej promieniotwórczości kryształu LSO:Ce.

Spis treści

1	Wstęp	11
2	Metody wykrywania materiałów niebezpiecznych	12
2.1	Oddziaływanie neutronów z materią	12
2.2	Wykrywanie materiałów niebezpiecznych za pomocą wiązek neutronów	13
3	Rejestracja promieniowania gamma	15
3.1	Oddziaływanie kwantów gamma z materią	15
3.2	Detektory promieniowania gamma	15
3.3	Detektor scyntylacyjny	16
3.4	Energetyczna zdolność rozdzielcza	17
4	Opis przeprowadzonych pomiarów	18
4.1	Źródła promieniowania	18
4.2	Pomiar energetycznej zdolności rozdzielczej	18
5	Wyniki pomiarów i ich dyskusja	20
5.1	Energetyczna zdolność rozdzielcza kryształu BGO	21
5.2	Analiza wyników dla scyntylatora NaI:Tl	23
5.3	Kalkulacja rozdzielczości energetycznej scyntylatora LSO	25
5.4	Wyniki pomiarów dla kryształu BaF ₂	27
5.5	Energetyczna zdolność rozdzielcza scyntylatora LaBr ₃ :Ce:Sr	29
5.6	Wewnętrzna promieniotwórczość kryształów zawierających cer	31
6	Podsumowanie	33

1. Wstęp

W działaniach wojennych, na początku XX wieku, wykorzystywano znaczne ilości bojowych środków trujących. Szacuje się, że w wyniku zastosowania tej broni zginęło ok. 100000 ludzi, a ponad milion odniosło rany[?]. Wraz z rozpoczęciem II Wojny Światowej zaczęto prowadzić prace badawcze nad nowymi związkami toksycznymi oraz zwiększono produkcję broni chemicznej. Po tym okresie na terenie Niemiec znaleziono ok. 296103 t amunicji wypełnionej środkami trującymi [?]. Najtańszym oraz najszybszym rozwiązaniem okazało się zatopienie tego arsenału w Morzu Bałtyckim. Ilość zatopionej broni chemicznej szacuje się na 42 do 69 tysięcy ton [?]. Wśród nich znalazły się takie substancje jak iperyt siarkowy (gaz musztardowy), adamsyt, chloroacetofenon czy kwas pruski. Środki te stają się szczególnie niebezpieczne w przypadku, gdy korodujące pociski są unoszone i rozszczelniają się, a niebezpieczne związki rozprzestrzeniają się w wodzie. Odnotowano kilka przypadków koniecznej ewakuacji ludności oraz poważnych zagrożeń zanieczyszczenia wybrzeża. Ponadto oszacowano, że gdyby $\frac{1}{6}$ zatopionych substancji została uwolniona do Bałtyku, to jego flora i fauna zostałyby kompletnie zniszczone na kolejne 100 lat [?].

W związku z tym zagrożeniem potrzebne są nowe, efektywne metody wykrywania materiałów niebezpiecznych. Obiecującą alternatywę dla powszechnie stosowanych metod jest wykorzystanie wiązek neutronów, które wzbudzają jądra atomów badanej substancji, a pomiar kwantów gamma z deekscytacji tych jąder daje możliwość zrekonstruowania stechiometrii. Metodą tą uzyskuje się zwykle złożone widma energetyczne kwantów gamma, dlatego bardzo ważnym elementem takiego wykrywacza jest detektor, który musi mieć jak najlepszą wydajność oraz energetyczną zdolność rozdzielczą.

Na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego rozwijane jest, w ramach projektu SABAT [?], urządzenie do nieinwazyjnego wykrywania materiałów niebezpiecznych w wodzie oparte na zastosowaniu neutronów. Jednym z jego najważniejszych elementów jest detektor promieniowania gamma, którego projekt i wykonanie wymaga m.in. określenia optymalnego materiału. Dlatego w ramach przedstawionej pracy licencjackiej zostały zbadane różne kryształy scyntylacyjne, które mogą być wykorzystane do budowy tego detektora.

Praca podzielona jest na 6 rozdziałów. W pierwszym zawarto podstawowe informacje na temat obecnie wykorzystywanych metod wykrywania materiałów niebezpiecznych. W drugim rozdziale zostały opisane podstawowe procesy oddziaływania neutronów z materią. Rozdział trzeci opisuje oddziaływanie kwantów gamma z materią oraz detektory wykorzystywane do rejestracji tych cząstek. W ostatnich rozdziałach opisano część eksperymentalną, przebieg pomiarów, przedstawiono wyniki oraz przeprowadzono ich dyskusję.

2. Metody wykrywania materiałów niebezpiecznych

Obecnie na świecie istnieje wiele różnych metod wykrywania substancji niebezpiecznych. Wykorzystują one głównie promieniowanie rentgenowskie, metody radarowe, analizę śladowych ilości substancji oraz detektory indukcyjne.

Jedną z metod jest, używana m.in. na lotniskach, spektrometria ruchliwości jonów (IMS) [?]. Wykorzystuje ona detektor, który analizuje lotne związki organiczne w złożonych matrycach gazowych. Identyfikacja badanej substancji następuje na drodze pomiaru szybkości jonów. Metoda pozwala wykrywać wiele związków chemicznych, tj. aldehydy, ketony, aminy czy estry, jednak trudno jest wykryć skomplikowane związki organiczne.

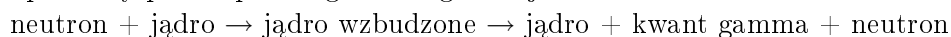
Kolejną metodą jest wykorzystanie skanerów promieniowania rentgenowskiego. Dzięki oddziaływaniu promieniowania rentgenowskiego z elektronami możliwe jest określenie kształtu oraz rozkładu gęstości badanych przedmiotów. Istotną wadą tego typu skanerów jest małe prawdopodobieństwo oddziaływania promieni X z lekkimi pierwiastkami (np. węgiel, azot, tlen, wodór), które głównie wchodzi w skład materiałów wybuchowych [?].

Do wykrywania ukrytych ładunków wybuchowych wykorzystywane są georadary oraz wykrywacze metali, oparte na emitowaniu fal elektromagnetycznych i rejestracji odbitych od badanej substancji fal wtórnych. Jednak często dają one fałszywe sygnały, a możliwość wykrywania jedynie obiektów metalowych nierzadko przynosi negatywny wynik w przypadku ładunków w kompozytowej obudowie.

Wady i ograniczenia wymienionych sposobów skłaniają do poszukiwania nowych urządzeń wykrywających materiały niebezpieczne. Przede wszystkim poszukuje się metod, które pozwolą na identyfikację substancji organicznych, składających się głównie z węgla, tlenu, wodoru i azotu. Do tego celu często wykorzystywane jest oddziaływanie neutronów z materią. Obecnie powstało już kilka urządzeń wykorzystujących neutrony, które zostaną krótko przedstawione w kolejnych częściach pracy.

2.1 Oddziaływanie neutronów z materią

Neutrony są składnikami jąder atomowych i jako cząstki elektrycznie neutralne reagują praktycznie wyłącznie z jądrami. Neutrony w materii mogą być rozpraszane, wychwytywane przez jądra lub ulegają reakcjom jądrowym. Najczęściej kiedy neutron przechodzi blisko jądra następuje zderzenie sprężyste, podczas którego neutron traci część swojej energii kinetycznej. To zjawisko jest nazywane rozpraszaniem sprężystym [?]. Neutrony zderzając się z jądrami mogą również powodować ich wzbudzenie. Aby przejść do stanu podstawowego, wzbudzone jądra wysyłają kwanty gamma, których energia jest zależna od rodzaju izotopu. Cały proces przebiega według reakcji:



Innym procesem oddziaływania neutronu z materią może być jego wychwyt przez jądro. Polega on na tym, że podczas zderzenia neutron może być zaabsorbowany przez jądro atomowe i spowodować powstanie nowego jądra o liczbie masowej o 1 większej w porównaniu z jądrem pierwotnego atomu. Przykładem takiej reakcji może być wychwyt neutronu przez ^{59}Co . Przechodzi on w radioaktywny ^{60}Co [?]. Najczęściej w wyniku takiej reakcji powstające jądro jest radioaktywne i emituje kwanty γ oraz promieniowanie β . Jednak nie jest to regułą. Część powstających pierwiastków, tj. ^2H , ^{114}Cd , ^{156}Gd , nie jest radioaktywna a inne, jak ^{32}P rozpadają się bez emisji kwantu gamma [?].

W związku z tym, że emitowane podczas nieelastycznego rozpraszania oraz wychwytu neutronów kwanty γ mają energie charakterystyczne dla jądra pierwotnego procesy te mogą być wykorzystane do określania składu pierwiastkowego materiałów i identyfikacji niebezpiecznych substancji, jak zostało przedstawione w kolejnym podrozdziale.

2.2 Wykrywanie materiałów niebezpiecznych za pomocą wiązek neutronów

Bezinwazyjne metody wykrywania substancji niebezpiecznych opierają się na analizie stechiometrii. Analiza ta jest przeprowadzana za pomocą wiązki neutronów powstających np. w procesie zderzeń deuteru i trytu (generator neutronów). Strumień neutronów pada na badaną substancję i oddziałuje z jądrami pierwiastków budujących dany materiał. Jądra zostają wzbudzone, a przechodząc do stanu o niższej energii emitują kwanty gamma (zależne od rodzaju jądra), które są rejestrowane za pomocą detektora, np. detektora scyntylacyjnego. Dzięki rejestracji tych kwantów można otrzymać informację jakie pierwiastki budują daną substancję, ponieważ każdy izotop ma swoje charakterystyczne widmo.

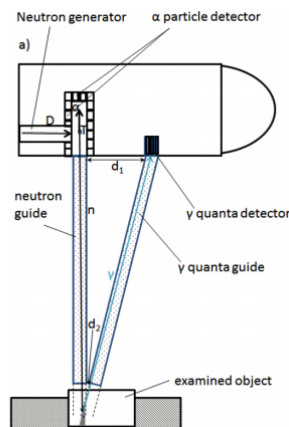
Aby wykryć takie pierwiastki jak wodór, chlor czy żelazo, należy użyć niskoenergetycznych (termicznych) neutronów, natomiast substancje zbudowane z węgla, azotu czy tlenu, są najlepiej wykrywalne przy pomocy neutronów wysokoenergetycznych (szybkich). Większość narkotyków czy materiałów wybuchowych posiada podobną strukturę, głównie składającą się one z węgla, azotu i tlenu. Pierwiastki te są również głównym składnikiem przeważającej części substancji organicznych. Jednak proporcje stechiometryczne tych związków w materiałach niebezpiecznych są dobrze znane. Analiza za pomocą aktywacji neutronami, wykorzystuje informacje o zawartości izotopów C, N, O w badanych próbkach. Dokładną informację o stechiometrii otrzymuje się po uwzględnieniu prawdopodobieństw reakcji neutronu z jądrami. Zwykle zmierzone zawartości pierwiastków normalizuje się do liczby atomów jednego z nich, otrzymując frakcje charakterystyczne substancji, które można porównać ze znanymi związkami i określić czy badana substancja jest niebezpieczna [?].

Neutronowe techniki aktywacyjne mają szerokie zastosowanie w wykrywaniu materiałów niebezpiecznych, zarówno na lądzie, jak i pod wodą. W pierwszym przypadku mogą być wykorzystywane na lotniskach, w urzędach oraz innych miejscach objętych szczególną ochroną [?].

Jednym z urządzeń opartych na oddziaływaniu neutronów jest SWAN, mobilny system detekcji materiałów wybuchowych na lądzie [?]. Wykorzystuje ono aktywację neutronami oraz pomiar widma charakterystycznego promieniowania gamma węgla, azotu i tlenu [?]. Analogiczną metodę wykorzystuje system PELAN (Pulsed Elemental Analysis with Neutrons) [?] oraz Sodern [?].

W środowisku wodnym metody aktywacyjne napotykają na problemy. Są one związane z oddziaływaniem pomiędzy neutronami a wodorem i tlenem, ponieważ cząstki są silnie moderowane oraz pochłaniane w zderzeniach z jądrami atomów wymienionych pierwiastków. W dodatku, również kwanty gamma emitowane przez badany obiekt są pochłaniane lub rozpraszane przez wodę [?]. Do zastosowania w warunkach wodnych, konieczne jest dopracowanie urządzeń wykorzystujących neutrony z powodu wspomnianych ograniczeń. Do tych rozwiązań zalicza się UNCOSS (Underwater Coastal Sea Surveyor) [?]. Wykorzystuje ono oddziaływanie termicznych neutronów z materia, głównie do identyfikacji podwodnych niebezpieczeństw, takich jak zatopione substancje wybuchowe. System składa się z generatora neutronów oraz detektora kwantów gamma z kryształem NaJ:Tl. Całe urządzenie, wraz z zasilaczami oraz modułem elektronicznym służącym do badania kwantów gamma, umieszczone jest w wodoodpornym pojeździe podwodnym[?].

Na Uniwersytecie Jagiellońskim w ramach projektu SABAT [?] jest rozwijane nowe urządzenie, pozwalające na szybkie i nieinwazyjne wykrywanie materiałów niebezpiecznych. Proponowane rozwiązanie zakłada zastosowanie przewodnic dla neutronów i kwantów gamma o zmiennej geometrii. Umożliwiają one wybranie wiązki neutronów naświetlających część badanego przedmiotu bez oddziaływania z otaczającą go wodą oraz rejestrację części emitowanych kwantów gamma, które nie uległy rozproszeniu w wodzie (Rys. ??). W



Rysunek 1: Schemat urządzenia SABAT do wykrywania substancji niebezpiecznych pod wodą. Rysunek zaadaptowany z [?]

ogólności pozwala to na wykonanie tomograficznego obrazu składu pierwiastkowego badanej substancji. Prowadnice mogą mieć kształt walców ze stali nierdzewnej, wypełnionej powietrzem pod niskim ciśnieniem lub gazem o niskim prawdopodobieństwie interakcji z neutronami. W projektowanym urządzeniu generator, poprzez zderzenia jonów deuteru i trytu, wytwarza neutrony oraz poruszające się w przeciwnym kierunku cząstki alfa, które mogą być rejestrowane przez zainstalowany wewnątrz generatora pozycyjnie czuły detektor (np. matrycę detektorów krzemowych lub scyntylacyjnych), tak jak na Rys. ???. Neutrony są emitowane prawie izotropowo z dobrze zdefiniowaną energią równą około 14,1 MeV ale rejestracja cząstek α pozwala na wybranie wiązki poruszającej się w przewodnicy. Po opuszczeniu przewodnicy neutrony wnikają do naświetlanego obiektu i mogą być nieelastycznie rozproszone na jądrach atomowych badanej substancji. Taka wartość energii jest wystarczająca do wzbudzenia jąder atomowych, które deeksytuując (przechodząc ze stanu wzbudzonego o energii E_1 do niższego stanu o energii E_2) emitują kwanty gamma z energią właściwą dla tego pierwiastka. Część emitowanych kwantów gamma leci w kierunku detektora, wewnątrz analogicznej przewodnicy, która dzięki swojej specyficznej budowie zmniejsza ich pochłanianie i rozpraszanie. Detektor, do którego docierają cząstki, powinien rejestrować czas, energię oraz być czuły na pozycję interakcji kwantu γ . Głębokość wnikania neutronów jest określana przez zmianę pozycji przewodnic oraz kąta między nimi. Zmiana odległości zapewnia rejestrację kwantów γ z różnych części badanej próbki, a dzięki temu wyznaczenie rozkładu gęstości pierwiastków wchodzących w skład materiału. W związku z dużymi strumieniami neutronów potrzebnych do szybkiej detekcji niebezpiecznych substancji oraz małych rozmiarów urządzenia w projekcie SABAT planuje się wykorzystanie detektora scyntylacyjnego do detekcji powstałych kwantów γ zamiast detektora półprzewodnikowego [?]. Te ostatnie pozwalają na rozróżnienie linii o bardzo zbliżonych energiach ale wymagają ciągłego chłodzenia oraz są wrażliwe na uszkodzenia radiacyjne wywoływane przez neutrony.

3. Rejestracja promieniowania gamma

3.1 Oddziaływanie kwantów gamma z materia

Promieniowanie gamma to promieniowanie elektromagnetyczne towarzyszące niektórym reakcjom jądrowym. Kwant γ może oddziaływać głównie poprzez trzy zjawiska: absorpcję, rozpraszanie koherentne oraz rozpraszanie niekoherentne. W zależności od energii kwanty gamma mogą oddziaływać z nukleonami, jądrami lub elektronami atomów. Dla fotonów w zakresie energii dostępnych źródeł izotopowych istotne znaczenie mają: efekt fotoelektryczny, efekt Comptona oraz efekt tworzenia par elektron-pozyton.

Efekt fotoelektryczny - polega na oddziaływaniu kwantu promieniowania gamma z elektronami związanymi w wewnętrznych powłokach atomu. Energia wzbudzonego kwantu gamma jest w całości zaabsorbowana przez elektron. Część tej energii zostaje zamieniona na pracę wyjścia W_0 równą energii wiązania elektronu w atomie. Druga część energii zostaje zamieniona na energię kinetyczną fotoelektronu E_k , która maksymalnie może wynosić:

$$E_k = h\nu - W_0$$

Efekt fotoelektryczny dominuje dla niskich energii kwantów gamma oraz jąder charakteryzujących się dużą liczbą atomową.

Efekt Comptona - polega na nieelastycznym rozproszeniu kwantu gamma na elektronie słabo związanym. Podczas zderzenia fotony przekazują część swojej energii elektronom, zatem po rozproszeniu energia fotonu E_2 jest mniejsza niż energia pierwotna E_1 . Energię elektronu i rozproszonego kwantu γ można wyliczyć z zasady zachowania energii i pędu:

$$\begin{aligned} E_1 + m_e c^2 &= E_2 + E_e \\ p_1 &= p_2 + p_e \end{aligned}$$

To zjawisko jest dobrym potwierdzeniem, iż foton jest cząstką, która może przekazać pęd i energię przy zderzeniu [?, ?].

Efekt tworzenia par - polega na tworzeniu pary elektron-pozyton w polu elektrycznym jądra lub elektronu. Efekt ten dominuje dla wysokoenergetycznych kwantów gamma oraz jąder o dużej liczbie protonów. Gdy energia kwantu γ przekracza sumę mas spoczynkowych obu cząstek, możliwa jest konwersja fotonu na parę elektron-pozyton. Procesem odwrotnym do tworzenia par jest anihilacja.

3.2 Detektory promieniowania gamma

Przy detekcji promieniowania gamma wykorzystywane są zmiany zachodzące w materii spowodowane przelotem cząstek. Istnieje wiele urządzeń, które umożliwiają taką detekcję. Detektory można podzielić na aktywne i pasywne, z czego pierwsze natychmiast wysyłają sygnał o przejściu cząstki, natomiast drugi rodzaj wykorzystuje fakt, iż zmianę spowodowaną przelotem cząstki można wykryć po pewnym czasie (dodatkowa obróbka). Do detektorów pasywnych zalicza się np. detektory dielektryczne, aktywacyjne czy chemiczne. Natomiast do detektorów aktywnych należą między innymi: detektory gazowe (w tym licznik Geigera-Müllera, komora jonizacyjna czy licznik proporcjonalny), detektory półprzewodnikowe, detektory kalorymetryczne czy licznik scyntylacyjny [?]. W związku z tym, że budowany wykrywacz materiałów niebezpiecznych będzie wykorzystywał detektor scyntylacyjny w dalszej części pracy zostanie opisany szerzej ten typ detektorów.

3.3 Detektor scyntylacyjny

Licznik scyntylacyjny składa się z materiału wykazującego właściwości scyntylacyjne połączonego z fotopowielaczem. W wyniku przejścia promieniowania jonizującego przez scyntylator jego atomy zostają wzbudzone lub zjonizowane. Część energii zamieniana jest na ciepło, natomiast pozostała część przechodzi od atomów wzbudzonych do ośrodków aktywnych kryształu i następuje emisja fotonów (scyntyłacja). Liczba wyemitowanych fotonów zależy od parametrów charakteryzujących scyntylator, (np. wydajności transferu energii cząstki na energię świetlną) oraz wielkości deponowanej energii. Natomiast stosunek liczby fotonów docierających do fotopowielacza do całkowitej liczby wyświeconych fotonów zależy od przezroczystości scyntylatora oraz jego kształtu.

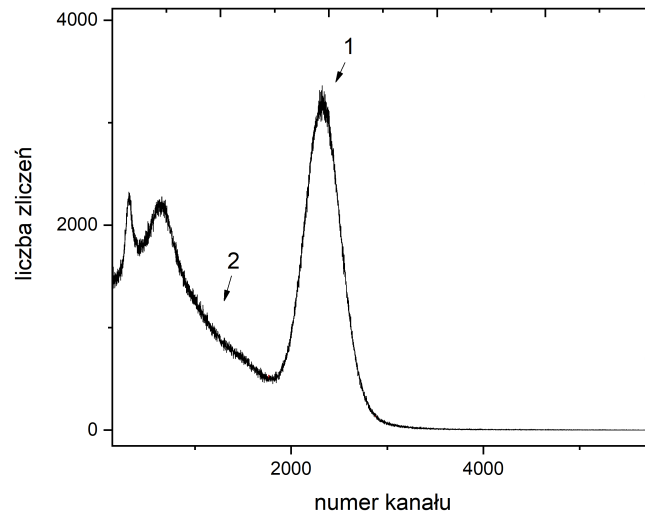
Scyntylatory można podzielić na kryształy organiczne i nieorganiczne, w których wyróżniamy scyntylatory krystaliczne, ciekłe oraz gazowe. Kryształy organiczne, do których należą m.in. antracen czy naftalen. Najczęściej mają one krótki czas wyświecania (rzędu 10^{-8} s), zdefiniowany jako czas upływający od momentu reakcji cząstki do momentu gdy natężenie wyświecanego światła spada e-krotnie [?]. Dla scyntylatorów nieorganicznych czasy wyświecania są dłuższe i wynoszą ok. 10^{-6} [?] s. Do takich kryształów należy np. jodek sodu lub jodek cezu aktywowane talem. Najkrótsze czasy wyświecania posiadają organiczne scyntylatory ciekłe. Wahają się one w granicach kilku nanosekund [?].

Do rejestracji kwantów gamma najczęściej są stosowane nieorganiczne monokryształy. Promieniowanie przekazuje elektronom w kryształach całość lub część swojej energii w wyniku zjawiska fotoelektrycznego, efektu Comptona lub tworzenia par. W wyniku tych procesów powstają elektrony wtórne, które wywołują luminescencję. Światło generowane w scyntylatorze jest przekształcane w sygnał elektryczny, który ulega dalszemu przetwarzaniu. Do tego celu używany jest fotopowielacz. Jest to urządzenie zamieniające strumień fotonów na impuls elektryczny. Składa się z szeregu dynod, fotokatody oraz anody. W wyniku padania fotonu na fotokatodę, zostaje wybity elektron, który jest przyspieszany w kierunku dynody i wybija z niej kolejne elektrony. Z każdą następną dynodą zwiększa się liczba wybitych elektronów, które dają wzmocniony impuls elektryczny. Wzmocnienie fotopowielacza zależy od kilku czynników, takich jak: liczba dynod, wielkość przyłożonego napięcia, rodzaj materiału, z którego są wykonane dynody oraz od zdolności ogniskującej dynod. Fotokatoda jest ważnym elementem, który wpływa na jakość fotopowielacza. Powinna ona mieć następujące cechy:

- dużą czułość,
- odporność na zmęczenie,
- małą emisję termiczną w temperaturze pracy.

Aby zapewnić wykrycie jak największej ilości światła scyntylacyjnego wykorzystuje się żel optyczny do połączenia kryształu i fotopowielacza. W ten sposób szczelina powietrza pomiędzy nimi zostaje zastąpiona substancją o takim współczynniku załamania światła, który zapewnia mniejsze odbicie wiązki świetlnej na granicy ośrodków. Sygnał z fotopowielacza jest następnie wmacniany przez przedwzmacniacz oraz analizowany, np. przez analizator wielokanałowy, który pozwala na pomiar widma deponowanej przez kwanty gamma energii. Przykładowe widmo elektronów wtórnych zarejestrowane detektorem z kryształem NaJ:Tl przedstawione zostało na Rys. ??.

Najwyższe maksimum, tzw. maksimum pełnego pochłaniania (pik 1) jest wynikiem zjawiska fotoelektrycznego. Odpowiada ono pełnemu pochłanianiu energii kwantów gamma w scyntylatorze. Szerokość połówkowa tego piku daje informację o rozdzielczości energetycznej detektora dla danej energii. Maksimum numer 2 odpowiada maksymalnej energii deponowanej w efekcie Comptona i nazywane jest krawędzią komptonowską.



Rysunek 2: Widmo energetyczne wtórnych elektronów powstałych w wyniku oddziaływania monoenergetycznych kwantów γ ze źródła cezu z materiałem scyntylatora NaJ:Tl.

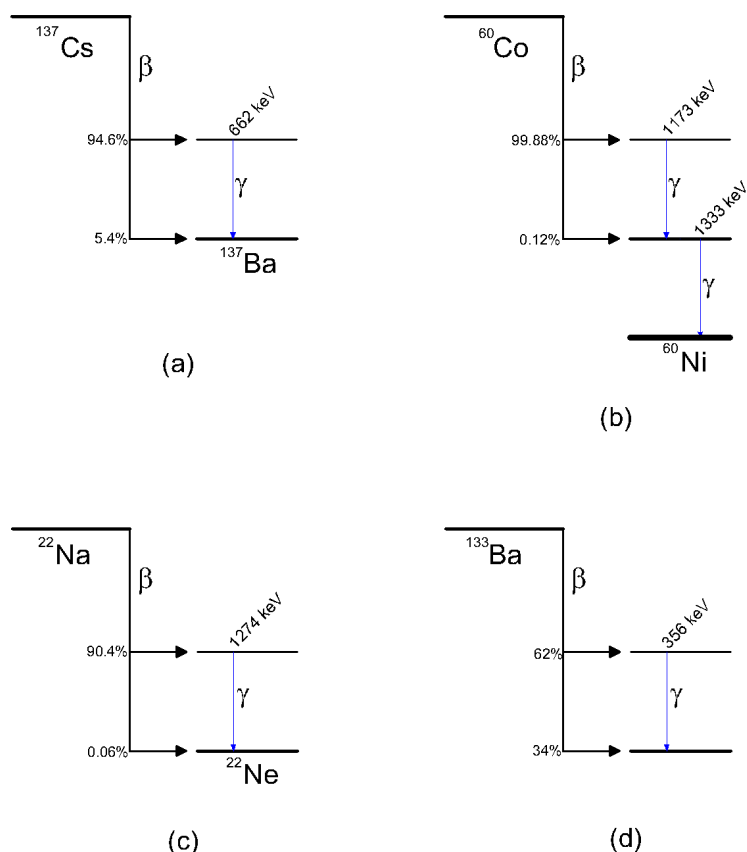
3.4 Energetyczna zdolność rozdzielcza

Energetyczna zdolność rozdzielcza materiału scyntylacyjnego R określa w jakim stopniu można rozróżnić kwanty γ o zbliżonych energiach. Jest ona zdefiniowana jako stosunek pełnej szerokości w połowie maksimum (FWHM), nazywanej bezwzględną energetyczną zdolnością rozdzielczą, do energii danej linii, i jest wyrażona w procentach:

$$R = \frac{FWHM}{E_0} \cdot 100\%$$

Do określenia zdolności rozdzielczej można wykorzystać piki pełnego pochłaniania, np. w efekcie fotoelektrycznym. Przy dostatecznie dużej statystyce piki te można opisać krzywą Gaussa, którego odchylenie standardowe jest związane z szerokością połówkową następującą relacją:

$$FWHM = 2,35 \cdot \sigma$$



Rysunek 3: Schematy rozpadów izotopów promieniotwórczych wykorzystanych w badaniach: a) Cez (^{137}Cs), b) Kobalt (^{60}Co), c) Sód (^{22}Na), oraz d) Bar ^{133}Ba .

4. Opis przeprowadzonych pomiarów

4.1 Źródła promieniowania

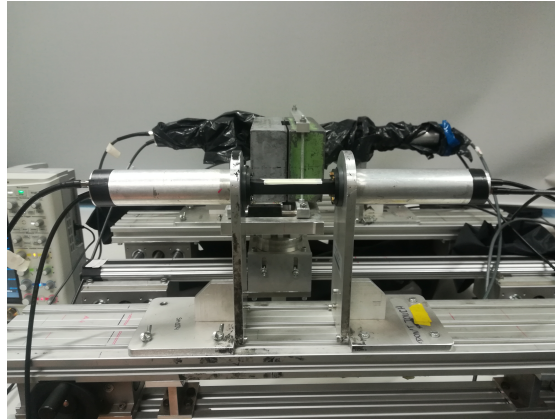
Jako źródła fotonów do badania zależności energetycznej zdolności rozdzielczej w funkcji energii zostały użyte następujące pierwiastki: ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{133}Ba oraz ^{60}Co , których schematy rozpadu przedstawiono na Rys. ?? Źródło ^{137}Cs emituje promieniowanie gamma o energii 662 keV (Rys. 2a), ^{60}Co posiada dwie linie i emituje fotony o energiach 1173 keV oraz 1333 keV (Rys. 2b). Kolejnym wykorzystanym źródłem był ^{22}Na emitujący kwanty gamma o energii 511 keV oraz 1274 keV. Jądro pierwiastka może ulec dwóm rozpadom, z różnym prawdopodobieństwem (Rys. 2c). Natomiast ^{133}Ba emituje kwanty gamma o energii 356 keV (Rys. 2d).

4.2 Pomiar energetycznej zdolności rozdzielczej

Do wyznaczenia energetycznej zdolności rozdzielczej kryształów scyntylacyjnych konieczne było wykonanie widm energii kwantów gamma emitowanych przez wymienione wcześniej źródła a następnie dopasowanie do maksimum pełnego pochłaniania funkcji Gaussa. Z dopasowania można było odczytać amplitudę piku A , położenie maksimum na osi odciętych x_c oraz szerokość piku w , równą podwojonej wartości odchylenia standardowego σ . Dzięki otrzymanym wielkościom można było wyliczyć pełną szerokość w połowie maksimum FWHM (Full Width at Half Maximum), a następnie energetyczną zdolność

rozdzielczą.

Kryształ scyntylacyjny połączono z fotopowielaczem podłączonym do zasilania za pomocą żelu optycznego. Po zmontowaniu aparatury podano odpowiednie napięcia na fotopowielacze. Cały układ owinięto nieprzepuszczającą folią, aby uniknąć szumów pochodzących od światła zewnętrznego. Sygnały na wyjściu fotopowielacza podawane były na wzmacniacz a następnie przy pomocy analizatora wielokanałowego Tukan8k rejestrowano energie deponowane przez kwanty gamma. Dla każdego scyntylatora wykonano serię pomiarów przy takich samych ustawieniach wzmacniacza oraz napięciu fotopowielacza, zmieniając jedynie źródło promieniowania.



Rysunek 4: Układ detekcyjny wykorzystywany do badania m.in. kryształu BGO.

Tabela 1: Wartości literaturowe wybranych parametrów kryształów scyntylacyjnych [?, ?].

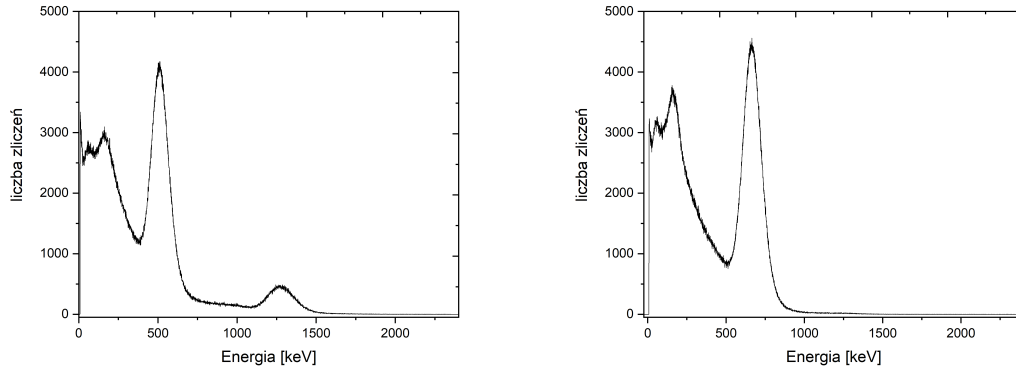
Scyntylator	Wydajność świetlna [fotony/keV]	Czas wyświecania [ns]	Długość fali [nm]	Gęstość [g/cm ³]
NaI:Tl	38	250	415	3,67
BaF ₂	1,8	0,7	210	4,88
BGO	9	300	480	7,13
LSO	32	40	420	7,4
LaBr ₃ :Ce:Sr	73	16	385	5,08

5. Wyniki pomiarów i ich dyskusja

Zbadano energetyczną zdolność rozdzielczą wybranych materiałów scyntylacyjnych wykorzystywanych do pomiaru energii kwantów γ : jodku sodu aktywowanego talem (NaI:Tl), fluorku baru (BaF₂), germanku bizmutu (BGO), krzemianu lutetu domieszkowanego cerem (LSO:Ce) oraz bromku lantanu domieszkowanego cerem i strontem (LaBr₃:Ce:Sr). W Tab. ?? zebrano wybrane własności badanych kryształów. Jak widać największą wydajność świetlną posiada kryształ LaBr₃:Ce:Sr, natomiast najszybszym z badanych scyntylatorów jest BaF₂. Kryształy te mają zbliżone gęstości (jest ona jednym z czynników wpływających na wydajność detektora), ale znacznie mniejsze niż gęstość BGO czy LSO.

5.1 Energetyczna zdolność rozdzielcza kryształu BGO

Pierwszym z badanych kryształów był kryształ BGO, o wzorze chemicznym $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$. Jest to typowy, często wykorzystywany scyntylator, o gęstości $7,13 \text{ g/cm}^3$ oraz wysokiej średniej liczbie atomowej (ze względu na zawartość bizmutu). Wydajność scyntylacji w tym kryształce wynosi $20\% \text{ NaI:Tl}$ [?]. Wymiary badanego kryształu wynosiły: $100 \times 14 \times 14 \text{ mm}^3$.



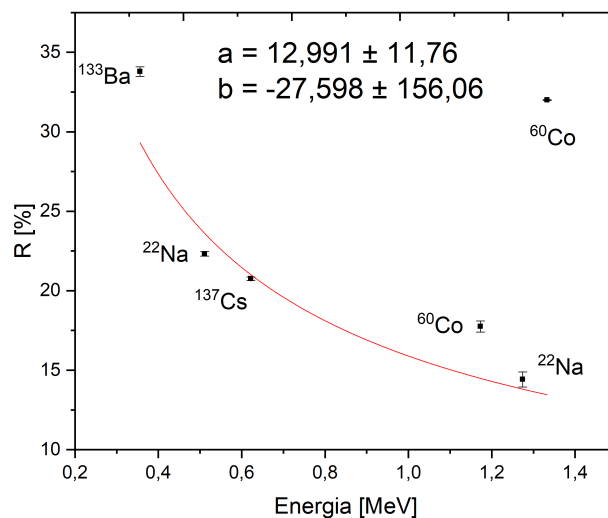
Rysunek 5: Widma energetyczne kwantów gamma ze źródeł promieniotwórczych sodu (prawy wykres) i cezu (lewy wykres), powstałych w wyniku oddziaływania kwantów gamma z materiałem scyntylatora BGO.

Tabela 2: Wyniki analizy energetycznej zdolności rozdzielczej w funkcji energii w kryształce BGO.

Pierwiastek	Energia kwantu γ	FWHM	R
^{22}Na	511	$114,078 \pm 0,73$	$0,2232 \pm 0,0015$
^{22}Na	1274	$183,746 \pm 6,07$	$0,1442 \pm 0,0048$
^{60}Co	1173	$208,254 \pm 4,12$	$0,1775 \pm 0,0036$
^{60}Co	1333	$426,608 \pm 31,30$	$0,3200 \pm 0,024$
^{137}Cs	662	$129,102 \pm 0,75$	$0,2076 \pm 0,0012$
^{133}Ba	356	$120,283 \pm 1,071$	$0,33879 \pm 0,0030$

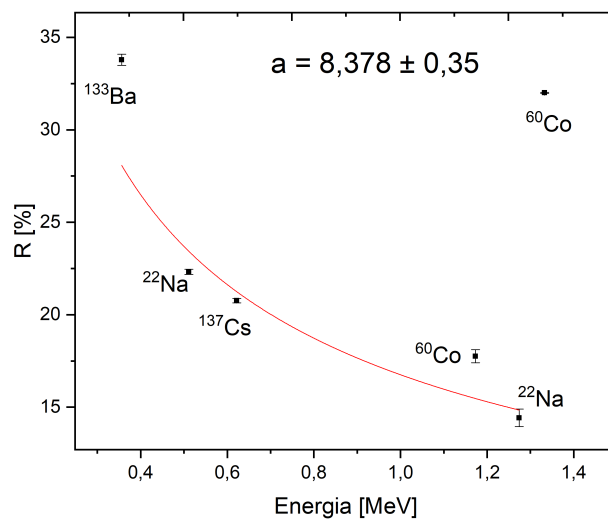
Zmierzona energetyczna zdolność rozdzielcza BGO dla linii cezu ^{137}Cs wyniosła $20.8 \pm 0.1 \%$. Na podstawie danych literaturowych scyntylator BGO posiada rozdzielczość energetyczną rzędu $20.1 \pm 0.1 \%$ bez użycia żelu optycznego oraz $18.3 \pm 0.1 \%$ z jego użyciem [17]. Różnice pomiędzy wartościami literaturowymi a otrzymanymi podczas doświadczenia są najprawdopodobniej związane z różnymi warunkami pomiaru, tj. używanie różnych fotopowielaczy, które nie były dedykowane do tego typu scyntylatorów. Na rysunku 6 sparametryzowano zależność $R[\%]$ od $E[\text{MeV}]$. Dopasowana funkcja przyjmuje wzór

$$R = \frac{a}{\sqrt{E[\text{MeV}]}} \oplus b$$



Rysunek 6: Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej od energii kwantu gamma w kryształach BGO.

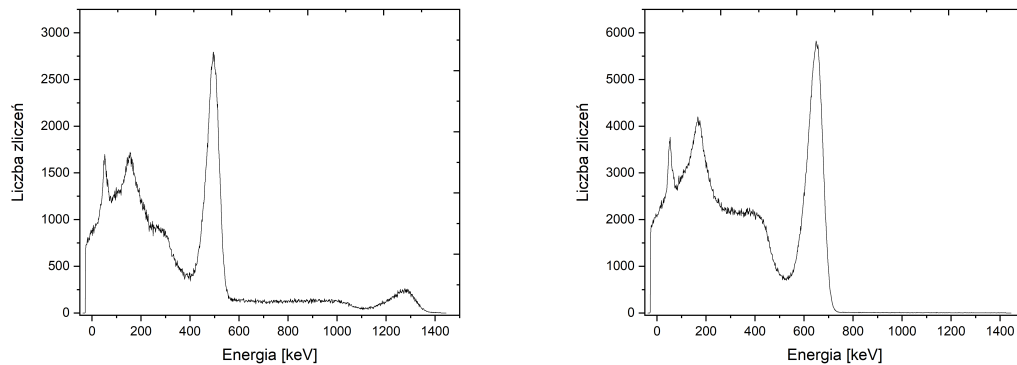
Analizując otrzymane wielkości (Rys. 6), można zauważyć, iż niepewność parametru b jest znacząco większa od jego wartości. Z tego powodu wykonano kolejne dopasowanie, tym razem za wartość parametru b przyjmując 0 (Rys. 7).



Rysunek 7: Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej od energii kwantu gamma w kryształach BGO.

5.2 Analiza wyników dla scyntylatora NaI:Tl

Kryształ jodku sodu (NaI) z domieszką talu (Tl) jest najczęściej używanym materiałem do detekcji promieniowania gamma. Cechuje go stosunkowo dobra wydajność oraz higroskopijność. Gęstość tego scyntylatora wynosi $3,7 \text{ g/cm}^3$ [?, ?]. Wymiary badanego kryształu wynosiły 40 mm (średnica) x 40 mm.

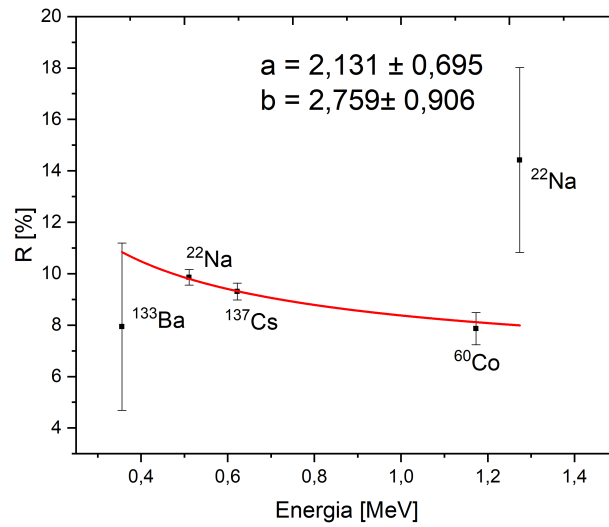


Rysunek 8: Widma energetyczne wtórnych elektronów powstałych w wyniku oddziaływania kwantów gamma źródeł sodu (lewy wykres) oraz cezu (prawy wykres) z materiałem scyntylatora NaI:Tl.

Tabela 3: Wyniki analizy rozdzielczości energetycznej kryształu NaI:Tl.

Pierwiastek	Energia kwantu γ	FWHM	R
^{22}Na	511	$50,366 \pm 1,55$	$0,099 \pm 0,0031$
^{22}Na	1274	$183,719 \pm 45,78$	$0,144 \pm 0,036$
^{60}Co	1173	$92,214 \pm 7,35$	$0,0789 \pm 0,0063$
^{60}Co	1333	$325,742 \pm 366,66$	$0,244 \pm 0,28$
^{137}Cs	662	$57,881 \pm 2,043$	$0,093 \pm 0,0033$
^{133}Ba	356	$28,263 \pm 11,60$	$0,079 \pm 0,033$

Zmierzona energetyczna zdolność rozdzielcza NaI:Tl dla linii cezu ^{137}Cs wyniosła $9,3 \pm 0,3 \%$. Na podstawie danych literaturowych detektor scyntylacyjny z jodkiem sodu wykazuje rozdzielczość energetyczną rzędu 7% [16]. Odstępstwa w wynikach mogą być skutkiem używania różnych fotopowielaczy oraz doboru różnego wzmocnienia. Analogicznie do wcześniejszego przypadku, do otrzymanych wyników wykonano parametryzację, która jest przedstawiona na Rys. 9.

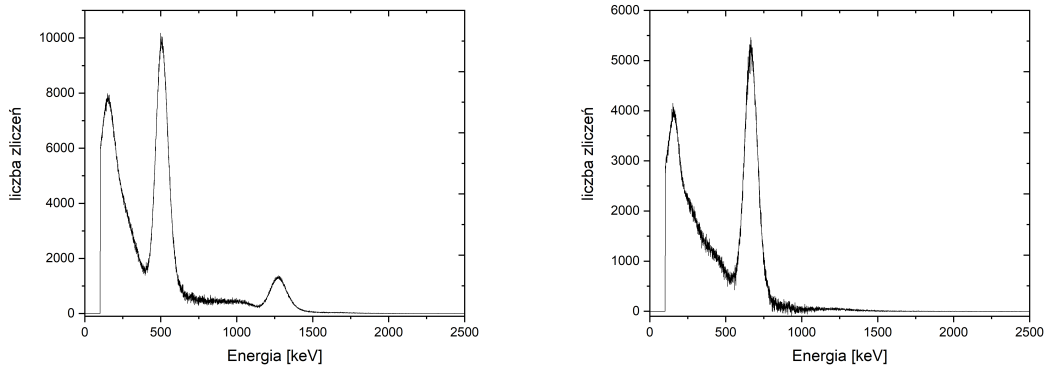


Rysunek 9: Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej od energii kwantu gamma w kryształach NaI:Tl

Na powyższym wykresie można zauważyć, że niepewności energetycznej zdolności rozdzielczej Baru ^{133}Ba oraz Sodiu ^{22}Na (linii 1274 keV) są zdecydowanie większe niż dla pozostałych pierwiastków. Funkcja została dopasowana bez uwzględnienia linii 1274 Sodiu, ponieważ wynik ten znacznie zaburzał jakość dopasowania. Analizując widmo pochodzące od Sodiu, można zauważyć, iż pik przy energii 1274 keV jest znacznie rozmyty, co wpływa na jakość pomiaru oraz dużą niepewność. Może być to spowodowane niestabilnym działaniem wzmacniacza, którego używano przy wykonywaniu pomiaru.

5.3 Kalkulacja rozdzielczości energetycznej scyntylatora LSO

Jest to kryształ scyntylacyjny LuSiO_5 , charakteryzujący się dobrymi właściwościami, tj. wysoką wydajnością światła, czy krótkim czasem zaniku [?, ?]. Gęstość tego kryształu wynosi $7,1 \text{ g/cm}^3$, natomiast wydajność scyntylacji to 75% wydajności NaI:Tl [?]. Wymiary kryształu użytego do badań wynosiły: $100 \times 14 \times 14 \text{ mm}^3$.



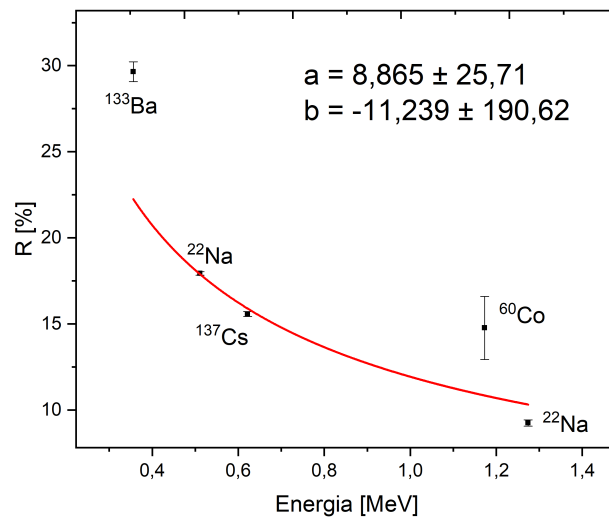
Rysunek 10: Widma energetyczne wtórnych elektronów źródeł promieniotwórczych sodu i cezu, powstałych w wyniku oddziaływania kwantów gamma z materiałem scyntylatora LSO.

Tabela 4: Wyniki analizy energetycznej zdolności rozdzielczej kryształu LSO.

Pierwiastek	Energia kwantu γ	FWHM	Zdolność rozdzielcza
^{22}Na	511	$91,649 \pm 0,52$	$0,179 \pm 0,0011$
^{22}Na	1274	$117,909 \pm 2,33$	$0,093 \pm 0,0019$
^{60}Co	1173	$173,284 \pm 21,53$	$0,148 \pm 0,018$
^{60}Co	1333	$402,397 \pm 1511,031$	$0,302 \pm 1,14$
^{137}Cs	662	$96,900 \pm 0,89$	$0,156 \pm 0,0015$
^{133}Ba	356	$105,540 \pm 2,029$	$0,296 \pm 0,0057$

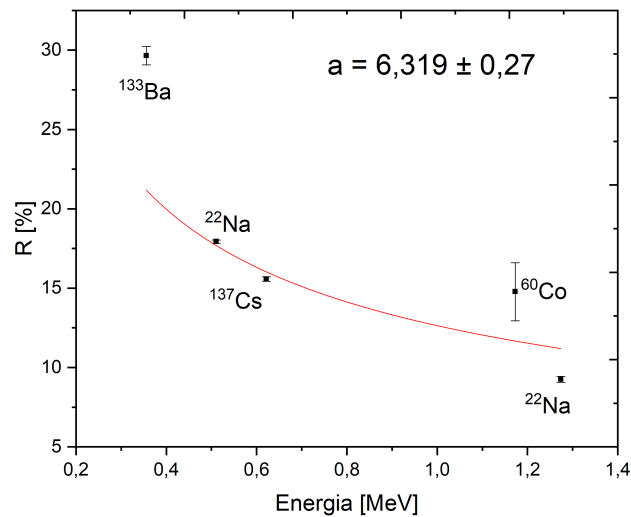
Wyniki analizy pokazują, że energetyczna zdolność rozdzielcza LSO dla linii 662 keV Cezu wynosi $15,6 \pm 0,15 \%$, podczas gdy dane literaturowe wskazują na wartość ok. 10%. Rozbieżność w wartościach może być związana z różnymi rozmiarami badanych kryształów czy z użyciem innego fotopowielacza.

Do otrzymanych danych, tak jak we wcześniejszym przypadku, sporządzono wykres zależności $R[\%]$ od energii [MeV], a następnie sparametryzowano analogiczną zależnością jak dla wcześniej badanych kryształów.



Rysunek 11: Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej od energii kwantu gamma w kryształach LSO.

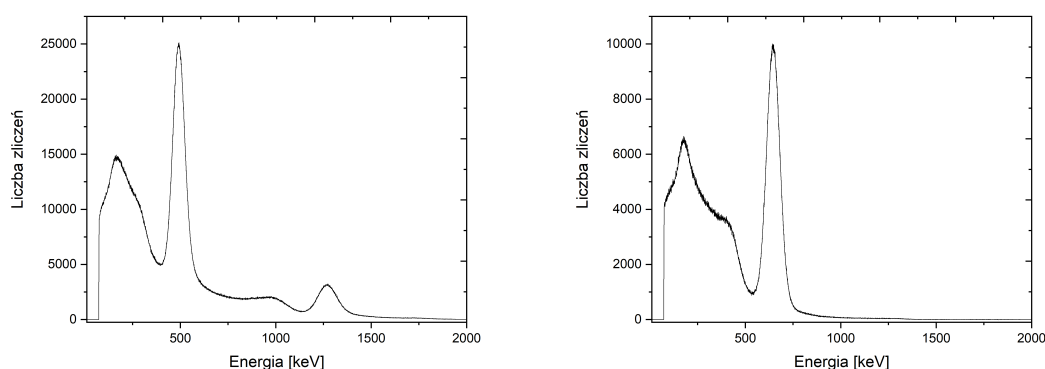
Tak jak w przypadku kryształu BGO, niepewność parametru b znacząco przekracza jego otrzymaną wartość, dlatego powtórnie wykonano parametryzację, tym razem za wartość b przyjmując 0.



Rysunek 12: Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej od energii kwantu gamma w kryształach LSO.

5.4 Wyniki pomiarów dla kryształu BaF₂

Fluorek baru to stosunkowo szybki scyntylator o gęstości 4,89 g/cm³ [?, ?]. Jego Wydajność scyntylacji wynosi tylko ok 4% wydajności jodku sodu. Badany kryształ miał kształt walca, a jego wymiary wynosiły: 37 mm (średnica) x 25 mm.



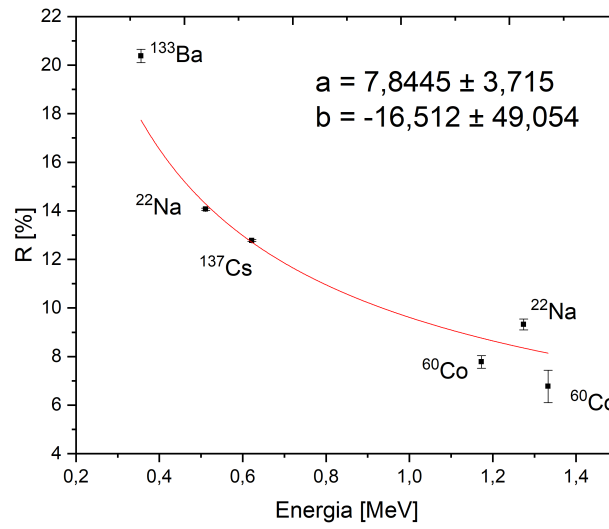
Rysunek 13: Widma energii kwantów γ emitowanych ze źródeł sodu i cezu zarejestrowane detektorem z kryształem BaF₂.

Tabela 5: Wyniki analizy rozdzielczości energetycznej kryształu BaF₂.

Pierwiastek	Energia kwantu γ	FWHM	Zdolność rozdzielcza
²² Na	511	71,875 ± 0,25	0,141 ± 0,00049
²² Na	1274	118,766 ± 2,85	0,093 ± 0,0022
⁶⁰ Co	1173	91,254 ± 3,047	0,078 ± 0,0026
⁶⁰ Co	1333	90,252 ± 8,91	0,068 ± 0,0066
¹³⁷ Cs	662	79,478 ± 0,22	0,128 ± 0,00035
¹³³ Ba	356	72,546 ± 0,99	0,204 ± 0,0028

Wartość energetycznej zdolności rozdzielczej dla scyntylatora BaF₂ dla linii 662 keV Cezu wyniosła 12,8 %.

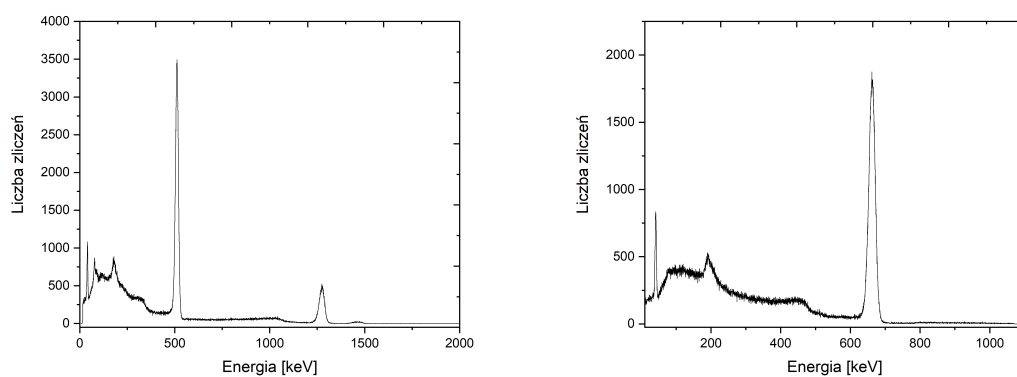
Kolejnym krokiem w analizie wyników było wykonanie parametryzacji zależności R[%] od E[MeV].



Rysunek 14: Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej od energii kwantu gamma dla badanego kryształu BaF_2 .

5.5 Energetyczna zdolność rozdzielcza scyntylatora LaBr₃:Ce:Sr

Jako materiał scyntylacyjny kryształ ten charakteryzuje się wysoką wydajnością. Jego gęstość jest mniejsza niż w wyżej wymienionych scyntylatorach i wynosi 5,08 g/cm³ [?, ?], a wydajność scyntylacji to aż 165% wydajności NaI(Tl). Według *Saint-Gobain Crystals* Bromek Lantanu jako scyntylator zapewnia doskonałą rozdzielczość energetyczną [?]. Jego wadą jest posiadanie izotopu ¹³⁸Ce, który emituje kwanty gamma o energii 788,74keV oraz wysoka higroskopijność [?]. Zbadano kryształ o wymiarach 50 mm (średnica) x 50 mm.

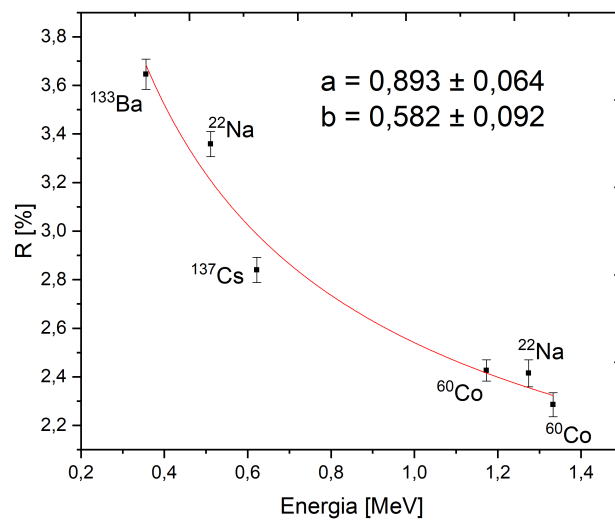


Rysunek 15: Widma energetyczne kwantów gamma emitowanych przez źródła sodu i cezu zarejestrowane za pomocą detektora scyntylacyjnego z kryształem LaBr₃:Ce:Sr.

Tabela 6: Wyniki analizy energetycznej zdolności rozdzielczej kryształu LaBr₃:Ce:Sr.

Pierwiastek	Energia kwantu γ	FWHM	Zdolność rozdzielcza
²² Na	511	17,163 ± 0,2670222	0,0336 ± 0,00053
²² Na	1274	30,763 ± 0,709	0,0241 ± 0,00056
⁶⁰ Co	1173	28,462 ± 0,512	0,0243 ± 0,00044
⁶⁰ Co	1333	30,468 ± 0,659	0,0229 ± 0,00050
¹³⁷ Cs	662	17,665898 ± 0,324087	0,0284 ± 0,00053
¹³³ Ba	356	12,979 ± 0,222	0,0365 ± 0,00063

Z przedstawionych danych wynika, że scyntylator LaBr₃:Ce:Sr ma najlepszą energetyczną zdolność rozdzielczą. Wartość ta dla linii 662 Cezu wyniosła 2,84 ± 0,053%. Według danych literaturowych rozdzielczość energetyczna wynosi 2,2%, co daje niewielki błąd pomiaru oraz jednocześnie czyni kryształ najlepszym z badanych scyntylatorów. Tak jak we wcześniejszych przypadkach dokonano parametryzacji zależności R[%] od E[MeV].



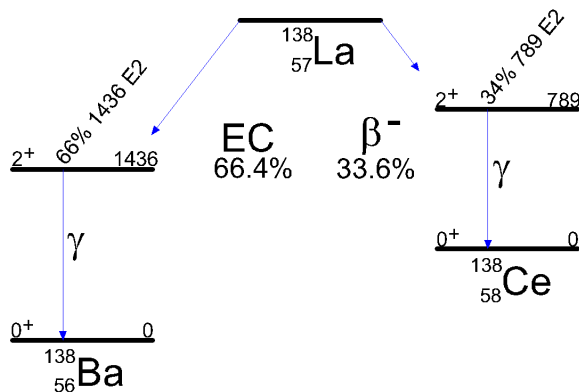
Rysunek 16: Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej od energii kwantu gamma dla badanego kryształu $\text{LaBr}_3\text{:Ce:Sr}$.

Można zauważyć, że jest to najdokładniejsze dopasowanie wśród wszystkich przedstawionych, co może oznaczać, że warunki przeprowadzania doświadczenia były w tym wypadku najlepiej dobrane.

5.6 Wewnętrzna promieniotwórczość kryształów zawierających cer

Kryształy domieszkowane cerem, m. in. LSO oraz $\text{LaBr}_3:\text{Ce}:\text{Sr}$, wykazują wewnętrzną radioaktywność ze względu na rozpad β pierwiastków chemicznych: Lantanu i powstałego w ten sposób promieniotwórczego Ceru ^{138}Ce .

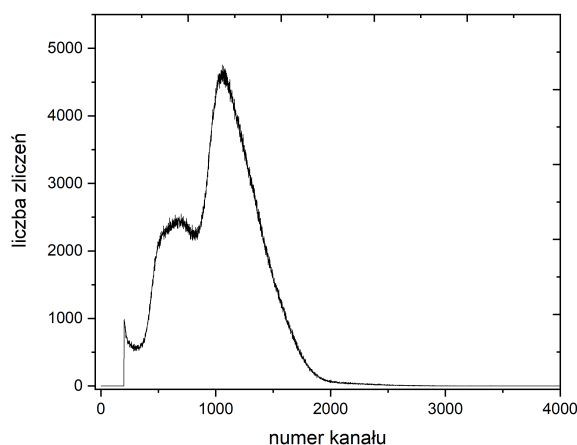
Lantan ^{138}La rozpada się na ^{138}Ba oraz ^{138}Ce , co zostało przedstawione na poniższym rysunku.



Rysunek 17: Schemat rozpadu ^{138}La obecnego w scyntylatorze $\text{LaBr}_3:\text{Ce}:\text{Sr}$.

Z tego powodu w obu kryształach dochodzi również do rozpadu ceru, który jest głównym przyczynkiem powstawania tła w pomiarach, dlatego do poprawnego określenia własności kryształów zmierzono widmo wewnętrznej promieniotwórczości tych scyntylatorów.

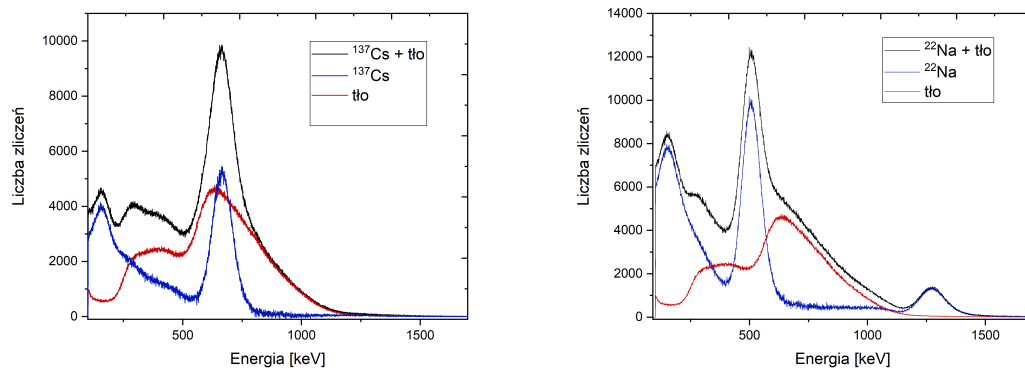
Dalszą analizę tła przeprowadzono na podstawie pomiaru wewnętrznej promieniotwórczości scyntylatora LSO.



Rysunek 18: Widmo energii cząstek pochodzących z rozpadów izotopu ceru wewnątrz kryształu LSO.

W celu zobrazowania wpływu wewnętrznej promieniotwórczości kryształu LSO na otrzymywane rozdzielczości, wykonano wykres zawierający widmo pochodzące tylko od jego

wewnętrznej radioaktywności, widmo pochodzące od samego źródła oraz ich sumę. Wyniki uzyskane dla źródła cezu oraz sodu przedstawione zostały na Rysunku 19.



Rysunek 19: Widma kwantów gamma emitowanych przez źródła ^{137}Cs (lewy panel) oraz ^{22}Na (prawy panel).

Widma czerwone odpowiadają przyczynom od rozpadów izotopu ceru kryształu LSO, widma niebieskie pochodzą bezpośrednio od wykorzystanych źródeł, natomiast czarne stanowią ich sumę.

Na powyższych wykresach można zauważyć, iż największą liczbą zliczeń charakteryzuje się część składająca się z sumy widm pochodzących od źródła promieniotwórczego oraz od wewnętrznej promieniotwórczości samego kryształu (tło). Rezultatem odjęcia tła od pozyskanego wyniku, było otrzymanie widma składającego się jedynie z promieniotwórczości użytego źródła.

6. Podsumowanie

Na świecie istnieje wiele metod wykrywania substancji niebezpiecznych, opierających się na różnych zjawiskach. Jednak postępująca nauka i technologia skłania do stwarzania nowych urządzeń, eliminujących wady i ograniczenia znanych już rozwiązań. Niektóre bezinwazyjne metody wykrywania substancji niebezpiecznych bazują na oddziaływaniu neutronów z materią. Należą do nich między innymi SWAN czy PELAN, które wyszukują materiały znajdujące się na lądzie. W środowisku wodnym istnieją przeszkody, związane z oddziaływaniem neutronów z wodorem i tlenem, które uniemożliwiają wykorzystanie wymienionych metod. Na Uniwersytecie Jagiellońskim, w ramach projektu SABAT, powstaje urządzenie, które proponuje rozwiązanie wymienionych problemów. Znaczącym elementem projektowanego urządzenia będzie licznik scyntylacyjny, umożliwiający detekcję kwantów gamma wyemitowanych przez badaną substancję. Taki detektor składa się z materiału scyntylacyjnego połączonego z fotopowielaczem, który przetwarza otrzymany impuls na sygnał elektryczny. Celem pracy było zbadanie energetycznej zdolności rozdzielczej wybranych materiałów scyntylacyjnych, które mogą mieć potencjalne zastosowanie w takim detektorze. Badane były kryształy: jodku sodu aktywowanego talem (NaI:Tl), fluorku baru (BaF_2), germanku bizmutu (BGO), krzemianu lutetu domieszkowanego cerem (LSO:Ce) oraz bromku lantanu domieszkowanego cerem i strontem ($\text{LaBr}_3\text{:Ce:Sr}$). Najlepszym materiałem scyntylacyjnym, zgodnie z przewidywaniami, okazał się domieszkowany bromek lantanu, którego energetyczna zdolność rozdzielcza wyszła $2,84 \pm 0,053\%$ dla linii 662 keV cezu. Wartość ta jest bardzo zbliżona do wartości literaturowej. Błędy i odstępstwa w wynikach dla innych materiałów mogły wynikać z używania różnych fotopowielaczy, nie zawsze zoptymalizowanych do pomiaru energii oraz z niestabilności wykorzystanej elektroniki. Jednakże badania miały na celu wyłonienie najlepszego wśród dostępnych kryształów scyntylacyjnych. Bromek lantanu domieszkowany cerem oraz strontem byłby idealnym materiałem do wykorzystania w urządzeniu SABAT. Optymalne zastosowanie mógłby mieć również BaF_2 , który pomimo gorszej energetycznej zdolności rozdzielczej, charakteryzuje się dobrą czasową zdolnością rozdzielczą.

Literatura

- [1] T. Kasperek, *Czas Morza* **1**, 15 (2001)
- [2] M. Silarski, D. Hunik, M. Smolis, S. Tadeja and P. Moskal, *Acta Phys. Polon. B* **47**, 497 (2016)
- [3] <http://laborant.pl/index.php/spektrometria-ruchliwosci-jonow-w-polaczeniu-z-chromatografia-cieczowa-i-spektrometria-mas>, Czerwiec 2018
- [4] M. Silarski, P. Moskal, *FOTON* **112**, 15 (2011)
- [5] Ł. Kaźmierczak, et al., *Acta Phys. Polon. A* **127**, 1540 (2015)
- [6] G. Vourvopoulos, R.A. Sullivan, D.T. Holslin, Proc. SPIE 6217, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI, 62171 (2006)
- [7] <http://www.sodern.com/>
- [8] C. Eleon, et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **629**, 220 (2011)
- [9] E. M. Rogers *Fizyka dla dociekliwych Część V*, Wydawnictwo PWN, 1960

- [10] N. Chankow, Neutron Radiography, wydawnictw oraz rok wydania
- [11] Z. Wróbel, A. Budziak, H. Hrynkiewicz, L. Jarczyk *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki jądrowej w pracowni studenckiej Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 1979
- [12] K. Fiałkowski, FOTON **120**, 4 (2013)
- [13] [http : //www.carbon14.pl/studia/pdf/geochemia_zotpow07.pdf](http://www.carbon14.pl/studia/pdf/geochemia_zotpow07.pdf), Czerwiec 2018
- [14] Scintillation Products Technical Note, Saint-Global Crystals, Revision: Styczeń, 2009
- [15] Jostein Saterstol *Characterization of Scintillation Crystals for Positron Emission Tomography*, Master Thesis, University of Bergen Faculty of Mathematics and Natural Sciences Department of Physics and Technology, 2010
- [16] <http://skaczmarek.zut.edu.pl/DO2006nr12.PDF?kfkfkfnohdbiekn>, Maj 2018
- [17] <http://pl.meta-laser.com/scintillation-detector/ce-lyso-scintillation-detector.html>, Maj 2018
- [18] <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/lanthanum-material-data-sheet.pdf>, Maj 2018
- [19] G. Gilmore, *Practical gamma-ray spectrometry*, John Wiley,