

Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Sabina Rachwalska

Nr albumu: 1122981

**Aktywacja neutronowa – projekt ćwiczenia na
II Pracownię Fizyczną**

Praca licencjacka
na kierunku biofizyka

Praca wykonana pod kierunkiem
Dr Michała Silarskiego
Zakład Doświadczalnej Fizyki Cząstek
i jej Zastosowań

Kraków 2018

*Pragnę serdecznie podziękować dr Michałowi Silarskiemu za cenne wskazówki, poświęcony czas
oraz pomoc w trakcie powstawania pracy.
Dziękuję również prof. dr hab. Janowi Stankowi za pomoc w przygotowaniu projektu ćwiczenia.*

Spis Treści

| | |
|---|----|
| 1. Wstęp..... | 4 |
| 1.1. Neutrony..... | 5 |
| 1.2. Źródła promieniowania neutronowego..... | 6 |
| 1.3. Źródło neutronów Am – Be..... | 6 |
| 1.4. Oddziaływanie neutronów z materią..... | 7 |
| 2. Aktywacja neutronowa..... | 10 |
| 3. Wpływ promieniowania neutronowego na organizmy żywe..... | 13 |
| 3.1. Terapia neutronowa – BNCT..... | 14 |
| 4. Określenie warunków bezpiecznego przeprowadzenia projektowanego ćwiczenia..... | 16 |
| 4.1. Dawki..... | 16 |
| 4.2. Osłony osłabiające promieniowanie jonizujące..... | 17 |
| 4.3. Obliczenia grubości osłon..... | 19 |
| 5. Projekt ćwiczenia..... | 21 |
| 6. Podsumowanie..... | 27 |
| Literatura..... | 28 |

1. Wstęp

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie ćwiczenia opartego na aktywacji neutronowej na II Pracownię Fizyczną Uniwersytetu Jagiellońskiego na Wydziale Fizyki Astronomii i Informatyki Stosowanej. Aktywacja neutronowa polega na naświetleniu izotopów w badanej próbce strumieniem neutronów. Powstałe w wyniku wychwytu neutronów promieniotwórcze izotopy emitują kwanty promieniowania γ o charakterystycznej dla siebie energii, co umożliwia ich identyfikację, a co za tym idzie także rekonstrukcję pierwotnego składu izotopowego próbki.

Rozdział 1 zawiera informacje na temat neutronów, oddziaływania neutronów z materią, o źródłach promieniowania neutronowego oraz używanym w projektowanym ćwiczeniu źródle Am-Be. Dokładny opis teoretyczny aktywacji neutronowej znajduje się w rozdziale 2. W rozdziale 3 - znajdują się informacje na temat działania promieniowania na organizmy żywe, natomiast rozdział 4 określa zasady bezpieczeństwa, jakie powinny być przestrzegane podczas pracy z promieniowaniem jonizującym wraz z obliczeniami dotyczącymi grubości, jaką powinna mieć parafinowa osłona źródła Am - Be.

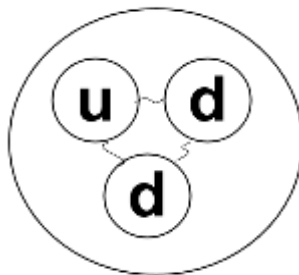
Projektowane ćwiczenie opisane jest w rozdziale 7. Zawiera ono 3 warianty: oznaczanie srebra, oznaczanie rtęci w produktach spożywczych oraz obserwowanie rozrodczości drożdży pod wpływem promieniowania neutronowego.

1.1 Neutrony

Neutrony należą do rodziny hadronów. Składają się z trzech kwarków, które są związane oddziaływaniem silnym: dwóch dolnych i jednego górnego (udd). Schemat budowy neutronu przedstawiony jest na *Rys. 1*. Neutrony są składnikiem jąder atomowych. Te związane w jądrach są stabilne, natomiast neutrony swobodne ulegają rozpadowi poprzez oddziaływanie słabe:



Jak widać z powyższego równania neutron rozpada się na: proton (p), elektron (e-) oraz antyneutrino elektronowe (ν_e).



Rysunek 1. Schemat przedstawiający budowę neutronu.

Masa neutronów jest porównywalna do protonów i wynosi: 1,00866491578 u [1]. Ponadto, neutrony posiadają spin połówkowy (1/2) oraz, co za tym idzie, moment magnetyczny. Ze względu na energię wyróżniamy neutrony prężkie, termiczne oraz epitermiczne.

Neutrony prężkie to neutrony, których długość fali jest porównywalna z promieniem jądra. Nie może jednak go przekraczać. Uzyskuje się je np. przy rozczepieniu jąder. Zakres energii dla neutronów prężkich wynosi: 0,5 - 50 MeV [2]. Neutrony termiczne natomiast mają energię kinetyczną, którą możemy porównać z energią ruchu cieplnego w temperaturze pokojowej lub

bardzo jej bliskiej. Energia neutronów termicznych wynosi około 0.025 keV [2]. Neutrony epitermalne są to neutrony o zakresie energii 0,025 – kilkaset eV [3].

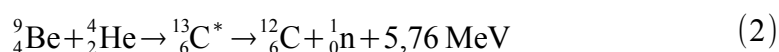
Neutrony powstają na skutek interakcji cząstek α z jądrem lekkich pierwiastków. W wyniku jej pochłonięcia powstaje jądro, które ma dwa dodatkowe neutrony, które następnie przechodzi do niższego stanu energetycznego. W warunkach naturalnych z promieniowaniem neutronowym nie spotykamy się często. Jest ono składnikiem promieniowania kosmicznego oraz powstaje podczas samorzutnego rozpadu ciężkich jąder, np. uranu.

1.2. Źródła promieniowania neutronowego

Źródła promieniowania neutronowego można podzielić na dwie grupy – naturalne i sztuczne. Do naturalnych źródeł należą:

Promieniowanie kosmiczne – dociera do Ziemi z kosmosu w ilości zależnej od miejsca oraz kierunku obserwacji. Składa się przede wszystkim z protonów, które stanowią aż około 90% cząstek tego promieniowania, jąder helu oraz innych cząstek. Neutrony są produkowane gdy cząstki naładowane pokonują pole magnetyczne Ziemi i ulegają oddziaływaniom pierwotnym w górnych warstwach atmosfery. Promieniowanie kosmiczne nie pochodzi jedynie z galaktyki, ale także emituje je Słońce [4].

1. Samorzutne reakcje rozpadu niektórych nuklidów, np. kalifornium ^{252}Cf .
2. Przemiany jądrowe indukowane izotopami emitującymi promieniowanie α lub γ , np. w reakcjach: Po – Be (α , n), Rn – Be (α , n), Pu – Be (α , n), Am – Be (α , n), Th – ^2H (γ , n), Ra – Be (γ , n) [5]. Beryl jest bardzo dobrym emiterym neutronów ponieważ ma małą energię wiązania na nukleon i najslabiej związany z jądrem neutron. Jeśli dostarczona energia jest większa od tzw. energii separacji, możliwe jest rozerwanie wiązania neutronu z jądrem np. w reakcji:



Reakcja (γ , n) zachodzi tylko wtedy, gdy kwant promieniowania γ posiada na tyle dużą energię, że podczas reakcji z jądrem następuje rozerwanie wiązania neutronów. Jest typowa dla deuteru i berylu, ponieważ ich energia separacji jest niska. Źródłami promieniowania γ są naturalne pierwiastki promieniotwórcze, np. : tor (Th) czy Rad (Ra), oraz promieniowanie emitowane podczas hamowania elektronów o wysokiej energii lub poprzez reakcje jądrowe z izotopami sztucznie promieniotwórczymi [6].

Istnieją także sztuczne źródła promieniowania neutronowego. Zaliczają się do nich między innymi:

1. Reaktory produkujące neutrony w rozszczepieniu ciężkich jąder takich jak uran ^{233}U , ^{235}U i ^{238}U , pluton ^{239}Pu i tor ^{233}Th . Rozszczepienie tych jąder przebiega według równania [7]:



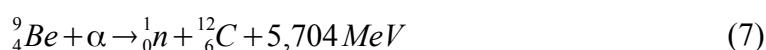
2. Akceleratory – zaliczają się do nich synchrotrony, cyklotrony, betatrony, akceleratory

liniowe. Stosowane są przede wszystkim do przyspieszania cząstek naładowanych, które uderzają w tarczę np. z cyrkonu. Promieniowanie neutronowe możliwe jest także do uzyskania z wykorzystaniem wiązek protonów w reakcjach typu (p, n). Kolejnymi reakcjami, w których można uzyskać neutrony są reakcje typu (d,n) wykorzystywane w generatorach neutronów. Uzyskuje się nimi neutrony prędkie. Jest to np. reakcja deuteru z trytem lub deuteru z deuterem [7]:

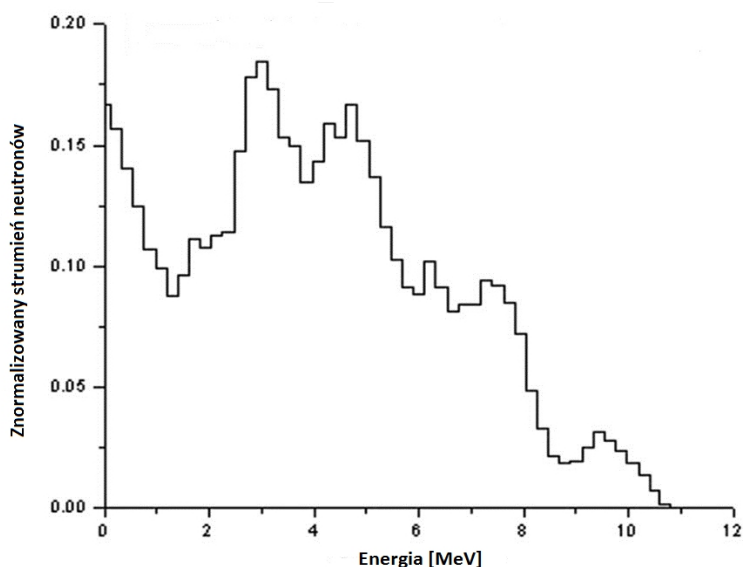


1. 3. Źródło Am – Be

W ćwiczeniu zostanie wykorzystane źródło Am–Be, które jest źródłem neutronów prędkich. Do jego budowy używane są izotopy ameryku ${}^{241}\text{Am}$ oraz berylu ${}^9\text{Be}$. Mechanizm reakcji przedstawiają równania (6) oraz (7). Poprzez rozpad ${}^{241}\text{Am}$ powstaje jądro wtórne ${}^{237}\text{Np}$ i zostaje wyemitowana cząstka α , która następnie reaguje z borem, co powoduje powstanie jądra węgla ${}^{12}\text{C}$ oraz emisję neutronu:



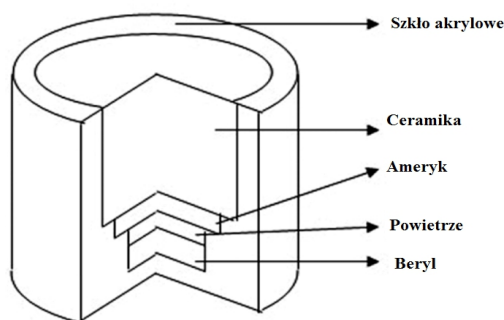
Widmo neutronów pochodzących z tego źródła jest ciągle i nie przekracza ona 11 MeV (Rys. 2).



Rysunek 2. Widmo energii neutronów emitowanych przez źródło Am – Be. Wykres zaadaptowany z [8].

Budowa źródła Am-Be została przedstawiona schematycznie na Rys. 3. Pomiędzy pierwiastkiem bombardowanym cząstkami α (w tym przypadku berylem) a ich źródłem (amerykiem) istnieje luka o grubości ok. 1 mm. Luka wypełniona jest zwykle powietrzem co prowadzi, do tego, że cząstka α , przechodząc przez nią traci energię. Dzięki takiej budowie źródło można kontrolować, a nawet

wyłączyć, wprowadzając do luki odpowiedni materiał pochłaniający cząstki α [9].

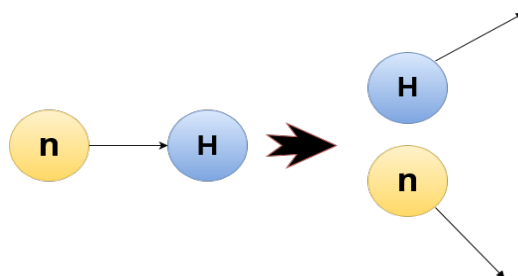


Rysunek 3. Schematyczna budowa źródła Am-Be [9].

1.4. Oddziaływanie neutronów z materią

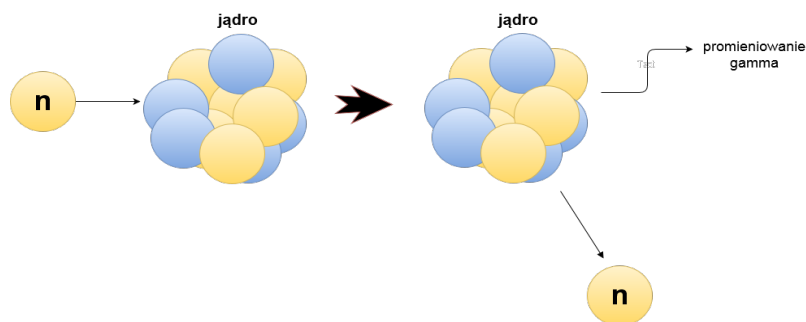
Neutrony w związku z tym, że są elektrycznie obojętne, nie ulegają oddziaływaniom Coulombowskim. Do oddziaływań neutronów z materią zaliczamy: elastyczne i nieelastyczne rozpraszanie, wychwyty radiacyjny oraz reakcje jądrowe, takie jak emisja cząstek wtórnych lub rozszczepienie jąder.

Elastyczne rozpraszanie neutronu polega na zderzeniu neutronu z jądrem atomowym, w wyniku czego traci energię kinetyczną i przekazuje ją jądro, z którym się zderza. Warto zauważyć, że neutron przy zderzeniu z ciężkim jądrem traci dużo mniej energii niż w zderzeniu z lekkim. Takie oddziaływanie neutronów jest zazwyczaj wykorzystywane do spowalniania prędkich neutronów. Przykładem elastycznego rozpraszania jest zderzenie neutronu z wodorem (^1H) przedstawionego schematycznie na Rys. 4.



Rysunek 4. Zderzenie neutronu z jądrem wodoru jako przykład elastycznego rozpraszania neutronów [6].

Podczas nieelastycznego rozpraszania neutron traci energię, ale gdy zderzy się z jądrem wnika do niego i powoduje wzbudzenie. Pochłonięcie neutronu skutkuje emisją promieniowania gamma oraz neutronu o niższej energii niż na początku. Na Rys. 5 przedstawiono schemat tego zjawiska [10 – 11].

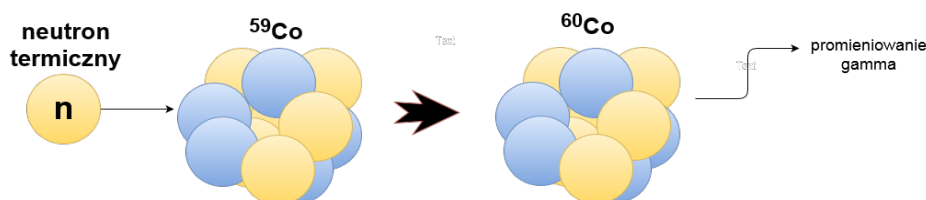


Rysunek 5. Zderzenie neutronu z jądrem atomowym – przykład rozpraszania nieelastycznego [6].

Wchwyty radiacyjne zazwyczaj ulegają neutrony termiczne. Tak jak w przypadku rozpraszania nieelastycznego neutron wnika do jądra i powstaje jądro wzbudzone. Staje się ono radioaktywne i emituje kwant promieniowania gamma. Gdy neutron wnika do jądra, zwiększa jego masę. Zjawisko zachodzi według równania :

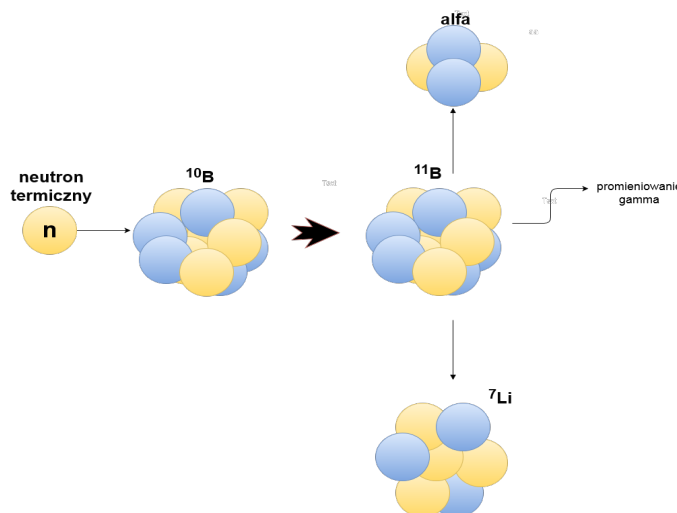


Na Rys. 6 przedstawiono wychwyt neutronu na przykładzie jądra ${}^{59}\text{Co}$. Wyróżniamy wychwyt r i s. Wychwyt s zachodzi np. w reaktorach jądrowych przy małym strumieniu neutronów. Następuje wychwyt jednego z nich i wzbudzenie jądra. Krótco po tym następuje emisja promieniowania gamma i powrót do stanu podstawowego. Proces r różni się od procesu s tym, że jądro wychwytuje wiele neutronów. Aby ten proces miał miejsce strumień neutronów musi być gęsty. Powstałe jądro jest bardzo niestabilne i ulega przemianom β^- czego skutkiem jest stabilne jądro o dużej liczbie atomowej.



Rysunek 6. Wniknięcie neutronu do jądra kobaltu – przykład wychwytu neutronu [6].

Neutrony mogą również uczestniczyć w innych reakcjach jądrowych. Mogą one prowadzić do emisji cząstek naładowanych, takich jak cząstki alfa oraz protony lub nawet rozbić jądra na mniejsze fragmenty. Ten rodzaj oddziaływań zazwyczaj zachodzi dla neutronów prędkich, ale rozbić jądra może nastąpić również poprzez wychwyt neutronu termicznego. Na Rys. 7 przedstawiono przykładową emisję cząstek naładowanych przez jądro boru na skutek wychwytu neutronu.



Rysunek 7. Rozpad jądra boru na skutek wychwytu neutronu [5].

To, jakie oddziaływanie dominuje zależy przede wszystkim od energii neutronu. Dla neutronów o wyższych energiach bardziej prawdopodobne są reakcje rozpraszania, natomiast dla tych o niższych energiach częstsze są wychwyty radiacyjne. W związku z tym neutrony klasyfikuje się ze względu

na posiadana energie kinetyczną. W Tabeli 1 przedstawiono taką klasyfikację z uwzględnieniem najbardziej prawdopodobnych procesów dla danej grupy neutronów.

Tabela 1. Klasyfikacja neutronów ze względu na posiadaną energię kinetyczną wraz z procesami prawdopodobnymi dla danej grupy neutronów [2, 12].

| Rodzaj neutronów | Energia kinetyczna | Proces |
|-------------------------|---------------------------|---|
| Powolne zimne | 0.001 eV | (n, γ) |
| Powolne termiczne | 0.025 eV | (n, γ) |
| Rezonansowe | 1 eV – 1 keV | (n, γ), rozpraszanie |
| Energii pośrednich | 1 keV – 0,5 MeV | (n, γ), (n, p), (n, α), rozpraszanie |
| Prędkie | 0.5 MeV – 50 MeV | rozpraszanie, (n, p), (n, α) |
| Wysokich energii | Powyżej 50 MeV | rozpraszanie |

Aby wyrazić prawdopodobieństwo zajścia danego procesu lub reakcji wprowadza się pojęcie przekroju czynnego. Definiuje on prawdopodobieństwo zajścia jakiegoś procesu i stosuje się go powszechnie do opisu zderzeń cząstek. Przekrój czynny zwykle zależy od energii początkowej zderzających się obiektów.

2. Aktywacja neutronowa

Aktywacją neutronową (NAA) nazywamy pochłonięcie neutronu przez jądro, co zwykle prowadzi do jego wzbudzenia. Jest ona stosowana jako jedna z metod analitycznych, ponieważ jądro wzbudzone ulega rozpadowi emitując między innymi kwanty promieniowania γ . Metodyka aktywacyjna metody analitycznej opiera się na tym, że każdy aktywowany izotop emituje kwanty γ o charakterystycznej dla siebie energii. Stąd pomiar ilości emitowanych kwantów γ o określonej energii pozwala na wyznaczenie zawartości danego izotopu w badanej próbce. Aktywacja neutronowa jest bardzo czułą i selektywną metodą analityczną, ponieważ korzysta z detekcji o wysokiej rozdzielczości co sprawia, że można zidentyfikować nawet pierwiastki śladowe i ultraśladowe. Inną zaletą jest także brak konieczności ingerencji w próbkę, więc nie ulega ona zniszczeniu, co pozwala na analizę cennych materiałów i przedmiotów. Aktywacja neutronowa jest także szybka i pozwala podczas jednego pomiaru na identyfikację wielu pierwiastków, które są w próbce. Rozkwit tej metody analitycznej wypada w latach 40-tych, 50 – tych i 70 – tych, kiedy to dokonano dużego postępu w dziedzinie detekcji oraz wytwarzania neutronów. Aktywację przeprowadza się poprzez naświetlenie badanego przedmiotu strumieniem neutronów termicznych, które są pochłaniane (wychwyt neutronu) [13]. Powstaje jądro wzbudzone:



Drugi etap polega na emisji kwantu promieniowania γ ze wzbudzonego jądra:



po czym następuje rozpad β^+ jądra ${}^{A+1}_ZX$, w wyniku którego powstaje jądro wtórne, często wzbudzone:



Wzbudzone jądro wtórne również się rozpada i emituje kwant promieniowania γ_2 . To właśnie promieniowanie gamma na tym etapie jest najczęściej wykorzystywane do identyfikacji pierwiastków.



Należy zauważyć, że przekrój czynny na wychwyt neutronów termicznych jest o czynnik $10^2 - 10^3$ razy większy od wychwytu innych cząstek naładowanych lub neutronów o wyższej energii. To z kolei sprawia, że aktywacja neutronowa jest wysokowydajna. Źródła neutronów także stają się coraz bardziej dostępne, a przygotowanie próbek do analizy za pomocą aktywacji jest stosunkowo łatwe, ponieważ nie wymaga skomplikowanych modyfikacji chemicznych. Otrzymane wyniki są jednoznaczne i nie wymagają dalszej głębokiej analizy. Aktywacja neutronowa posiadają także wady. Jedną z nich jest to, że czułość metody jest bardzo uzależniona od oznaczanego pierwiastka. Jest tak dlatego, że każdy izotop pierwiastka ma inny przekrój czynny na wychwyt neutronu. Problem pojawia się również wtedy, gdy po „bombardowaniu” neutronami termicznymi próbki, powstałe jądra nie ulegają rozpadowi – są stabilne. Niemożliwe jest wtedy zarejestrowanie charakterystycznego promieniowania γ . Do wykonywania pomiarów potrzebna jest specjalistyczna aparatura, a także wiedza o metodyce i analizie otrzymanych wyników. Wszystko to sprawia, że analizowanie próbek metodą aktywacji neutronowej jest stosunkowo drogie. Najczęściej wykorzystywanym źródłem neutronów jest reaktor, ponieważ neutrony otrzymane z tego źródła

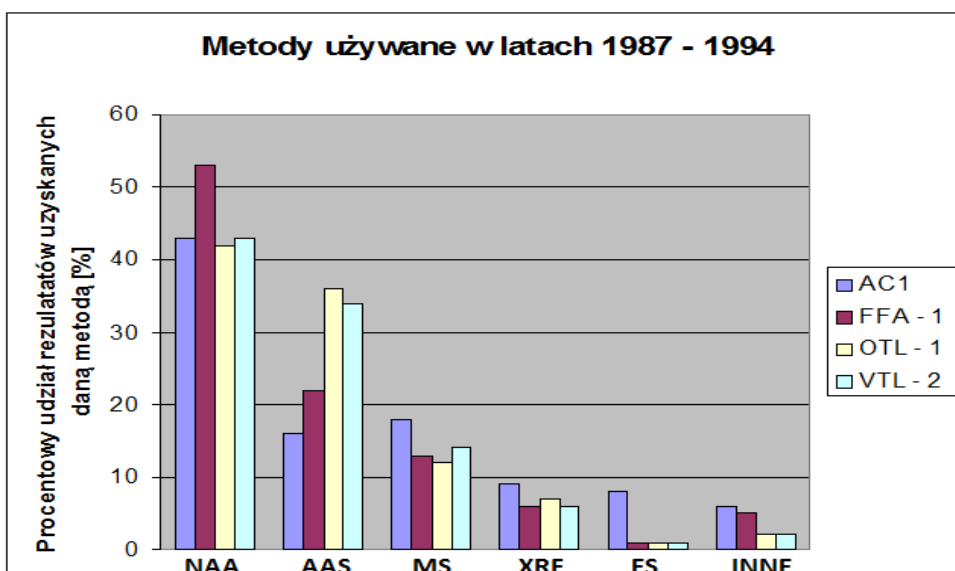
mają duże natężenie. Powstają one podczas rozpadu jąder uranu [13]. Ograniczające jest również to, że metoda może być stosowana tylko do oznaczania izotopów, które mają duży przekrój czynny na wychwytywanie neutronu. Pozostałe izotopy nie ulegną aktywacji w odpowiednio krótkim czasie ekspozycji. W Tabeli 2 przedstawiono przykładowe zastosowania aktywacji neutronowej.

Tabela 2. Przykładowe zastosowania aktywacji neutronowej [14].

| Nr | Dziedzina | Rozwiązywany problem |
|----|---|--|
| 1 | Technologia materiałów wysokiej czystości | Oznaczanie ppm i ppb ilości zanieczyszczeń w materiałach reaktorowych, półprzewodnikach, metalach wysokiej czystości, stopach etc. |
| 2 | Geologia | Oznaczanie składu skał, osadów i minerałów. Poszukiwania geochemiczne i biogeochemiczne. |
| 3 | Kosmochemia | Oznaczanie składu meteorytów, skał księżycowych etc. |
| 4 | Oceanografia | Badanie składu osadów oceanicznych. Oznaczanie metali śladowych w wodzie morskiej |
| 5 | Sądownictwo | Identyfikacja włosów ludzkich, narkotyków, okruchów farby, papieru, szkła etc. Wykrywanie śladów prochu, porównywanie pocisków z broni palnej etc. |
| 6 | Nauki biomedyczne | Oznaczanie pierwiastków ważnych dla życia lub toksycznych w ludzkich organach, tkankach, płynach ustrojowych, ślinie, mleku, włosach, paznokciach etc. Diagnoza schorzeń. |
| 7 | Rolnictwo i nauka o żywieniu | Oznaczanie mikroelementów w glebach, roztworach glebowych, produktach żywnościowych. Oznaczanie pozostałości pestycydów w roślinach |
| 8 | Nauka o środowisku człowieka | Ocena zanieczyszczenia wody i powietrza. Weryfikacja narażenia ludzi na metale ciężkie. Identyfikacja źródeł zanieczyszczeń. |
| 9 | Archeologia | Analiza porównawcza starożytnych monet, sreber, ceramiki, rzeźb, wyrobów z brązu etc., w celu ustalenia ich pochodzenia, stanu dawnych technik wytwórczych, dróg handlowych. |
| 10 | Historia Sztuki | Weryfikacja autentyczności starych obrazów i rzeźb |
| 11 | Zapewnienie jakości w analizie | Weryfikacja dokładności innych metod nieorganicznej analizy śladowej. Atestacja (certyfikacja) materiałów odniesienia. |

Inne metody analityczne stosowane praktycznie to np: absorpcyjna spektroskopia atomowa (AAS), fluorescencja rentgenowska (XRF), dyfrakcja rentgenowska (XRD), spektroskopia masowa (ICP - MS), spektroskopia emisyjna ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP – OES). To co różni aktywację neutronową (NAA) od innych metod to to że, praktycznie niemożliwe jest zanieczyszczenie próbki gdy została już ona aktywowana. To wyjaśnia zastosowanie w wielu przypadkach aktywacji neutronowej do badania wiarygodności innych metod analitycznych. Ważne jest także to, że inne metody nie są tak czułe i nie można nimi analizować zawartość pierwiastków śladowych.

Na Rys. 8 przedstawiono procentową częstość użycia aktywacji w porównaniu do wykorzystania innych metod analitycznych. Jak widać NAA była i jest naprawdę często stosowana mimo szybkiego rozwoju innych metod pomiarowych [15].



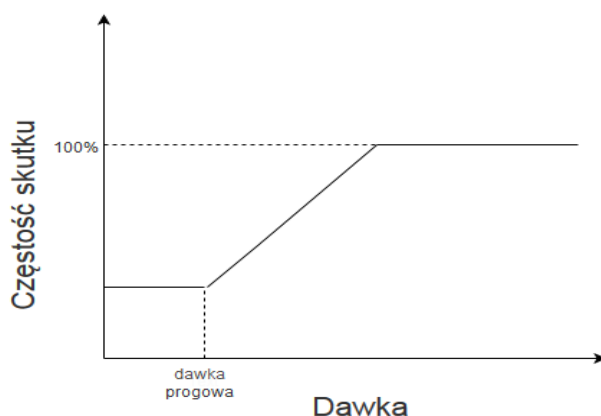
Rysunek 8. Procentowe porównanie w użyciu różnych metod analitycznych w latach 1975 – 1980 oraz latach 1987 – 1994. Rysunek zaadaptowany z [15]. Oznaczenia próbek: AC-1- koncentrat apatytowy, FFA – 1- popiół lotny, OTL – 1 – liście tytoniu (oriental), VLT – 2 – liście tytoniu (Virginia).

3. Wpływ promieniowania na organizmy żywe

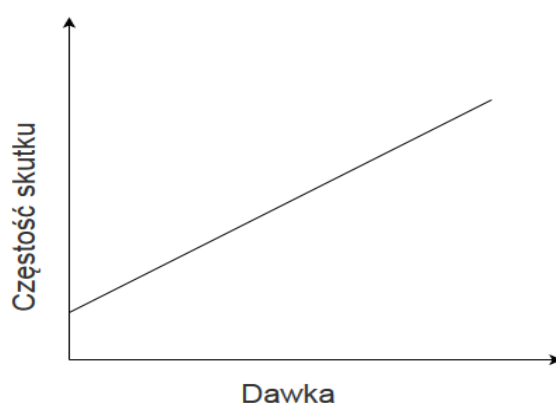
Promieniowanie neutronowe to rodzaj promieniowania jonizującego. Wpływa ono na organizmy żywe, ponieważ powoduje zmiany w budowie związków organicznych w komórce, na skutek zainicjowania pewnych reakcji chemicznych. To, jak promieniowanie wpłynie na organizm zależy od wielu czynników np.: wielkości dawki, rodzaju promieniowania, sposobu funkcjonowania komórki/narządu/organizmu, masy napromieniowanych tkanek, rodzaju napromieniowanych narządów [16].

Na poziomie komórkowym po napromieniowaniu dochodzi do np: zmian czynnościowych, morfologicznych, zmian trwałych lub śmierci w wyniku uszkodzeń błony komórkowej lub programowanej śmierci komórki [16].

Skutki, jakie wywołuje promieniowanie jonizujące – w tym promieniowanie neutronowe – można podzielić na deterministyczne oraz stochastyczne. Jeżeli pochłonięta dawka jest na tyle duża, że powoduje uszkodzenie lub zniszczenie komórek, to mowa jest o skutku deterministycznym, którą jest np. choroba popromienna. Jeśli chodzi o skutki stochastyczne to mają one związek z uszkodzeniem w wyniku napromieniowania materiału genetycznego. Skutki deterministyczne posiadają pewną wartość dawki progowej, po której przekroczeniu można zaobserwować trwałe zmiany w organizmie [16]. Na Rys. 9 – 10 przedstawiono poglądowe schematy wykresów zależności skutku od dawki dla skutków kolejno deterministycznych i stochastycznych.



Rysunek 9. Poglądowy schemat wykresu zależności częstotliwości skutku od dawki. Skutki deterministyczne objawiają się po przekroczeniu pewnej wartości progowej [17].



Rysunek 10. Poglądowy schemat wykresu zależności częstotliwości skutku od dawki. Skutki stochastyczne objawiają się zarówno dla małych jak i dużych dawek [17].

Pochłonięcie dużej dawki promieniowania powoduje skutki deterministyczne. Oznacza to, jak napisano wyżej, że na tyle duża liczba komórek została zniszczona, że uniemożliwia to prawidłowe funkcjonowanie narządu. Objawy mogą być natychmiastowe lub odroczone w czasie. Po krótkim czasie od pochłonięcia dużej dawki promieniowania pojawia się: zapalenie skóry, utrata włosów, spadek odporności i liczby limfocytów, zapalenie jelit, niedokrwistość, niepłodność oraz zmętnienie soczewki. Późniejsze skutki są poważniejsze np. skrócenie czasu życia, nowotwory złośliwe, białaczka, zaćma oraz bezpłodność [17].

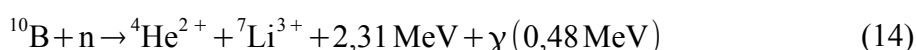
Jedną z form ochrony przed efektami pochłonięcia promieniowania przez organizm jest stosowanie się do zasady ALARA (*As Low As Reasonably Possible* – w wolnym tłumaczeniu: *Tak Mało Jak To Rozsądnie Możliwe*). Zasada ta jest wymogiem prawnym jeśli używane jest jakiekolwiek źródło promieniowania. Zabrania ekspozycji na promieniowanie jeśli nie jest to konieczne oraz zwiększa ochronę środowiska poprzez ograniczanie ilości radioaktywnych materiałów niego uwalnianych [18].

Trzy główne założenia zasady ALARA:

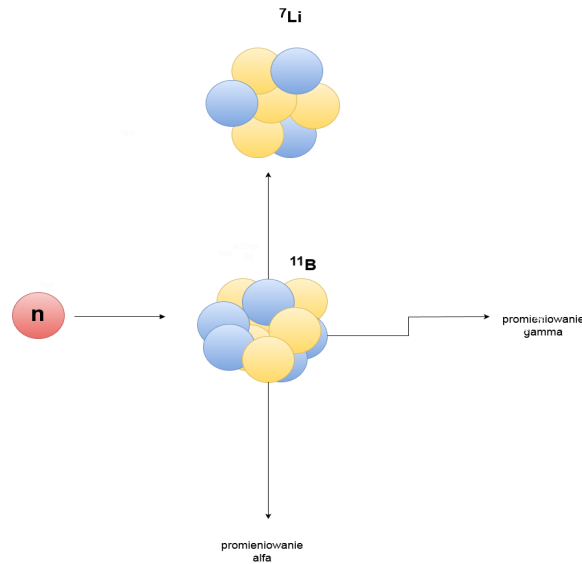
1. Krótki czas ekspozycji – nie przebywać w pobliżu źródła promieniowania przez dłuższy czas niż to konieczne. Im mniejszy czas napromieniowania, tym mniejsza pochłonięta dawka promieniowania.
2. Duża odległość od źródła – im większa odległość, tym mniejsza ekspozycja na promieniowanie. Na przykład, jeśli zwiększymy odległość dwukrotnie to ekspozycja na promieniowanie zmniejsza się czterokrotnie.
3. Zastosowanie osłon – pochłaniają one promieniowanie i zmniejszają dawkę pochłoniętą przez organizm [18 - 19]

3.1. Terapia neutronowa

Jednym z najważniejszych zastosowań neutronów termicznych jest terapia borowo-neutronowa. BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*) jest metodą stosowaną do leczenia nowotworów rozsianych. Polega ona na dostarczeniu izotopu boru do komórek nowotworowych. Następnie pacjenta poddaje się naświetlaniu strumieniem neutronów termicznych. Ponieważ przekrój czynny na wychwytywanie neutronu przez jądro ^{10}B jest bardzo duży, neutrony ulegają wychwytywowi o wiele częściej w obrębie nowotworu niż na innych tkankach. Gdy neutron zostaje wychwycony przez bor powstaje krótkotrwałe jądro ^{11}B , które ulega rozpadowi na jądro wtórne litu ^7Li oraz cząstkę α [20]. Ich średni zasięg w tkankach wynosi odpowiednio około $5\ \mu\text{m}$ oraz $9\ \mu\text{m}$ [20], co powoduje, że depozycja ich energii jest ograniczona do obszaru pojedynczej komórki. Reakcje (13 – 14) przedstawiają mechanizm terapii BNCT, który schematycznie przedstawiono również na Rys. 11:



Reakcja (14) zachodzi wtedy, gdy powstałe jądro litu jest wzbudzone i wracając do swojego poprzedniego stanu emituje kwant promieniowania γ (94% reakcji wychwytywania na borze ^{10}B).



Rysunek 11. Schemat reakcji wychwytu neutronu na jądrze boru ^{10}B będąca podstawowym mechanizmem terapii BNCT.

W terapii neutronowej stosuje się neutrony termiczne i epitermiczne, czyli o energii od 1 eV do 10000 eV. Neutrony termiczne stosuje się do terapii nowotworów, które nie są zlokalizowane głęboko, lecz na powierzchni, natomiast epitermiczne mogą dotrzeć do komórek nowotworowych, które są położone głębiej. Zostają spowolnione na tkankach do energii neutronów termicznych i ulegają wychwytywi na jądrach boru.

Terapia neutronowa jest dwumodalna. Podczas rozpadu emitowane jest promieniowanie o wysokiej wartości współczynnika liniowego przekazu energii – LET. Definiuje się go jako iloraz średniej energii, którą przekazuje cząstka podczas reakcji z elektronami w danym ośrodku i drogi jaką przebyła cząstka w tym ośrodku [21]:

$$LET = \frac{\Delta E}{\Delta L}, \quad (15)$$

gdzie: ΔE to średnia ilość energii przekazanej przez naładowaną cząstkę, a ΔL to średnia droga przebyta przez cząstkę w ośrodku.

Duża wartość LET dla cząstek powstających w BNCT oraz świetne zlokalizowanie depozycji energii powoduje, że terapia ta ma duży potencjał do leczenia rozsianych i trudno dostępnych operacyjnie nowotworów.

4. Określenie warunków bezpiecznego przeprowadzenia ćwiczenia

Określanie akceptowalnych ilości promieniowania pochłanianych przez ludzi oraz utrzymanie bezpieczeństwa podczas pracy ze źródłami promieniowania jonizującego zajmuje się dziedzina zwana dozymetrią. Określa dawkę promieniowania, która może zostać pochłonięta przez organizmy bez trwałych konsekwencji. Aby zapewnić bezpieczeństwo podczas pracy ze źródłem, w tym przypadku ze źródłem neutronów, należy stosować osłony zbudowane z odpowiednich materiałów oraz o odpowiedniej grubości i nie przekraczać ilości pochłoniętego promieniowania ustalonej przez dawkę graniczną.

4.1. Dawki

Dawka jest wartością charakteryzującą ilość pochłoniętego promieniowania jonizującego przez organizm żywy. Istnieją różne rodzaje dawek – jedna z nich jest np. dawka pochłonięta. Jej jednostką jest grej (Gy). Charakteryzuje ona energię promieniowania pochłoniętą przez ośrodek na jednostkę masy rozważanego ośrodka :

$$D = \frac{dE}{dm}, \quad (16)$$

gdzie:

D – dawka pochłonięta,

dE- średnia ilość energii zabsorbowanej przez ośrodek,

dm – masa ośrodka [22].

Dokładniejszą informację dostarcza dawka równoważna. Przy obliczaniu tego rodzaju dawki uwzględnia się energię i rodzaj promieniowania. Jest to dawka pochłonięta przez dany narząd lub tkankę. Jej jednostką jest siwert (Sv). Dawka równoważna przedstawiona jest wzorem:

$$H_T = w_R D, \quad (17)$$

gdzie:

H_T – dawka równoważna

D – średnia dawka pochłonięta w narządzie lub tkance,

w_R – współczynnik wagowy, charakterystyczny dla danego promieniowania [22].

Wyróżniamy również dawkę skuteczną, która jest sumą dawki równoważnej pochodzącej od czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Dawka skuteczna charakteryzuje narażenie na promieniowanie całego ciała lub określonego organu, dlatego podczas jej obliczania należy uwzględnić odpowiednie współczynniki wagowe. Jest ona więc sumą dawek równoważnych dla odpowiednich tkanek i narządów. Wyznaczamy ją ze wzoru:

$$E = \sum w_T H_T, \quad (18)$$

gdzie:

E – dawka skuteczna

H_T – równoważnik dawki pochłoniętej dla narządu lub tkanki,

w_T – współczynnik wagowy, charakterystyczny dla danego narządu lub tkanki [22 - 24].

Najbardziej wrażliwe na promieniowanie są gonady ($w_T = 0,25$) a najbardziej odporna: skóra

($w_T = 0,01$) [22].

Dzięki współczynnikowi wagowemu w_R można określić różnice w skutkach biologicznych dla różnych rodzajów promieniowania i dokładniej określić ryzyko związane z narażeniem na nie. Na przykład, efekt biologiczny dla neutronów epitermalnych jest 20 razy większy niż dla kwantów gamma (Tab. 3). Współczynniki wagowe dla promieniowania neutronowego zależą od energii.

W Tabeli 3 przedstawiono wartości współczynnika wagowego w_R dla określonych energii neutronów.

| Energia | Współczynnik |
|-----------------|--------------|
| < 10 keV | 5 |
| 10 – 100 keV | 10 |
| 100 keV – 2 MeV | 20 |
| 2 – 20 MeV | 10 |
| > 20 MeV | 5 |

Tabela 3. Wartości współczynnika wagowego w zależności od energii neutronów

Najważniejszą wielkością w kontroli i utrzymaniu bezpieczeństwa związanego z kontaktem ze źródłem promieniowania jonizującego jest dawka graniczna. Określa ona nieprzekraczalną ilość promieniowania, jaką może pochłonąć określona osoba z danej grupy zawodowej. Bierze ona pod uwagę narażenia wewnętrzne i zewnętrzne – dawkę skuteczną [15]. W Tabeli 4 przedstawiono dawki graniczne dla odpowiednich grup ludzi przy narażeniu całego ciała oraz niektórych organów.

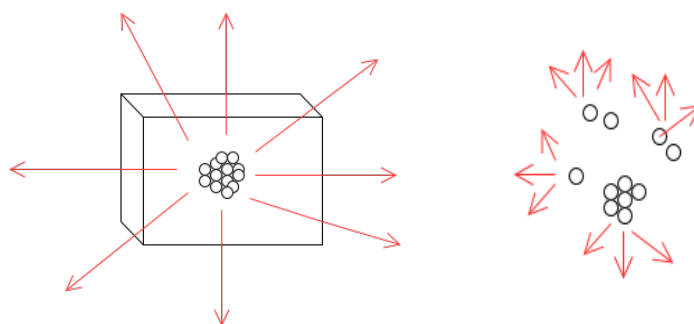
Tabela 4. Wartość dawek granicznych według rozporządzenia Rady Ministrów z dn. 18.01.2005 roku [24].

| | Dawka skuteczna [mSv/rok] | Dawka równoważna [mSv/rok] | | |
|---|------------------------------|-------------------------------|-------|---|
| | | oczy | skóra | dłonie, przedramiona, stopy, podudzia |
| Praktykanci, pracownicy, uczniowie, studenci w wieku powyżej 18 lat | 20 | 150 | 500 | 500 |
| Uczniowie, studenci, praktykanci w wieku 16-18 lat | 6 | 50 | 150 | 150 |
| Osoby z ogółu ludności, uczniowie, studenci, praktykanci w wieku poniżej 16 lat | 1 | 15 | 50 | --- |

4. 2. Osłony osłabiające promieniowanie jonizujące

Istnieją różne kryteria podziału źródeł promieniowania. Źródła zamknięte charakteryzuje się tym, że substancja promieniotwórcza nie ma kontaktu z otoczeniem (Rys. 12). Brak dostępu do materii promieniującej znajdującej się w środku powoduje, że nadaje się ono tylko jako źródło promieniowania. Źródło otwarte to takie, kiedy substancja promieniująca może mieć kontakt

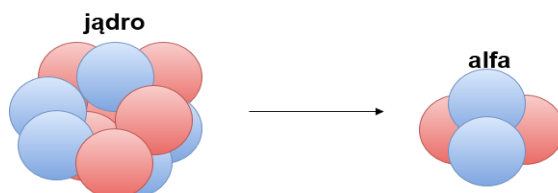
z otoczeniem [25]. Praca z takimi źródłami jest dużo trudniejsza ze względu na możliwość niekontrolowanego skażenia materiałem promieniotwórczym.



Rys 12. Schemat kolejno źródła zamkniętego (lewy panel) i otwartego (prawy panel) [25].

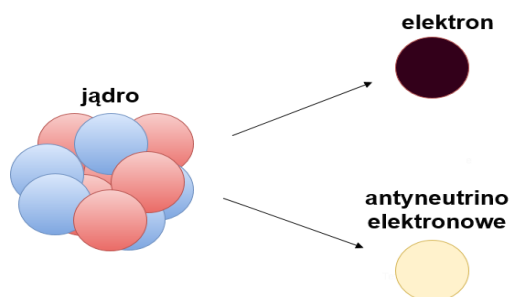
W zależności od rodzaju promieniowania stosowane są osłony różnego typu. Jest tak dlatego, że każdy rodzaj promieniowania charakteryzuje się różną przenikliwością. Wyróżniamy promieniowanie: α , β , γ oraz promieniowanie neutronowe.

Promieniowanie α charakteryzuje się bardzo małą przenikliwością. Wystarczy zwykła kartka papieru, aby je zatrzymać. Powstaje podczas rozpadu jąder promieniotwórczych, jak pokazano na Rys. 13.



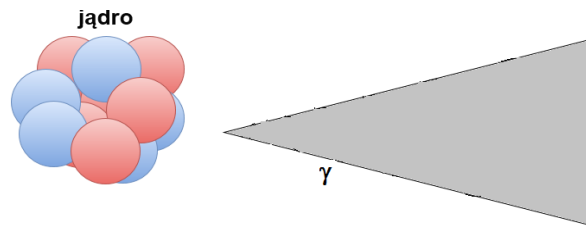
Rys 13. Emisja cząstek alfa przez jądro atomowe .

Promieniowanie β jest dużo bardziej przenikliwe niż promieniowanie α . Jako osłony stosowane są materiały lekkie takie jak aluminium lub tworzywa sztuczne. Ten rodzaj promieniowania również powstaje podczas rozpadu promieniotwórczego. Zachodzi on z emisją elektronów w rozpadzie β^- (Rys. 14) lub pozytonów przy rozpadzie β^+ . Podczas tego rozpadu pojawia się również nukleon i neutrino lub antyneutrino elektronowe [25 – 28].



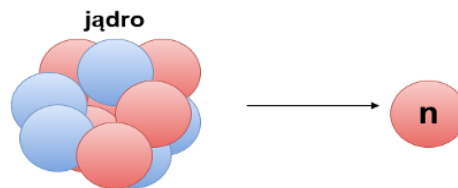
Rys 14. Emisja elektronu – rozpad β^- .

Promieniowanie γ jest bardzo przenikliwe dlatego jako osłony stosuje się grube, betonowe lub ołowiane płyty. Tak jak w przypadku wcześniej wymienionych rodzajów promieniowania, powstaje podczas przemian jądrowych (Rys.15). Jego zakres częściowo pokrywa się z promieniowaniem rentgenowskim.



Rys 15. Emisja promieniowania γ .

Promieniowanie neutronowe (Rys. 16), tak jak promieniowanie γ jest bardzo przenikliwe. Ten rodzaj promieniowania szerzej opisano w podrozdziale 2.1. Jako osłony używa się substancji z dużą zawartością kadmu i boru ze względu na ich duży przekrój czynny na absorpcję., dlatego najczęściej stosuje się je do osłon przeciw neutronom termicznym. Neutrony prędkie, używane w ćwiczeniu, są trudniejsze do zabsorbowania przez osłony, dlatego najpierw spowalnia się je, tak aby ich energia była zbliżona do energii neutronów termicznych. Do moderowania takich neutronów używa się materiałów lekkich z dużą zawartością atomów, których masa jest bliska masy neutronu. Najczęściej są to związki węgla i wodoru, np. parafina lub beton barytowy [29 -30].



Rys 16. Emisja neutronu.

4.3. Obliczenia grubości osłon dla wykorzystywanego źródła neutronów

Aby zapewnić bezpieczeństwo podczas pracy z promieniowaniem neutronowym należy używać osłon o odpowiedniej grubości. Aby wyznaczyć tą grubość konieczne jest wprowadzenie wielkości zwanej krotnością osłabienia osłony - k . Charakteryzuje ona krotność zmniejszenia natężenia wiązki promieniowania po przejściu przez osłonę. Wyraża się wzorem [22]:

$$k = \frac{D_x}{D}, \quad (19)$$

gdzie: D_x – dawka pochłonięta, gdy źródło nie posiada osłon, D – dawka pochłonięta gdy źródło posiada osłony.

Aby zapewnić bezpieczeństwo osobom pracującym ze źródłem należy skonstruować osłonę w taki sposób, aby dawki promieniowania były mniejsze od dawek granicznych. Narzucone jest również stosowanie się do zasady pesymizacji – zakładanie najgorszej możliwej sytuacji.

Dawka graniczna jak podano w Tabeli 3 w rozdziale 4.1 wynosi 1 mSv/rok dla ogółu ludności. Aby ułatwić obliczenia przeliczono dawkę roczną na dawkę tygodniową przyjmując, że 1 rok to 52 tygodnie. Dawka tygodniowa wynosi więc 0,02 mSv.

Dawkę pochłoniętą promieniowania innego niż neutronowe wyraża wzór [22]:

$$D = \frac{\Gamma_r x A x t}{k x l^2}, \quad (20)$$

gdzie: Γ_r – wartość równoważna stałej ekspozycyjnej (zależna od źródła promieniowania),

A – aktywność źródła, t – czas ekspozycji na promieniowanie, k – krotność osłabienia promieniowania, l – odległość od źródła.

Nie jest to jednak prawdziwe dla promieniowania neutronowego. Aby obliczyć dawkę konieczna jest wtedy znajomość wydajności źródła neutronów – W_n . Jest to liczba neutronów, którą źródło emituje w czasie sekundy przez źródła o masie 1g.

Przy założeniu jednorodności, możliwe jest obliczenie mocy dawki skutecznej ze wzoru [22]:

$$E_n = \frac{k_n \times W_n \times A}{4\pi l^2}, \quad (21)$$

gdzie: k_n - współczynnik konwersji, A – aktywność źródła, l – odległość od źródła, E_n – moc dawki skutecznej.

Współczynnik konwersji definiuje przejście od gęstości strumienia na powierzchnię ciała do mocy dawki równoważnej.

Przy konstruowaniu osłon należy wziąć pod uwagę również fakt, że każdy materiał ma inny przekrój czynny na reakcję na spowolnienie lub usunięcie neutronów prędkich. Jest to bardzo ważny czynnik w obliczeniach grubości osłony, jaką powinno posiadać źródło. Dla parafiny przyjęto $0,144 \text{ cm}^{-1}$ [31]. Wartość ta jest różna dla danego widma neutronów. Aby obliczyć grubość osłon należy skorzystać ze wzoru:

$$L = \frac{\ln \frac{k_n \times A \times B \times W_n}{H_{max} \times 2\pi l^2}}{\sum_r}, \quad (22)$$

gdzie: B – współczynnik narostu, Σ_r - przekrój czynny na reakcje spowolnienia neutronów prędkich, H_{max} – maksymalna dopuszczalna wartość równoważnika dawki, l – odległość od źródła.

Współczynnik narostu – B – jest niezbędny w celu uwzględnienia neutronów które zostaną rozproszone z powrotem do strumienia przez elastyczne i nieelastyczne rozpraszania w absorbencie. Mogą one wzmacniać dawkę promieniowania na zewnątrz osłony [32]. Współczynnik narostu reguluje wyliczoną intensywność neutronów. Dla związków o dużej zawartości wodoru, jak w przypadku parafiny, współczynnik narostu wynosi 5 [32].

W przypadku projektowanego ćwiczenia osłona znajduje się zaraz za źródłem neutronów dlatego do obliczeń stosowany jest wzór:

$$L = \sqrt{\frac{k_n \times B \times W_n \times A}{H_{max} \times 4\pi}} e^{-\Sigma_r \cdot l} \quad (23)$$

W obliczeniach przyjęto odległość od źródła $l = 100 \text{ cm}$.

Za maksymalną wartość równoważnika dawki – H_{max} – przyjęta $0,02 \text{ mSv}$ dla ogółu ludności

Parametry używanego w ćwiczeniu źródła:

aktywność – A – równa $12,95 \text{ GBq}$,

wydajność – W_n - wynosi $7,7 \cdot 10^5 \text{ n/s}$,

współczynnik konwersji – k_n - dla promieniowania neutronowego wynosi $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ mSv h}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}$.

Podstawiając powyższe dane do równania (22) możliwe jest obliczenie grubości jaką powinna mieć osłona z parafiny do danego źródła. Po przeprowadzeniu obliczeń wyznaczono $L = 32,71 \text{ cm}$.

5. Projekt ćwiczenia

Projektowane ćwiczenie ma kilka wariantów. Oznaczanie srebra, rtęci oraz napromieniowanie drożdży. To ostatnie jest skierowane w szczególności dla biofizyków.

1. Oznaczanie srebra

Cel ćwiczenia: Oznaczenie izotopów srebra w próbkach przy użyciu źródła neutronowego Am-Be, zapoznanie się z metodą analityczną, jaką jest aktywacja neutronowa NAA.

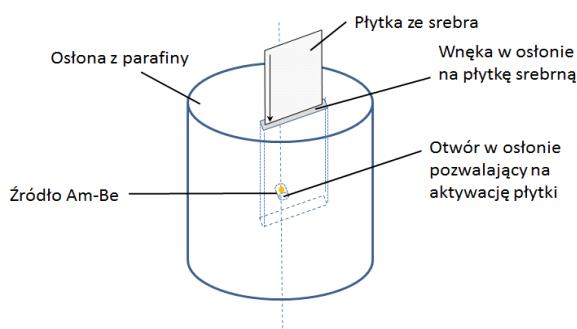
Zagadnienia do przygotowania:

1. Promieniowanie neutronowe,
2. Źródła neutronów,
3. Oddziaływanie neutronów z materią,
4. Aktywacja neutronowa,
5. Metodyka ćwiczenia: oznaczanie pierwiastków
6. Dozymetria: dawki, zasady bezpieczeństwa podczas pracy z promieniowaniem neutronowym.

Aparatura pomiarowa:

1. Źródło Am-Be w osłonie parafinowej
2. Próbkę – srebro
3. Komputer z oprogramowaniem do analizy widma
4. Detektor promieniowania γ
5. Stoper

Schemat układu pomiarowego: (Rys.17)



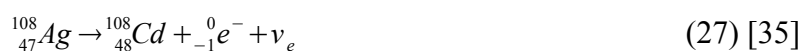
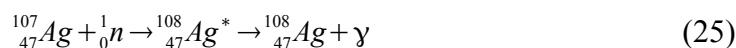
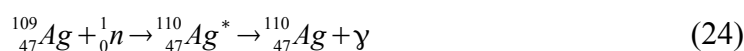
Rysunek 17. Schemat układu doświadczalnego do aktywacji próbek, w tym przypadku srebra.

Przebieg doświadczenia:

1. Przygotowanie próbek: aby poprawnie przeprowadzić pomiar bez emisji lotnych pierwiastków, należy wykonać zamknięte próbki, które będą reprezentować dany materiał. Aktywacja neutronowa nie wymaga dodatkowej modyfikacji próbek [13].

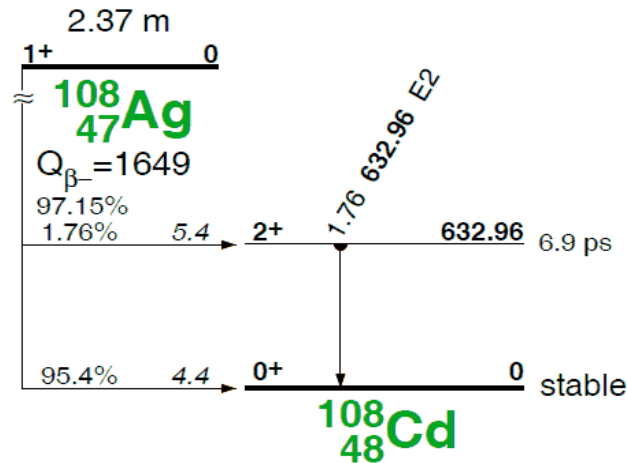
- Do otworu w osłonie wsunąć badaną próbkę, w tym wypadku srebra, o masie 10–20 g i poddać ją napromieniowaniu. Naturalne srebro zawiera głównie dwa stabilne izotopy: ^{109}Ag (ok. 51,8%) oraz ^{107}Ag (ok. 48,2%).
- Dokładnie zmierzyć czas naświetlania próbki. Powinien on wynosić około trzech okresów połowicznego rozpadu izotopu, który powstanie w wyniku aktywacji. Jednak aktywność nie zależy jedynie od czasu naświetlania, ale również od strumienia neutronów oraz przekrojów czynnych wychwyty neutronów na srebrze. Przekroje czynne wynoszą: 85 b dla ^{107}Ag i 178 b dla ^{109}Ag [33]. Dla srebra ^{108}Ag czas połowicznego rozpadu wynosi ok. $T_{1/2} = 146$ s, a dla ^{110}Ag : $T_{1/2} = 24$ s [35]. Równania reakcji wychwyty neutronów przez dwa najczęściej występujące izotopy srebra oraz rozpadów produktów tych reakcji zostały przedstawione poniżej:

Schematy rozpadów (24 – 27):

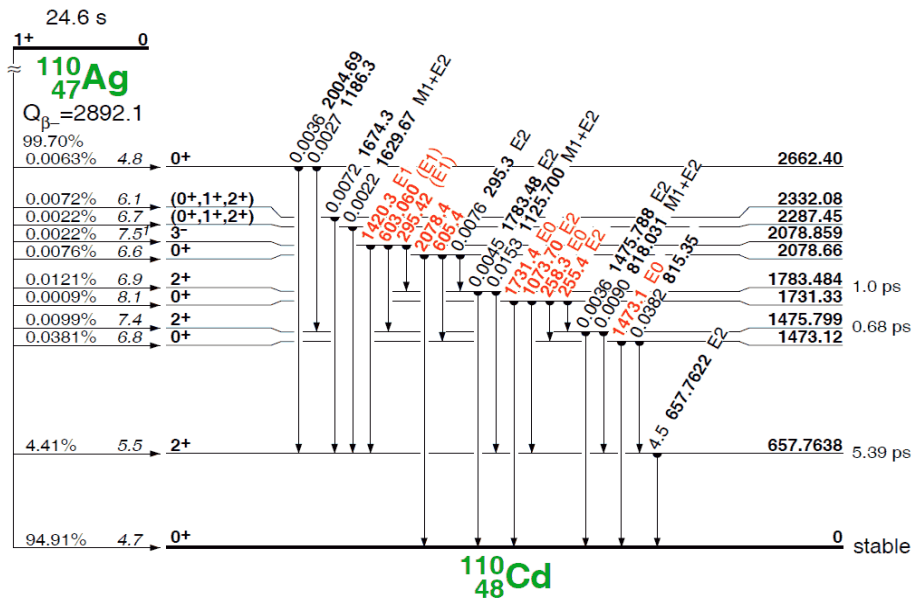


Energia kwantów γ izotopów ^{108}Ag i ^{110}Ag wynoszą odpowiednio: 632,99 keV oraz 657,51 keV [36]. Bardziej dokładne schematy rozpadów β^- izotopów ^{108}Ag i ^{110}Ag znajdują się na *Rys. 18* oraz *Rys. 19*.

- Gdy próbka zostanie naświetlona i aktywowana przez odpowiednie długi czas, należy wyjąć ją z otworu w osłonie i jak najszybciej przenieść do detektora promieniowania γ . Zmierzyć aktywność badanej próbki oraz zarejestrować widmo powstających w rozpadach aktywowanych izotopów cząstek.
- Przeanalizować otrzymane widmo i ustalić na podstawie widma zarejestrowanego promieniowania γ skład pierwiastkowy próbki oraz aktywności poszczególnych izotopów.
- Pomiary powtórzyć w kilku odstępach czasowych oraz wyznaczyć czas połowicznego rozpadu powstałych przez aktywację izotopów.



Rysunek 18. Schemat rozpadu β^- izotopu ^{108}Ag . [37]



Rysunek 19. Schemat rozpadu β^- izotopu ^{110}Ag . [37]

2. Oznaczanie rtęci.

Przebieg tej części ćwiczenia jest niemal identyczny, jak przy oznaczaniu srebra. Ważne jest jednak uwzględnienie tego, że rtęć jest bardziej toksyczna niż srebro. Jest ona lotna i jej pary są trujące. Nie należy również jej spożywać. Rozlaną rtęć należy zebrać i zneutralizować siarką lub cynkiem. Podczas wykonywania tej części ćwiczenia należy zachować szczególną ostrożność, stosować ubiór, rękawice i okulary ochronne.

Jednym z zastosowań oznaczenia rtęci za pomocą aktywacji neutronowej jest analiza występowania tego pierwiastka w produktach spożywczych. Jest to stosowane w kontroli żywności do stwierdzenia czy dany produkt nadaje się do spożycia. Jednym z wariacji ćwiczenia może być naświetlanie dowolnego produktu spożywczego (stosunkowo dużo rtęci jest np. w rybach) i oznaczanie jego składu pierwiastkowego. Należy określić wzorec o znanym stężeniu rtęci i poddać ją analizie razem z danym produktem spożywczym, a następnie dzięki znajomości stężenia wzorca wyznaczyć stężenie rtęci w próbce.

Przebieg doświadczenia:

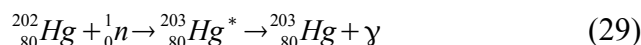
1. Próbką : wzorzec - związek rtęci z selenem (dzięki temu rtęć nie będzie bardzo toksyczna) o znanym stężeniu. W związku z tym, że rtęć ma długi czas połowicznego rozpadu należy dobrać masę próbki tak, aby uzyskana aktywność była odpowiednio duża, by możliwa była detekcja dużej statystyki emitowanych kwantów γ [Profesor dr hab. Jan Stanek - rozmowa prywatna]. Aktywność danej masy można wyrazić następującym wzorem:

$$A_0 = \frac{\sigma_x \phi N_0 a_x n_x (1 - e^{-\lambda t})}{M_x} e^{-\lambda t_d}, \quad (28)$$

gdzie: A_0 to aktywność cząstkowa, ϕ to strumień neutronów, N_0 to liczba Avogadro, a_x to abundancja izotopu, M_x – szukana masa próbki, n_x to szybkość zliczeń, λ to odwrotność czasu połowicznego rozpadu, t_d to czas schładzania, t to czas naświetlania [38].

Drugą próbkę stanowi produkt spożywczy, który będzie analizowany pod względem stężenia rtęci. Należy pamiętać, że obie próbki należy naświetlać w tych samych warunkach.

2. Do otworu w osłonie wsunąć obie próbki (wzorzec oraz produkt spożywczy) i poddać ekspozycji na promieniowanie. W wyniku naświetlania powstaje w wyniku wychwytu neutronu izotop promieniotwórczy ^{203}Hg z czasem połowicznego rozpadu 46,61 dni [38]. Równania reakcji wychwytu neutronów na rtęci przedstawiono poniżej:



Energia emitowanego kwantu γ przez izotop ^{203}Hg wynosi 279 keV [39].

3. Należy równocześnie mierzyć liczbę zliczeń od wzorca i próbki produktu spożywczego. Dokładnie mierzyć czas naświetlania próbek.
4. Gdy próbki zostaną naświetlone i aktywowane przez odpowiednio długi czas, należy wyjąć ją z otworu w osłonie i jak przenieść do detektora promieniowania γ .
5. Dzięki temu, że we wzorcu również występował izotop rtęci o znanym stężeniu, możliwe jest wyznaczenie stężenia w badanej próbce produktu spożywczego. Wyznaczane stężenie:

$$n_w = C * c_{xw} m_w, \quad (30)$$

$$n_x = C * c_x m_x, \quad (31)$$

$$c_x = \frac{c_{xw} * n_x m_w}{n_x m_p}, \quad (32)$$

gdzie: n_w to liczba zliczeń pomiaru wzorca, n_x to liczba zliczeń pomiaru próbki, c_x to stężeniem danego pierwiastka w produkcie, c_{xw} to stężeniem danego pierwiastka w wzorcu, m_x to całkowita masa próbki, a m_w oznacza całkowitą masę wzorca, C to współczynnik proporcjonalności [38].

3. Napromieniowanie drożdży.

Cel ćwiczenia: Obserwacja efektu pochłonięcia przez drożdży małych i dużych dawek promieniowania. Obserwacja ich liczebności i pączkowania.

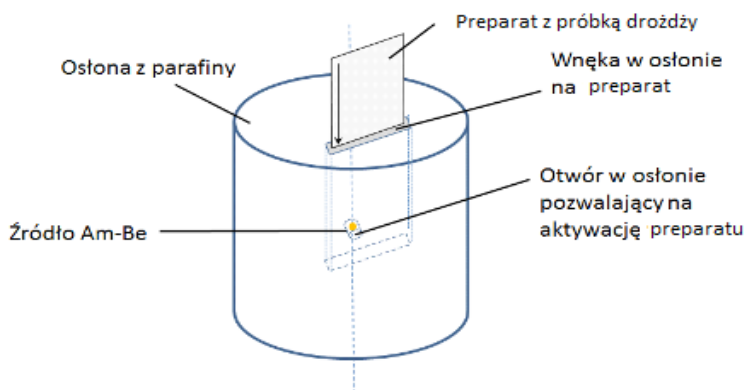
Zagadnienia do przygotowania:

1. Promieniowanie neutronowe,
2. Źródła neutronów,
3. Oddziaływanie promieniowania neutronowego z materią,
4. Aktywacja neutronowa,
5. Hormeza,
6. Dozymetria: dawki, zasady bezpieczeństwa podczas pracy z promieniowaniem neutronowym,

Aparatura pomiarowa:

1. Źródło Am-Be w parafinowej osłonie,
2. Osłona z parafiny,
3. Próbkę – drożdże,
4. Detektor promieniowania γ ,
5. Mikroskop optyczny z kontrastem różnicowo – interferencyjnym.

Schemat układu pomiarowego: (Rys. 20)



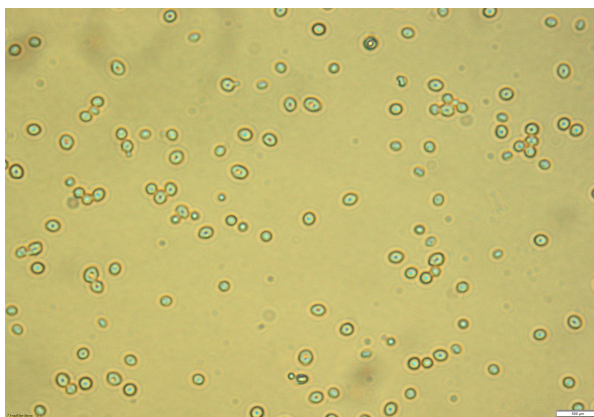
Rysunek 20. Schemat układu pomiarowego do aktywacji próbek, w tym przypadku drożdży.

Przebieg doświadczenia:

1. Przygotowanie próbki: rozpuścić drożdże w wodzie, nałożyć próbki na szkło podstawowe, przygotować 15 preparatów,
2. Preparaty wsunąć w otwór w osłonie i poddać naświetlaniu: 1 próbka – kontrolna, 2 próbka – czas naświetlania 10 s, 3 próbka – 15 s, 4 próbka – 20 s, 5 próbka – 25 s, 6 próbka – 30 s, 7 próbka – 35 s, 8 próbka – 40 s, 9 próbka – 45 s, 10 próbka – 50 s, 11 próbka – 55 s, 12 próbka – 60 s, 13 próbka – 65 s, 14 próbka – 70 s, 15 próbka – 75 s.

3. Obserwacja każdego z preparatów za pomocą mikroskopii różnicowo – interferencyjnej. Wykonać zdjęcie i policzyć liczbę komórek w każdej próbce,
4. Przedstawić wyniki na wykresie zależności liczby komórek od czasu naświetlania,
5. W związku z tym, że drożdże rozmnażają się niezależnie od promieniowania, należy przeprowadzić próbę kontrolną: przygotować preparat i po takim czasie jak wcześniejszy czas napromieniowania, wykonać zdjęcia pod mikroskopem. Policzyc liczbę komórek po danym czasie. Wykonać wykres zależności liczby żywych komórek drożdży od czasu.
6. Porównać otrzymane wykresy. Wyciągnąć wnioski dotyczące wpływu małych dawek na liczbę komórek drożdży.

Do obserwacji komórek drożdży pod mikroskopem używany jest mikroskop różnicowo-interferencyjny, ponieważ w odróżnieniu od innych rodzajów mikroskopii (np. jasnego pola) eliminowany jest efekt halo. Przy obserwacji preparatów przezroczystych (takich jak drożdże) pojawia się zarys, natomiast np. przy użyciu mikroskopii jasnego pola obraz byłby gładki, jednolity i bez kształtu. Na *Rys. 21* przedstawiono przykładowe zdjęcie drożdży wykonane za pomocą mikroskopii różnicowo–interferencyjnej.



Rysunek 21. Zdjęcie drożdży wykonane za pomocą mikroskopii różnicowo – interferencyjnej.

7. Podsumowanie

Celem tej pracy było zaprojektowanie ćwiczenia poszerzającego ofertę dydaktyczną II Pracowni Fizycznej na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ, w którym wykorzystuje się promieniowanie neutronowe w celu analizy składów pierwiastkowych materiałów. Ćwiczenie to ma za zadanie rozszerzyć wiedzę teoretyczną i praktyczną na temat metody analitycznej, jaką jest aktywacja neutronowa.

Aktywacja neutronowa to szeroko stosowana metoda analityczna, która polega na wytworzeniu izotopów promieniotwórczych badanych pierwiastków poprzez wychwyt neutronu, a następnie detekcji wyemitowanych przez nie kwantów γ . W związku z tym, że każdy izotop posiada inną strukturę emitowanych kwantów γ możliwe jest zidentyfikowanie danego izotopu, a co za tym idzie pierwotnego pierwiastka w próbce. Aktywacja neutronowa stosowana jest w wielu dziedzinach: geologii, kosmologii, archeologii, sądownictwie, oceanografii i wielu innych.

W projekcie uwzględniono, że źródło neutronów to źródło neutronów prędkich Am-Be, którego aktywność wynosi 12,95 GBq, a wydajność $7,7 \cdot 10^5$ n/s. A wśród aparatury pomiarowej znajduje się również detektor promieniowania (najlepiej detektor półprzewodnikowy). Do bezpiecznej pracy ze wspomnianym źródłem niezbędne są osłony wykonane z lekkich pierwiastków. W przypadku wspomnianego źródła neutrony będą spowalniane za pomocą parafinowej osłony o grubości 32,7 cm oraz pochłaniane na folii kadmowej. Podczas obliczeń grubości jaką powinna mieć osłona stosowano zasadę pesymizacji, a osłona została zaprojektowana tak, aby możliwe było wsunięcie i naświetlenie próbki.

Ćwiczenie ma kilka wariantów: oznaczanie srebra, oznaczanie zawartości rtęci w produktach spożywczych oraz badanie hormezy radiacyjnej poprzez badanie rozrodczości komórek drożdży pod wpływem ekspozycji na promieniowanie neutronowe.

Oznaczanie srebra polega na oznaczeniu płytki czystego srebra, czyli mieszaniny stabilnych izotopów ^{109}Ag oraz ^{107}Ag . Czas naświetlania potrzebny to uzyskania odpowiedniej aktywności powinien wynosić około trzech czasów połowicznego rozpadu izotopów promieniotwórczych, które powstaną na skutek wychwytu neutronu przez izotopu stabilne. Po naświetleniu należy przenieść próbkę do detektora promieniowania. Należy zidentyfikować pik o energii charakterystycznej dla danego izotopu w widmie, a następnie ustalić skład pierwiastkowy płytki.

Metodyka oznaczania rtęci w produktach spożywczych przebiega bardzo podobnie do oznaczania srebra. W tym wypadku wraz z próbką naświetlany jest również wzorzec. Użyty w tym wypadku wzorzec to związek selenu z rtęcią. Równocześnie naświetlana powinna być próbka, jak i wzorzec. Dzięki znajomości stężenia izotopu rtęci we wzorcu możliwe jest wyznaczenie stężenia rtęci w badanym produkcie.

Obserwacja hormezy polega na poddawaniu ekspozycji na promieniowanie komórek drożdży rozpuszczonych w wodzie. Należy zwiększać z każdym pomiarem czas naświetlania o 5 sekund, a następnie wykonać zdjęcia pod mikroskopem różnicowo – interferencyjnym. Należy policzyć liczbę komórek i narysować wykres zależności liczby komórek od czasu naświetlania. Komórki drożdży dzielą się też niezależnie od promieniowania, dlatego należy wykonać serie pomiarów kontrolnych – po takim samym czasie jak wcześniejszy czas napromieniowania wykonać zdjęcia i policzyć liczbę komórek. W tym wypadku również narysować wykresy zależności liczby komórek od czasu. Należy porównać oba wykresy. Jeśli rozrodczość pod wpływem promieniowania wyraźnie wzrosła to znaczy, że nastąpiło zjawisko hormezy.

Projekty ćwiczeń należy zweryfikować odpowiednimi pomiarami, które planują wykonać w najbliższym czasie.

Należy pamiętać, że promieniowanie neutronowe jest szkodliwe. Należy unikać ekspozycji na nie i stosować się do zasad ALARA.

Literatura

- [1] C. Latham, C. Ewels „Recommended Values of Physical Constants and Conversion Factors”
<http://newton.ex.ac.uk/research/qsystems/collabs/constants.html> (dostęp 14.06.2018 r.)
- [2] A. Strzałkowski „Wstęp do fizyki jadra atomowego” Warszawa, PWN 1978 r.
- [3] L. Heilbronn „Neutron Properties and Definitions”
https://three.jsc.nasa.gov/articles/Heilbronn_Neutron_Supplement.pdf (dostęp 15.06.2018 r.)
- [4] P. Moskal, S. Jowzaee „Promieniowanie naturalne z Ziemi i z Kosmosu”, artykuł
publikowany w „FOTON” 117, 4 (2012)
- [5] L. F. Curtiss „Introduction to neutron physics”, Princeton, 1959 r.
- [6] Materiały szkoleniowe Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa, 2008r.
- [7] Z. Surowiec „Wykłady z Oddziaływania promieniowania jonizującego z materią” 2015 r.
- [8] E. A. Lorch „Int J. Appl. Radiat. Isotopes 24, 585 (1973)
- [9] T. Kakavand, H. Ghafourian, M. Haji-Shafeieha, Iran. J. Radiat. Res 5, 41 (2007).
- [10] D. Oleszczuk „Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią”
www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/zal03/oleszczuk/oleszczuk.doc (dostęp 17.03.2018 r.)
- [11] N. Chankow „Nondestructive Testing Methods and New Applications”, 2012 r.
- [12] J. Pluta „Metody i techniki jądrowe w środowisku, przemyśle i medycynie” Wykład
2003/2004 r.
- [13] J. Braziewicz Wykłady „Metody fizyczne w medycynie” 2016 r.
- [14] R. Dybczyński „Zastosowania analizy aktywacyjnej” Instytut Chemii i Techniki Jądrowej
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/032/32032500.pdf
(dostęp 14.04.2018 r.)
- [15] R. Dybczyński „Chemia Analityczna”, Warszawa 2000 r.
- [16] L. Dobrzyński Wykłady „Energia Jądrowa i jej zastosowania” 2013 r.
- [17] M. Grygiel, H. Nazarenko-Fogt, R. Nych „Fizyka. Świat pod lupą”, WCACAG 2016 r.
- [18] Internet: <https://radioembolizacja.org.pl/zasada-alara/> (dostęp 13.03.2018 r.)
- [19] A. Szumska „Dozymetria soczewek oczu w medycynie z wykorzystaniem dawkomierzy
termoluminescencyjnych” Rozprawa doktorska przygotowana pod kierunkiem dr hab.
Macieja Budzanowskiego, prof. nadzw. IFJ PAN
- [20] Narodowe Centrum Badań Jądrowych - BNCT
<https://www.ncbj.gov.pl/bnct> (dostęp 21.04.2018 r.)

- [21] M. Kicińska-Habior, wykłady „Fizyka jądrowa w medycynie”, 2008/2009 r.
- [22] B. Gostkowska „Ochrona Radiologiczna. Wielkości, jednostki i obliczenia”, Warszawa: Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, 2005 r.
- [23] Praca zbiorowa „ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection” artykuł opublikowany w „European Journal of Radiology” 15, 93 (1992)
- [24] Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego
- [25] F. Sala „Dozymetria i ochrona przed promieniowaniem jonizującym: aspekty fizyczne, techniczne, prawne i społeczne” Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, Warszawa 2009 r.
<http://if.pw.edu.pl/~sala/papers/Dozymetria.pdf> (dostęp 2.02.2018 r.)
- [26] H. Becquerel, Comptes-rendus de l'Académie des sciences, séance 24, 420 (1896)
- [27] E. Rutherford., Philosophical Magazine 47, 109 (1899)
- [28] S. Chibowski „Ćwiczenia laboratoryjne z chemii jądrowej i radiometrii” Lublin UMCS 2010 r.
- [29] J. Pluta „Oddziaływanie neutronów z materią”
<http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w2/segment8/main.htm> (dostęp 13.02.2018)
- [30] G. Gilmore, „Practical Gamma-Ray Spectrometry”, Wiley 1995 r.
- [31] T. Jasin, M. N. Khan „High density polyethylene/boron carbide composites for neutron shielding” artykuł opublikowany w „e-Polymers” 8 strona 59 2008 r.
- [32] J. Martin „Physics for Radiation Protection” Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA 2013 r.
- [33] N. A. Własow „Neutrony”, PWN 1957 r.
- [34] H. Chmielewski, S. Andrzejewski, J. Zienkiewicz „Encyklopedia techniki: energia jądrowa”, WNT, 1970 r.
- [35] S. Katz, J. Bryan „Experiments in NUCLEAR SCIENCE” CRC Press 2010 r.
- [36] Live Chart of Nuclides – tablice:
<https://wwwnds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (dostęp 20.06.2018)
- [37] R. Firestone „Table of Isotopes” Wiley International Publication 1996 r.
- [38] J. Stanek, wykład „Wyznaczanie składu pierwiastkowego” z kursu „Metody fizyczne w biologii i medycynie” 2018 r.
- [39] Live Chart of Nuclides – tablice:
<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=800203> (dostęp 21.06.2018)