

Spektroskopia gamma przy użyciu wielodetektorowego układu EAGLE

Lidia Lappo

Styczeń 2022

Raport z ćwiczenia wykonanego w ramach udziału w XVI Ogólnopolskich Warsztatach Akceleracji i Zastosowań Ciężkich Jonów w dniach 24-30.10.2021 w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów. Raport stanowi opracowanie zaliczeniowe w Metod i Technik Jądrowych w roku akademickim 2021/2022

1 Wstęp

1.1 Warsztaty Akceleracji i Zastosowań Ciężkich Jonów w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów

Warsztaty dzieliły się na część teoretyczną, w ramach której wysłuchaliśmy cyklu wykładów z różnych dziedzin fizyki jądrowej: od budowy akceleratora i zasad bezpieczeństwa przy pracy z promieniotwórczością, poprzez metody tworzenia tarcz, działania detektorów do zastosowań w medycynie. Część doświadczalna polegała na wykonaniu eksperymentu w grupie czteroosobowej w składzie Mikołaj Brzeziński (Politechnika Poznańska), Lidia Lappo (Politechnika Warszawska), Rafał Stoga (Politechnika Poznańska), Jakub Wysocki (Uniwersytet Warszawski) pod opieką prowadzących prof. Marcina Palacza, dr Justyny Samorajczyk-Pyśk i dr Tomasza Abrahama z Laboratorium Ciężkich Jonów.

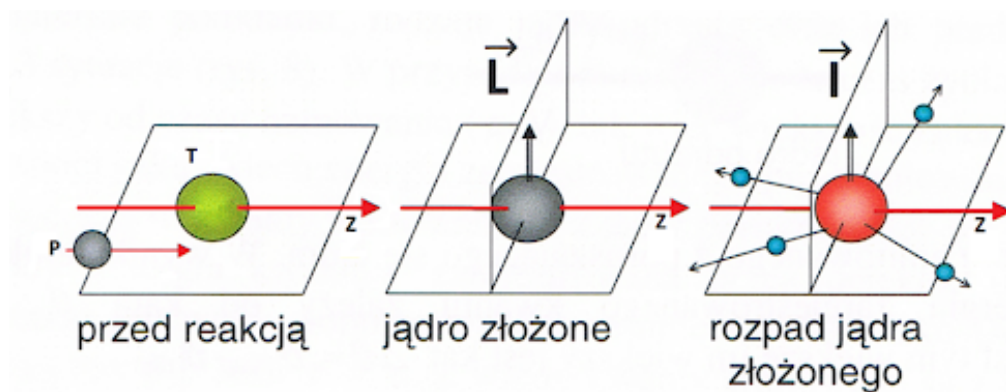


Rysunek 1: Zespół studentów i prowadzących na tle detektora EAGLE

W ramach warsztatów policzyliśmy razem z prof. Marcinem Palaczem i dr Justyną Samorajczyk-Pyśk teoretyczną grubość tarczy potrzebną do przeprowadzenia doświadczenia. Wykonaliśmy tarcze z miedzi w czym pomagała dr hab. Anna Stolarz. Następnie skalibrowaliśmy detektory przy pomocy słabych źródeł promieniotwórczych Europu 152 i Baru 133 pod nadzorem dr Tomasza Abrahama. Następnie po otrzymaniu wiązki jonów węgla C12 nasz zespół wykonał pomiary kwantów gamma emitowanych przez jądra złożone Bromu 75 i 77. Pod kierownictwem prof. Marcina Palacza i dr Justyny Samorajczyk-Pyśk przeprowadziliśmy analizę danych i zidentyfikowaliśmy jądra, które powstały.

1.2 Spektroskopia gamma jako metoda badawcza w fizyce reakcji ciężkich jonów

Po zderzeniu jąder powstaje wzbudzone jądro złożone. Emituje protony lub neutrony oraz kwanty gamma, które są rejestrowane np. przez detektory germanowe EAGLE. Mierząc energie kwantów gamma można zidentyfikować powstałe w ten sposób jądro. Jest to możliwe, ponieważ jądra mogą się znajdować tylko w określonych stanach energetycznych i przejścia między nimi są zawsze ściśle określone - wartość energii wyemitowanego kwantu gamma odpowiada określonej energii.

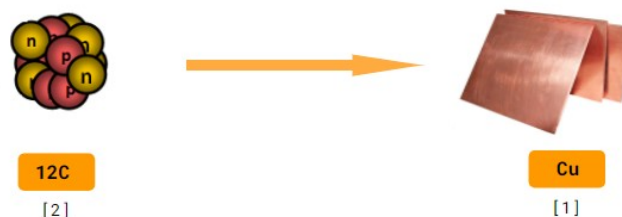


Rysunek 2: Ogólne przedstawienie badanej reakcji jądrowej

1.3 Cel poznawczy ćwiczenia

Identyfikacja jąder powstałych w wyniku bombardowania tarczy miedzi (^{63}Cu i ^{65}Cu) przyspieszoną w cyklotronie wiązką jonów węgla ^{12}C poprzez detekcję kwantów gamma wyemitowanych przez rozpad jąder złożonych ^{75}Br i ^{77}Br . Otrzymane jądra złożone obniżają swoją energię emitując protony lub neutrony. Powstałe w ten sposób jądra są wzbudzone i obniżają swoją energię poprzez emisję kwantów gamma o określonych wartościach energetycznych.

W doświadczeniu bombardowano tarczę wykonaną z miedzi ^{63}Cu (69%) i ^{65}Cu (31%) wiązką węgla ^{12}C .



Rysunek 3: Schematyczne przedstawienie reakcji przebiegającej w doświadczeniu

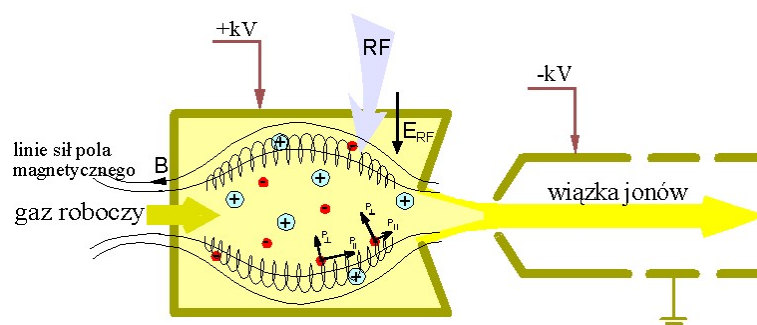
2 Aparatura

2.1 Akcelerator: cyklotron

Cyklotron o średnicy dwóch metrów w Środowiskowym Laboratorium Jonów Ciężkich jest izochroniczny. Co oznacza, że czas obiegu cząstek w cyklotronie jest stały pomimo wzrostu masy cząstek spowodowanego efektami relatywistycznymi. Cyklotron posiada zmienne w kierunku azymutalnym pole magnetyczne AVF (Azimuthally Varying Field) co zapewnia zbieżność wiązki.

Napięcie przyspieszania to 70 kV.

Źródło jonów jest typu ECR (Electron Cyclotron Resonance). Elektrony w pułapce magnetycznej są nagrzewane przy pomocy mikrofal dzięki zjawisku elektronowego rezonansu cyklotronowego do wysokich temperatur, co pozwala na jonizację głębokich powłok atomowych i zapobiega rekombinacji jonów.

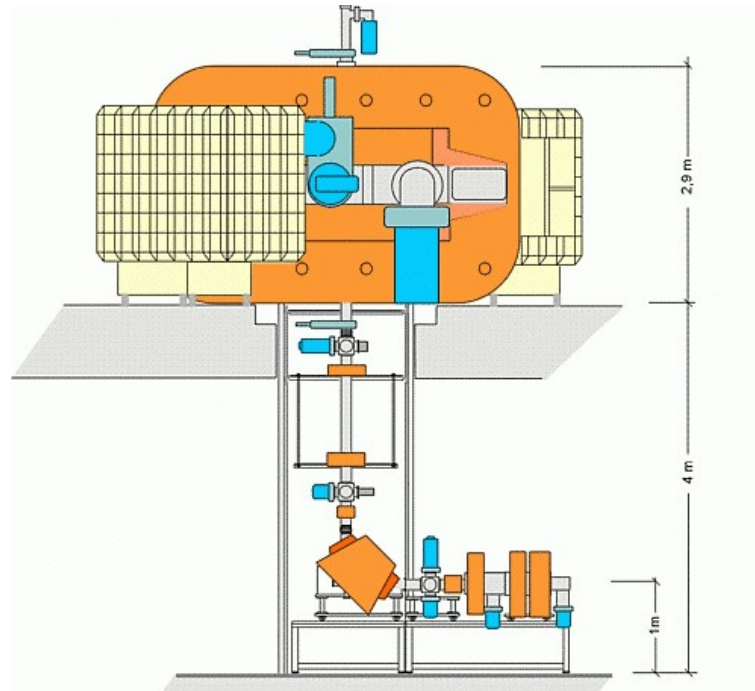


Rysunek 4: Uproszczony schemat źródła jonów typu ECR

Źródło typu ECR jest stosunkowo nowym nabytkiem laboratorium. Pozwala na wytwarzanie większej różnorodności wiązek. W naszym przypadku była to wiązka jonów węgla C12 podwójnie zjonizowanego.

Wiązka jest wprowadzana do cyklotronu za pomocą linii iniekcyjnej. Wiązka powstałych w źródle jonów jest skupiana przez soczewki elektrostatyczną i magnetyczną. Następnie elektromagnes odchyła wiązkę i kieruje ją do centrum cyklotronu przy pomocy soczewek magnetycznych, gdzie inflektor zwierciadlany zagina wiązkę o 90 stopni i wprowadza w obszar akceleracji.

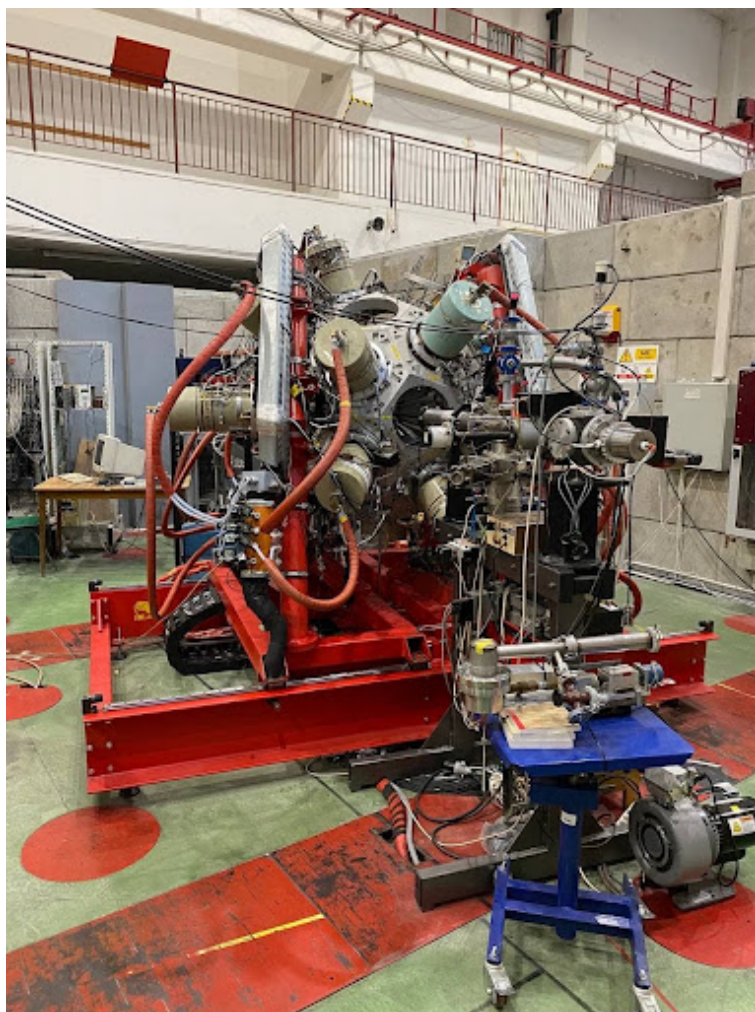
Zakres wartości stosunku masa/ładunek jonów to 2-10. O cyklotronie dowiedzieliśmy się dużo w pierwszym dniu warsztatów w czasie wykładu i wycieczki po laboratorium, Do usystematyzowania informacji korzystałam ze strony laboratorium ŚLCJ w zakładce Eksperymenty i Urządzenia.



Rysunek 5: Schematyczny rysunek przedstawiający źródło jonów, linię iniekcyjną i cyklotron (przekrój pionowy)

2.2 Układ wielodetektorowy EAGLE

EAGLE (central European Array for Gamma Levels Evaluations) to konfiguracja detektorów. Rama EAGLE ma kształt dwudziestościanu, która mieści do 30 detektorów germanowych w osłonach anti-Comptonowskich, chłodzonych przy pomocy ciekłego azotu.

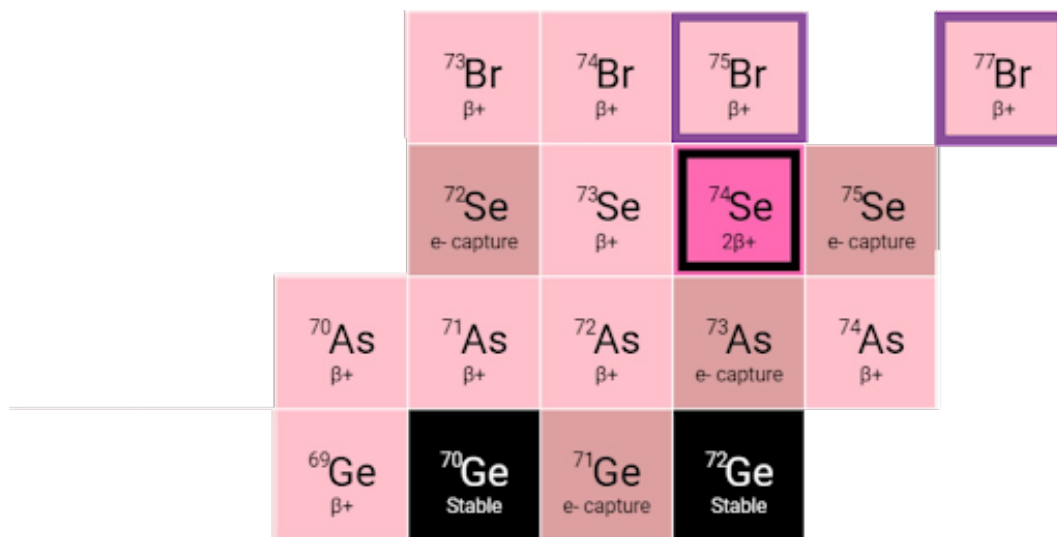


Rysunek 6: Zdjęcie układu wielodetektorowego EAGLE

3 Przygotowanie doświadczenia

3.1 Teoretyczne przewidywania

Przy pomocy specjalnego programu obliczyliśmy jakich jąder najczęściej możemy się spodziewać. Oddzielnie dla jądra złożonego Bromu 77 i Bromu 75. Ponieważ do tarczy użyliśmy miedzi 35 i 33 spodziewaliśmy się dwóch rodzajów jąder złożonych. Następnie wybraliśmy te nuklidy, dla których przekrój czynny był największy. Kolorami są oznaczone przemiany jądrowe, którym ulegają wybrane nuklidy: jasny róż β^+ , kolor skóry - wychwyt elektronu, intensywny róż z czarną ramką - dwie przemiany β^+ , czarny kolor oznacza stabilne jądro. Fioletowe ramki to zaznaczenie otrzymanych jąder złożonych.

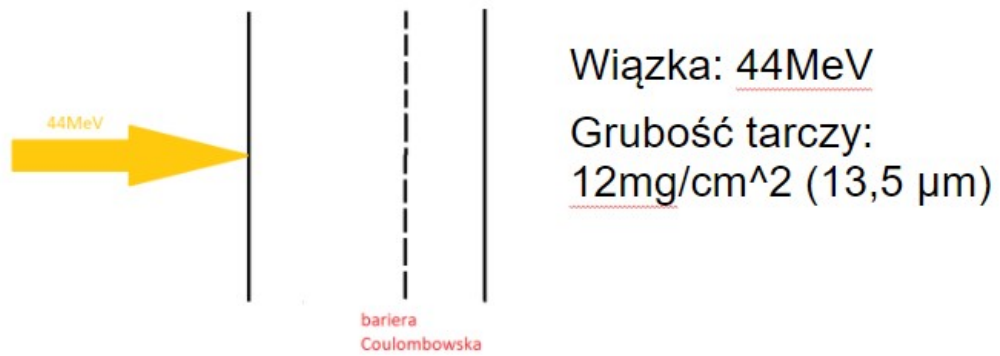


Rysunek 7: Jądra izotopów, których powstanie zostało przewidziane przez nas teoretycznie

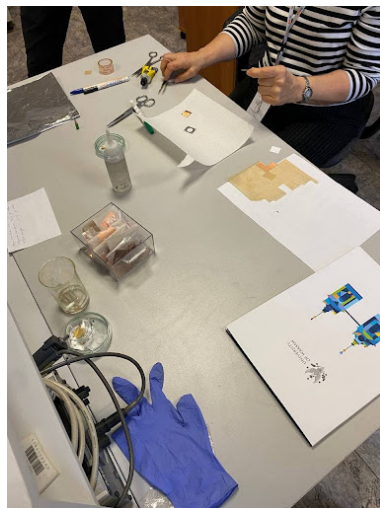
3.2 Przygotowanie tarczy

Wiedząc, że wiązka jonów będzie miała energię 44MeV, obliczyliśmy przy pomocy programu komputerowego jaką grubość powinna mieć tarcza - 13.5 μm . Nie chcieliśmy by była zbyt cienka, by wszystkie jony węgla, powstałe z reakcji jądra zatrzymały się w tarczy. Następnie metodą walcowania przygotowaliśmy folię z miedzi ($\text{Cu}35$ i $\text{Cu}33$) o grubości 14 μm , która została naklejona na specjalną ramkę. Na szczęście przygotowaliśmy więcej folii, gdyż później przy umieszczaniu ramki uszkodziliśmy folię śrubokrętem.

Założenia eksperymentu



Rysunek 8: Założenia eksperymentu



(a)



(b)

Rysunek 9: Przyklejenie tarczy na ramkę

3.3 Kalibracja: źródła punktowe Eu152 i Ba133

Na początku mieściliśmy punktowe źródło promieniotwórcze i wstępnie skalibrowaliśmy wzmacniacze dla każdego z detektorów, by na kanał przypadło około 0.5keV. Robiliśmy to identyfikując charakterystyczny pik Europu 152 i zmieniając ustawienia wzmacniacza na bieżąco patrząc na odczyty. Następnie zrobiliśmy pomiary po kolei dla Europu 152 i Baru 133. Później wykona-



Rysunek 10: Wstępna kalibracja detektorów



(a)



(b)

Rysunek 11: a) Europ 152 b) Bar 133

liśmy dokładną kalibrację (obliczoną przez specjalistyczny program komputerowy) dla każdego detektora - ustalając dokładnie 0.5 keV na kanał. Porównując charakterystyczne piki Europu 152 i Baru 133 dla każdego detektora uznaliśmy, że odczyty z dwóch detektorów są rozmyte, dlatego nie braliśmy ich później pod uwagę.

4 Pomiary

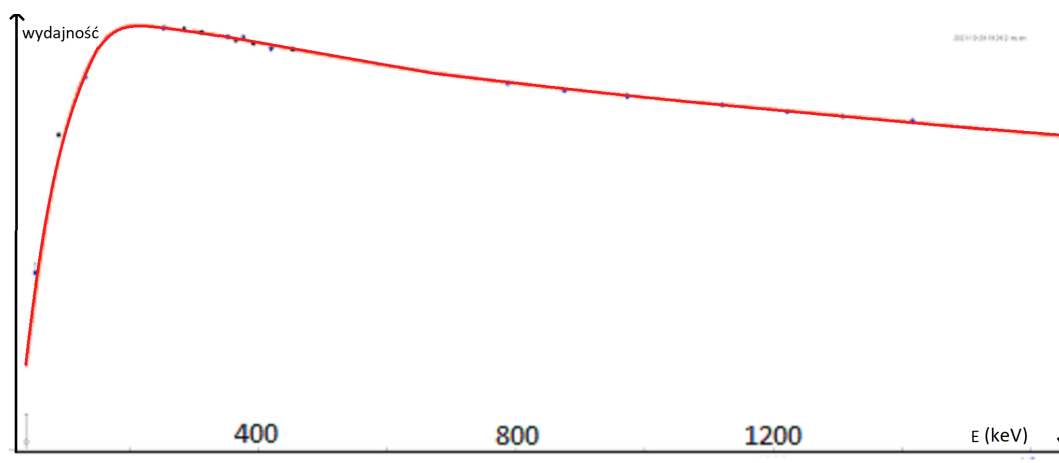
Pomiary prowadziliśmy w trzecim dniu warsztatów, gdy dostaliśmy wiązkę jonów węgla C12. Dzień wcześniej umieściliśmy tarczę w detektorze EAGLE, i przez całą noc z układu było wypompowywane powietrze, tak by reakcje zachodziły w próżni. Zbieraliśmy odczyty z 16 detektorów, później odrzucając wyniki z 4 i 15 detektora.



Rysunek 12: Tarcza po doświadczeniu, widać zmianę koloru tam gdzie padała wiązka

4.1 Krzywa wydajności

Ponieważ detektory germanowe nie są jednakowo czułe na wszystkie energie kwantów gamma z charakterystycznych pików Europu i Baru stworzyliśmy krzywą wydajnościową. Którą potem uwzględniliśmy przy analizie wyników.

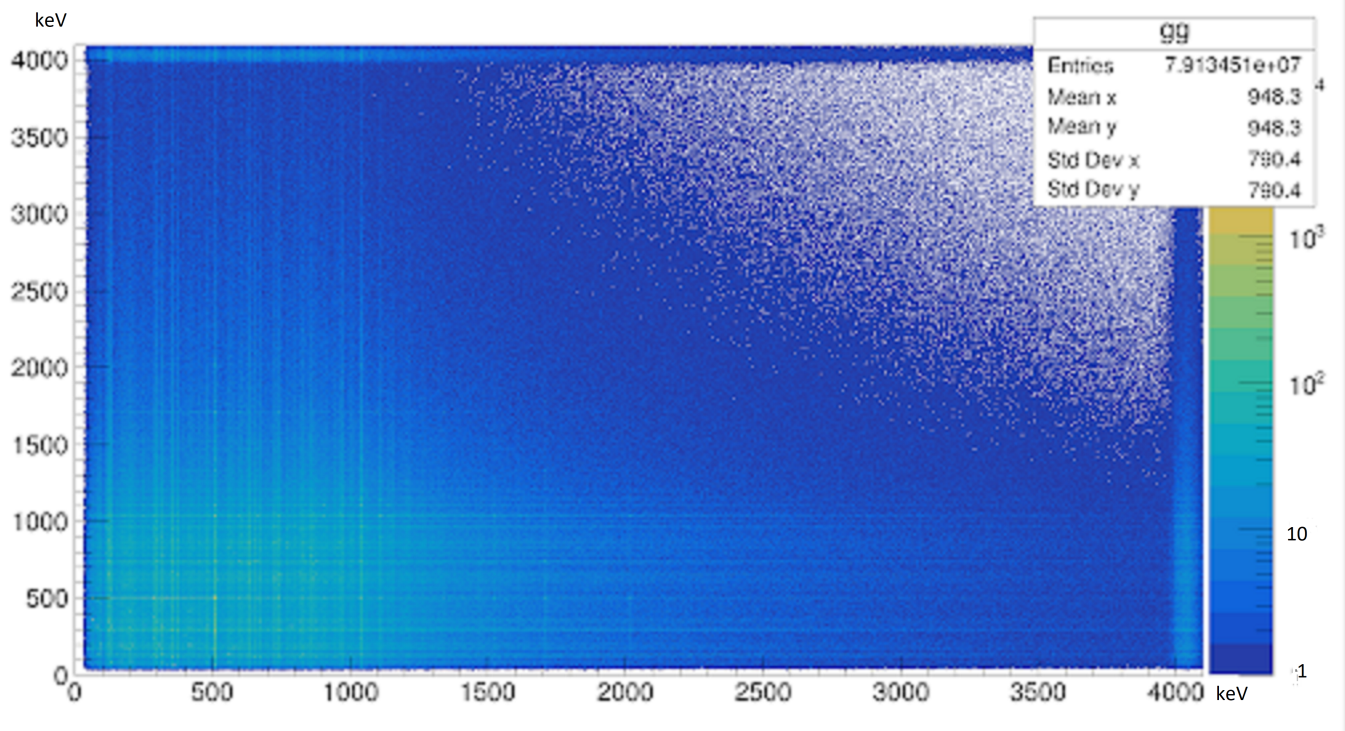


Rysunek 13: Krzywa wydajności

4.2 Macierz koincydencji

Zarejestrowane kwanty gamma nie zawsze muszą pochodzić od jądra wzbudzonego: pochodzące z anihilacji pozytonów, promieniowania tła. Dlatego uwzględniamy tylko te detekcje,

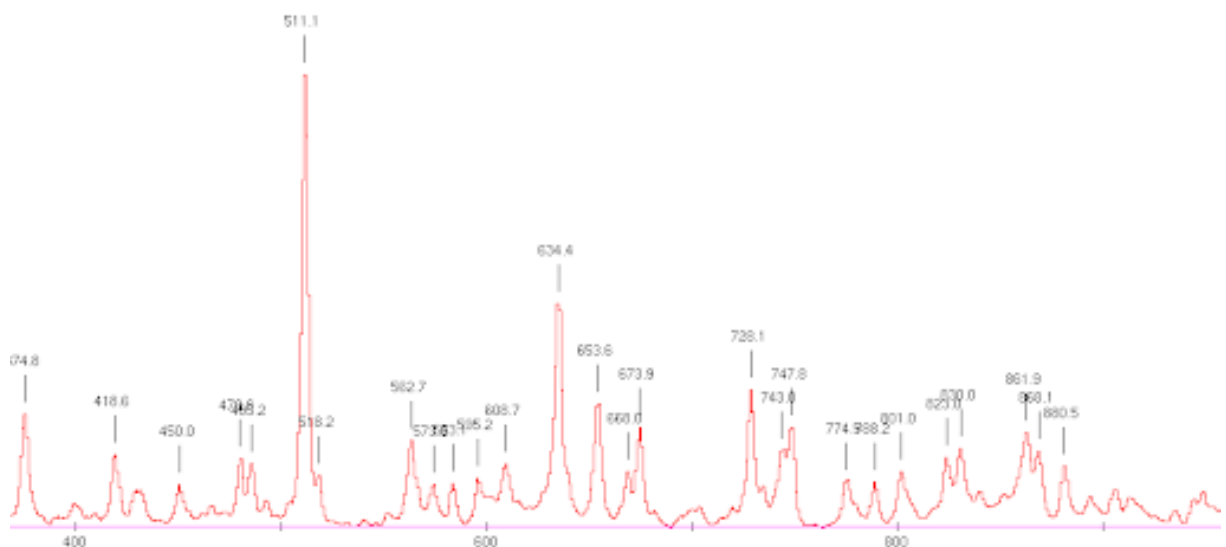
gdy jednocześnie co najmniej dwa detektory coś zarejestrowały, w tym celu stworzyliśmy macierz koincydencji.



Rysunek 14: Macierz koincydencji

5 Analiza wyników

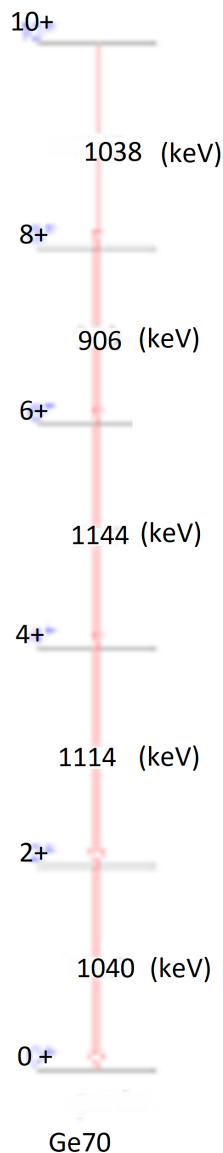
5.1 Rozpoznanie powstałych jąder



Rysunek 15: Zaobserwowane piki zliczeń o określonych energiach

Korzystając z macierzy koincydencji i tablic przejść poziomów jądrowych identyfikowaliśmy jakie jądra mogły powstać. Macierz koincydencji pozwoliła nam zobaczyć, że niektóre kwanty o określonej energii częściej był rejestrowane razem. Szukaliśmy w tablicach przejść poziomów jądrowych jakie możliwe były przejścia. Na tej podstawie odtworzyliśmy energetyczne stany, w których znajdowało się wzbudzone jądro i identyfikowaliśmy je. Korzystaliśmy z danych z <https://www-nds.iaea.org/> i z "Table of Isotopes" Richard B. Firestone. Była to w zasadzie zabawa w detektywa, patrzyliśmy które piki energii występują razem i przeszukiwaliśmy tablice by znaleźć odpowiadające przejścia z poziomów energetycznych.

Poniżej zidentyfikowane przez nas przejścia energetyczne dla Germanu 70. Podobnie wyglądało z innymi nuklidami.



Rysunek 16: Zidentyfikowane przez nas przejścia energetyczne dla Germanu 70

5.2 Intensywność powstawania poszczególnych jąder

Mierząc wartości zliczeń poszczególnych pików ustaliliśmy względną intensywność powstawania jąder. Najczęściej tworzył się German 70.



Rysunek 17: Intensywność otrzymywania poszczególnych izotopów

6 Wnioski

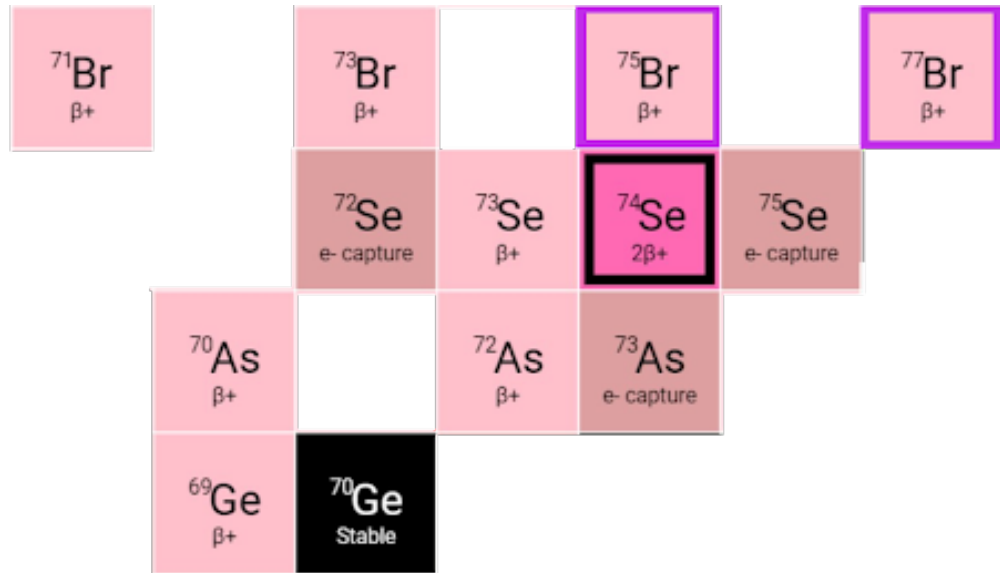
Powstałe jądra wymagały emisji z jądra wzbudzonego określonej ilości protonów i neutronów. W przypadku gdy emisja była większa niż 2 protony i 2 neutrony możliwa była emisja cząstki alfa.

	$^{75}_{35}\text{Br}$	$^{77}_{35}\text{Br}$
$^{75}_{35}\text{Br}$	-	2n
$^{73}_{35}\text{Br}$	2n	4n
$^{71}_{35}\text{Br}$	4pn	4p4n
$^{75}_{34}\text{Se}$	-	pn
$^{74}_{34}\text{Se}$	p	p2n
$^{73}_{34}\text{Se}$	pn	p4n
$^{72}_{34}\text{Se}$	p2n	p6n
$^{73}_{33}\text{As}$	2p	2p2n
$^{72}_{33}\text{As}$	2pn	2p4n
$^{70}_{33}\text{As}$	2p4n	2p5n
$^{70}_{32}\text{Ge}$	4p3n	4p5n
$^{69}_{32}\text{Ge}$	4p4n	4p6n

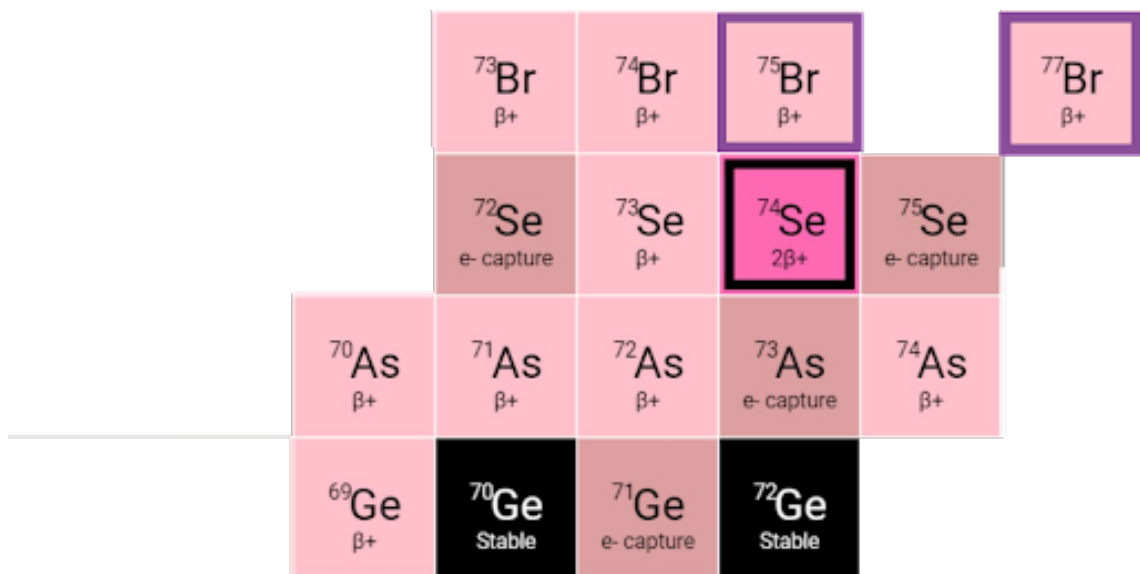
Rysunek 18: Jakie nukleony mogły, być wyemitowane z jądra złożonego

6.1 Porównanie z przewidywaniami teoretycznymi

Nie zidentyfikowaliśmy wszystkich przewidywanych teoretycznie jąder. Możliwe, że powstawały, ale w zbyt małych ilościach by możliwa była identyfikacja. Co ciekawe udało nam się zarejestrować jądra Bromu 71, który nie był przewidywany teoretycznie. Oznaczenia kolorystyczne takie same jak w przypadku rysunku 6.



Rysunek 19: Wyniki doświadczalne



Rysunek 20: Teoretyczne przewidywania

7 Podsumowanie

Warsztaty były bardzo pouczające. Dawały możliwość pracy z fizykami jądrowymi. Zobaczenie cyklotronu i detektora EAGLE oraz uczestnictwo w autentycznym eksperymencie fizycznym było bardzo ekscytujące. Warto dodać, że ten konkretny eksperyment (wiązka jonów węgla i tarcza miedzi) nie był przeprowadzany wcześniej w tym laboratorium i nawet prowadzący nie byli pewni jakie wyniki otrzymamy.

8 Bibliografia

<https://people.physics.anu.edu.au/~ecs103/chart/>

<https://www-nds.iaea.org/>

Table of Isotopes by Richard B.Firestone

Wiedza przekazana przez prowadzących w czasie warsztatów

<http://slcj.uw.edu.pl/> - strona laboratorium

9 Źródła grafik

Rys. 1 - zdjęcie własne

Rys. 2 - udostępnione prof Marcina Palacza

Rys. 3 - własne

Rys. 4-5 - <http://slcj.uw.edu.pl/>

Rys. 6 - zdjęcie własne

Rys. 7 - <https://people.physics.anu.edu.au/~ecs103/chart> + własne

Rys. 8 - 18 - własne

Rys 19-20 - <https://people.physics.anu.edu.au/~ecs103/chart> + własne