

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł F I Z Y K I



Praca zaliczeniowa z zajęć specjalistycznych "Metody i Techniki Jądrowe w Środowisku, Przemśle i Medycynie", rok ak. 2016/17

Rozpraszanie Rutherforda oraz pomiar energii rozproszonych ciężkich jonów przy użyciu układu eksperymentalnego ICARE

Opracowanie wykonano na podstawie materiałów zebranych w czasie XII Ogólnopolskich Warsztatów Akceleracji i Zastosowań Ciężkich Jonów w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego w dniach 23 – 29 października 2016 r.

Monika Seniut

Numer albumu: 265004

WARSZAWA, 2017

Spis treści

1	Wstęp	3
2	Model budowy atomu	6
2.1	Model Thomsona	6
2.2	Model Rutherforda	7
3	Układ eksperymentalny	10
3.1	Akcelerator Ciężkich Jonów w ŚLCJ - U200P	10
3.2	Układ ICARE	12
3.3	Budowa układu ICARE	14
3.4	Rodzaje detektorów użyte w eksperymencie	15
3.4.1	Detektor pojedynczy	16
3.4.2	Detektor podwójny	17
3.5	Tarcze	17
4	Opis eksperymentu	18
4.1	Kinematyka rozpraszania Rutherforda	18
5	Analiza danych	19
5.1	Kalibracja detektorów	19
5.1.1	Kalibracja energetyczna detektorów pojedynczych	19
5.2	Pomiar energii wiązki	22
5.3	Pomiar grubości tarczy	23
5.4	Porównanie wyników dla tarczy węglowej oraz tarczy ze złota	24
5.5	Obserwacja wiązki ^{20}Ne	26
6	Podsumowanie i wnioski	27
	Literatura	28

1 Wstęp

XII ogólnopolskie warsztaty *Akceleracji i Zastosowań Ciężkich Jonów* [1] organizowane przez Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego (ŚLCJ UW [2]) odbyły się w dniach 23 - 29 października 2016 roku. Warsztaty były przeznaczone dla studentów fizyki oraz kierunków pokrewnych, zainteresowanych fizyką jądrową.

Program warsztatów obejmował zarówno wykłady, jak i zadania praktyczne, wykonywane w grupach 3-4 osobowych przez studentów z różnych uczelni Polskich. Zajęcia odbywały się w Laboratorium ŚLCJ UW z wykorzystaniem unikalnej aparatury badawczej zainstalowanej na wiązce Warszawskiego Cyklotronu U200P.

Celem warsztatów było zapoznanie studentów z zagadnieniami, dotyczącymi tematów:

- akceleracja ciężkich jonów i elementy optyki jonowej;
- detekcja cząstek naładowanych i promieniowania gamma;
- własności jąder atomowych i mechanizmy reakcji jądrowych;
- układy elektroniki pomiarowej i systemy zbierania danych.

Studenci w czasie warsztatów realizowali przez tydzień jeden z projektów badawczych, których proponowanymi tematami były:

- (A) Optyka jonowa / akceleracja ciężkich jonów.
- (B) Pomiar energii rozproszonych ciężkich jonów (rozpraszanie Rutherforda).
- (C) Spektroskopia gamma przy użyciu wielodetektorowego układu EAGLE.
- (D) Produkcja cienkich tarcz i pomiar ich grubości.
- (E) Pomiar aktywności w próbce środowiskowej.

W warsztatach wzięło udział 19 osób z całej Polski, w czym 3 osoby - studenci Politechniki Warszawskiej.



<http://www.old.slcj.wv.edu.pl/pl/events/Warsztaty/warsztaty2016/warsztaty2016-foto.jpg>

Rysunek 1: Uczestnicy XII Ogólnopolskich Warsztatów Akceleracji i Zastosowań Ciężkich Jonów.

Projekt eksperymentalny pod tytułem „Pomiar energii rozproszonych ciężkich jonów (rozpraszanie Rutherforda)” był realizowany przez 4 osobowy zespół studentów:

1. Tomasz Hanusek, Politechnika Poznańska
2. Katarzyna Krutul, Uniwersytet w Białymstoku
3. Karolina Rozwadowska, Uniwersytet Warszawski
4. Monika Seniut, Politechnika Warszawska

Kierownicy projektu:

- dr Paweł Napiorkowski
- dr inż. Magdalena Matejska-Minda
- dr Marzena Wolińska-Chichocka



Rysunek 2: Studenci pracujących nad projektem „Pomiar energii rozproszonych ciężkich jonów (rozpraszanie Rutherforda)” przy wykorzystaniu układu eksperymentalnego ICARE. Od lewej: Karolina Rozwadowska, Monika Seniut, Tomasz Hanusek, Katarzyna Krutul.

2 Model budowy atomu

2.1 Model Thomsona

Na przestrzeni wieków, niemalże do końca XIX wieku w świecie nauki istniało przekonanie, że najmniejszymi elementami składowymi otaczającej materii były atomy - cząstki niepodzielne, „cegiełki” budujące wszechświat. Atomy oddziaływały pomiędzy sobą siłami, które działały na odległość (bez żadnych materialnych nośników oddziaływania). Jednakże, w słusność takiej teorii jako jeden z pierwszych wątpił już rosyjski chemik, odkrywca prawa okresowości pierwiastków chemicznych, D.I. Mendelejew. Przypuszczał on, iż atomy - to złożone cząstki materii, które mają bardziej skomplikowaną strukturę i są podzielne na mniejsze komponenty. Brakowało, mimo wszystko, metod chemicznych, które by potwierdzały taką, odważną jak na te czasy, tezę.

Pod koniec XIX wieku nastąpił przełom i zaczęły powstawać różnorodne teorie na temat właściwości atomu, które wskazywały na jego złożoną budowę. Pierwsza próba stworzenia **modelu atomu** na podstawie zgromadzonej dotychczas wiedzy była podjęta przez brytyjskiego fizyka, J.J. Thomsona w roku 1904. Model atomu Thomsona jest również zwany modelem ciasta z rodzynkami, gdzie ciasto przedstawia dodatni ładunek atomu, a rodzynki - ujemnie naładowane elektrony. Thomson twierdził, iż atom można przedstawić jako równomiernie naładowaną dodatnio sferę, w której „pływają” ujemnie naładowane elektrony (nazwane wtedy „korpuskułami”). Rozpatrując sferę, przedstawioną na rysunku 4, wypełnioną dodatnio naładowaną materią o gęstości objętościowej, równej $+\rho$, gdzie w odległości r od środka znajduje się ładunek punktowy - elektron $-e$, podzielmy ją na cienkie koncentryczne warstwy. Wtedy natężenie pola wewnątrz każdej z takich warstw jest równe 0, a na zewnątrz jest tak, jak gdyby cały ładunek elektryczny danej warstwy znajdował się w środku sfery (punkcie O na rys. 4). W takim wypadku, na elektron e będzie działał ładunek $q(r)$, znajdujący się w sferze o promieniu r . Dodatkowo, siła działająca na ten elektron będzie taka, jak w przypadku gdyby cały ten ładunek znajdował się w punkcie zero (in. O - rys. 4). Można to zapisać w postaci wzorów ([3]):

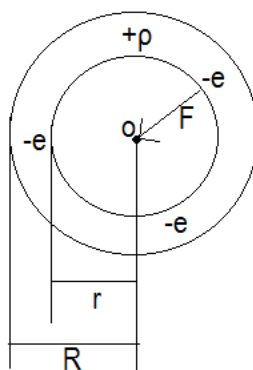
$$q(r) = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho, \quad (1)$$

$$F = \frac{-eq}{r^2} = -\frac{4}{3}\pi \rho r = -\kappa r. \quad (2)$$

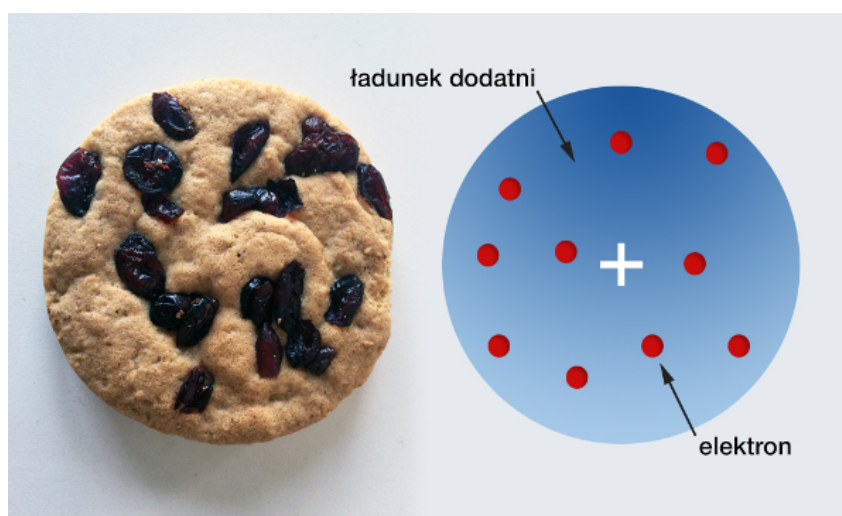
Oznacza to, iż elektron będzie poruszał się pod wpływem siły kwazi-elastycznej (przy braku tarcia), tzn. będzie wykonywał drgania harmoniczne wokół punktu O . Przy czym, będzie on też emitował monochromatyczne promieniowanie z częstością $\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{m}}$, gdzie m - masa elektronu. W taki sposób Thomson próbował wyjaśnić liniowe pochodzenie widma emitowanego przez atomy. Jednak jego sposób opisywał tylko spektrum zawierające jedną linię spektralną, a nie widmo składające się z zestawu linii, co się nie zgadzało z wynikami eksperymentów. Model Thomsona miał też tę wadę, iż nie potrafił również wytłumaczyć podstawowej zasady, na której bazował układ

2.2 Model Rutherforda

okresowy pierwiastków - okresowości właściwości atomów. Toteż, oczywistym był fakt, iż model atomu Thomsona nie był satysfakcjonujący i potrzebowano nowych pomysłów oraz doświadczeń, które wyjaśniałyby budowę atomu.



Rysunek 3: Model atomu Thomsona - schemat.



<https://ilf.fizyka.pw.edu.pl/podrecznik/1/3/1>

Rysunek 4: Model atomu Thomsona - „ciasto z rodzynekami”.

2.2 Model Rutherforda

W roku 1907 eksperymentalnie zostało udowodnione, iż cząstki α , powstające przy rozpadach promieniotwórczych pierwiastków, składają się z jąder helu (są to podwójnie zjonizowane atomy helu He^{2+}). Przy przejściu szybkich cząstek α (o dużych prędkościach) przez ośrodek materialny, większość z nich doznawała tylko niewielkich odchyłeń od kierunku wiązki padającej, o kąty $2^\circ - 3^\circ$. Jednakże, bardzo nieznaczna część cząstek α , rzędu 0.01% wszystkich cząstek, została odbijana

2.2 Model Rutherforda

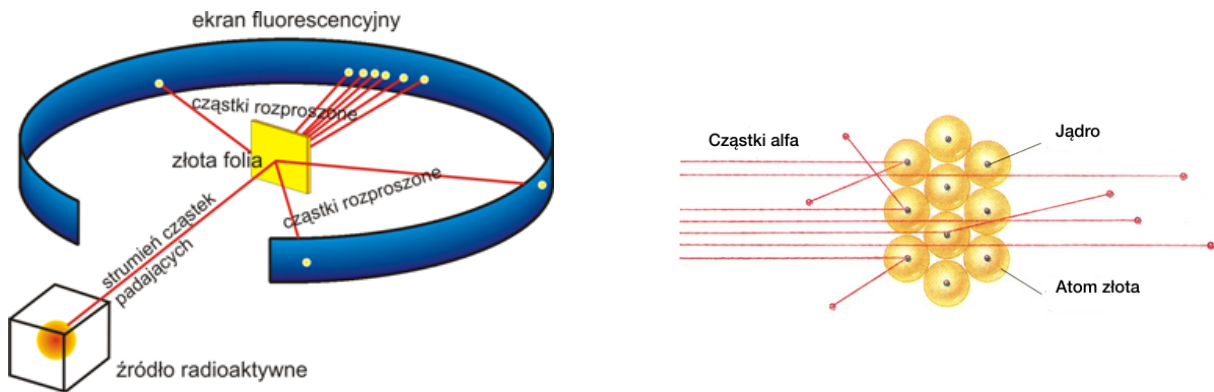
pod kąta, bliskimi kątom 180° . Przewaga cząstek α nad innymi rodzajami promieniowania jest taka, iż są one wysoko monochromatyczne (wszystkie cząstki emitowanego z tego samego atomu mają niemalże identyczną prędkość) oraz są to cząstki o dość wysokiej masie (7263 masy elektronu). W związku z tym, iż masa rozpatrywanych cząstek jest tak duża, przy zderzeniu z elektronami znajdującymi się w jądrze, nie mogą one być rozpraszane (doznawać odchylenia), dzięki czemu na podstawie rozproszenia cząstek α w materii można wnioskować o dystrybucji ładunku dodatniego w atomie. Masa ładunku dodatniego jest niemalże równa masie całego atomu.

Krokiem milowym w poznaniu struktury atomu był eksperyment słynnego angielskiego fizyka XX wieku, Ernesta Rutherforda oraz jego współpracowników: Hansa Geigera i Ernesta Marsdena, przeprowadzony w roku 1911. Obserwowano rozpraszanie cząstek α na cienkiej folii aluminiowej. Eksperyment polegał na tym, iż źródło promieniotwórcze emitowało skolimowaną wiązkę cząstek α , która następnie uderzała w cienką złotą folię, grubości $0.4 \mu m$, co odpowiada 2000 warstw atomowych. Po przejściu przez folię rozproszone cząstki α padały na niewielki, przezroczysty ekran, pokryty materiałem fluorescencyjnym, zamontowany na czubku mikroskopu, wywołując scyntyłację. Mikroskop, natomiast, wmontowany był w ściankę mogącej obracać się puszkę w kształcie walca. We wnętrzu aparatury była próżnia, żeby zapobiec zderzeniom cząstek α z cząsteczkami powietrza. W doświadczeniu określano liczbę cząstek (scyntyłacji) odchylonych o różne kąty od pierwotnego kierunku wiązki. Jak się należało spodziewać, większość cząstek przechodziła przez folię bez wyraźnego odchylenia (odchylana była pod bardzo małymi kątami), co świadczy o tym, iż folia oraz atomy są przezroczyste dla cząstek α . Jednak, zaskakującym był fakt, iż średnio jedna na $2 \cdot 10^4$ cząstek α były rozpraszane pod kątem $> 90^\circ$. Niektóre z tych cząstek, doznawały odchylenia nawet o kąt bliski 180° w stosunku do pierwotnego kierunku ruchu strumienia cząstek α (cząstki były rejestrowane po tej samej stronie folii, z której padała wiązka początkowa). Schemat przedstawiający przebieg eksperymentu jest pokazany na rysunku 5.

O niezwyklej roli odkrycia w świecie nauki świadczą słowa E. Rutherforda: „To było chyba najbardziej niewiarygodne zdarzenie w moim życiu. To tak, jakby pocisk artyleryjski wielkiego kalibru, wystrzelony w kierunku serwetki, odbił się od niej i powrócił do strzelającego”.

Po przestudiowaniu wyników doświadczenia Rutherford doszedł do wniosku, iż odchylenie cząstek α pod dużymi kątami w stosunku do kierunku wiązki początkowej jest spowodowane jednokrotnym oddziaływaniem cząstek α z ładunkiem dodatnim, związanym z dużą masą i co najważniejsze, skupioną w objętości dużo mniejszej niż objętość samego atomu. Właśnie dlatego w skali atomowej (rysunek 5, str.9 w danej pracy) widać, iż tylko nieliczne cząstki α są odchylane pod dużymi kątami, bo tylko w tych przypadkach zderzają się z tą dużą, ale zajmującą bardzo niewielką część atomu, masą).

2.2 Model Rutherforda



<http://rutherford.pl/informacje/doswiadczenie-rutherforda/>

Rysunek 5: Schemat ilustrujący doświadczenie Rutherforda w skali makroskopowej oraz na poziomie pojedynczych atomów.

Dzięki opisanemu powyżej doświadczeniu Rutherford zaproponował jądrowy model atomu (zwany modelem atomu Rutherforda), opublikowany w roku 1911, który bazował na założeniach:

1. atomy posiadają jądra o promieniu rzędu $10^{-15} m$;
2. jądro skupia w sobie prawie całą masę atomu (zderzenie cząstki α z dużo lżejszym elektronem nie wpływa na jej tor ruchu);
3. ładunek dodatni Ze zgromadzony jest w niewielkim i bardzo gęstym jądrze, gdzie Z - jest to liczba masowa pierwiastka (numer pierwiastka w układzie okresowym);
4. ujemnie naładowane elektrony okrążają jądro, podobnie jak planety okrążają Słońce;
5. wokół jądra panuje pole kulombowskie o natężeniu E w odległości r od środka jądra (model matematyczny, na podst. [4]):

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze\vec{r}}{r^2 r}, \quad (3)$$

gdzie: ϵ_0 - przenikalność elektryczna próżni, Z - liczba atomowa, $\frac{\vec{r}}{r}$ - wektor jednostkowy.

3 Układ eksperymentalny

3.1 Akcelerator Ciężkich Jonów w ŚLCJ - U200P



Rysunek 6: Akcelerator Ciężkich Jonów U200P, ŚLCJ UW, Warszawa.

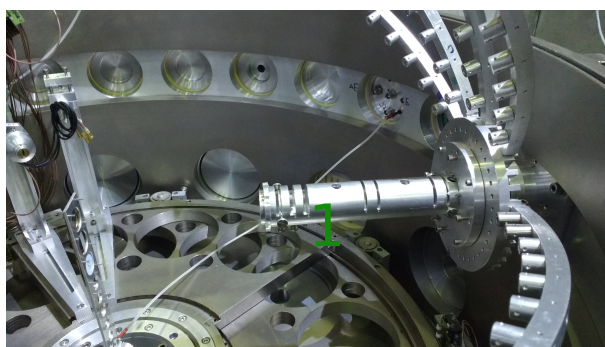
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego jest jedynym ośrodkiem w Polsce dysponującym akceleratorem ciężkich jonów (rysunek 6). Cyklotron U200P, funkcjonujący już od 24 lat, przyspiesza wiązki jonów do energii w zakresie od 2 do 10 MeV na nukleon. Cyklotron współpracuje z dwoma źródłami jonów ECR (Electron Cyclotron Resonance, elektronowy rezonans cyklotronowy). Są to urządzenia, w których elektrony są rozpędzane do dużych energii strumieniem mikrofal poprzez elektronowy rezonans cyklotronowy. Dzięki temu możliwe jest otrzymanie plazmy - gazu zawierającego w większej mierze zjonizowane atomy i swobodne elektrony. Taki gaz wypełnia komorę, która, utrzymywana pod niskim ciśnieniem, jest źródłem wiązki, używanej w eksperymencie. W celu przeprowadzenia doświadczenia niezbędne jest przygotowanie niskoenergetycznej wiązki cząstek o ściśle określonym ładunku (stopniu jonizacji). Wiązka ta przedstawia sobą jądra atomowe, które mają być przyspieszone przez cyklotron.

Po wyjściu ze źródła ECR, kontrolowana przez układy magnesów wiązka jonów kierowana jest do centrum cyklotronu. W centrum cyklotronu znajduje się inflektor – rodzaj zwierciadła elektrostatycznego – który zakrzywia wiązkę jonów, ponownie nadając jej kierunek poziomy, tak by

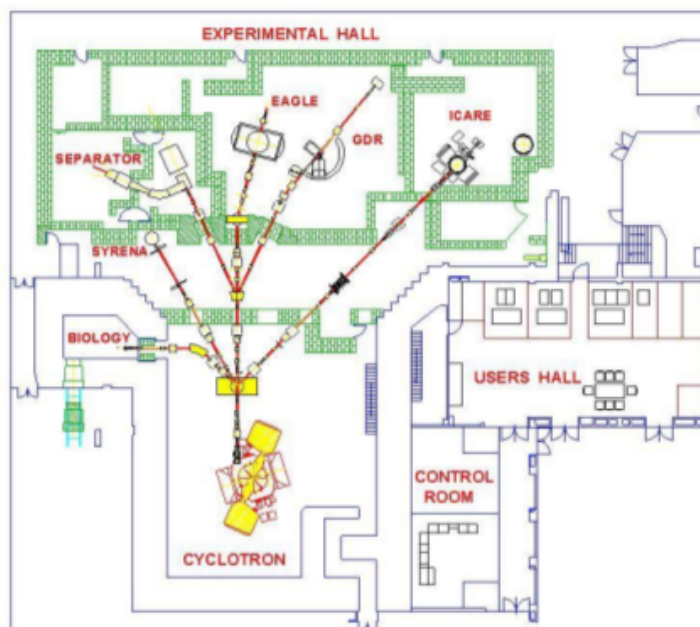
3.1 Akcelerator Ciężkich Jonów w ŚLCJ - U200P

możliwe było przyspieszanie jonów w cyklotronie.

Cyklotron znajdujący się w ŚLCJ jest cyklotronem izochronicznym, co oznacza, iż wszystkie przyspieszane w nim cząstki mają tę samą częstotliwość obrotową, niezależnie od promienia. Wiązka z cyklotronu (w przeprowadzonym eksperymencie była to wiązka ^{20}Ne) jonowodami (rys. 7) wyprowadzana jest do stanowisk eksperymentalnych (w doświadczeniu - ICARE), wyposażonych w różne urządzenia pomiarowe (rys. 8).



Rysunek 7: Widoczna część jonowodu (ozn. 1) wprowadzająca wiązkę do komory rozproszeń układu pomiarowego ICARE.



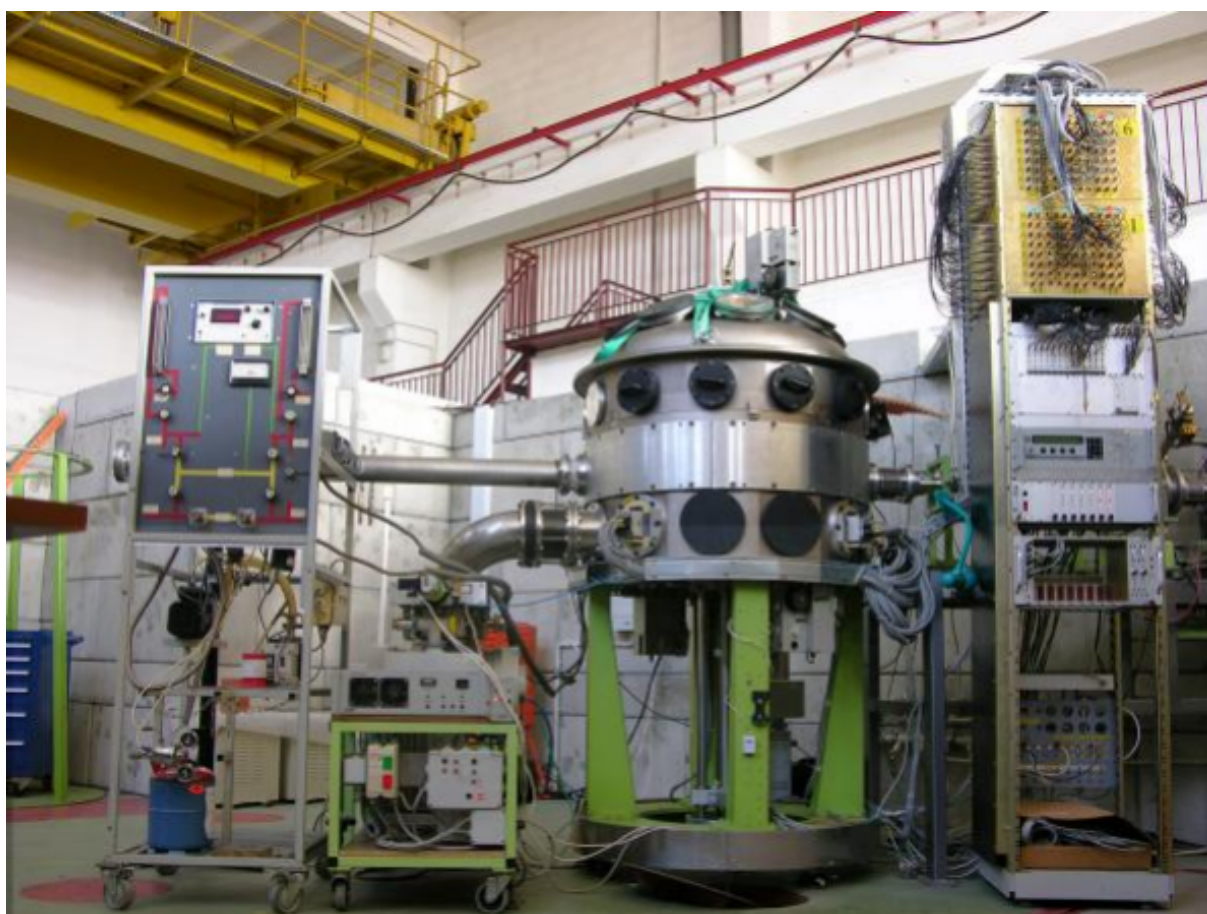
Rysunek 8: Plan eksperymentalnej części Laboratorium ŚLCJ UW - cyklotron i hala eksperymentów (rys. I. Skrzeczanowska).

Podsumowując, mechanizm wytwarzania jonów, ich przyspieszenia oraz doprowadzania wiązki do stanowisk pomiarowych wygląda następująco:

3.2 Układ ICARE

- jony ze źródła jonów, znajdującego się w piwnicy laboratorium, liniami iniekcyjnymi o długości ok. 4 m są dostarczane do cyklotronu (ozn. 2 na rys. 6), którego wysokość jest równa 2.9 m;
- po trafieniu do cyklotronu jony są odpowiednio przyspieszane;
- jony są kierowane jonowodami (ozn. 1 na rys. 6) do odpowiednich stanowisk pomiarowych.

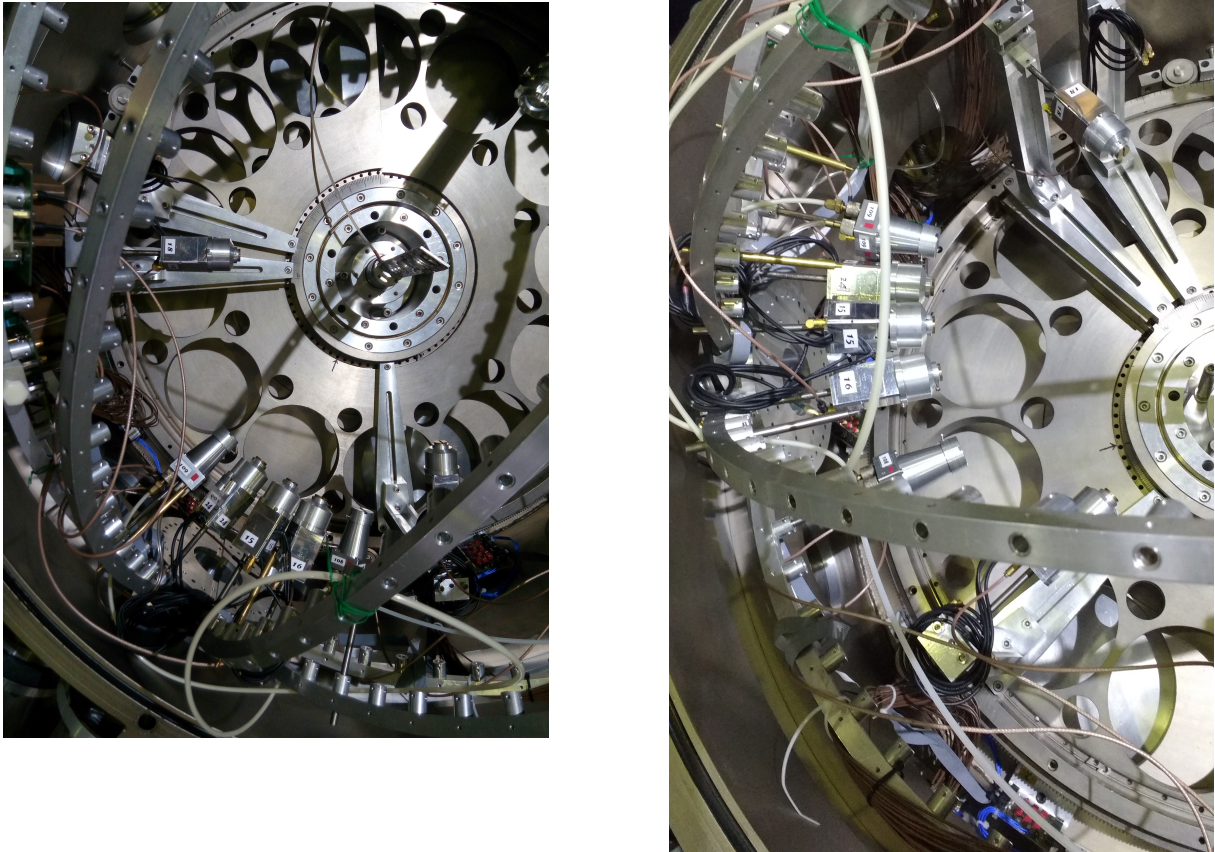
3.2 Układ ICARE



Rysunek 9: Spektrometr cząstek naładowanych ICARE, ŚLCJ UW, Warszawa.

ICARE (*d'Identificateur de Charges à Rendement Elevé*) - jest to wielodetektorowy układ służący do detekcji cząstek naładowanych (rys. 9). Był on sprowadzony do Środowiskowego Laboratorium Ciężkich Jonów z ośrodka IreS ze Strasburga we Francji w roku 2006. Komora ICARE ma średnicę 1 m, a maksymalna liczba detektorów gazowych i półprzewodnikowych, która może być umieszczona w danym układzie wynosi 48. Detektory te służą do jednoczesnego pomiaru strat energii cząstki (ΔE) w cienkiej warstwie materiału, jak również całkowitej energii cząstki (E). Są to tzw. teleskopy $E - \Delta E$. Jednoczesny pomiaru obu parametrów: E , ΔE pozwala na precyzyjną identyfikację cząstek. Wnętrze komory ICARE wraz z wyraźnie widocznymi detektorami

przedstawiono na rysunku 10.



Rysunek 10: Wnętrze komory ICARE z widocznymi detektorami.

Zaletą komory ICARE jest fakt, iż jej konstrukcja pozwala dopasować geometrię ustawienia detektorów do potrzeb danego pomiaru oraz umożliwia zmianę położenia kąтового części detektorów w trakcie pomiaru bez konieczności otwierania komory, która jest skomplikowana i czasochłonna z powodu utrzymywanej w niej wysokiej próżni (10^{-6} mbar).

Układ ICARE wykorzystywany jest do eksperymentów, które wymagają dużej precyzji przy identyfikacji i pomiarze energii cząstek naładowanych. Są to m.in. badania mechanizmów reakcji jądrowych, realizowane przez pomiary rozkładów kątowych produktów reakcji oraz przekrojów czynnych, przy energiach wiązki bliskich barierze kulombowskiej. Inne eksperymenty służą wyznaczeniu rozkładów wysokości barier na fuzję metodami rozpraszania quasi-elastycznego. Planowane są badania własności izotopów leżących daleko od ścieżki stabilności produkowanych w reakcjach ciężkojonowych oraz badania deformacji jąder poprzez analizę widm emitowanych lekkich cząstek naładowanych (źródło informacji: materiały zebrane w czasie warsztatów ogólnopolskich w

3.3 Budowa układu ICARE

ŚLCJ UW).

3.3 Budowa układu ICARE

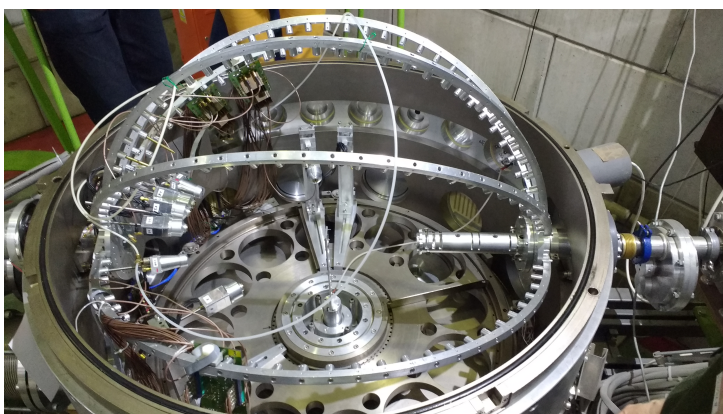
W celu wykonania doświadczenia Rutherforda w warunkach laboratoryjnych korzystano z układu pomiarowego ICARE, współpracującego z systemem akwizycji danych **SMAN** - wykonanego i będącego własnością ŚLCJ UW. Na rysunku 11 przedstawiona jest komora rozproszeń, używana podczas wykonywania doświadczenia, zawierająca następujące elementy:

- jonowód - służy do doprowadzania wiązki ^{20}Ne z akceleratora,
- ramkę z 2 tarczami: złotą (^{197}Au) oraz węglową (^{12}C),
- zestaw detektorów: 4 detektory krzemowe oraz 2 detektory teleskopowe.



Rysunek 11: Komora spektrometru cząstek naładowanych ICARE, ŚLCJ UW, Warszawa. Widać tu poszczególne elementy układu używane w eksperymencie: jonowód (1), ramkę z tarczami (2), detektory (3).

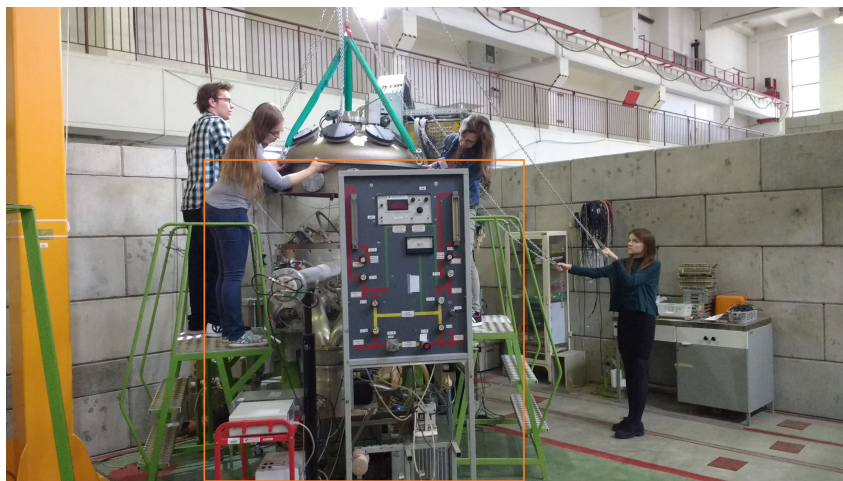
Główną częścią układu pomiarowego ICARE jest próżniowa komora rozproszeń, przedstawiona na rysunku 12. Komora ta ma kształt walca o wysokości 0.7 m oraz średnicy 1 m.



Rysunek 12: Komora spektrometru cząstek naładowanych ICARE, ŚLCJ UW, Warszawa.

3.4 Rodzaje detektorów użyte w eksperymencie

Wewnątrz komory można montować detektory na 2 różne sposoby: na stałych pozycjach oraz na ruchomej platformie. W danym doświadczeniu posługiwano się detektorami (d8, d18), umieszczonymi na platformie ruchomej, co umożliwiło zmianę położenia detektorów bez konieczności otwierania komory. Ważną częścią układu pomiarowego jest również system do wytwarzania wysokiej próżni (rzędu 10^{-6} mbar) oraz system doprowadzania i regulacji ciśnienia gazu wypełniającego detektory gazowe. Oba systemy są przedstawione na rysunku 13.



Rysunek 13: System do wytwarzania wysokiej próżni oraz system doprowadzania i regulacji ciśnienia gazu wypełniającego detektory gazowe w układzie pomiarowym ICARE (pomarańczowy prostokąt). Na zdjęciu komora jest zamykana przed włączeniem systemu wytwarzania próżni, umożliwiającym rozpoczęcie pomiarów.

Wewnątrz komory rozproszeń umieszczana jest ramka (tzw. holder), na której można montować różnego rodzaju tarcze w zależności od potrzeb eksperymentu. W danym doświadczeniu użyto 2 tarcz: złotej (^{197}Au) oraz węglowej (^{12}C). Pozycja ramki może być zmieniana (góra-dół, obrót) przy zamkniętej komorze (rys. 14).

3.4 Rodzaje detektorów użyte w eksperymencie

W celu detekcji cząstek naładowanych w eksperymencie zastosowano 2 rodzaje detektorów:

1. półprzewodnikowe detektory krzemowe,
2. gazowe komory jonizacyjne.

Utworzono z nich pojedyncze i podwójne układy detekcyjne, które dla wygody w dalszej części pracy będą nazywane krótko detektorami pojedynczymi i podwójnymi. Informacje oraz rysunki na temat detektorów są zaczerpnięte z pracy doktorskiej [5].

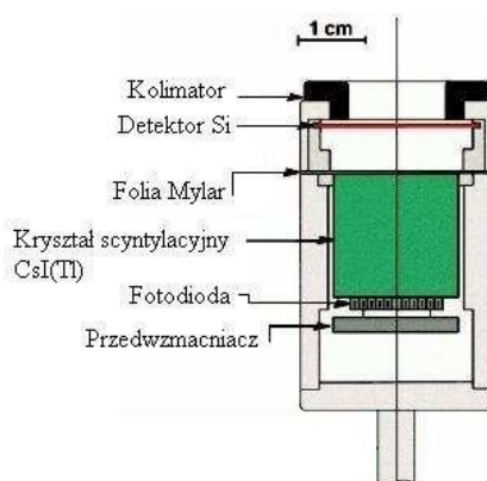
3.4 Rodzaje detektorów użyte w eksperymencie



Rysunek 14: Ramka z tarczami: złotą (^{197}Au) oraz węglową (^{12}C), umieszczona w komorze rozproszeniowej układu ICARE.

3.4.1 Detektor pojedynczy

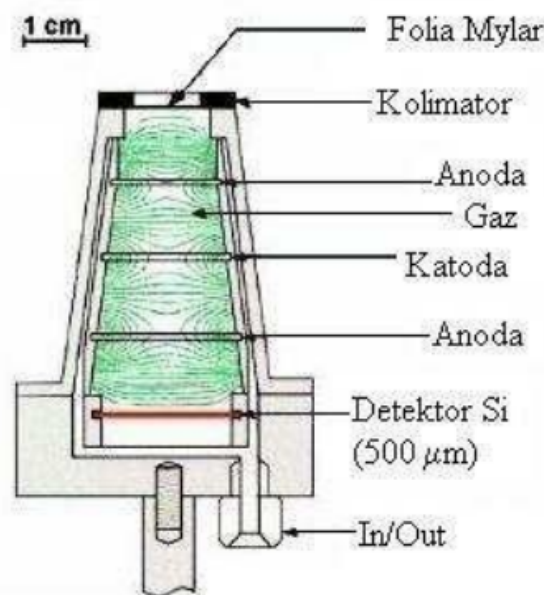
Schemat detektora pojedynczego przedstawiony jest na rys. 15. Głównym jego elementem był krzemowy detektor półprzewodnikowy o grubości 300 – 500 μm (podczas omawianego eksperymentu nie był wykorzystywany detektor scyntylacyjny, widoczny na rysunku). Grubość detektora krzemowego była wystarczająca do całkowitego zatrzymania interesujących produktów reakcji. Detektory pojedyncze przekazywały informację o całkowitej energii cząstki naładowanej E .



Rysunek 15: Schemat detektora pojedynczego (źródło: [5]).

3.4.2 Detektor podwójny

Detektor podwójny, często też nazywany teleskopem, to układ składający się z gazowej komory jonizacyjnej i półprzewodnikowego detektora krzemowego (rys. 16). Cząstka naładowana wpadała do teleskopu przez okienko wejściowe, przechodziła przez wypełnioną gazem komorę jonizacyjną i zostawała zatrzymana w detektorze krzemowym o grubości $500\ \mu\text{m}$. Elektroniczny system akwizycji rozpoczynał zbieranie danych od chwili przyścia sygnału z detektora krzemowego. Umożliwiało to identyfikację cząstek za pomocą metody $\Delta E * E$.

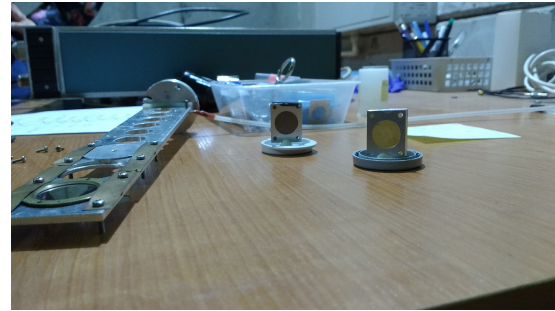
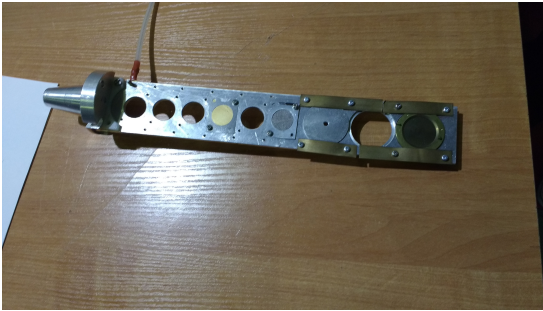


Rysunek 16: Schemat detektora podwójnego - teleskopu (źródło: [5]).

3.5 Tarcze

Tarcza - jest to specjalnie przygotowany materiał (izotop), który w trakcie pomiarów bombardowany jest przez wiązkę jonów przyspieszonych w akceleratorze (z rys. 17).

W ŚLCJ UW funkcjonuje pracownia wykonująca tarcze na potrzeby wielu eksperymentów. Tarcza może być zarówno w postaci gazu, jak też cieczy czy ciała stałego. Najczęściej, w eksperymentach fizyki jądrowej używane są tarcze w postaci ciała stałego. W zależności od wykonywanego eksperymentu, różnią się parametry tarcz: grubość, czystość (stopień wzbogacenia), obecność lub brak podkładki. Wytwarzanie tarcz wymaga dużej precyzji oraz cierpliwości, ponieważ często tarcze są wykonywane z drogich materiałów oraz muszą być bardzo cienkie (rzędu $1\ \mu\text{m} - 3\ \mu\text{m}$), co powoduje iż są one bardzo delikatne i łatwo jest je popsuć.



Rysunek 17: Tarcze: złota (4 od prawej) oraz węglowa (6 od prawej) na potrzeby doświadczenia wmontowane do ramki, która następnie była umieszczona w komorze rozproszeń.

Do wytwarzania tarcz stosuje się metody:

1. mechaniczne: walcowanie, prasowanie;
2. elektro-chemiczne: elektro-osadzanie ze środowiska wodnego lub organicznego);
3. osadzanie par materiału w wysokiej próżni.

4 Opis eksperymentu

W przeprowadzonym pomiarze wiązką ^{20}Ne o energii 50 MeV (dostarczoną z cyklotronu U200P) bombardowano tarczę wykonaną z izotopu złota ^{197}Au , a następnie - węgla ^{12}C . W eksperymencie rejestrowano energię rozproszonych jąder pocisku (^{20}Ne).

4.1 Kinematyka rozpraszania Rutherforda

Przy projektowaniu eksperymentu, w celu określenia wartości kątów, pod którymi będzie można umieścić detektory do rejestracji cząstek emitowanych podczas reakcji jąder wiązki oraz tarczy obliczono teoretyczne wartości energii emitowanych cząstek pod różnymi kątami θ . Wartości kątów wzięto z zakresu $30^\circ - 180^\circ$. Przy założeniu, iż znane są liczby masowe jąder złota ($M_2 = 79$) oraz węgla ($M_2 = 12$), jąder neonu ($M_1 = 20$), jak również energia początkowa wiązki ($T_1 = 50 \text{ MeV}$) wyznaczono energie T_3 emitowanych cząstek na podstawie wzoru 4 (źródło: [6]):

$$T_3 = T_1 \frac{M_1^2}{(M_1 + M_2)^2} \left(\cos(\theta) \pm \sqrt{\cos^2(\theta) + \frac{M_2^2 - M_1^2}{M_1^2}} \right)^2 \quad (4)$$

Okazało się, że w przypadku tarczy złotej - możliwe jest ustawienie detektorów pod dowolnymi kątami. W przypadku kątów $\theta > 90^\circ$ obserwowane by było rozpraszanie wsteczne (rejestrowane również w oryginalnym eksperymencie Rutherforda). Natomiast dla tarczy węglowej, obserwacja cząstek mogła zajść tylko przy ustawieniu detektorów pod kątami, nieprzekraczającymi wartości 36° . W przeciwnym przypadku, nie zaszłaby reakcja pomiędzy jądrami węgla ^{12}C oraz neonu ^{20}Ne , co oznacza, iż nie byłoby produktów reakcji, więc nie dałoby się nic zaobserwować.

5 Analiza danych

5.1 Kalibracja detektorów

5.1.1 Kalibracja energetyczna detektorów pojedynczych

Jednym z elementów niezbędnych do przeprowadzenia eksperymentu Rutherforda było wykonanie kalibracji energetycznej detektorów pojedynczych: d8 oraz d18, jak również monitorów: m15, m16 - detektorów umieszczonych na stałych pozycjach pod kątem 15° względem osi wiązki. Do tego celu użyto generatora impulsów (BWC PB-5 Precision Pulse Generator/Berkeley Nucleonics Group) oraz radioaktywnego źródła ^{241}Am , emitującego cząstki α .

Aby wykonać kalibrację energetyczną detektorów cząstek źródło ^{241}Am umieszczono w pozycji tarczy (na tzw. holderze) - w tym przypadku źródło zastępowało wiązkę. Reakcja nie zachodziła, jednak źródło emitowało cząstki α , które to rejestrowano w doświadczeniu. Zgodnie ze schematem rozpadu 18 najsilniejszą linią (najbardziej intensywną) w obserwowanym widmie pochodzącą z rozpadu była linia, odpowiadająca emisji cząstki α o energii $E_\alpha = 5.476 \text{ MeV}$ (84.4 %). Detektory używane w doświadczeniu należą do klasy detektorów proporcjonalnych. Oznacza to tyle, że podczas gdy cząstka naładowana przechodzi przez taki detektor, traci ona część swojej energii na skutek oddziaływania z obszarem czynnym detektora (krzemem lub gazem). Z powodu strat energii tworzy się pewna liczba par jonów, która jest **proporcjonalna** do ładunku zbieranego przez taki detektor. Ładunek, z kolei, można przełożyć na impuls prądowy lub napięciowy, który też będzie proporcjonalny do energii zgromadzonej cząstki.

W celu wykonania kalibracji dzięki użyciu generatora impulsów mierzono sygnał odpowiedzi z odpowiednich detektorów: d8, d18 oraz monitorów: m15, m16. Wartości amplitudy napięcia podawanego z generatora były z zakresu (0 – 3.5 V). Umożliwiło to wyznaczenie funkcji, która przyporządkowywała numer kanału odpowiedniej wartości amplitudy sygnału (napięcia U [mV]). W Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów zazwyczaj w celach kalibracji detektorów używano funkcji 2 rodzajów:

1. potęgowej:

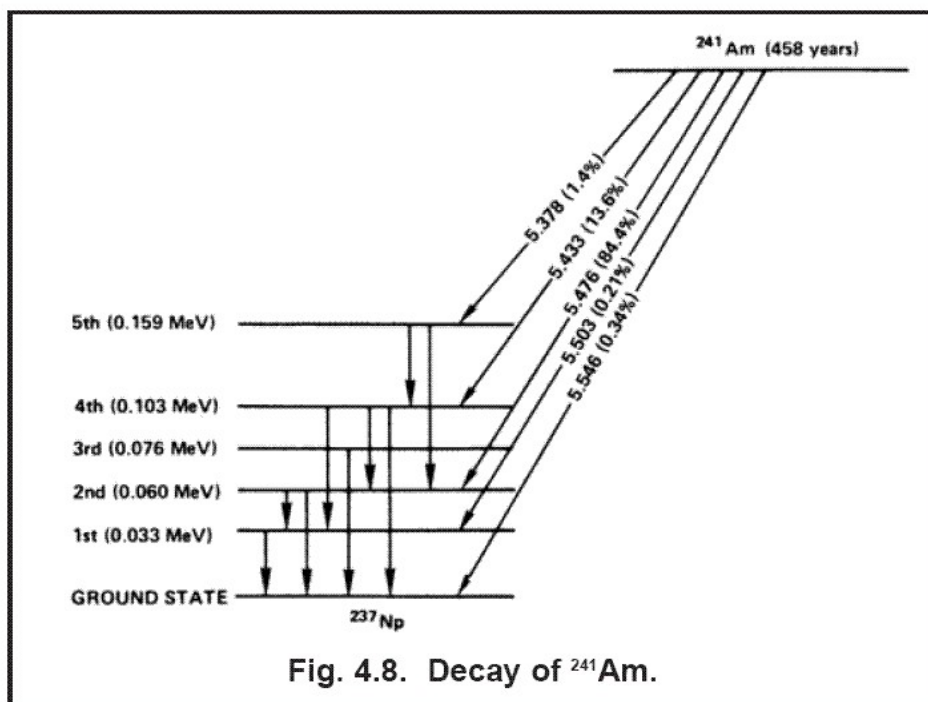
$$y = ax^2 + c; \quad (5)$$

2. pierwiastkowej:

$$y = a\sqrt{x} + c. \quad (6)$$

W równaniach (5, 6): x - numer kanału, y - wartość napięcia podanego z generatora, a , c - współczynniki dopasowania funkcji o odpowiedniej postaci.

5.1 Kalibracja detektorów



Rysunek 18: Schemat rozpadu ^{241}Am .

W trakcie wykonywania danego ćwiczenia ze strony studentów powstał pomysł dopasowania funkcji o nieznanym potęgze w celu poprawienia jakości kalibracji. Postać dopasowywanej funkcji przedstawia następujący wzór:

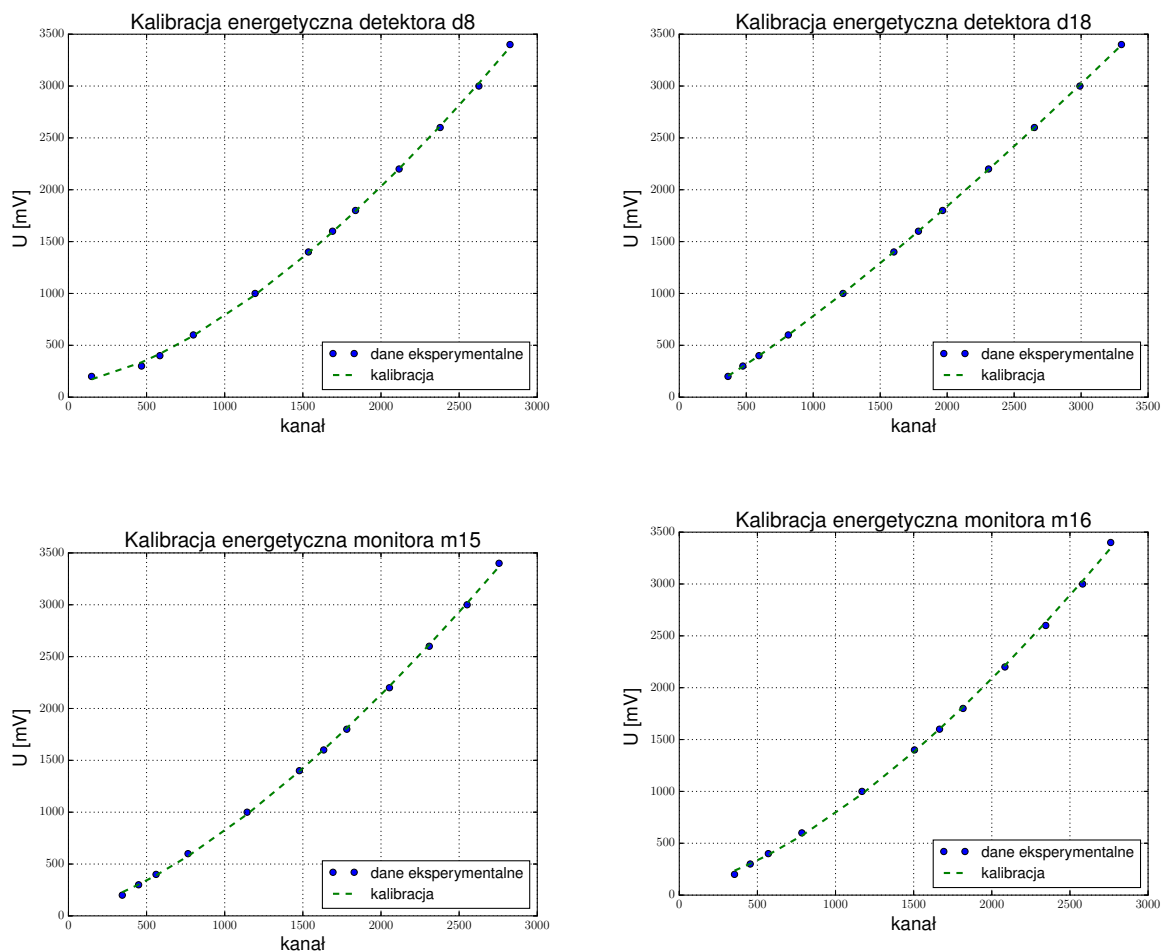
$$y = ax^b + c. \quad (7)$$

We wzorze 7: x - numer kanału, y - wartość napięcia podanego z generatora, a , b , c - współczynniki dopasowania.

W celu wykonania dopasowania funkcji 7 do danych pomiarowych: 4 zestawy odpowiednio dla detektorów oraz monitorów: d8, d18, m15, m16 napisano skrypt, używając języka programowania *Python* oraz specjalnie do tego przeznaczonej biblioteki *SciPy* [7]. Jak się okazało, nowe dopasowania, zgodne ze wzorem 7 dały dużo lepsze dopasowania do danych pomiarowych aniżeli funkcje, używane wcześniej w laboratorium, opisane wzorami: 5 oraz 6. Weryfikacja jakości dopasowanych funkcji do danych eksperymentalnych odbyła się na podstawie testu χ^2 . Skrypt wykonujący kalibrację detektorów poprzez dopasowanie odpowiednich funkcji można znaleźć w załączniku do niniejszej pracy (autor skryptu: Monika Seniut).

Wykresy przedstawiające dopasowanie funkcji potęgowej do punktów pomiarowych dla każdego z detektorów, jak również parametry dopasowań są przedstawione na rysunku 19 oraz w tabeli 1.

5.1 Kalibracja detektorów



Rysunek 19: Kalibracja detektorów: d8, d18 oraz monitorów: m15, m16 z użyciem funkcji "fitującej" postaci 7.

Detektor	a	b	c
d18	$0,199 \pm 0,009$	$1,204 \pm 0,005$	-36 ± 6
d8	$0,014 \pm 0,003$	$1,556 \pm 0,026$	139 ± 18
m15	$0,030 \pm 0,006$	$1,466 \pm 0,026$	72 ± 20
m16	$0,019 \pm 0,006$	$1,520 \pm 0,039$	93 ± 29

Tabela 1: Wyniki dopasowania funkcji $y = ax^b + c$ dla detektorów używanych w eksperymencie.

Drugim etapem kalibracji było wyznaczenie współczynnika wzmocnienia, który by pozwolił na wyznaczenie rzeczywistej energii cząstek. W tym celu zarejestrowano widmo cząstek α pochodzących ze źródła ^{241}Am . Na podstawie wiedzy o numerze kanału (x_α), odpowiadającym środkowi peaku cząstek α (z dopasowania rozkładu Gaussa wykonanego przy użyciu programu dostępnego w laboratorium) oraz energii tych cząstek $E_\alpha = 5.476 \text{ MeV}$ obliczono współczynnik

5.2 Pomiar energii wiązki

wzmocnienia k dla każdego z detektorów korzystając ze wzoru:

$$k = \frac{E_\alpha}{U_\alpha} = \frac{E_\alpha}{ax_\alpha^b + c} \quad (8)$$

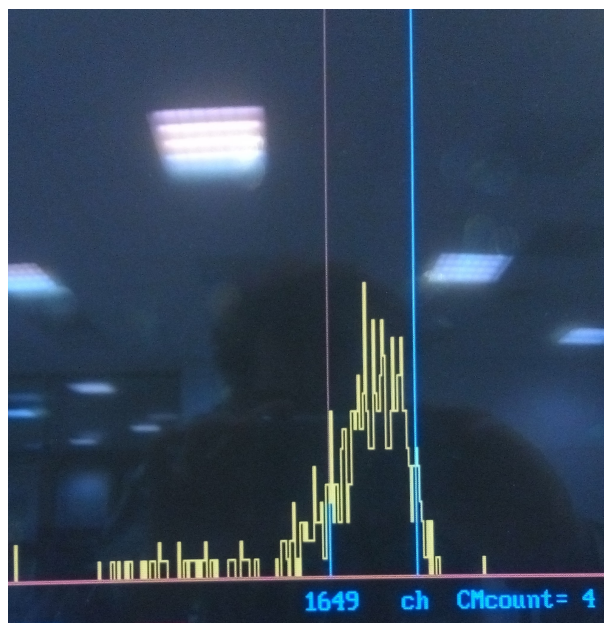
Wyznaczone wartości współczynników wzmocnienia k podano w tabeli 2.

detektor	kanał	U [mV]	k [MeV/mV]
d18	367.2	207.158	0.026
d8	376.2	279.266	0.020
m15	373.1	247.677	0.022
m16	356.5	237.963	0.023

Tabela 2: Współczynnik wzmocnienia k dla detektorów, użytych w doświadczeniu.

5.2 Pomiar energii wiązki

Energię wiązki wyznaczono na podstawie danych, uzyskanych z monitorów - detektorów nieruchomych, umieszczonych pod kątem 15° względem osi wiązki. Widmo uzyskane dla jednego z monitorów (m15) przedstawione jest na rysunku 20.



Rysunek 20: Widmo rozpraszania jąder ^{20}Ne na tarczy ^{197}Au .

Pokazuje ono, iż główna linia widma jest niesymetryczna, co można wytłumaczyć tym, że zachodzą tutaj 2 rodzaje rozpraszania:

- elastyczne (bardziej znaczące);
- nieelastyczne - związane ze wzbudzeniami jąder tarczy i pocisku.

5.3 Pomiar grubości tarczy

Do takiego „peaku” była dopasowywana funkcja Gaussa, uwzględniająca przede wszystkim prawe zbocze, odpowiadające rozproszeniu elastycznemu. Na podstawie uzyskanej wcześniej kalibracji dla konkretnego monitora obliczono energię linii elastycznego rozpraszania, a następnie z kinematyki reakcji wyznaczono energię wiązki. Jako dokładność wyznaczenia energii wiązki przyjęto szerokość połówkową linii rozpraszania (z dopasowania Gaussa).

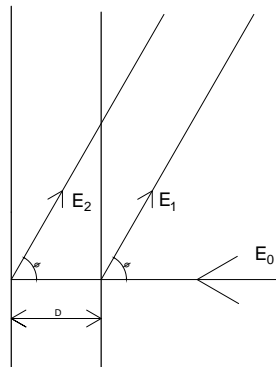
Otrzymana energia wiązki: $51,91(+0,46; -0,15) \text{ MeV}$. Jak wspomniano na początku, energia wiązki wynosiła 50 MeV , z czego wynika, iż wartość energii wiązki wyznaczona w eksperymencie jest bliska wartości rzeczywistej. Można stąd wnioskować, że wcześniejsza kalibracja detektorów została wykonana poprawnie.

5.3 Pomiar grubości tarczy

Dzięki rejestracji odbicia wstecznego (wiązka była odbijana od tarczy pod kątami $\theta > 90^\circ$) wyznaczono również grubość tarczy złota ^{197}Au , użytej w eksperymencie w celu porównania jej z wartością rzeczywistą. Grubość tarczy (x) wyznaczono ze wzoru:

$$x = \frac{\Delta E}{\rho \left(\left. \frac{dE}{dx} \right|_1 + \left. \frac{dE}{dx} \right|_2 \frac{1}{\cos(\theta)} \right)} \quad (9)$$

Gdzie: ΔE - wartość energii zarejestrowana w komorze jonizacyjnej, $\rho = 19300 \text{ mg/cm}^3$ - gęstość złota, $\left. \frac{dE}{dx} \right|_1$ - straty energii w punkcie 1, $\left. \frac{dE}{dx} \right|_2$ - straty energii w punkcie 2, $\theta = 120^\circ$ - kąt odbicia od tarczy.

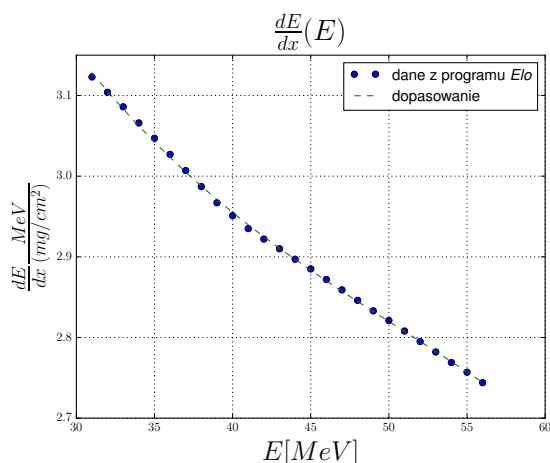


Rysunek 21: Schemat ilustrujący zjawisko odbicia wiązki od tarczy, ułatwiający wykonanie odpowiednich rachunków do obliczenia grubości tarczy (D).

Wyniki obliczeń przedstawiono poniżej.

Tabele 3 i 4 przedstawiają porównanie grubości oraz gęstości powierzchniowej tarczy ^{197}Au wyznaczonych w trakcie warsztatów z grubością teoretyczną oraz gęstością powierzchniową

5.4 Porównanie wyników dla tarczy węglowej oraz tarczy ze złota



Rysunek 22: Wykres służący do wyznaczenia grubości tarczy ze złota, użytej w eksperymencie.

Gęstość powierzchniowa tarczy [$\frac{\mu g}{cm^2}$]	
Teoria	100-150
Pomiar	129 ± 23

Tabela 3: Pomiar gęstości powierzchniowej tarczy $^{197}_{79}Au$

Grubość tarczy [μm]	
Teoria	0,06731
Pomiar	$0,066 \pm 0,008$

Tabela 4: Pomiar grubości tarczy $^{197}_{79}Au$

teoretyczną. Otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników. Dokładna wartość teoretyczna grubości tarczy nie była określona jednoznacznie, tylko w pewnym przedziale, a wartość grubości tarczy wyznaczona podczas eksperymentu okazała się leżeć dokładnie w środku tego przedziału.

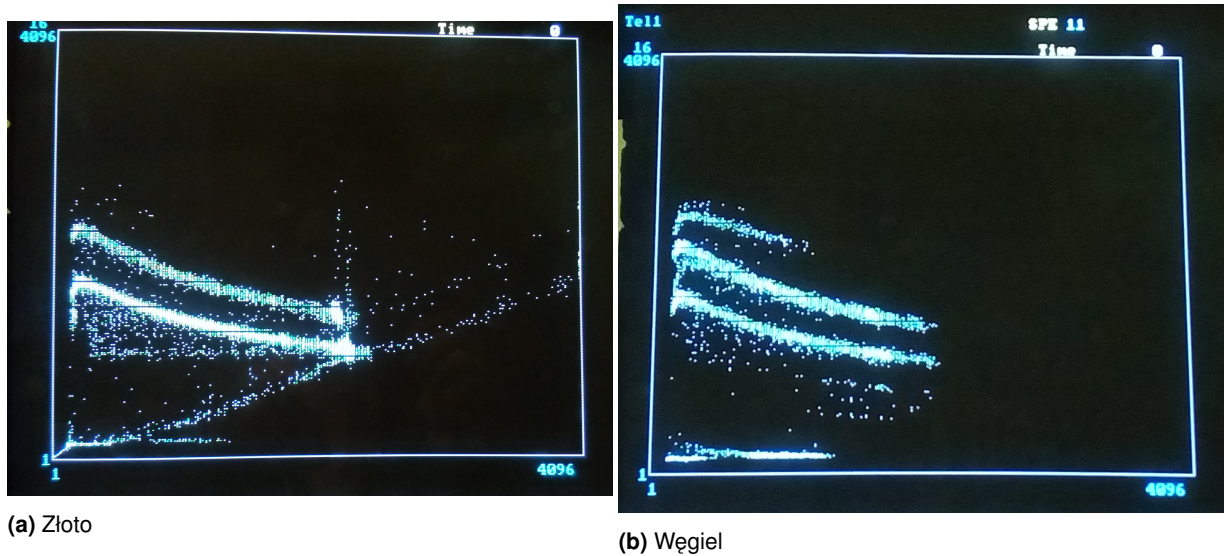
5.4 Porównanie wyników dla tarczy węglowej oraz tarczy ze złota

Zastosowanie teleskopów w przeprowadzonym eksperymencie umożliwiło zaobserwowanie ciekawych zjawisk, związanych ze zjawiskiem pokonania bariery kulombowskiej. Zmierzono dwuwymiarowe widma produktów rozpraszania i reakcji dla 2 przypadków:

1. wiązka ^{20}Ne + tarcza ze złota $^{197}_{79}Au$, wartość bariery kulombowskiej: $BC_{LAB} = 117 MeV$;
2. wiązka ^{20}Ne + tarcza węglowa $^{12}_6C$, wartość bariery kulombowskiej: $BC_{LAB} = 36 MeV$.

Na dwuwymiarowych wykresach, przedstawionych na rysunku 23 na osi rzędnych jest zaznaczona strata energii zarejestrowana w komorze jonizacyjnej ΔE , natomiast na osi odciętych energia zarejestrowana przez detektor krzemowy $E_{tot} + \Delta E$ (energia całkowita). Każda z krzywych hiperbolicznych na takich widmach odpowiada innemu izotopowi, czyli pierwiastkowi o innej liczbie

5.4 Porównanie wyników dla tarczy węglowej oraz tarczy ze złota



Rysunek 23: Porównanie dwuwymiarowych widm produktów rozpraszania i reakcji, zarejestrowanych przez teleskopy dla tarcz: węglowej $^{12}_6C$ oraz złotej $^{197}_{79}Au$.

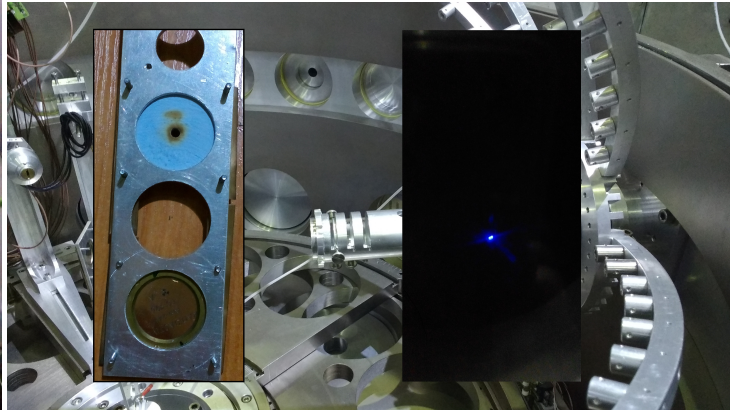
atomowej Z . Z powodu ograniczonej ilości czasu nie wykonano kalibracji teleskopów, więc nie było możliwości zidentyfikowania określonych pierwiastków. Jednakże, zauważono, iż krzywe odpowiadające izotopom o wyższej liczbie atomowej Z znajdują się wyżej na zarejestrowanych dwuwymiarowych wykresach (widmach produktów rozpraszania i reakcji), ponieważ ze względu na większą liczbę protonów w jądrze są one cięższe, co oznacza, iż straty energii (wartości na osi rzędnych) też będą stosunkowo większe.

Porównując wyniki dla tarcz: złotej $^{197}_{79}Au$ oraz węglowej $^{12}_6C$ zauważono, że z powodu różnej liczby protonów (79 oraz 6) w jądrze, pole, które jest przez nie wytwarzane ma inną wartość. Wynika stąd, iż w przypadku tarczy węglowej ze względu na dużo mniejszą liczbę protonów pole będzie słabsze, a więc dojdzie do prawdziwego zderzenia jąder, zostanie pokonana bariera kulombowska, co z kolei będzie przyczyną powstania nowych pierwiastków. Nowo powstałe pierwiastki będą miały inną liczbę atomową Z i można je będzie rejestrować na dwuwymiarowych wykresach (widmach produktów rozpraszania - najwyższa krzywa dla przypadku b z rys. 23).

5.5 Obserwacja wiązki ^{20}Ne

5.5 Obserwacja wiązki ^{20}Ne

Warto zaznaczyć, iż zespół pracujący przy układzie eksperymentalnym ICARE jako jedyny miał szansę zobaczenia prawdziwej wiązki, doprowadzonej z cyklotronu do układu pomiarowego ICARE.



(b) Jonowód, wiązka oraz luminofor ze "szparką", wypaloną przez wiązkę.

(a) Okienko komory rozproszeniowej układu pomiarowego ICARE.



(c) Wiązka ^{20}Ne .

Rysunek 24: Zdjęcia obrazujące wiązkę zaobserwowaną przez jedno z okienek komory rozproszeniowej ICARE podczas wykonywania eksperymentu.

6 Podsumowanie i wnioski

Podczas warsztatów *Akceleracji i Zastosowań Ciężkich Jonów* organizowanych przez Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego (ŚLCJ UW) przeprowadzono eksperyment, który miał na celu pomiar energii rozproszonych ciężkich jonów. Na potrzeby eksperymentu wiązkę jonów ^{20}Ne przyspieszono w warszawskim cyklotronie U200P do energii 50 MeV , a następnie bombardowano nią dwie tarcze (^{197}Au i ^{12}C). Do rejestracji rozpraszanych jonów zastosowano zestaw detektorów układu ICARE. W czasie trwania warsztatów zebrane dane doświadczalne zostały przeanalizowane przez 4-osobowy zespół studentów. Sformułowano następujące wnioski:

- (A) Powtórzono eksperyment Rutherforda (z roku 1911) w obecnych warunkach laboratoryjnych.
- (B) Zbadano zjawisko rozpraszania Rutherforda - rejestrowano **energię rozproszonych jąder** pocisku (^{20}Ne) podczas zderzenia wiązki ^{20}Ne o energii 50 MeV z tarczami: złotą ^{197}Au , a następnie - węglową ^{12}C .
- (C) Zaobserwowano **rozpraszanie** jąder pocisku (wiązki ^{20}Ne) podczas zderzenia z tarczami złotą ^{197}Au oraz węglową ^{12}C na podstawie zmiany wartości energii wiązki w zależności od kąta rozpraszania. Pozwoliło to na potwierdzenie słuszności modelu Rutherforda, który zakłada, iż ładunek dodatni zgromadzony jest w niewielkim, ale jednocześnie gęstym jądrze gromadzącym większość masy atomu.
- (D) Zastosowano nową metodę **kalibracji** detektorów, która może być użyteczna w przyszłości.
- (E) Dzięki **parametryzacji** wykładnika potęgi metoda kalibracji jest bardziej elastyczna.
- (F) Wyznaczono **energię** wiązki i **grubość** tarczy dzięki rejestracji odbicia wstecznego.
- (G) Zgodnie z obliczeniami zaobserwowano pokonanie **bariery kulombowskiej** węgla i przez reakcje jądrowe powstanie nowych pierwiastków.

LITERATURA

Literatura

- [1] “Ogólnopolskie warsztaty akceleracji i zastosowań ciężkich jonów.” <http://www.old.slj.uw.edu.pl/pl/66.html>. 3
- [2] “Środowiskowe laboratorium ciężkich jonów.” <http://www.old.slj.uw.edu.pl/pl/0.html>. 3
- [3] “Modele atomów thomsona i rutherforda.” http://old.pskgu.ru/ebooks/zsm_3/zs3_gl12_43.pdf. 6
- [4] “Doświadczenie rutherforda.” <http://rutherford.pl/informacje/doswiadczenie-rutherforda/>. 9
- [5] I. Strojek, *Wpływ struktury jądra ^{20}Ne na reakcje z jego udziałem*. PhD thesis, 2012. 15, 16, 17
- [6] A. Strzałkowski, *Wstęp do fizyki jądra atomowego*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1979. 18
- [7] “Scipy - biblioteka w języku programowania python do zastosowań naukowych.” <https://www.scipy.org/>. 20