



Dr hab. Piotr Bednarczyk,
profesor IFJ PAN.

Kraków, 06.10.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandry Anny Ciemny pt.:

„Exotic decay modes of medium-mass proton drip-line nuclei”

Przedstawiona do oceny praca doktorska Pani mgr Aleksandry Ciemny została wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr hab. Chiary Mazzocchi, profesor tej uczelni.

Temat pracy dotyczy kluczowego aspektu badań współczesnej fizyki jądrowej jakim jest określenie granic stabilności materii jądrowej i własności egzotycznych jąder z pobliża linii odpadania protonu. W szczególności, praca koncentruje się na niezwykle rzadkim zjawisku- radioaktywności protonowej, opóźnionej rozpadem beta, którego systematyczne badania doświadczalne prowadzone są w światowych laboratoriach akceleratorowych, z wiodącą rolą warszawskich fizyków. Uczestnicząc w pracach realizowanych w ramach kilku projektów badawczych grupy UW, Doktorantka podjęła ważny temat i osiągnęła wyniki o zasięgu i znaczeniu międzynarodowym. Świadczy o tym cykl czterech artykułów na których oparta jest jej dysertacja, których Pani Ciemny jest pierwszą autorką. Prace te opublikowano w wysoko punktowanych, międzynarodowych czasopismach.

1. Kontekst podjętej tematyki badań

Jądra atomowe leżące na rubieżach tablicy nuklidów, w których relacja liczby neutronów i protonów N/Z znacznie różni się od wartości charakteryzujących stabilne izotopy pierwiastków występujących w naturze, są priorytetowym celem prowadzonych ostatnio badań eksperymentalnych i teoretycznych fizyki jądrowej. Własności tych egzotycznych nuklidów m.in.: ich kształty, struktura stanów wzbudzonych, czy rozpady radioaktywne, często odbiegają od prawideł znanych dla jąder leżących w pobliżu ścieżki stabilności β . Wiąże się to z obsadzaniem w nich specyficznych, rzadkich konfiguracji nukleonów, dających wkład do średniego pola sił jądrowych, o spłyconej studni potencjału i odmiennego kształtu względem jąder stabilnych. Dodatkowo, na cechy tych luźno związanych jąder mogą wpływać sprzężenia ze stanami rezonansowymi, leżącymi w pobliższym energetycznie kontinuum.

Eksperymenty prowadzone w obszarze jąder wieńczących dolinę stabilności, dostarczają danych pomocnych w testowaniu i weryfikacji różnych elementów hamiltonianu jądrowego, które choć zanedbywalne w opisie silnie związanych jąder stabilnych, mogą mieć decydujący wpływ na strukturę i własności egzotycznych nuklidów. Badania te są zatem konieczne do sformułowania uniwersalnej teorii sił jądrowych,

Wyniki doświadczeń z jądrami z pobliża linii odpadania neutronu bądź protonu, są kluczowe także w modelowaniu procesów astrofizycznych, m.in. wychwytu prędkich neutronów (proces r) i protonów (proces rp), ważnych w gwiazdnej nukleosynzie ciężkich pierwiastków.

Dotarcie do jąder znajdujących się na granicy stabilności wymaga zastosowania wyrafinowanych metod eksperymentalnych, w szczególności nowych technik akceleracji i separacji ciężkich jonów, prowadzących do uzyskania tzw. wiązek radioaktywnych. W odróżnieniu od wiązek stabilnych jonów, bezpośrednio przyspieszanych w tradycyjnych akceleratorach, do otrzymania wiązki radioaktywnej stosuje się m.in. metodę, w której pociski o energiach relatywistycznych, kilkadziesiąt-



kilkaset MeV na nukleon, rozbijane są w kolizji na lekkich tarczach, a wiązkę wtórną formuje się, w locie ze strumienia fragmentów wybranych w separatorze masowym (tzw. metoda *in-flight*). Metoda ta, stosowana jest z powodzeniem w największych centrach akceleratorowych na świecie, m.in.: w GSI w Niemczech, GANIL we Francji, MSU w USA czy RIKEN w Japonii. Pozwala wytwarzać wiązki niestabilnych izotopów większości pierwiastków, o dużym niedoborze jak i nadmiarze neutronów, oraz o krótkim czasie półżycia. Wyselekcjonowane w ten sposób nuklidy, po skierowaniu do stanowiska doświadczalnego, są obiektem badania, m.in. pod kątem ich rozpadów radioaktywnych, mogą być także użyte do wywołania wtórnych reakcji jądrowych.

Wykorzystując neutronodeficytowe wiązki radioaktywne, eksperymentalnie zidentyfikowano linię odpadania protonu, sięgającą izotopów bizmutu ($Z=83$). Natomiast po przeciwnej stronie ścieżki stabilności, znacznie bardziej oddalona i rozmyta linia odpadania neutronu wyznaczona jest jedynie po ciężkie izotopy neonu ($Z=10$).

Do odkrycia wielu nietrwałych jąder, bogatych w protony, przyczyniły się prowadzone już od przeszło 60 lat badania nad radioaktywnością p . W niektórych emiterach protonów zidentyfikowano również rozpady stanów wzbudzonych, zachodzące z emisją jednego bądź kilku protonów, poprzedzoną promieniowaniem β^+ (β -delayed particles).

W badaniach nad nowymi modami rozpadów radioaktywnych z emisją protonów, bardzo aktywnie uczestniczą polscy fizycy, w szczególności reprezentujący środowisko skupione na Uniwersytecie Warszawskim. Grupa ta jako jedna z pierwszych w świecie zaobserwowała rozpady $2p$ stanu podstawowego oraz opóźnione promieniowanie β - $3p$, z ubożego w neutrony izotopu żelaza ^{45}Fe , leżącego na linii odpadania protonu. Do osiągnięć warszawskich fizyków walcie przyczyniło się opracowanie przez nich koncepcji i wykonanie detektora- OTPC, dedykowanego identyfikacji egzotycznych rozpadów i obrazowaniu trajektorii naładowanych cząstek, emitowanych w tych procesach.

Kompetencje i instrumentarium w dyspozycji naukowców z tej grupy, pozwalają oczekiwać ich kolejnych sukcesów w doświadczeniach nad radioaktywnością protonową. Przykładem takich badań jest temat podjęty w pracy doktorskiej Pani Aleksandry Ciemny.

2. Struktura pracy

Praca napisana jest w języku angielskim, liczy 88 stron. Rozpoczyna się spisem treści, streszczeniem i jego tłumaczeniem na język polski. Rozprawa ma standardową strukturę złożoną z 6 głównych rozdziałów z podrozdziałami, które zawierają: i) Wstęp, ii) Opis zastosowanej metody badawczej, iii) Opis wykonanych eksperymentów, iv) Przedstawienie wyników badań neutronodeficytowych izotopów krzemu, v) Przedstawienie wyników badań neutrono-deficytowych izotopów germanu i cynku, vi) Podsumowanie. W dalszej kolejności w pracy znajdują się wykazy zawierające odnośniki do 65 rysunków i 11 tabel, zamieszczonych w tekście. Pracę kończy bibliografia, licząca 76 pozycji.

3. Omówienie głównych paragrafów pracy

I) We Wstępie Autorka podaje garść informacji dotyczących topografii doliny stabilności, przytacza tu przybliżone liczby znanych i przewidywanych izotopów pierwiastków występujących w przyrodzie. Zamieszcza pół-empiryczny wzór Bethego-Weizsackera na energię wiązania jądra i ilustruje na wykresie, wynikającym z tej formuły, paraboliczny przebieg energii wiązania pojedynczego nukleonu w izobarach o masie $A=58$. Na tym przykładzie klasyfikuje jądra stabilne i radioaktywne, podlegające przemianom β^+ i β^- . Przedstawia tu także aktualną wersję mapy znanych nuklidów, zaczerpniętą z serwisu NNDC, z zaznaczonymi obszarami jąder wykazujących różne rodzaje radioaktywności.

W kolejnych punktach Autorka koncentruje się w na podstawowym opisie rozpadu β . Podaje formuły na energię (ciepło reakcji- Q) uwolnioną w rozpadach z emisją elektronu (β^-), pozytonu (β^+)



i w konkurencyjnym procesie wychwytu elektronu (EC), wyrażone poprzez masy atomowe jąder biorących udział w tych przemianach. Przedstawia zaczerpnięty z bazy danych NNDC, rozkład wartości Q_{EC} naniesiony na fragment mapy nuklidów.

Następnie Autorka podaje analogiczne wyrażenie na energię separacji protonu S_p , po czym definiuje linię odpadania protonu przebiegającą przez nuklidy gdzie $S_p=0$, co również ilustruje odpowiednią reprezentacją mapy nuklidów.

W kolejnym podrozdziale zacytowano formułę na wielkość $\log ft$, wyrażającą nasilenie przejścia β , wiążącą go ze zredukowanymi prawdopodobieństwami przejść typu Fermiego i Gamowa-Tellera. Następnie Autorka zamieszcza tabelę z regułami wyboru (zmiana spinu, izospinu i parzystości) dla dozwolonych i zabronionych przejść obu rodzajów. W tym miejscu podkreśla, że przejścia typu Fermiego zachodzą pomiędzy izobarycznymi stanami analogowymi (IAS), które odpowiadają takiej samej konfiguracji nukleonów w jądrach należących do multipletów izospinowych.

Ogólne wprowadzenie kończy paragraf opisujący zjawisko, które jest głównym tematem pracy. Ma ono miejsce w rozpadzie jąder leżących w pobliżu ścieżki odpadania protonu, gdzie w związku z dużym ciepłem reakcji $Q_{\beta+/EC}$ i jednocześnie niską energią wiązania protonu S_p , może dochodzić do przejścia β poprzedzającego emisję cząstek naładowanych, m.in.: $\beta-p$, $\beta-2p$, $\beta-3p$, mechanizm ten zilustrowany jest schematycznym rysunkiem.

W dalszych dwóch podrozdziałach Autorka reasumuje stan wiedzy na temat ubogich w neutrony izotopów krzemu $^{22,23}\text{Si}$, najbliższych znanych nuklidach o składowej izospinu odpowiednio $T_z = -3$ i $T_z = -5/2$, które są przedmiotem jej zainteresowania. Podaje zmierzone wartości czasów półzaniku tych nuklidów, a na schematach i w tabelach zestawia dane eksperymentalne o znanych kanałach ich rozpadu, zachodzących poprzez opóźnioną emisję protonów: $\beta-p$ i $\beta-2p$, o różnych energiach.

Innej parze badanych w pracy izotopów germanu $^{59,60}\text{Ge}$ poświęcony jest kolejny paragraf wstępu. Dla lżejszego z tych jąder, niezidentyfikowanego do czasu eksperymentu opisanego w dalszej części pracy, Autorka przytacza wyniki przewidywań energii separacji protonu i diprotonu S_p i S_{2p} . Sugeruje że, emisja $2p$ może być preferowanym kanałem rozpadu ^{59}Ge . W przypadku ^{60}Ge , Autorka podsumowuje dotychczasowe próby wytworzenia tego egzotycznego nuklidu. W tabeli przedstawia także wartości energii $Q_{\beta+/EC}$ dla $^{59,60}\text{Ge}$ i energie separacji różnych sekwencji cząstek, w jądrach-córkach: $^{59,60}\text{Ga}$, które mogłyby być emitowane w ich radioaktywnych rozpadach.

Autorka podsumowuje własności kolejnego egzotycznego jądra- ^{58}Zn , którego badania podjęła w pracy. Podaje zmierzone wcześniej wartości czasów połowicznego zaniku i charakteryzuje znane sposoby rozpadu tego jądra poprzez przejścia Fermiego i Gamowa-Tellera. Swoje zainteresowanie tym nuklidem uzasadnia jego rolą w procesie wychwytu protonu- rp .

Na zakończenie wstępu umieszczono charakterystykę kolejnych rozdziałów dysertacji. Autorka wymienia tu też cztery publikacje (trzy artykuły w *Physical Review C* i jeden w *European Physical Journal A*), których jest pierwszą autorką, i na podstawie których oparta jest jej praca doktorska.

II) Druga część pracy dotyczy zastosowanej przez Autorkę metodyki prowadzenia badań eksperymentalnych.

Na początku tego rozdziału, Pani Ciemny wspomina rodzaje reakcji jądrowych zachodzących w zakresie energii od bariery Kulombowskiej: kilka MeV na nukleon, aż po energie relatywistyczne, rzędu GeV na nukleon. Więcej uwagi poświęca reakcjom fragmentacji, stosowanym w produkcji wiązek radioaktywnych, metodą *in-flight*. Przytacza parametryczne wyrażenie na przekrój czynny dla tej reakcji, w funkcji liczb masowych uczestników kolizji. Wymienia także inne warianty szacowania przekrojów czynnych na produkcję rezyduów w kolizjach relatywistycznych, ciężkich jonów: semi-empiryczną formułę *EPAX3* czy kod Monte-Carlo *ABRABLA*.

Dalej Autorka omawia metody wytwarzania wiązek radioaktywnych jonów: *ISOL* i *in-flight*, co ilustruje odpowiednimi schematami. Dokładniej dyskutuje tę drugą metodę, stosowaną do separacji prędkich wiązek jonów, wytwarzanych w reakcjach fragmentacji. Wykorzystuje się w niej kombinację magnetycznego odchyłania trajektorii lotu i indukowania, za pomocą degradatora, dyspersji energii



(tzw. metoda $B\rho\text{-}\Delta E\text{-}B\rho$). Autorka przytacza tu garść standardowych formuł przydatnych do wyliczania trajektorii jonów i pokazuje schemat typowego separatora fragmentów opartego na tej zasadzie.

Pani Ciemny podkreśla, że wtórna wiązka jonów po przejściu przez separator wciąż nie jest monoizotopowa. Fragmenty o różnej masie i ładunku, docierające do płaszczyzny ogniskowej, można zidentyfikować poprzez dodatkowy pomiar czasu przelotu (ToF) i określenie ich prędkości, oraz strat energii ΔE , co obrazuje diagram $\Delta E\text{-}ToF$, wykonany dla produktów reakcji fragmentacji wiązki ^{78}Kr . Autorka zaznacza, że jeśli brak pomiaru czasu przelotu wiązki, to alternatywnie, do jednoznacznej identyfikacji jonów, można wykorzystać zależność ich zasięgu (R) od straty energii, co także pokazane jest na wykonanych przez nią wykresach.

Ważnym wątkiem tej części pracy jest prezentacja komory projekcji czasowej- OTPC, warszawskiego detektora służącego do wizualizacji, w trzech wymiarach, trajektorii implantowanych, radioaktywnych fragmentów, oraz naładowanych produktów ich rozpadu. Osiąga się to poprzez kombinację obrazu z kamery CCD (pozycja $x\text{-}y$) i czasu dryfu elektronów, wywołujących w pobliżu anody błysk światła, rejestrowany przez fotopowielacz (pozycja z). Opis komory OTPC i wyjaśnienie zasady jej działania, zilustrowane są poglądowymi schematami i szeregiem fotografii tego urządzenia. Pokazane są także przykładowe przebiegi sygnałów z fotopowielacza i obrazy z kamery CCD, wywołane rejestracją jonów i protonów. Zamieszczono także krótki paragraf wyjaśniający sposób określenia prędkości dryfu elektronów w gazie wypełniającym komorę, niezbędny do kalibracji pomiaru współrzędnej z .

III) Trzecia część pracy zawiera opis dwóch eksperymentów przeprowadzonych z udziałem Autorki w laboratoriach uniwersytetów w Teksasie (TAMU) i Michigan (MSU).

Pomiar wykonany w TAMU poświęcony był badaniu rozpadów radioaktywnych ubogich w neutrony izotopów krzemu $^{22,23}\text{Si}$, produktów fragmentacji stabilnej wiązki ^{28}Si przy energii 45 A·MeV. Do selekcji i implantacji radioaktywnych fragmentów wykorzystano tam separator MARS, w którego ognisku, za degradatorem energii, umieszczono komorę OTPC, użytą również do wyznaczenia zasięgu jonów.

W eksperymencie wykonanym w MSU, badano produkty fragmentacji wiązki ^{78}Kr , przyspieszonej do energii 140 A·MeV, w szczególności leżące na ścieżce odpadania protonu izotopy germanu $^{59,60}\text{Ge}$, które wybierano w separatorze A1900. Także i w tym doświadczeniu do implantacji produktów reakcji i rejestracji produktów ich rozpadu posłużono się detektorem OTPC.

Autorka opisuje obydwa układy eksperymentalne, sposób ich ustawienia, w celu selekcji odpowiednich fragmentów (m.in. przez dobór szczelin) i metodę rejestracji danych. Informacje te ilustruje zmierzonymi rozkładami pozwalającymi, na identyfikację jonów docierających do płaszczyzny fokalnej separatorów: $\Delta E\text{-}R$ (TAMU) i $\Delta E\text{-}ToF$ (MSU). Kładzie nacisk na charakterystykę układu tryggera, wykorzystanego do wyzwiania akwizycji danych w detektorze OTPC, w modzie wysokiej (detekcja protonu) lub niskiej (detekcja jonu) czułości.

Tą część pracy kończy zbiorcza tabela, zawierająca ustawienia aparatury, jak i charakterystykę pierwotnych i wtórnych wiązek jonów, zastosowanych w obu pomiarach.

IV) W czwartym rozdziale pracy przedstawione są wyniki eksperymentu wykonanego w TAMU, którego celem były badania ubogich w neutrony izotopów krzemu $^{22,23}\text{Si}$.

Autorka prezentuje tu szczegóły opracowania danych uzyskanych za pomocą komory OTPC. Na szeregu wykresów pokazuje rozkłady przestrzenne jonów ^{22}Si i ^{23}Si , implantowanych w komorze. Na tej podstawie Autorka przeprowadza symulacje, z pomocą pakietu SRIM, w których stara się określić prawdopodobieństwo, że protony o różnych energiach, wyemitowane w rozpadzie jonów zostaną zatrzymane w aktywnej objętości komory. W oparciu o te obliczenia, dla obu przypadków, wykreśla krzywe wydajności na absorpcję protonu w zależności od jego energii. Do oszacowania liczby wszystkich protonów wyemitowanych w rozpadzie, Autorka uwzględnia także relacje długości czasów rejestracji obrazu w kamerze CCD i półroczu $T_{1/2}$.



Następnie Autorka opisuje procedurę określania całkowitej energii protonu, w oparciu o rekonstrukcję długości jego trajektorii i porównaniu jej ze stabelaryzowanymi wartościami zasięgów $R(E_p)$.

W kolejnych paragrafach tej części pracy, zaprezentowane są rezultaty analizy danych. W obu badanych jądrach zarejestrowano przypadki rozpadów poprzez emisję cząstek, opóźnioną w rozpadzie β : $p, 2p$ z ^{22}Si oraz $p, 2p, 3p$ i $p\alpha$ z ^{23}Si . Niektóre z tych kombinacji zilustrowane są na rycinach z fotografiami śladów wytworzonych przez hamujący w gazie jon, gdzie widoczne są także emitowane w jego rozpadzie protony. Pokazane są również odpowiadające tym przypadkom impulsy elektryczne generowane w fotopowielaczach. Na podstawie analizy liczby przypadków, Autorka określiła stosunki rozgałęzień B_r dla zidentyfikowanych kanałów rozpadu. Ponadto, analizując widma energetyczne protonów, stwierdziła, że można w nich zidentyfikować linie odpowiadające przejściom do dyskretnych stanów wzbudzonych w jądrach córkach, co ilustruje na schemacie rozpadu jądra ^{23}Si . Fitując widma czasowe, Autorka oszacowała także parcjalne czasy $T_{1/2}$, które odtwarzają wartości znane z literatury.

Nieco więcej miejsca Autorka poświęca analizie nowych kanałów rozpadu, zidentyfikowanych w jądrze ^{23}Si . Na podstawie dwóch zarejestrowanych przypadków emisji $\beta-3p$, określa wartość B_r i zestawia ją z danymi literaturowymi dla 4 innych nuklidów, wykazujących ten rzadki sposób rozpadu. Dla pojedynczego zarejestrowanego przypadku, interpretowanego jako rozpad $\beta-p\alpha$ (bardzo egzotyczny kanał rozpadu, znany tylko w 2 innych nuklidach), Autorka estymuje wartość B_r i rozważa możliwe scenariusze kolejności emisji tych cząstek.

Na zakończenie tego rozdziału Autorka referuje zaawansowane obliczenia teoretyczne w formalizmie funkcjonałów gęstości energii (EDF), których celem było określenie energii wiązania stanów podstawowych w izobarach ^{23}Si i ^{23}Al , oraz struktury stanów wzbudzonych w ^{23}Al -rezyduum rozpadu β^+ jądra ^{23}Si . W tym kontekście zamieszcza dyskusję nt. otrzymanych wartości elementów macierzowych przejść Fermiego i Gamowa-Tellera i stwierdza, że przewidywana przez teorię, znaczna różnica kształtów jąder- matki i córki, może mieć wpływ na opóźnienie przejść do stanów leżących poniżej energii stanu IAS w ^{23}Al .

V) Rozdział piąty zawiera prezentację wyników drugiego z eksperymentów, wykonanego w MSU, w którym badano rozpady jąder $^{59,60}\text{Ge}$ i ^{58}Zn .

Podobnie jak w poprzednim rozdziale, Autorka opisuje procedury prowadzące do określenia wydajności komory OTCP na detekcję fragmentów i protonów emitowanych w rozpadach, z uwzględnieniem specyfiki zastosowanej reakcji i warunków pomiaru. W tym celu wspomaga się wynikami symulacji procesu implantacji jonów w komorze, wykorzystując pakiet programów LISE++.

Autorka przechodzi następnie do przedstawienia wyników eksperymentu.

Na podstawie obserwacji 4 przypadków zidentyfikowanych jako nowy nuklid- ^{59}Ge , szacuje przekrój czynny σ na jego produkcję w reakcji fragmentacji wiązki ^{78}Kr . Wynik ten zestawia z wartościami przekrojów czynnych otrzymanych dla cięższych izotopów germanu, a także z wartościami literaturowymi, oraz z wynikami obliczeń EPAX3. Zauważa, że choć obliczenia odtwarzają rosnący trend σ w funkcji liczby atomowej, to znacznie, nawet o 2 rzędy wielkości, przeszacowują wartości doświadczalne.

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu, po raz pierwszy zidentyfikowano szereg przypadków emisji opóźnionych protonów z jądra ^{60}Ge . Oszacowano także czas połowicznego zaniku tego nuklidu, w procesie rozpadu $\beta-p$. Doświadczalna wartość $T_{1/2}$ zgadza się z wynikami teoretycznymi dla ^{60}Ge , z uwzględnieniem przejść Fermiego i Gamowa-Tellera, dozwolonych w rozpadzie β tego jądra.

Kolejnym nowym emitorem $\beta-p$, wytwarzanym w zastosowanej reakcji był ^{58}Zn . Na podstawie analizy zmierzonego widma energetycznego protonów, emitowanych w rozpadzie $\beta-p$ ^{58}Zn , Autorka identyfikuje 3 grupy protonów, emitowanych ze stanów wzbudzonych w pośrednim jądrze- ^{58}Cu . Na tej podstawie stara się oszacować zredukowane prawdopodobieństwa $B(\text{GT})$ przejść Gamowa-Tellera, zasilających te poziomy w rozpadzie β . Porównanie wyników z obliczeniami teoretycznymi wskazuje, że za zmierzony rozkład nasilenia $B(\text{GT})$ odpowiadają efekty związane z deformacją ^{58}Zn .



Na zakończenie tego rozdziału, Autorka wspomina rolę jądra ^{58}Ni na przebieg procesu rp , wychwyty szybkich protonów i rozważa wpływ jego rozpadu βp na abundancję lżejszych nuklidów, w materii gwiazdnej.

VI) Pracę kończy podsumowanie, w którym streszczone są jej główne wyniki i konkluzje.

4. Uwagi i opinia recenzenta

Pod względem edycji i formy rozprawa nie budzi moich większych zastrzeżeń. Jest poprawna merytorycznie, co jest dodatkowo potwierdzone przez fakt, że większość zaprezentowanego w niej materiału znalazła się w recenzowanych publikacjach. Zarzut jaki można by postawić Autorce, jest właśnie związany z trzymaniem się przez nią bardzo skondensowanej formy przekazu, która jest raczej odpowiednia dla krótkich artykułów naukowych, typu *letter*, niż dla pracy doktorskiej. W konsekwencji, czytelnik pracy, nie będący specjalistą, pracującym w tematyce pracy, może niejednokrotnie odczuwać brak odniesień do podstawowej wiedzy, za to często odsyłany jest do literatury. Problem ten przewija się przede wszystkim w rozdziałach dotyczących modeli fizycznych, opisujących np. reakcje fragmentacji, czy rozdziałach, w których dyskutuje się wyniki na gruncie teorii, a także szerszego kontekstu badań związanego z astrofizyką. Z opisu badań umieszczonego w dysertacji trudno też ustalić, które z działań Autorka wykonała samodzielnie.

Poniżej zamieszczam listę najważniejszych uwag, które nasunęła mi lektura pracy:

1. We wstępie, w paragrafie 1.1, Autorka stwierdza, że we wszechświecie występuje „około 100 pierwiastków chemicznych”, stwierdzenie to wydaje mi się nazbyt lakoniczne, jak na pracę doktorską z fizyki jądrowej, której temat dotyczy produkcji nuklidów na granicy stabilności. Może należało tu wspomnieć o liczbach pierwiastków naturalnych i tych otrzymanych sztucznie? Nawiązać do zawartych w pracy wątków nukleosyntezy gwiazdnej ciężkich pierwiastków?
2. We wzorze na ciepło reakcji wychwyty elektronu zwykle uwzględnia się także energię wiązania elektronu z najniższej powłoki atomowej, wielkości tej brakuje w formule 1.5. Na rysunku 1.3 przedstawiono rozkład energii Q_{EC} , podczas gdy odnośnik w tekście podaje, że jest to rozkład $Q_{\beta+}$.
3. Podana na stronie 5. definicja izobarycznych stanów analogowych, poprzez powiązanie ich z przejściami typu Fermiego, wydaje się być niecisła.
4. W paragrafie 1.2.3 Autorka przytacza liczbę około 200 znanych emiterów βp , nie podając źródła tej informacji.
5. W pracy przewija się niekonsekwencja w użyciu różnych konwencji zapisu energii pocisku, np. na str 15.: MeV/nukleon i A·MeV.
6. Także na str. 15. Podano, że energia wiązki 100 A·MeV stanowi dolne ograniczenie zakresu energii dla reakcji fragmentacji, skąd takie założenie? W rozważaniach nad mechanizmem reakcji fragmentacji umieszczono wzór 2.1 (bez podania jego źródła), na całkowity przekrój czynny reakcji, podkreślając nieoczywisty brak w tej zależności energii pocisku. Skąd wynika to przybliżenie?
7. Na stronie 16. W paragrafie 2.1.2, omawiając wiązki radioaktywne wytwarzane metodą *in-flight*, stwierdzono że możliwa jest wtórna akceleracja fragmentów. Wiazki takie zwykle mają bardzo wysokie energie, porównywalne z wiązką pierwotną, i często wymagają raczej spowalniania. Porównując schematy wytwarzania wiązek ISOL i *in-flight*, stwierdzono jedynie, że stosowane są odpowiednio: grube lub cienkie tarcze, które naświetlane są wiązką pierwotną. Pominęto zasadniczą kwestię składu chemicznego tych tarcz.
8. W opisie ustawień separatorów MARS i A1900 wspomina się o specyficznych, dla selekcyonowanych jonów, ustawieniach optyki jonów w tych układów.
 - Na czym polegały te różnice? Czy wpływały także na współczynniki transmisji?



- W eksperymencie wykonanym w MSU, przeprowadzono dwa niezależne pomiary ToF, skąd wynika wspomniana różnica w rozdzielczościach tych pomiarów, dla ustawień zoptymalizowanych dla ^{59}Ge i ^{60}Ge ?
- 9. Na rysunku 3.2 (d), podpis sugeruje widmo strat energii- ΔE , jonów rejestrowanych przy ustawieniach zoptymalizowanych dla ^{22}Si , podczas gdy pokazane na rysunku widmo, wydaje się dotyczyć raczej ich całkowitej energii- piki dla jonów krzemu przy energiach w zakresie 700-800 MeV, co koresponduje z energiami podanymi w tabeli 3.2.
- 10. W tabeli 3.1, podsumowującej parametry pierwotnych i wtórnych wiązek jonów oraz ustawienia układu detekcyjnego, pojawiają się nieścisłości:
 - podano energię wiązki ^{78}Kr - 150 A·MeV, podczas gdy w tekście operuje się wartością 140 A·MeV;
 - w jakim stanie ładunkowym znajdowała się wiązka ^{28}Si ?
 - dlaczego przy zbliżonych wartościach energii początkowej, końcowa energia jonów ^{22}Si jest znacznie niższa niż ^{23}Si , mimo że w pierwszym przypadku użyto cieńszego degradatora Al ? Informacja ta wydaje się być także w sprzeczności z profilami pokazanymi na rysunku 4.3, gdzie jony ^{22}Si penetrują znacznie większy obszar komory.
- 11. W rozkładach pozycji-y jonu, na rysunku 4.1, mimo przeszło 10-krotnie większej statystyki dla ^{23}Si (panel b), fluktuacje statystyczne (różnice kilkudziesięciu zliczeń pomiędzy sąsiednimi kanałami) wydają się być porównywalne jak dla ^{22}Si (panel a), skąd ten efekt ?
- 12. W symulacjach opisanych w paragrafie 4.1.2, jak i w prezentowanej dalej analizie danych, przyjmuje się że emisja protonów następuje wyłącznie po zatrzymaniu jonu. Czy to założenie jest zawsze spełnione ?
- 13. Jak mierzono czas między implantacją jonu i jego rozpadem, użyty do wykreślenia krzywych rozpadu na rysunkach 4.10, 4.11 i 5.10 ?
- 14. W obliczeniach stosunków rozgałęzień, opartych o rejestracje pojedynczych zliczeń, podano oszacowanie błędów (niesymetryczne δ), zastanawiające jest jak określono niepewność detekcji, np. w przypadku obserwacji 1 rozpadu β pa jądra ^{23}Si ?
- 15. W jaki sposób symulowano przebieg sygnału generowanego w fotopowielaczu, przedstawiony na rysunku 4.22 ?
- 16. Jak obliczono eksperymentalne wartości B(GT), podane w tabeli 5.2 ? Jeśli zastosowano w tych rachunkach wzór 1.9, to jaką wartość ft przyjęto ?
- 17. W tabeli 5.1 i na rysunku 5.8 liczby masowe- A, izotopów Ge, pomyłono z liczbami atomowymi- Z. W przedstawionych obliczeniach przekrojów czynnych, z wykorzystaniem formuły EPAX3, jakimi parametrami i w jakim zakresie można manipulować, aby uzyskać lepsze dopasowanie do danych eksperymentalnych ? Jak te wartości korespondują z wynikami otrzymanymi z zastosowaniem przybliżonego wzoru 2.1 ?
- 18. W interpretacji wyników wykorzystano zaawansowane obliczenia teoretyczne w formalizmach SM, EDF czy QRPA, jakie są podstawowe założenia tych modeli i związek między nimi ? W konkluzji podstawiono tezę, że obserwowane efekty związane są z deformacją kształtu, egzotycznych jąder, biorących udział w przemianach beta. Dyskutuje się także parametry deformacji badanych jąder, choć nigdzie wcześniej pojęcie deformacji jądrowej, ani sposobu jej opisu, nie zostało wprowadzone.
- 19. Interesująca dla czytelnika motywacja podjęcia badań nad jądrami leżącymi na ścieżce procesu rp, i znaczenie wyników w astrofizyce, mogłaby być atrakcyjniej przedstawiona. W komentarzu, np. w rozdziale 5.4.3, stosuje się szereg specjalistycznych pojęć i odnośników do literatury. Natomiast brakuje wprowadzenia, z choćby pobieżnym omówieniem tych procesów i wskazaniem związku badań fizyki jądrowej z modelami gwiazdnej nukleosyntezy.

Przedstawione wyżej uwagi nie zmieniają mojej wysokiej oceny pracy doktorskiej Pani mgr Aleksandry Anny Ciemny. Uważam, że podjęła aktualny i bardzo ciekawy problem badawczy nad nowymi formami radioaktywności w egzotycznych, silnie neutrono-deficytowych jądach. Do jego



**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

zeglębienia zastosowała nowoczesne podejście eksperymentalne i osiągnęła ważne wyniki. Do ich interpretacji wykorzystwała zaawansowane modele teoretyczne.

Na podstawie przedstawionej rozprawy pozytywnie oceniam przygotowanie merytoryczne i warsztat badawczy doktorantki.

Stwierdzam, że przedstawiona do oceny dysertacja spełnia warunki określone w art. 13 ust.1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dnia 14 marca 2003 r., i wnoszę o dopuszczenie magister Aleksandry Anny Ciemny do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony.