

dr hab. Jerzy Łukasik
IFJ PAN

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Kamili Zelgi

pt. *EXPERIMENTAL STUDIES ON THE MULTINUCLEON TRANSFER REACTIONS
AS A PATH TO SUPERHEAVY NUCLEI CREATION*

Praca doktorska pani mgr Kamili Zelgi poświęcona jest testowaniu możliwości syntezy i detekcji super ciężkich jąder atomowych w drodze reakcji transferu wielu nukleonów, MNT. W pracy badane są możliwości produkcji i detekcji zarówno izotopów krótkożyciowych (z czasami życia w przedziale od nanosekund do minut), jak i długożyciowych (z czasami życia rzędu kilku lat). Metoda MNT stanowi stosunkowo nowy i komplementarny sposób tworzenia jąder superciężkich obok tradycyjnych metod transmutacji z wychwytem neutronów czy zimnej i gorącej fuzji. W odróżnieniu od metod standardowych, jej zaletą jest możliwość tworzenia superciężkich izotopów neutronowo-nadmiarowych, co może wpływać na ich stabilizację i żywotność. Autorka pracy prezentuje pilotażowe, niemniej wydaje się, że obiecujące wyniki swoich badań dotyczących detekcji izotopów długożyciowych. Do dopracowania pozostawałby sposób identyfikacji ciężkich alfa-emiterów co będzie się wiązało z poprawą energetycznej i czasowej zdolności rozdzielczej używanych detektorów oraz z redukcją tła. Sugestie co do możliwości postępu w tym kierunku również znajdują się w pracy, co świadczy o jej rozwojowym charakterze i atrakcyjności dalszych badań.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów, dwóch dodatków i obszernej bibliografii. Rozdziały wstępne zawierają interesujące i wyczerpujące przedstawienie wyścigu w kierunku wyspy stabilności, napotykanne trudności, osiągnięte wyniki, stosowane metody, jak również ich ograniczenia.

W dalszej części przedstawione zostały metody stosowane przy identyfikacji wytworzonych jąder superciężkich. Metoda oparta na pomiarze korelacji pomiędzy energią i czasem życia cząstek α emitowanych w kolejnych rozpadach ciężkich izotopów. Oraz metoda pozwalająca na oszacowanie liczby atomowej jądra pierwotnego na podstawie zmierzonych energii kinetycznych fragmentów pochodzących z jego rozszczepienia. Specyfika syntezy jądra superciężkiego na drodze zimnej fuzji i związana z tym metoda identyfikacji, przedstawiona została na przykładzie jądra ^{113}Nh wyprodukowanego w RIKEN.

Rozdział trzeci poświęcony jest omówieniu metody transferu wielu nukleonów, która może być remedium na ograniczenia metod opartych na reakcji fuzji. W metodzie tej wykorzystuje się efekt dyfuzji nukleonów w trakcie długiego kontaktu pocisku i tarczy w zderzeniach niecentralnych, która może prowadzić do powstania ciężkich jonów z dużym nadmiarem neutronów. Oszacowanie wydajności metody MNT w zastosowaniu do produkcji jąder superciężkich stało się istotnym tematem badań eksperymentalnych prowadzonych na Uniwersytecie Texas A&M we współpracy z Uniwersytetem Jagiellońskim. W badaniach tych uczestniczyła także autorka pracy i uzyskane przez nią wyniki stanowią zasadniczą część pracy. System zaproponowany w tych badaniach to zderzenia $\text{Au}+\text{Th}$ przy energii 7.5 MeV/nukleon. Wybór łatwo rozszczepialnego jądra Th jako tarczy ma szczególne uzasadnienie. Liczy się tu prawdopodobnie w mniejszym stopniu na dyfuzję, a raczej na wykorzystanie efektu odrzutu fragmentu symetrycznego lub niesymetrycznego rozszczepienia jądra tarczy, co powinno ułatwić pokonanie bariery kulombowskiej i zwiększyć prawdopodobieństwo przyłączenia fragmentu rozszczepienia do jądra pocisku. W dalszej części

rozdziału przedstawione są szczegóły eksperymentalne i wyniki dwóch ostatnich pomiarów w Texas A&M, z lat 2015 i 2016. W szczególności przedstawione są wyniki analizy danych uzyskanych przy pomocy detektorów ze scyntylatorem BC-418.

Na rys. 3.19 przedstawione są wyniki dla 19 zdarzeń, w których zarejestrowano dwa impulsy następujące po sobie w krótkim odstępie czasu (okno czasowe 200 ns, jak można się domyślić). Brakuje w tym miejscu czegoś, co powinno charakteryzować pracę doktorską, czyli wyników popartych szczegółowymi wzorami, czy wyliczeniami. Na przykład, w jaki sposób wyliczono dla zdarzeń w modzie „beam-off” i „beam-on” prawdopodobieństwa (a w zasadzie krotności) przypadkowych koincydencji i czy uwzględniono w nich czasy martwe? Na podstawie oszacowanych krotności przypadkowych koincydencji przyjęto, że wyselekcjonowane zdarzenia pochodzą z rozpadu zarejestrowanych ciężkich jonów. Brakuje tutaj analizy statystycznej otrzymanych wyników. Z jakim prawdopodobieństwem można przyjąć, że interesujące zdarzenia nie są wynikiem nałożenia dwóch zdarzeń („pile-up”)? W pracy nie ma odniesienia do rozkładu Poissona, który określa te prawdopodobieństwa. Z przeprowadzonej w pracy analizy wynika, że dla zdarzeń „beam-on” ok. 1/3 zdarzeń może być przypadkowa. Oprócz tej możliwości istnieje też prawdopodobieństwo, że zarejestrowane podwójne zdarzenia są efektem tła, np. od promieniowania kosmicznego. Czy w eksperymencie wykonane były pomiary tła, pomiary bez tarczy, bez wiązki? Jaka była częstość zdarzeń tła, w szczególności w stosunku do zdarzeń będących efektem badanych reakcji? Precyzyjny pomiar tła w pomiarach tak niskich aktywności wydaje się mieć kluczowe znaczenie.

Brakuje też błędów wyznaczenia czasów połowicznego rozpadu dla zarejestrowanych, hipotetycznych jąder superciężkich. W pracy nie ma odniesienia do tak fundamentalnych prac w tym temacie jak K.-H. Schmidt et al., Z. Phys. A 316 (1984) 19, czy M. Annis et al., Rev. Mod. Phys. 25 (1953) 4. Jakiego rzędu są to błędy? Co więcej, wydaje się, że czasy połowicznego rozpadu na str. 44 i 45 wyliczono jako zwykłą średnią arytmetyczną. Dla rozkładu eksponencjalnego miałoby to sens, gdyby czas zliczania był nieograniczony. Przy krótkich czasach zliczania i rejestracji krótkożyciowych izotopów, błąd wynikający z przyjęcia takiej metody może być bardzo duży. Zakładając, że zakres czasowy FADC to 200 ns, różnica między średnią uwzględniającą ograniczony czas detekcji a zwykłą średnią arytmetyczną, przy średnio-arytmetycznym czasie $T_{1/2}=47$ ns wynosi 43%, a przy $T_{1/2}=59$ ns jest to czynnik 2.6. Jak faktycznie wyznaczono czasy połowicznego rozpadu dla hipotetycznie, zarejestrowanych jąder superciężkich? Jeśli istotnie są to aż tak krótkożyciowe jądra, dlaczego w tabelce (3.1) na str. 44 podano jako potencjalnie zaobserwowane rozpady, rozpady jąder z czasami życia rzędu μ s czy ms? Wydaje się, że tak długożyciowych jąder nie da się zmierzyć przy pomocy FADC o zakresie 200 ns.

Rozdziały czwarty i piąty wydają się być wstępem do zasadniczego rozdziału szóstego zawierającego najciekawsze wyniki pracy związanej z nowatorską próbą detekcji hipotetycznych długożyciowych jąder superciężkich. Mowa tu o jądrach z czasami życia rzędu lat, wytworzonych metodą MNT. Autorka pracy podejmuje tutaj próbę wykrycia rozpadów takich jąder potencjalnie implantowanych w scyntylatorach podczas eksperymentu w Teksasie. Na wstępie pokazane jest oszacowanie prawdopodobieństwa detekcji jąder długożyciowych w zależności od ich czasów życia. Następnie autorka prezentuje wykonane w tym celu detektory, system elektronicznej obróbki sygnałów i akwizycji danych.

Dalej, przedstawione są wyniki badań efektu tła. Przy badaniach tak niskich aktywności zrozumienie i eliminacja bądź dyskryminacja zdarzeń tła wydaje się mieć kluczowe znaczenie. Z przeprowadzonego pomiaru ok. 1 km pod powierzchnią ziemi wynika, że natężenie promieniowania kosmicznego można w ten sposób zredukować o czynnik 10, a więc znacznie,

choć zapewne nie jest to wystarczająca redukcja. Do detekcji cząstek alfa i fragmentów rozszczepienia z rozpadów długożyciowych izotopów autorka stosuje detektory plastikowe charakteryzujące się dobrą rozdzielczością czasową, ale słabą rozdzielczością energetyczną, jak również detektory krzemowe dryfowane litem o dużo lepszej rozdzielczości energetycznej, ale gorszej rozdzielczości czasowej. Przeprowadzona została optymalizacja grubości detektorów plastikowych pod kątem minimalizacji energii deponowanej przez cząstki promieniowania kosmicznego, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości detekcji cząstek alfa o energiach do kilkunastu MeV. Dobrano także napięcia zasilające fotopowielacze w celu ujednolicenia wzmocnień dla różnych modułów.

Rozdział piąty poświęcony jest różnym metodom cyfrowej obróbki sygnału zastosowanym w celu polepszenia zdolności identyfikacyjnej i rozdzielczej używanych detektorów.

Rozdział szósty to zasadniczy rozdział pracy zawierający główne wyniki pomiarów i analiz. Na wstępie autorka wyznacza na mapie ΔE -E obszar, w którym można się spodziewać sygnałów pochodzących od cząstek alfa o energiach kilkunastu MeV. Kalibracja energetyczna detektorów krzemowych jest względnie prosta, ze względu na liniowość ich odpowiedzi na stratę energii. Detektory te zostały wykalibrowane przy pomocy źródeł cząstek alfa o znanych energiach. Natomiast detektory plastikowe zostały wykalibrowane przez dopasowanie ich rozkładów do rozkładów wykalibrowanych uprzednio detektorów krzemowych. Można mieć tutaj pewne wątpliwości, czy taki sposób jest optymalny, ze względu na gorszą rozdzielczość detektorów plastikowych, których spektra „z natury” są szersze niż te same zmierzone detektorem krzemowym. Wymuszenie takich samych kształtów widm może być nieco ryzykowne. Wydaje się, że lepsza byłaby tu też kalibracja źródłem, nawet jeśli linie się nie rozdzielają. Czy nie było takiej możliwości? Poza tym, wadą plastiku jest to, że amplituda sygnału (liczba wyprodukowanych fotonów) zależy także od ładunku i masy cząstki i w zasadzie kalibrację energetyczną trzeba by robić dla każdej cząstki osobno, a więc osobno dla mionów, cząstek alfa, kwantów gamma, czy fragmentów rozszczepienia. Możliwe, że nawet w przypadku detektorów krzemowych, przy kalibracji fragmentów rozszczepienia warto byłoby uwzględnić tzw. „defekt wysokości impulsu”.

Główne wyniki pracy dotyczą 87-dniowych pomiarów aktywowanych scyntylatorów, 39-dniowych pomiarów tła z czystymi scyntylatorami oraz 17-dniowych pomiarów aktywowanych scyntylatorów z rozdzielonymi warstwami ΔE i E. Z analizy pierwszych rysunków (6.8-6.11) pokazujących impulsy z interesujących zdarzeń nasuwa się pytanie o właściwy dobór okna czasowego konwertera analogowo-czasowego. Na pewno okno czasowe 1 μs nie umożliwi rejestracji sekwencji rozpadów, które mogą trwać kilka minut. Zamiast tego nastawiono się na pomiar pojedynczych rozpadów z emisją wysokoenergetycznych cząstek alfa. Wydaje się, że stosując dłuższe okno czasowe, lub przynajmniej skracając czas „pre-trygera”, można byłoby zarejestrować więcej, lub przynajmniej odrzucić mniej zdarzeń. Z pokazanych kształtów impulsów widać, że zastosowana stała czasowa przedwzmacniacza ładunkowego detektora krzemowego wymaga znacznie dłuższych czasów rejestracji impulsu. Powinien to być jeden z parametrów do korekty w ewentualnych dalszych badaniach.

W kolejnym kroku autorka staje przed problemem doboru optymalnych obserwacji i ich kombinacji umożliwiających najlepszą dyskryminację pomiędzy zdarzeniami tła (promieniowania kosmicznego) a detekcją cząstek alfa i fragmentów rozszczepienia z rozpadów potencjalnych superciężkich jąder. Do analizy wybrano 5 obserwacji: amplitudy impulsu ładunkowego i prądowego, drugi i trzeci moment impulsu prądowego oraz czas narastania impulsu. Analizując „treningowe” zbiory danych uzyskane w pomiarach tła, pomiarach cząstek alfa ze źródeł, oraz pomiarach fragmentów rozszczepienia kalifornu udało się w pracy określić, w przestrzeni

wybranych parametrów, obszary charakterystyczne dla danej klasy zdarzeń. W szczególności określono obszar, w którym z dużym prawdopodobieństwem można się spodziewać rejestracji wysokoenergetycznych cząstek alfa. Rysunki 6.13-6.20 należą do najciekawszych w pracy i świadczą o pomysłowości i doświadczeniu autorki, oraz umiejętności rozwiązywania problemów. Można by tutaj jedynie zasugerować zastosowanie metod statystycznych opracowanych specjalnie do rozwiązywania tego typu problemów, a mianowicie analizy dyskryminacyjnej, sieci neuronowych, czy analizy głównych składowych. Zwłaszcza ta pierwsza pozwala na znalezienie optymalnych kombinacji obserwacji i kierunków rzutowania w wyznaczonej podprzestrzeni parametrów, mając do dyspozycji dane ze zbiorów treningowych. Metoda ta zapewnia jednocześnie maksymalną separację różnych klas zdarzeń w znalezionej podprzestrzeni. Zastosowany w pracy „ręczny” sposób separowania klas może nie być optymalny, chociaż niektóre kombinacje parametrów wykazują istotnie całkiem dobrą dyskryminację.

Główne wyniki analizy zawarte są w tabelach 6.3-6.8. Brakuje tutaj błędów, zwłaszcza jeśli chodzi o energie zarejestrowanych cząstek alfa. Odpowiednie liczby podano z precyzją 4 cyfr po przecinku, ale ile z nich jest faktycznie znaczących? Z pokazanych wyników widać wyraźną różnicę pomiędzy pomiarami tła, czy czystych scyntylatorów, a pomiarami scyntylatorów aktywowanych. Wydaje się więc, że faktycznie widać efekt aktywacji i te wstępne analizy są istotnie obiecujące i skłaniają do dalszych poszukiwań.

Kluczowe wyniki pokazane są na rysunkach 6.21 i 6.22, prezentujących częstości zliczeń z wykonanych trzech typów pomiarów, z uwzględnieniem wszystkich detektorów. Tutaj wreszcie policzone zostały błędy, niemniej wydaje się, że zostały one oszacowane zbyt ostrożnie. Można wydedukować z zaprezentowanych danych, że błędy te wyliczono jako średni błąd zliczeń z poszczególnych detektorów. Jakie jest prawdopodobieństwo, że prawdziwe wartości częstości zliczeń znajdują się w tak określonych granicach błędów? Bardziej miarodajnym oszacowaniem byłoby policzenie tych błędów jako pierwiastek z sumy wariancji liczby zliczeń w poszczególnych detektorach, czyli po prostu jako pierwiastek z sumarycznej liczby zliczeń. Umożliwiłoby to automatyczne przypisanie poziomu ufności do otrzymanych wyników.

Wyniki uzyskane przy pomocy detektorów krzemowych wskazują, że napromieniowane w trakcie eksperymentu scyntylatory wykazują prawie 4-krotnie większą aktywność niż „czyste” scyntylatory, w obszarze interesujących zdarzeń, nawet po kilku latach. Wydaje się, że ten najważniejszy wynik pracy jest trochę mało uwypuklony i trochę skąpo przedyskutowany, zwłaszcza jeśli chodzi o analizę błędów.

Praca pozostawia pewien niedosyt, w pozytywnym sensie. Na tym etapie czytelnik niestety nie zaspokoi swojej ciekawości czy i o ile zbliżyliśmy się do wyspy stabilności, i czy w ogóle taka wyspa istnieje. Wydaje się, że wyniki są obiecujące i podjęte ryzyko może się opłacić. Niemniej poszukiwania będą wymagać dalszych badań i prawdopodobnie lepszych detektorów, modułów elektronicznych o dłuższym zakresie mierzonych czasów i być może bardziej zaawansowanych metod analizy danych. Uzyskane wysokie energie cząstek alfa (10-18 MeV w detektorach krzemowych) mogą świadczyć faktycznie o emisji z bardzo ciężkiego źródła.

Autorce należy się duże uznanie za podjęcie tego dosyć ryzykownego tematu i konsekwentne doprowadzenie go do etapu pozwalającego na wysunięcie pewnych pozytywnych wniosków, co do możliwości produkcji bardzo ciężkich a jednocześnie długożyciowych jąder metodą MNT. W każdym razie, uzyskane wyniki na tym etapie raczej nie pozwalają na odrzucenie takiej hipotezy. Może to stanowić o „być albo nie być” przyszłych kampanii eksperymentalnych. Wynik pracy może być podstawą przyszłych grantów, czy wniosków o wiązkę. Należałoby go jedynie uzupełnić

o analizę probabilistyczną otrzymanych wyników. Pozostawałaby też w przyszłości do wyjaśnienia natura tych potencjalnych ciężkich alfa-emiterów. Patrząc na rys. 3.17, duże energie cząstek alfa korelują się raczej z krótkimi czasami życia ciężkich emiterów. Czy zaobserwowane zdarzenia świadczą o istnieniu bardzo długożyciowych izomerów? A może faktycznie pochodzą one z wyspy stabilności? Wydaje się, że kontynuacja tematu ma sens, tym bardziej, że wyniki mogą, jeśli nie zahaczać o nagrodę Nobla, to przynajmniej doprowadzić do odkrycia nowego (własnego) pierwiastka. Do tego jednak niezbędna będzie chyba detekcja sekwencji czasowej rozpadów alfa bądź rozszczepienia w celu bardziej precyzyjnej identyfikacji pierwotnych jąder oraz zastosowanie analizy statystycznej pozwalającej na ocenę wiarygodności uzyskanych wyników.

Rozdział kończy się spojrzeniem w przyszłość, gdzie autorka dostrzega obecne ograniczenia i proponuje sposoby ulepszenia dalszych badań. Proponuje między innymi zastosowanie osłon antykoincydencyjnych w celu redukcji zdarzeń wywołanych przez promieniowanie kosmiczne, dodanie modułów kontrolnych do pomiarów samego tła oraz przeprowadzenie pomiarów w próżni (co ma swoje zalety ale też i wady).

Praca napisana jest w języku angielskim, co niestety nie jest jej mocną stroną. Przekaz jest czytelny, zwłaszcza dla polskojęzycznego czytelnika ze względu na składnię, niemniej lektura wymaga nieco wysiłku. Zważywszy, że nie jest to rozprawa filologiczna, a wyniki przedstawione są w sposób zrozumiały, nie powinno to zaważyć w istotny sposób na ogólnej ocenie pracy, przy zdecydowanie pozytywnej ocenie jej meritum.

Odniesienie się do wyróżnionych w tekście recenzji uwag nie powinno stanowić problemów. Uwagi te nie kwestionują uzyskanych wyników ale mają na celu ich doprecyzowanie i przynajmniej częściowe umożliwienie oszacowania ich wiarygodności, czy poziomu ufności.

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr Kamili Zelgi ma nowatorski, a nawet pionierski charakter, nie jest pracą „sztamponową” i zawiera:

- przedstawienie oryginalnych wyników badań mających na celu weryfikację hipotezy o możliwości produkcji i detekcji superciężkich jąder metodą transferu wielu nukleonów, zarówno tych krótko- jak i długo-życiowych, oraz
- opis skonstruowanych układów detekcyjnych, przeprowadzonych pomiarów w różnych konfiguracjach i warunkach tła, a także opis zastosowanych technik analizy danych.

W planowaniu pomiarów i przeprowadzonej analizie danych widać logikę i konsekwencję w dążeniu do uzyskania wyczerpujących i obiektywnych wyników. Praca stanowi cenny wkład w przygotowanie i przeprowadzenie ewentualnych dalszych poszukiwań jąder superciężkich.

Pani Kamila Zelga jest współautorką 4 prac (wg bazy Web of Science). Wydaje się, że przedstawiony w rozprawie materiał może z powodzeniem stanowić kanwę kolejnej pracy, po uwzględnieniu załączonych uwag i sugestii.

Biorąc pod uwagę jakość wyników, nakład pracy i doświadczenie autorki w pracy eksperymentalnej, uważam że zawarty w rozprawie materiał i forma prezentacji świadczą o kompetencjach i dojrzałości autorki jako badaczki, oraz spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Tym samym wnoszę o dopuszczenie mgr Kamili Zelgi do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

T. Tuleśki