



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

prof. dr hab. Bogdan Fornal
Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego
Polska Akademia Nauk

Kraków, 11 października 2015 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. Rafała Najmana

**p.t. „A quest for exotic nuclear systems formed in the $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ reaction
at 23 A MeV”**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Rafała Najmana stanowi liczące siedemdziesiąt jeden stron opracowanie, prezentujące wyniki prac badawczych przeprowadzonych przez Doktoranta w Zakładzie Fizyki Gorącej Materii na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego pod kierownictwem prof. dr. hab. Romana Płanety. Praca miała na celu eksperymentalne sprawdzenie hipotezy dotyczącej tworzenia się w reakcjach jądrowych jąder atomowych o kształtach toroidalnych. Podjęty w dysertacji doktorskiej temat jest niezwykle interesujący, gdyż nie istnieją jednoznaczne wyniki pomiarowe, które świadczyłyby o formowaniu się jąder przyjmujących formę torusa, a zaobserwowanie obiektów jądrowych o takich egzotycznych kształtach pozwoliłoby na weryfikację szerokiej klasy podejść teoretycznych, które opisują proces zderzeń ciężkich jąder atomowych przy pośrednich energiach.

Krakowska grupa specjalizująca się w badaniach reakcji jądrowych zachodzących podczas zderzeń ciężkich jonów, którą kieruje Prof. dr hab. Roman Płaneta, a w której Pan Najman przygotowywał rozprawę, posiada ugruntowaną wysoką pozycję międzynarodową. Bardzo owocna jest długoletnia współpraca tego zespołu z grupą z Laboratori Nazionali del Sud (LNS) w Katanii (Włochy), stąd też wybór tematu oraz zakres prac eksperymentalnych opartych na układzie detekcyjnym CHIMERA w Katanii, w które zaangażował się Pan mgr Najman, wydają się ze wszech miar uzasadnione.

Wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej zostały opublikowane w dwóch pokonferencyjnych artykułach, które ukazały się w recenzowanych czasopismach o zasięgu



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

międzynarodowym: w Acta Physica Polonica B oraz w The European Physical Journal. Jest też wiadomo, że artykuł podsumowujący rezultaty stanowiące trzon ocenianej pracy został zaakceptowany do publikacji w czasopiśmie Physical Review C. We wszystkich tych trzech publikacjach Doktorant jest pierwszym autorem, co świadczy o wiodącym jego udziale w prezentowanych badaniach.

Praca doktorska została napisana po angielsku i według klasycznego dla tego typu opracowań schematu: rozpoczynają ją „Spis treści”, „Spis rysunków”, „Spis tabel”, po których następuje „Wstęp” mający na celu poinformowanie czytelnika o kontekście oraz zakresie podejmowanych badań. Znajdujemy tutaj także przedstawienie celu i zakresu pracy.

Kolejna część to rozdziały 2, 3 i 4, które są opisem: a) pomiaru przeprowadzonego na wiązce akceleratora, b) zastosowanego aparatu detekcyjnego, c) użytej metody identyfikacyjnej produktów oraz d) globalnych własności uzyskanych danych pomiarowych. Na początku Autor w skrócie podaje charakterystykę systemu akceleratorów w LNS oraz określa reakcję, która stanowi przedmiot badań. Następnie prezentuje budowę i zasadę działania układu detekcyjnego CHIMERA, składającego się z 1192 teleskopów rejestrujących cząstki naładowane, które pokrywają 94% pełnego kąta bryłowego. Zwraca uwagę na swoistą cechę układu, którą jest jego modułarna budowa: pod kątami do przodu (1° - 30°) umieszczonych jest 18 pierścieni o rosnącym promieniu, z zamontowanymi na nich trapezoidalnymi modułami detekcyjnymi – promień tych pierścieni rośnie w miarę przesuwania się do większych kątów biegunowych. Pozostałych 17 pierścieni zawierających elementy detekcyjne tworzy sferę w zakresie kątów od 30° do 176° . W dalszej kolejności Doktorant charakteryzuje poszczególne rodzaje modułów detekcyjnych, które są teleskopami Si-CsI(Tl) oraz opisuje stosowane w układzie CHIMERA metody identyfikacji produktów. Zaznacza, że podczas analizy, którą prowadził, posługiwał się wyłącznie techniką czasu przelotu oraz metodą ΔE -E.

Dalsza część poświęcona jest skrótowemu omówieniu głównych elementów elektroniki układu pomiarowego, skąd Autor płynnie przechodzi do opisu procedur kalibracji energetycznej detektorów. Do określenia zależności: „wysokość sygnału wejściowego – kanał na wyjściu z ADC” użyty został generator impulsów, a kolejny krok, kalibracja energetyczna modułów detekcyjnych, przeprowadzony został głównie za pomocą reakcji elastycznego rozpraszania dla różnych systemów wiązka-tarcza oraz różnych energii wiązki. Przy tej okazji



mgr Najman zwraca szczególną uwagę na zjawisko zależności wysokości sygnału z detektora krzemowego nie tylko od energii, ale i od liczby atomowej rejestrowanego fragmentu, czyli na tzw. defekt wysokości impulsu – opisuje szczegółowo sposób jego uwzględnienia podczas kalibracji energetycznej detektorów.

Podczas lektury tej części pracy Pan mgr Najman daje się poznać jako osoba umiejętnie wnikająca w tajniki urządzenia pomiarowego, które używa, oraz starająca się przekazać czytelnikowi podstawowe zagadnienia związane z tym urządzeniem w sposób zwarty i konkretny. Chciałbym jednak zauważyć, że zbyt mało miejsca poświęcone jest scharakteryzowaniu badanego systemu, $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ przy energii 23 MeV/A oraz przebiegu samego pomiaru.

Niezwykle ważnym elementem analizy jest identyfikacja produktów reakcji. Zagadnienie to Autor dyskutuje dla dwóch klas zdarzeń: dla przypadków, gdy produkt zatrzymuje się w detektorze krzemowym ΔE , oraz dla sytuacji, gdy produkt rejestrowany jest zarówno w ΔE jak i w E. Jeżeli realizowany jest drugi scenariusz, identyfikacja ładunku produktu prowadzona jest za pomocą standardowej techniki opartej na zależności pomiędzy energią rejestrowaną w poszczególnych elementach teleskopu, czyli ΔE -E. Jak widać na załączonych rysunkach, metoda ta pozwala na rozróżnienie liczby atomowej produktów aż do wartości 40.

Gdy produkt zatrzymywany jest w detektorze ΔE , można określić wyłącznie jego masę. Dokonuje się tego na podstawie znajomości energii produktu oraz czasu jego przelotu pomiędzy tarczą a detektorem. O ile energia fragmentu jest bezpośrednio mierzona, o tyle absolutne wyznaczenie czasu przelotu nie jest sprawą łatwą, gdyż uwzględnić należy różnice w czasach rejestracji sygnału w Si zależne od masy i energii produktu, od rodzaju detektora, od opóźnień traktów elektronicznych, itp. Autor opisuje metodę, która pozwala na uwzględnienie poprawki do czasu przelotu w funkcji masy i energii fragmentu. Stosując ją, jest w stanie określić masę rejestrowanego w danym detektorze produktu.

Biorąc pod uwagę złożoność procedury wyznaczania masy produktów zatrzymanych w detektorze krzemowym ΔE , uzyskanie spójnego zestawu poprawek do czasu przelotu dla wszystkich detektorów jest nie lada sukcesem. Mam jednak uwagi do omawianej części rozprawy: prezentacja metody wyznaczania poprawek niezbędnych do dokładnego określenia czasu przelotu jest niezwykle skrótowa. Autor powinien był wykorzystać okazję, której z reguły



nie ma podczas publikacji artykułów w czasopismach, i rozszerzyć opis procedury. Ta skrótość bowiem powoduje, że rodzą się pytania. Na przykład, z jakich pomiarów pochodzą dyskretne punkty eksperymentalne na rysunku 3.9? Czy $t_{0,sat}$ dla danego detektora jest takie samo dla wszystkich produktów, niezależne od ich ładunku i masy? Jeżeli tak, to dlaczego wartości t_0 , wynikające z dopasowania (rysunek 3.9), nie dążą do uniwersalnego $t_{0,sat}$ (zaznaczonego na rysunku) dla wysokich energii fragmentów? Podpis pod rysunkiem 3.10, a także odniesienie do niego w tekście są na tyle skąpe, że nie jest powiedziane, dla jakiej wartości energii produktu E i dla którego detektora określone jest tutaj $t_0(E,m)$?

W kolejnej części rozprawy Pan Najman, za pomocą odpowiednich fenomenologicznych formuł, określa w przybliżeniu masę produktu reakcji wtedy, gdy eksperymentalnie wyznaczył tylko jego liczbę atomową, oraz oblicza liczbę atomową, gdy pomiar dostarcza informacji jedynie o masie fragmentu. W ten sposób dla każdego zdarzenia charakteryzuje wszystkie produkty za pomocą liczby masowej A i liczby atomowej Z . Jest więc gotowy do wyznaczania rozkładów fragmentów reakcji w funkcji wybranych parametrów. Zaczyna od sprawdzenia poprawności i spójności danych pomiarowych. Robi to, wykreślając rozkłady: i) masy fragmentów w zależności od składowej prędkości równoległej do kierunku wiązki, ii) ładunku produktów w zależności od składowej całkowitego pędu równoległej do kierunku wiązki, iii) składowej prędkości fragmentu prostopadłej do wiązki w zależności od składowej prędkości równoległej do wiązki – wykonuje to wszystko dla zdarzeń, które charakteryzują się rozszczepieniem jednego (całkowita krotność = 3) lub obu (całkowita krotność = 4) produktów binarnych reakcji głęboko nieelastycznego rozpraszania. W wyselekcjonowaniu wymaganych przypadków pomagają warunki stawiane na masach produktów; np. wybranie zdarzeń rozszczepienia obu fragmentów odbywa się poprzez wymóg, aby wszystkie jądra końcowe posiadały masę większą niż 50. Otrzymane rozkłady produktów potwierdzają poprawność metody identyfikacji jąder końcowych oraz poprawność określania dynamicznych parametrów reakcji. Ta część pracy ukazuje Doktoranta jako eksperymentatora, który kontroluje i rozumie główne mechanizmy badanych reakcji i który jest dobrze przygotowany do przeprowadzenia bardziej wymagających analiz.

Mając przygotowane narzędzie do analizy danych, Pan Najman przystępuje do opisu modeli teoretycznych badanych procesów, analizy danych oraz prezentacji wyników – jest



temu poświęcony rozdział 5. Rozpoczyna od scharakteryzowania dwóch podejść teoretycznych o akronimach ETNA i QMD, których przewidywania skonfrontuje z eksperymentem. Model ETNA (Expecting Toroidal Nuclear Agglomeration) opisuje rozpad obiektu tworzego w fazie wymrażania. Obiekt taki tworzy się po emisji nukleonów przedrównowagowych z systemu złożonego, który powstaje w wyniku połączenia się jądra wiązki z jądrem tarczy. Ten system, w rozważanej reakcji złożony z ponad 300 nukleonów, będąc w fazie wymrożenia (freeze-out), może przyjmować różne kształty. W ramach modelu ETNA rozważane są obiekty o kształtach kuli, sfery (bańki) lub torusa, a następnie ich rozpad na zadaną liczbę wzbudzonych fragmentów, które z kolei schładzają się, emitując nukleony i lekkie cząstki naładowane – ta część procesu modelowana jest za pomocą kodu komputerowego GEMINI (model statystyczny). Autor antycypuje, że podczas porównania wyników obliczeń za pomocą modelu ETNA z eksperymentem brane będą pod uwagę wyłącznie przypadki zderzeń centralnych (0-3 fm) charakteryzujące się krotnością ≥ 5 .

QMD (Quantum Molecular Dynamics) to inny model teoretyczny, który Autor będzie używał do porównania z eksperymentem. Nukleony są tutaj przedstawione w formie paczek falowych o stałej szerokości w czasie - układ ewoluuje zgodnie z równaniem Hamiltona. Dla zadanego czasu ewolucja czasowa układu jest zatrzymywana i przeprowadza się analizę systemu pod kątem obecności klastrów, które są następnie emitowane jako fragmenty po reakcji.

Jak wspomniano, celem pracy jest sprawdzenie hipotezy tworzenia się, w fazie wymrożenia reakcji $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ przy energii 23 MeV/A, egzotycznych konfiguracji jądrowych. Aby było to możliwe, należy wprowadzić obserwable, które będą czułe na kształty tych konfiguracji. Autor dokonuje tego w kolejnym podrozdziale. Biorąc za punkt wyjścia tensor pędu skonstruowany z pędów wszystkich produktów w danym zdarzeniu, definiuje się sferyczność zdarzenia (*sph*) i koplanarność zdarzenia (*cop*). Można pokazać, że zdarzenia związane z powstaniem konfiguracji torusa w fazie wymrożenia ułożą się wzdłuż pewnej prostej w układzie, w którym współrzędnymi są sferyczność i koplanarność (*sph, cop*). Inne konfiguracje, kula lub bańka, związane będą z szerokimi rozkładami na dużej części powierzchni w takim układzie współrzędnych. W tej sytuacji definiuje się jeszcze jedną wielkość, δ , która mierzy odległość pomiędzy dowolnym punktem na płaszczyźnie (*sph, cop*), a wspomnianą prostą.



Mając do dyspozycji tak zdefiniowane obserwable, Pan mgr Najman przystępuje do porównania wyników symulacji komputerowych badanego procesu, przeprowadzonych na podstawie modeli ETNA i QMD, z danymi eksperymentalnymi. Robi to dla zdarzeń, dla których w kanale wyjściowym zarejestrowanych jest co najmniej 5 fragmentów z warunkiem $Z \geq 10$. Rozkłady eksperymentalne zarówno we współrzędnych (sph, cop), jak i δ są zgodne z przewidywaniami modelu QMD. W przypadku modelu ETNA najbardziej odległe od danych eksperymentalnych są wyniki symulacji dla konfiguracji kuli i bańki.

Kolejną obserwabłą zaproponowaną do rozróżniania kształtów egzotycznych układów jest wielkość nazwana płaskość (*flatness*) Δ^2 , która określa płaskość zdarzenia w przestrzeni prędkości. Widać od razu, że rozkład liczby zdarzeń mierzonych w eksperymencie w funkcji płaskości Δ^2 jest bardzo różny od wyniku symulacji komputerowej, gdy założy się, że system w fazie wymrażania posiada kształt kuli lub bańki.

Autor nie poprzestaje na wyżej wspomnianych porównaniach – stara się uzyskać mocniejsze argumenty świadczące o przyjmowaniu przez system złożony kształtu torusa. Wprowadza nowe parametry: i) kąt θ_{flow} , który jest kątem pomiędzy główną osią zdarzenia wyznaczoną przez diagonalizację tensora pędu i kierunkiem wiązki, oraz ii) kąt θ_{plane} , który jest kątem pomiędzy kierunkiem prostopadłym do płaszczyzny zdarzenia i kierunkiem wiązki. Doktorant pokazuje, że za pomocą odpowiedniego doboru kątów θ_{flow} i θ_{plane} można wzmocnić selekcję zderzeń centralnych – jako warunek takiej selekcji przyjmuje: $\theta_{flow} > 20^\circ$ i $\theta_{plane} < 75^\circ$. Stosując obserwable czułe na kształt systemu w fazie wymrażania, płaskość Δ^2 , i parametr δ , definiuje tzw. warunek „toroidalności”: $\Delta^2 < 0.001$ i $\delta < 0.005$, który powinien selekcjonować przypadki powstawania konfiguracji o kształcie torusa. Następnie, dla danej klasy zdarzeń, ustala odsetek przypadków spełniających warunek konfiguracji toroidalnej – jest to stosunek liczby zdarzeń spełniających warunek toroidalności do wszystkich zdarzeń rozważanego typu – nazwijmy go prawdopodobieństwem toroidalności. Pan mgr Najman dociera teraz do momentu, w którym może przeprowadzić precyzyjny test na tworzenie konfiguracji torusa w badanej reakcji $^{197}\text{Au} (23 \text{ MeV/A}) + ^{197}\text{Au}$. Rezultaty zawiera tabela 5.1, która przedstawia prawdopodobieństwo toroidalności dla zdarzeń wyselekcjonowanych poprzez następujące dwa warunki: 1) warunek centralności i 2) warunek detekcji 5 lub więcej fragmentów reakcji. Prawdopodobieństwo toroidalności dla danych eksperymentalnych pozostaje w granicach 0.211 do 0.271, gdy ograniczenie na liczby atomowe fragmentów zmienia się od $Z \geq 20$ do $Z \geq 3$.



Przewidywania modelu ETNA dotyczące prawdopodobieństwa toroidalności dla konfiguracji kuli i bańki są bardzo odległe od wartości eksperymentalnych. Także przewidywania prawdopodobieństwa toroidalności z użyciem modelu QMD różnią się znacznie od wyników pomiarowych. Jedynie wyniki symulacji za pomocą modelu ETNA, które zakładają tworzenie się w fazie wymrażania obiektu o kształcie torusa dla zderzeń centralnych w reakcji ^{197}Au (23 MeV/A)+ ^{197}Au , doskonale zgadzają się z eksperymentem. Można to uznać za przesłankę, że w badanej reakcji obiekt tworzony w fazie wymrażania może posiadać kształt inny niż kula lub bańka – może to być kształt toroidalny. Zaprezentowany powyżej wynik uważam za najważniejszy i doniosły wynik rozprawy doktorskiej. Jedyną moją uwagą jest duża skrótowość w prezentowaniu materiału, która jest bardziej charakterystyczna dla artykułu naukowego, niż rozprawy doktorskiej.

W ostatnim podrozdziale omawianej części rozprawy Doktorant poddaje weryfikacji czułość innych obserwacji na tworzenie się konfiguracji o kształcie torusa w fazie wymrażania. Rozważa takie wielkości jak: odchylenie standardowe rozkładu masy fragmentów, względną prędkość par fragmentów, względne kąty par fragmentów oraz średnią prędkość fragmentów w funkcji ich masy. Okazuje się, że odchylenie standardowe rozkładu masy rejestrowanych produktów nie zależy od tego, czy przypadki związane są z emisją w płaszczyźnie, czy poza płaszczyzną reakcji – odchylenie standardowe rozkładu masy nie jest więc czułe na kształt konfiguracji w fazie wymrożenia.

Ciekawa jest natomiast inna obserwacja: dla zdarzeń, dla których produkty emitowane są poza płaszczyzną reakcji, względne prędkości par fragmentów są najmniejsze. Doktorant konkluduje, że świadczy to o tworzeniu się wydłużonych konfiguracji, być może toroidalnych – dokonuje tego na podstawie dwóch przesłanek: i) emisja fragmentów z obiektów o kształcie torusa powinna stanowić duży odsetek zdarzeń z emisją poza płaszczyzną reakcji, ii) względne prędkości końcowych fragmentów emitowanych z konfiguracji toroidalnej powinny być najmniejsze (ich wzajemne odległości w fazie wymrażania są największe) w stosunku do konfiguracji kulistych czy sferycznych. Autor wspomina jeszcze, że zależność średniej prędkości produktów od ich masy dla zdarzeń spełniających zdefiniowany wcześniej warunek toroidalności jest zgodna z tym, czego można oczekiwać dla obiektów toroidalnych, nie omawia jednak bardziej szczegółowo tego interesującego efektu.

Rozprawę doktorską zamykają „Podsumowanie” oraz wykaz cytowanych prac zawierający 43 pozycje.



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Podsumowując, pragnę stwierdzić, że Doktorantowi należą się słowa wysokiego uznania za wykazanie, że dane eksperymentalne są zgodne z hipotezą tworzenia się w fazie wymrażania reakcji $^{197}\text{Au} (23 \text{ MeV/A}) + ^{197}\text{Au}$ obiektów o kształtach toroidalnych. Konkluzja była możliwa poprzez umiejętne zastosowanie przez Autora takiego zestawu obserwacji i warunków nałożonych na te obserwacje, które mogą różnicować kształty obiektu formowanego podczas zderzeń bardzo ciężkich jonów przy energiach pośrednich.

Oceniana praca doktorska, moim zdaniem, stanowi oryginalny i trwały wkład do nauki w zakresie fizyki reakcji jądrowych i w pełni spełnia wymagania stawiane dysertacjom na stopień doktora nauk fizycznych. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. Rafała Najmana do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Bogdan Fornal