

UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów w UW

Recenzja rozprawy doktorskiej "Procesy wielonukleonowego transferu i fragmentacji układu $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ w głęboko-nieelastycznych zderzeniach przy energii 23A MeV" pana mgr Tomasza Capa

Różnorodność procesów zachodzących podczas zderzenia dwóch jader atomowych zależy od wielu czynników, w tym od ich energii i ich mas. Przy energiach zbliżonych do bariery kulombowskiej procesy elastycznego i nieelastycznego rozpraszania konkurują z reakcjami przekazu nukleonów i z fuzją obu partnerów. Są one dobrze opisywane przez kwantowe modele reakcji bezpośredniego oddziaływania i statystyczne modele jądra złożonego. Jednak w przypadku zderzeń ciężkich jader o podobnych masach, w których zaangażowane są duże momenty pędu, główną rolę grają procesy zwane reakcjami głęboko-nieelastycznymi, które obejmują szereg nowych mechanizmów. Niniejsza praca jest fragmentem dużego programu badań zapoczątkowanego kilkanaście lat temu, poświęconego zderzeniom dwóch jader złota przy różnych energiach. Już jego pierwszy etap, w którym badano zderzenia przy energii 15A MeV, przyniósł odkrycie procesów prowadzących do emisji trzech lub nawet czterech fragmentów o zbliżonych masach, głównie w wyniku bezpośredniej dysocjacji obu zderzających się partnerów. W niniejszej pracy prezentowane są wyniki doświadczeń przy wyższej energii 23A MeV, bowiem prawdopodobieństwo obserwacji zdarzeń prowadzących do powstania kilku fragmentów powinno rosnąć wraz z energią jądra-pocisku. Jej celem jest zbadanie procesów zachodzących przy takiej energii, a w szczególności poszukiwanie nowych, egzotycznych procesów.

Praca, napisana bardzo ładnym językiem, liczy 150 stron i składa się z dziesięciu rozdziałów poprzedzonych spisem treści i spisami: rysunków, tablic i użytych skrótów, trzech dodatków i obszernej bibliografii. Manuskrypt ma elegancką graficznie formę, z bardzo starannie przygotowanymi rysunkami. Czyta się go z przyjemnością - autor ma duże zdolności dydaktyczne czego mogłem też doświadczyć słuchając wcześniej jego publicznych wystąpień.

Przejdę teraz do omówienia poszczególnych rozdziałów. Nasuwające się w trakcie czytania uwagi wyróżniam w poniższym tekście pogrubioną czcionką.

We wstępie doktorant krótko charakteryzuje znane procesy zachodzące w zderzeniach ciężkich jonów. Podaje cel pracy i uzasadnia wybór zderzającego się układu.

W rozdziale drugim znacznie szerzej omawia interesujące go reakcje głęboko-nieelastyczne z doświadczalnego punktu widzenia, przedstawia też modele teoretyczne służące ich interpretacji. Omawiając wcześniejsze prace z tej dziedziny wspomina o dużym obecnie zainteresowaniu wykorzystaniem tego typu reakcji do otrzymywania jąder ciężkich spoza ścieżki stabilności. **W części omawiającej dynamiczne modele reakcji jądrowych mgr Tomasz Cap stwierdza m. in. iż „Przy energii pocisku z obszaru energii Fermiego zakaz Pauliego przestaje obowiązywać...” co wydaje mi się zbyt daleko idącym uproszczeniem omawianego problemu.** Jak wspomniałem, mgr Cap włożył duży wysiłek by język pracy był daleki od żargonu wprowadzając polskie określenia jak np. „kąt muśnięcia” w miejsce żargonowego „grazing angle”. **Jednak do końca nie mogło mu się to udać i już w pierwszym rozdziale znajdujemy takie terminy jak „dyssypacja” czy też „hipoteza randomizacji”.**

Rozdział trzeci to omówienie wcześniejszych prac dotyczących zderzeń jąder złota przy różnych energiach, zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych. W eksperymentach przeprowadzonych przy energii 15A MeV zaobserwowano emisję ciężkich fragmentów (z przedziału mas 60-150 jednostek) w szybkim, dynamicznym procesie rozerwania jednego lub obu zderzających się partnerów. Symulacje modelowe przeprowadzone przy dwóch energiach, 15A MeV i 23A MeV, pokazały, iż przy wyższej z energii faza prowadząca do powstania tzw „szyjki” między dwoma zderzającymi się partnerami jest znacznie zredukowana w porównaniu z wynikami dla niższej z energii.

W rozdziale czwartym omawia autor układ eksperymentalny. A jest co omawiać, bowiem układ CHIMERA jest jednym z najbardziej skomplikowanych układów detekcyjnych używanych w fizyce jądrowej. Składa się z aż 1192 modułów detekcyjnych (teleskopów), z których każdy zawiera dwa detektory cząstek naładowanych. CHIMERA pozwala rejestrować pozycję, energię i czas przelotu dla każdego zdarzenia, a dzięki zastosowaniu teleskopów rozróżniać produkty reakcji.

Sama kalibracja tak skomplikowanego układu jest bardzo pracochłonnym procesem. Rozdział piąty, drugi pod względem długości w całej pracy, poświęcony jest opisowi tego procesu. Należy podkreślić, że doktorant opracował procedurę kalibracji wykorzystującą metodę czasu przelotu i opublikował ją w pracy [94]. W omawianym rozdziale jest paragraf poświęcony procedurze autorstwa mgr Tomasza Capa. Po zapoznaniu się z tym rozdziałem czytelnik nabiera przekonania, iż autor jest w pełni doświadczonym eksperymentatorem, przygotowanym do prowadzenia własnych badań doświadczalnych.

Rozdział szósty należy z kolei do najkrótszych w pracy i przedstawia wielkości fizyczne używane w analizie danych doświadczalnych. Są wśród nich m.in. kąty emisji rejestrowanych fragmentów. **Uważam, że rozdział ten powinien być uzupełniony o rysunek pokazujący układ współrzędnych używany przez autora, co znacznie ułatwiło by jego czytanie.**

Przed wykonaniem właściwego pomiaru przeprowadzono eksperyment testowy, w którym bombardowano tarczę węglową jonami złota o energii 23A MeV. Układ ten wybrano ze względu na możliwość porównania wyników z wynikami eksperymentu przeprowadzonego przy podobnej energii (20A MeV). Eksperyment testowy potwierdził dobrą kalibrację energetyczną detektorów oraz prawidłową identyfikację emitowanych w reakcji fragmentów.

Rozdział ósmy to nie tyle krótki opis właściwego eksperymentu, co tytuł rozdziału mógłby sugerować, ale prezentacja wyników analizy tzw „zdarzeń kompletnych” zarejestrowanych w zderzeniach jonów złota. „Zdarzenia kompletne” to przypadki, w których zarejestrowano (w koincydencji) wszystkie emitowane ze zderzeń fragmenty. Ograniczając się do zderzeń z których emitowane były fragmenty cięższe od jonów ${}^7\text{Li}$, zaobserwowano dominację zdarzeń binarnych, prowadzących do emisji dwóch ciężkich fragmentów (ok. 88 procent wszystkich zdarzeń kompletnych). Fragmenty o masach zbliżonych do masy cząstek emitowane były pod przednimi kątami zaś te podobne do jader tarczy pod kątami wstecznymi, zgodnie z kinematycznymi przewidywaniami. **Uwagę moją zwrócił jednakowoż rysunek 8.4.f przedstawiający rozkład tarczopodobnych fragmentów o bardzo niesymetrycznym kształcie, znacznie odbiegającym od przewidywań.**

Zderzenia z trzema fragmentami w stanie końcowym to mniej niż 10 procent wszystkich zdarzeń. Doktorant omawia je w paragrafie 8.2.2. Analiza tych zdarzeń biorąc pod uwagę ich prędkości prowadzi do wniosku, iż powstają one albo na drodze szybkiej emisji lekkiego fragmentu (dysocjacji cząstki lub tarczy) lub też w procesach dwu-stopniowych, w których w pierwszym etapie powstają dwa fragmenty, z których jeden emituje w drugim stopniu lekką cząstkę. **Czytając ten rozdział z przyjemnością zauważyłem terminy rozpad zrelaksowany i rozpad nie zrelaksowany wprowadzone przez autora.**

Zdarzenia z czterema fragmentami w stanie końcowym to tylko parę procent wszystkich i powstają w wyniku procesów dwu-stopniowych, w których pierwszym stopniem jest wspomniana wyżej dysocjacja cząstki lub tarczy lub też dominujący proces binarny.

Zdarzenia semi-inkluzywne (szkoda, że nie udało się doktorantowi znaleźć polskiego określenia) to takie, w których zarejestrowano w koincydencji dwa fragmenty emitowane z jednego z fragmentów pierwotnych, ze szczególnym naciskiem na emisję z fragmentu pocisko-podobnego. Analiza biorąc pod uwagę ich rozkłady kątowe pozwoliła na oddzielenie zdarzeń szybkich od tych związanych z równowagą termodynamiczną pierwotnego fragmentu. Te pierwsze można powiązać z mechanizmem tworzenia się tzw „szyjki” w zderzeniach dwóch jader złota. Ich szczegółowa analiza pozwoliła doktorantowi na oszacowanie czasu jaki mija od momentu oderwania się od siebie pierwotnych fragmentów do momentu rozpadu fragmentu cząstko-podobnego.

Ostatnim rozdziałem jest podsumowanie, w którym autor sumuje swój (olbrzymi!) wkład pracy i uzyskane rezultaty naukowe. Wśród nich warto podkreślić spostrzeżenie, iż analizowana reakcja przebiega głównie w wyniku transferu kilku nukleonów i z tego powodu nie można wiązać z nią nadziei na wytwarzanie jader ciężkich lub superciężkich. Ciekawym wynikiem jest też obserwacja wielu zdarzeń związanych z powstaniem „szyjki”, **bowiem w świetle wcześniej cytowanej pracy teoretycznej prawdopodobieństwo takich zdarzeń powinno radykalnie maleć wraz ze wzrostem energii pocisku.** Innym ciekawym wynikiem

jest mała ilość obserwowanych zdarzeń związanych z szybkim sekwencyjnym rozpadem układu Au+Au na trzy lub cztery części – procesem obserwowanym przy niższej energii 15A MeV. **Wydawało by się, że ze wzrostem energii prawdopodobieństwo takich procesów wzrośnie (Rys.2.1).**

Jak już wyżej wspomniałem praca jest bardzo dobrze napisana i bardzo starannie zredagowana, choć oczywiście można w tekście znaleźć literówki typu „czątek” zamiast „cząstek” (str. 71) lub nie najszcześniejsze wyrażenia typu „nachodzenie się” zamiast „nakładanie się” (str 86). **Jednak najbardziej brakuje mi w pracy szerszego porównania wyników uzyskanych wcześniej, przy niższej energii 15A MeV, z wynikami obecnymi (jeszcze jeden rozdział).** We wstępie mgr Tomasz Cap deklaruje, iż „Niniejsza praca ma na celu zbadanie jakie procesy zachodzą w zderzeniach dwóch jąder złota przy energii pocisku wynoszącej 23 MeV na nukleon”. Rzeczywiście procesy te doktorant szczegółowo, z ogromnym nakładem pracy zbadał, jednak szerokie porównanie z procesami odkrytymi w identycznym eksperymencie przy niższej energii byłoby, moim zdaniem, bardzo interesujące.

Nie mam jednak żadnych wątpliwości, że mgr Tomasz Cap uzyskał bardzo wartościowe wyniki doświadczalne stosując nowoczesne metody pomiarowe i nowatorskie metody analizy danych. Jestem przekonany, że praca doktorska pana mgr Tomasza Capa spełnia warunki określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2014 r. poz. 1852 i Dz.U. z 2015 r poz. 249) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Krzysztof Rusek

Warszawa, 21.03.2018