

Recenzja pracy doktorskiej mgr Sahil Upadhyaya
pt. „Systematic analysis of nuclear reactions with a neutron rich projectile on multiple targets
at intermediate energies”

Badania zderzeń ciężkich jonów dla pośrednich energii (10-100) MeV/A od wielu lat dostarczają stale nowych, ważnych i często spektakularnych informacji o jądrach atomowych i procesie oddziaływań. Są przedmiotem stale rozwijających się modeli teoretycznych oraz nowych wielo-licznikowych systemów detekcji produktów zderzeń ciężkich jonów z identyfikacją ładunku Z i masy A w przestrzeni 4π .

Celem pracy doktorskiej Pana mgr Sahil Upadhyaya było przeprowadzenie analizy wyników pomiarowych uzyskanych w kolejnym eksperymencie FAZIA-PRE w międzynarodowym dużym projekcie FAZIA, przeprowadzonym w lutym 2018 roku. Muszę tu na początku mojej opinii zaznaczyć, że ten cykl pomiarowy przeprowadzony w LNS-INFN Catania w lutym 2018 roku dla wybranych układów i energii zderzających się jonów był przygotowany przez doktoranta mgr Sahil Upadhyaya, który aktywnie uczestniczył w pomiarach, zbieraniu danych pomiarowych oraz przeprowadził szczegółową analizę przy pomocy zaawansowanych modeli teoretycznych. Badania przeprowadzono dla układów $^{48}\text{Ca}+^{12}\text{C}$ i $^{48}\text{Ca}+^{27}\text{Al}$ dla energii 25 i 40 MeV/A oraz układu $^{48}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ dla energii 25 MeV/A. Celem tych badań było uzyskanie nowych informacji o członie energii symetrii (E_{sym}) w jądrowym równaniu stanu (nEoS)-(*nuclear Equation-of-State*), niezbędnych do dalszych systematycznych badań zależności (E_{sym}) od transferu izospinu. W tym celu jadra tarczy ^{12}C , ^{27}Al i ^{40}Ca o stosunku $(N/Z)\sim 1$, były bombardowane jonami ^{48}Ca o nadmiarowej liczbie neutronów $(N/Z)=1.4$, o energii 25 MeV/A i 40 MeV/A. Taki wybór warunków eksperymentu pozwolił na badanie ewolucji stosunku (N/Z) fragmentów reakcji w funkcji masy tarczy oraz energii.

Praca doktorska mgr Sahil Upadhyaya powstała w ramach Studiów Doktoranckich w Zakładzie Fizyki Jądrowej, Instytutu Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, we współpracy w międzynarodowej kolaboracji projektu FAZIA (Four- π , A i Z Identification-Array).

Układ rozprawy doktorskiej mgr Sahil Upadhyaya jest prawidłowy zarówno w części opisowej, gdzie zebrano w sposób wyczerpujący wiedzę związaną ze zderzeniami ciężkich jonów, eksperymentalnej, dotyczącej budowy układu detekcyjnego, pomiarów jak i analizy wyników eksperymentalnych oraz szczegółową analizą teoretyczną.

Praca doktorska mgr Sahil Upadhyaya jest napisana w j. angielskim, zawiera 107 stron, składa się ze wstępu, 4 zasadniczych rozdziałów, podsumowania wyników, spisu literatury (107 pozycji), spisu rysunków (88) i tabel (9).

Pierwszy rozdział (*Introduction*) związany jest z opisem fizycznych podstaw dynamiki zderzeń ciężkich jonów. W rozdziale tym autor omawia i dyskutuje zderzenia ciężkich jonów w funkcji energii i parametru zderzenia. W rozdziale tym doktorant przedstawił również podstawy teoretyczne jądrowego równania stanu materii jądrowej (nEoS), dla jąder dalekich od stanu podstawowego, t.j. dla jąder o asymetrii neutron-proton i jąder o ekstremalnie wysokich energiach wzbudzenia. Na końcu tego rozdziału omówiono możliwość badania proces transferu izospinu do końcowych produktów zderzeń ciężkich jonów, poprzez systematyczne studiowanie stosunku N/Z produktów reakcji.

W rozdziale 2 (*The FAZIA and FAZIA-PRE experiment*) autor omawia budowę systemu detektora FAZIA, a w szczególności detektora FAZIA-PRE, jaki został wykorzystany w pomiarach, które są przedmiotem pracy doktorskiej Pana mgr Sahil Upadhyaya. Detektor FAZIA-PRE, jako detektor demonstracyjny składa się obecnie z sześciu modułów, każdy po 16-cie teleskopów ($\text{Si}_1(300\mu\text{m})\text{-Si}_2(300/500\mu\text{m})\text{-CsI(Tl}(10\text{cm}))$). Zarówno budowa detektora jak i metoda identyfikacji ładunku (Z) i masy (A) produktów reakcji, techniką (PSA) i (DE-E), została dobrze przedstawiona na odpowiednio dobranych rysunkach, zdjęciach i przykładowych wykresach. Moduły detektora FAZIA-PRE umieszczone były w odległości 1m od tarczy wewnątrz komory CICLOPE, w INFN LNS Catania. Zakres kątowy detekcji 16-tu modułów multidetektora FAZIA-PRO wraz z fotografią całego zestawu pomiarowego przedstawiono na rys. 2.17(a) i (b). Geometria układu pomiarowego pozwoliła na detekcje prawie wszystkich „quasi-projectile” (QP) produktów badanych reakcji. Parametry charakteryzujące badane reakcje: zestawiono w tabeli 2.1, 2.2 i 3.3.

Z przykładowych prezentacji wyników pomiarowych widać że, osiągnięto bardzo dobrą identyfikację produktów reakcji (Z, A) oraz znakomitą rozdzielczość energetyczną i granulację kątową detekcji produktów reakcji dla przednich kątów ($\sim 2^0\text{-}8^0$) i ($12^0\text{-}16^0$).

W następnych trzech obszernych rozdziałach (3. *Data analysis*, 4. *Description of intermediate energy nuclear reactions using HIPSE*, 5. *Comparison of FAZIA-PRE experimental data with HIPSE simulations*) bardzo dobrze przeprowadził analizę danych eksperymentalnych i teoretycznych tak, aby można było zbadać efekt wpływu jąder tarczy (^{12}C , ^{27}Al i ^{40}Ca) oraz energii wiązki jonów ^{48}Ca (25 MeV i 40 MeV) na wybrane podstawowe fizyczne „observable” fragmentów reakcji: ładunek Z, masa A, prędkość fragmentu v i całkowitą krotność cząstek naładowanych M_{tot} dla ($Z>1$).

Na rys. 3.1 i tabelach 3.1 i 3.2 przedstawiono średnie wartości tych obserwabli dla 5 badanych reakcji. Porównanie zależności rozkładu $P(Z)$, $P(A)$ i $P(M_{\text{tot}})$ fragmentów reakcji w funkcji masy jądra tarczy oraz energii wiązki E_B przedstawiono odpowiednio na rys. 3.2 i 3.3.

Oddzielnie dane pomiarowe badanych reakcji uzyskane w eksperymencie FAZIA-PRE przedstawiono tak, aby można było porównać rozkłady izospinu (N/Z) fragmentów, jako produktów reakcji w zależności od masy jądra tarczy i energii wiązki E_B . Rys. 3.4 przedstawia rozkład prawdopodobieństwa $P(N)$, (gdzie $N=A-Z$), dla fragmentów w przedziale od $Z=3$ do $Z=20$. W celu badania transportu izospinu w badanych reakcjach, na Rys. 3.5 przedstawiono wartości $\langle N \rangle / Z$ w funkcji Z, osobno dla reakcji przy 25 MeV/A i 40 MeV/A. Ze wszystkich tych prezentacji danych eksperymentalnych, doktorant uzyskuje szereg jakościowych informacji, które szczegółowo omawia i dyskutuje.

Różnice $\delta T \langle N \rangle / Z$ w funkcji ładunku Z i prędkości wzdłużnej v_{II} dla badanych systemów, autor zestawiał na Rys. 3.6 i 3.7. Następne zestawienie danych pomiarowych (Rys. 3.9) przedstawia $\langle N \rangle / Z$ w funkcji v_{II} dla układów z tarczami ^{12}C , ^{27}Al i ^{40}Ca , przy energii 25 MeV/A, osobno dla każdego Z od $Z=3$ do $Z=20$ oraz na osobnym zestawieniu (Rys. 3.10) dla masy tarcz ^{12}C i ^{27}Al , przy energii 40 MeV/A. Dalsze ciekawe zestawienia danych eksperymentalnych w funkcji energii E_B , doktorant przedstawił dla badanych reakcji na wykresach (Rys.3.13) do (Rys. 3.15). Takie specjalne przedstawienie danych pomiarowych wymagało od autora wiele pracy, inwencji i poświęconego czasu.

Wnioski z tych porównań wyników eksperymentalnych, doktorant szczegółowo przedstawił już w tym rozdziale, ale pełny zestaw wniosków znajduje się w ostatnim rozdziale (6. *Summary and conclusion*), po bardzo dobrze przeprowadzonej analizie teoretycznej i porównaniu danych pomiarowych z wynikami teoretycznymi.

W Rozdziale 4. „*Description of intermediate energy nuclear reactions using HIPSE*”, autor pracy doktorskiej w wyczerpujący sposób przedstawił możliwości opisu zderzeń ciężkich jonów przy pomocy fenomenologicznego modelu HIPSE, łącznie ze statystycznymi generatorami SIMON i GEMINI++ następnymi rozpadów, prowadzących do końcowych fragmentów zderzenia.

Przykładowo, możliwości modelu HIPSE pokazano przeprowadzając symulacje dla reakcji $^{48}\text{Ca}+^{27}\text{Al}$ przy energii 40 MeV/A (bez filtrów, dla produktów reakcji w 4π), z maksymalnym parametrem zderzenia $b_{\text{max}}=8$ fm. Uzyskane wyniki rozkładów $P(M_{\text{tot}})$, $P(Z)$ i $P(A)$ dla ($Z \geq 1$), przedstawiono na rysunkach (Rys.4.6, 4.7 i 4.8), a średnie wartości rozkładów $\langle Z \rangle$, $\langle A \rangle$, $\langle M_{\text{tot}} \rangle$ oraz średnie wartości multiplicity kolejno dla p, d, t, ^3He , ^4He ($\langle M_p \rangle$, $\langle M_d \rangle$, $\langle M_t \rangle$, $\langle M_{^3\text{He}} \rangle$ i $\langle M_{^4\text{He}} \rangle$) zestawiono w interesujących tabelach, dla symulacji modelami HIPSE-PF, HIPSE SIMON i HIPSE-GEMINI++. Te same symulacje przy zastosowaniu generatorów dla HIPSE SIMON i HIPSE-GEMINI++ doktorant wykonał i porównał po fizycznych cięciach zgodnych z warunkami eksperymentu FAZIA-PRE. Widać, że wyniki zebrane w Rozdziale 5. „*Comparizon of FAZIA-PRE experimental data with HIPSE simulations*” są konsistentne i dobrze oddają opis reakcji z ciężkimi jonami dla pośrednich energii. Uważam, że te symulacje jeszcze przed porównaniem z danymi eksperymentalnymi zestawionymi dla podstawowych „obserwabli” oraz efektu izospinowego (N/Z) produktów reakcji, w funkcji masy tarczy i energii jonu padającego na tarczę są interesujące i ważne. Na zakończenie tego rozdziału doktorant umieścił 15 złożonych rysunków, gdzie wszystkie wcześniej prezentowane dane eksperymentalne dla wszystkich pięciu badanych reakcji, porównuje z odpowiednimi wynikami modelowych symulacji przy pomocy HIPSE-SIMON i HIPSE-GEMINI. Liczbowe średnie wartości uzyskane z symulacji $\langle Z \rangle$, $\langle A \rangle$, $\langle M_{\text{tot}} \rangle$ i $\langle v_{\text{II}} \rangle$ dla fragmentów, wszystkich badanych reakcji, autor zebrał i porównał z odpowiednimi średnimi wartościami eksperymentalnymi w Tabeli 5.1 i Rys.5.4. Pracę dokorską zamyka rozdział 6. „*Summary and conclusion*”, gdzie w sposób jakościowy, jeszcze raz spisano osobno wnioski wynikające z analizy danych eksperymentalnych, analizy wyników symulacji modelowych i porównania symulacji z eksperymentem. Uzyskane wyniki na pewno przyczynią się do urealnienia systematyki badań reakcji związanych z transferem izospinu do końcowych fragmentów reakcji z ciężkimi jonami dla pośrednich energii. Niestety mimo ogromnej pracy włożonej w pomiary i analizę teoretyczną, nie znaleziono formuły matematycznej transferu izospinu.

W pracy znalazłem kilka drobnych pomyłek, np. na str. 27, Rys.2.15 na osi poziomej N powinno zaczynać się od $N=0$, nie od $N=1$. Podpis pod Rys,4.8 jest taki sam jak na Rys. 4.7. Poza drobnymi niezgrabnymi sformułowaniami oraz stwierdzeniami żargonowymi nie znalazłem istotnych błędów redakcyjnych.

Badania zostały przeprowadzone prawidłowo, autor wykazał się dużą wiedzą eksperymentalną oraz dużą samodzielnością i starannością w opisie przeprowadzonego eksperymentu i opisie zaawansowanej analizy danych pomiarowych oraz przeprowadzeniu analizy teoretycznej. Tekst i rysunki pracy zostały uzupełnione adekwatnymi odnośnikami do literatury.

Muszę dodać, że doktorant od kilku lat zajmuje się tematyką badania reakcji z ciężkimi jonami przy pośrednich energiach i jest współautorem w 11-tu publikacjach (w tym jednej jako jedyny autor) oraz wygłosił 4 referaty na specjalistycznych konferencjach, a także prezentował 2 postery. Wyniki jego pracy doktorskiej są przygotowane do publikacji w której S. Upadhyaya ma być pierwszym współautorem.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Zagadnienia którymi zajmuje się doktorant dotyczą bardzo interesującej, potrzebnej tematyki badawczej uprawianej jedynie w renomowanych laboratoriach fizyki jądrowej.

Uważam, że cel pracy został osiągnięty, wyniki badań są znakomicie przedstawione i przedyskutowane. Autor uzyskał bogaty i rzetelny materiał eksperymentalny, który powinien być przedmiotem dalszych badań teoretycznych przy pomocy innych modeli zderzeń ciężkich jonów.

Stwierdzam że, praca doktorska spełnia wymogi ustawowe i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr Sahil Upadhyaya do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wiktor Zipper