

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Mariusza
Wojciechowskiego pt. „Light and intermediate mass fragment
emission from proton – nucleus collisions”.**

Rozprawa doktorska Pana mgr Mariusza Wojciechowskiego powstała na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego we współpracy z Centrum Badawczym w Julich w Niemczech. Pomiary zostały przeprowadzone w ramach projektu PISA (Proton Induced Spallation) na akceleratorze COSY (COoler SYnchrotron) w Centrum Badawczym w Jülich. Promotorem pracy jest profesor Bogusław Kamys z Zakładu Fizyki Jądrowej Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Mechanizmu oddziaływania proton-jądro atomowe dla energii rzędu GeV nie jest w dalszym ciągu wystarczająco dobrze poznany. Badania produkcji jądrowych fragmentów powstałych w zderzeniach protonów z ciężkimi jądrami prowadzone są w kilku ośrodkach naukowych od prawie czterech dekad. Badanie tych zderzeń jest niezwykle przydatne w zrozumieniu procesów prowadzących do wysoko wzbudzonej materii jądrowej, jej własności oraz procesów emisji nukleonów i cięższych fragmentów materii jądrowej. Wymienić tu można wiele interesujących zagadnień związanych z równowagą termodynamiczną, dynamiką ekspansji, sekwencyjną i jednoczesną emisją fragmentów z wysoko wzbudzonej materii jądrowej.

Procesy zderzeń proton-jądro atomowe mogą być wykorzystane w praktyce do produkcji intensywnych wiązek neutronów („spallation sources of neutrons”), a silne strumienie neutronów mają zastosowanie w badaniach podstawowych, biologicznych, materiałowych i ciała stałego, a także w energetyce jądrowej i transmutacji odpadów z rozczepianych reaktorów jądrowych.

Ważnym jest również aspekt astrofizyczny w produkcji izotopów Li, Be i B poprzez wysoko energetyczne protony w promieniowaniu kosmicznym i w systemie Słonecznym.

Dobrze pracujące modele teoretyczne zderzeń protonów z jądrami atomowymi pozwolą na przewidywanie produkcji lekkich i ciężkich fragmentów materii jądrowej w szerokim zakresie mas jader tarczy i energii bombardujących protonów.

W 1999 roku w Centrum Badawczym w Jülich powstał zespół fizyków, głównie z Uniwersytetu Jagiellońskiego, którego celem było w ramach nowego projektu zwanego PISA zbudowanie aparatury do prowadzenia eksperymentów pozwalających na badanie zderzeń protonów z jądrami atomowymi na wewnętrznej wiązce synchrotronu COSY. Pierwsze pomiary dla szeregu tarcz (C, Ni i Au) zostały wykonane w pod koniec 2002 roku dla protonów o energii 1.9 GeV. W pracach kolaboracji eksperymentu PISA mgr Mariusz Wojciechowski praktycznie od początku brał czynny udział. Pierwsze prace związane z eksperymentem PISA zostały opublikowane w 2004 roku i mgr. Mariusz Wojciechowski był już w nich współautorem.

Celem pracy doktorskiej mgr Mariusza Wojciechowskiego było przeprowadzenie badań dla zderzeń proton-Ag. Wyznaczono podwójnie różniczkowe widma $d^2\sigma/d\Omega dE$ dla lekkich cząstek naładowanych (LCP): protonów, deuteronów, trytonów i $^3,4,6\text{He}$ oraz jader o pośrednich masach (IMF): $^6,7,8,9\text{Li}$, $^7,9,10\text{Be}$ i $^{10,11,12}\text{B}$, które zostały zmierzone pod 7 kątami: 15.6, 20, 35, 50, 65, 80 i 100 stopni w układzie laboratoryjnym dla reakcji protonów na tarczy Ag. Pomiary wykonano dla trzech energii protonów: 1.2 GeV, 1.9 GeV i 2.5 GeV. Przeprowadzono szczegółową analizę danych doświadczalnych przy pomocy dwustopniowych mikroskopowych modeli teoretycznych. Uzyskane wyniki swoich badań dla układu p+Ag porównano z wynikami dla zderzeń p+Ni i p+Au, które zostały uzyskane wcześniej w eksperymencie PISA w tym samym zakresie energii wiązki protonów.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. Mariusza Wojciechowskiego, napisana jest w języku angielskim, zawarta jest na 118 stronach. Praca ma typową strukturę dla eksperymentalnych rozpraw doktorskich i składa się z części związanej z pomiarami oraz drugiej części poświęconej prezentacji modeli teoretycznych i analizie wyników pomiarowych. Całość pracy składa się z ośmiu rozdziałów wraz z krótkim wstępem, spisem literatury, podsumowaniem i konkluzjami. Praca na końcu zawiera także pięć istotnych aneksów, bardzo dobrze wydzielonych z głównej części rozprawy.

We wstępie autor wyraźnie zaznaczył cel swojej pracy doktorskiej. Przegląd obecnego stanu wiedzy związanej z mechanizmem reakcji zderzeń proton-jądro atomowe dla energii protonów rzędu GeV autor przedstawił w rozdziale drugim, który kończy się dobrze przemyślanym podsumowaniem. Z tego podsumowania widać wyraźnie konieczność dalszych badań podjętych właśnie w recenzowanej dysertacji.

W trzecim rozdziale opisano eksperyment PISA oraz przeprowadzenie pomiarów dla reakcji proton + Ag na wewnętrznej wiązce protonów akceleratora COSY w Centrum Badawczym Jülich. Na rys. 3.1 schematycznie przedstawiono układ akceleracyjny COSY wraz miejscami eksperymentów zlokalizowanych na wiązce zewnętrznej i wewnętrznej. Układ eksperymentu PISA, komora

rozproszeń wraz z tarczą oraz teleskopami detekcyjnymi produktów zderzeń proton-jądro atomowe przedstawiono na rys. 3.3. Cały system pomiarowy, identyfikacja i pomiar energii produktów zderzenia p+Ag oraz normalizacja danych pomiarowych zostały tu dobrze opisane. Znakomite możliwości identyfikacji fragmentów zderzeń i pomiar ich energii przy pomocy teleskopów $\Delta E-E$ przedstawiono przykładowo na rysunkach 3.4-3.6. Muszę tu jednak nadmienić, że jest to kolejna praca doktorska związana z eksperymentem PISA i oczywiście podobne opisy znajdują się we wcześniejszych dysertacjach i publikacjach.

Eksperymentalne dane rozkładów kątowych i energetycznych dla lekkich cząstek naładowanych (LCP) i jąder o pośrednich masach (IMF) uzyskane w eksperymencie PISA dla energii protonów 1.2 GeV, 1.9 GeV i 2.5 GeV autor dysertacji przedstawił na rysunkach 4.4-4.11 w rozdziale czwartym. W rozdziale tym mgr. M. Wojciechowski dyskutuje również porównanie swoich danych eksperymentalnych z danymi literaturowymi dla energii protonów 1.2 GeV prezentowanymi w pracy Herbach et al. Nucl. Phys. (2006). Wyniki przedstawione na rysunkach 4.1-4.3 wskazują na bardzo dobrą zgodność z danymi literaturowymi. Dane eksperymentalne ocenianej pracy doktorskiej charakteryzują się wyraźnie mniejszymi błędami statystycznymi. Porównanie całkowitych przekrojów czynnych dla wszystkich izotopów H, He, Li i Be produktów reakcji p+Ag otrzymanych w pracy Herbach, et al. z danymi eksperymentu PISA dla energii protonów 1.2 GeV, autor przedstawił na rys. 4.3. Całkowite przekroje czynne w obu eksperymentach zostały otrzymane przez całkowanie podwojenie różniczkowych przekrojów czynnych $d^2\sigma/d\Omega dE$ w tym samym przedziale kątów i energii. Uzyskano znakomitą zgodność wyników pomiarowych dla dwu zupełnie różnych eksperymentów, prowadzonych na wewnętrznej i zewnętrznej, wiązce protonów, różnych metodach, innym systemie detekcji a także innej metodzie normalizacji. Świadczy to również o rzetelności wyników eksperymentalnych zderzeń p+Ag prezentowanych w rozprawie doktorskiej mgr M. Wojciechowskiego.

Następne trzy rozdziały autor poświęcił na szczegółową prezentację modeli teoretycznych, zderzeń proton-jądro wykorzystanych do analizy danych eksperymentalnych uzyskanych w ramach swojej pracy doktorskiej. W rozdziale piątym omawiane są modele bazujące na założeniu Serbera(1947), że reakcja zderzenia zachodzi w dwu kolejnych stopniach. W pierwszym stopniu wysokoenergetyczny proton inicjuje kaskadę zderzeń nukleon-nukleon i pion-nukleon wewnątrz jądra atomowego. Część nukleonów lub ich grupa opuszcza jądro a energia pozostałych prowadzić może do wzbudzenia jądra atomowego. Ten przed-równowagowy proces jest źródłem emisji wysokoenergetycznych nukleonów i lekkich cząstek naładowanych (LCP), emitowanych głównie w kierunku wiązki protonów. Gdy jądro osiągnie stan równowagi zaczyna się drugi stopień reakcji zderzenia, opisywany poprzez różne modelowe procesy deekscytacji. W dalszej części autor w szczegółach przedstawia model kaskady

wewnątrz jądrowej w wersji Liège (INCL). Nowa wersja tego modelu z możliwością zajścia tzw. procesu „coalescence mechanizm”, znana jest jako model INCL4.3 (2004). W następnych podrozdziałach autor dyskutuje i przedstawia modele sekwencyjnej lub równoczesnej deekscytacji jako drugiego stopnia reakcji zderzenia protonów z jądrami atomowymi. Prezentowany jest model wyparowania GEM2 (2002) oraz model równoczesnej emisji jako statystyczny model wielofragmentacji (SMM). Modele te autor wykorzystuje w analizie swoich danych pomiarowych.

Wyniki teoretycznych obliczeń modelowych INCL4.3, GEM2 i SMM w porównaniu z danymi eksperymentalnymi autor dysertacji szczegółowo przedstawia na wielu dobrze opracowanych rysunkach (rys. 5.1- rys. 5.11), zależności energetycznej $d^2\delta/d\Omega dE$ dla wszystkich izotopowych produktów, wybranych kątów detekcji i energii wiązki protonów. Do teoretycznego opisu wykonano również obliczenia przy pomocy najnowszej wersji modelu INCL4.6, który pozwala na włączenie efektu „coalescencji” z liczbą masową $A < 9$.

Widać jednak z tej obszernej analizy że, mikroskopowy dwu etapowy model INCL4.3 łącznie z modelami GEM2 i SMM nie opisuje danych eksperymentalnych w zadawalający sposób. Wysoko energetyczna część widm dla fragmentów o pośrednich masach (IMF) nie jest dobrze opisana. Również widma energetyczne dla lekkich naładowanych cząstek (LCP) w obszarze energii ok. 35-150 MeV są słabo opisane. Model INCL4.3 dobrze opisuje widma energetyczne dla LCP dla wyższych energii. Jednak włączenie efektów „koalescencji” nie dało poprawy opisu IMF dla wyższych energii widma energetycznego.

W rozdziale szóstym mgr M. Wojciechowski prezentuje tzw. model fenomenologiczny (Appendix A) umożliwiający włączenie dodatkowej emisji z jednego lub dwu poruszających się fragmentów jako źródeł o określonych parametrach: prędkości, temperatury i wydajności. Dodatkowym parametrem fenomenologicznym jest w tym modelu jeszcze parametr skalowania F przy pomocy którego można dopasować udział modeli mikroskopowych z uwzględnieniem modelu fenomenologicznego z jednym lub dwoma poruszającymi się źródłami emisji lekkich cząstek lub cząstek o pośrednich masach. Parametry te są traktowane jako wielkości które otrzymuje się z najlepszego dopasowania obliczeń modelowych do danych pomiarowych. Podejście takie zostało zaproponowane już wcześniej w analizie pomiarów eksperymentów PISA dla układów $p+Ni$ (A. Budzanowski et al. 2009) oraz $p+Au$ (A. Budzanowski et al. 2008), gdzie wystąpiły bardzo podobne problemy w opisie danych, jak w analizie prowadzonej przez M. Wojciechowskiego dla układu $p+Ag$. Wyniki obliczeń dla izotopów $^1,2,3H$ zostały przedstawione na rys. 6.2, a dla izotopów $^3,4,6He$ na rys. 6.3. Wszystkie parametry modelu fenomenologicznego z jednym poruszającym się źródłem zestawiono w tab. 6.1. Podobnie wyniki obliczeń dla izotopów $^6,7,8,9Li$, $^7,9,10Be$ i $^{10,11,12}B$ przedstawiono na rys. 6.4-6.6, a wszystkie parametry modelu fenomenologicznego z dwoma

poruszającymi się źródłami emisji zestawiono w tabeli 6.3. Wszystkie obliczenia i porównanie z danymi pomiarowymi Autor przeprowadził dla trzech energii wiązki protonów.

W obszernym rozdziale 7 zestawiono i porównano każdy z parametrów modelu fenomenologicznego dla trzech energii wiązki protonów i trzech układów $p+Ni$, $p+Ag$ i $p+Au$, otrzymanych z trzech niezależnych analiz danych pomiarowych. Widać wyraźną systematykę czy tendencję małej zmiany tych parametrów, ale powiązanie ich interpretacji z modelami mikroskopowymi jest na pewno trudne.

Pracę zamyka podsumowanie wyników, modelowej analizy danych z koniecznością dodania do modeli mikroskopowych, opisu przy pomocy modelu fenomenologicznego. Wyniki uzyskane w ramach dysertacji mgr Mariusza Wojciechowskiego dla układu $p+Ag$ nie zostały jeszcze opublikowane, a z pewnością są rzetelnym i cennym materiałem do dalszych analiz teoretycznych.

W pracy nie znalazłem błędów mających istotny wpływ na moją wysoką ocenę otrzymanych wyników i samą redakcję pracy doktorskiej. Nie odnoszę się do poprawności języka angielskiego, gdyż nie jestem kompetentny w tym zakresie. Wszystkie procedury zarówno związane z eksperymentem jak i z analizą oraz interpretacją wyników zostały bardzo dobrze opisane. Wyniki badań zostały znakomicie przedstawione w starannych i dobrze przygotowanych tabelach, rysunkach oraz wykresach. Jednakże praca zawiera pewne usterki, które przykładowo wypisuje poniżej:

1. Uważam, że w spisie literatury powinny znajdować się wszystkie dotychczasowe Prace Doktorskie wykonane w ramach eksperymentu PISA.
2. W spisie literatury nie znalazłem prac dotyczących eksperymentu PISA, w których Mariusz Wojciechowski jest także współautorem :
V. Bolini et al. „Light charge particle and intermediate mass fragment cross-sections in GeV proton induced reactions”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A562 (2006) 733,
A. Bubak et al. „Non-equilibrium emission of complex fragments from Au+p collisions at 2.5 GeV proton beam energy”, Phys. Rev. C 76, 014618 (2007).
R. Barna et al. „PISA-an experiment for fragment spectroscopy at the Internal Beam of COSY; application of an Axial Ionization Chamber” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A519 (2004) 610-622.
3. Błędne podpisy i opisy rysunków: 3.6, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 i 6.6

Podsumowując, stwierdzam że rozprawa doktorska Pana Mariusza Wojciechowskiego zawiera cenne i wiarygodne dane pomiarowe obarczone stosunkowo małym błędem. Analiza modelowa została bardzo rzetelnie

przeprowadzona i dostarcza wiele nowych informacji dotyczących parametrów modelu fenomenologicznego.

Chcę jednocześnie podkreślić, że zarówno obszerna część opisowa jak i przeprowadzenie pomiarów i analiz, mogą stanowić bardzo pomocny materiał przydatny przyszłym adeptom eksperymentalnych badań zderzeń proton-jądro atomowe.

Doceniam znaczny wkład pracy wniesiony przez Autora do projektu PISA realizowanego przez wieloosobową grupę badawczą. Stwierdzam z pełnym przekonaniem, że rozprawa Pana mgr Mariusza Wojciechowskiego zasługuje na wysoką ocenę i spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim w Polsce. Wnoszę o dopuszczenie Pana mgr Mariusz Wojciechowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Wiktor Zipper