

**Recenzja pracy doktorskiej mgra Mariusza Wojciechowskiego  
pod tytułem  
„Light and intermediate mass fragment emission from proton-nucleus collisions”.**

Praca doktorska Pana mgra Mariusza Wojciechowskiego poświęcona jest badaniu procesów spalacji jąder atomowych. Przedmiotem analizy są dane pomiarowe otrzymane w eksperymencie PISA wykonanym w Centrum Badawczym Jülich na synchrotronie COSY, w którym była badana emisja lekkich cząstek naładowanych oraz fragmentów o pośrednich masach z jąder srebra bombardowanych protonami o energiach 1.2, 1.9 oraz 2.5 GeV. Rezultatem przeprowadzonej analizy danych są energetyczne i kątowe rozkłady przekrojów czynnych na emisję cząstek. Otrzymane wyniki zostały zinterpretowane na podstawie porównań z wynikami symulacji modelowych. Rozprawa napisana jest w języku angielskim, liczy 118 stron, składa się z 8 rozdziałów, pięciu aneksów oraz spisu literatury zawierającego 85 pozycji.

We wstępie Autor przedstawił motywację i cel naukowy pracy oraz zwięźle opisał jej strukturę. W szczególności zwrócona została uwaga na duże znaczenie prowadzonych badań procesów spalacji. Wynika ono nie tylko ze względów poznawczych, ale także z możliwości wykorzystania tych procesów w akceleratorowych źródłach neutronów, które z kolei można zastosować m.in. do budowy subkrytycznych reaktorów, czy też transmutacji długożyciowych odpadów radioaktywnych w krótkożyciowe.

W rozdziale drugim omówiony jest aktualny stan wiedzy na temat reakcji proton-jądro przy energiach rzędu GeV. Autor wskazuje na brak pomiarów różniczkowych przekrojów czynnych dla reakcji z jądrami srebra lub jądrami o podobnych masach przy energiach kilku GeV. Wypełnienie tego braku było jednym z celów omawianej rozprawy. Moja jedyna uwaga krytyczna odnosząca się do tego rozdziału dotyczy opisu rysunku 2.2. Autor podaje, że pokazane na nim widma energetyczne fragmentów zostały opisane przez model kropelkowy Fisher'a. Nie może to być prawdą ponieważ ten model stosuje się jedynie do opisu rozkładu masy fragmentów. W rzeczywistości, pokazane na rysunku linie przedstawiają rezultat obliczeń wykonanych w ramach modelu poruszających się źródeł z parametrami uzyskanymi przez dopasowania do danych doświadczalnych w zakresie wyższych energii pocisków.

W rozdziale trzecim Autor opisuje techniczne aspekty eksperymentu PISA, szczegółowo przedstawia budowę oraz zasadę działania systemu detekcyjnego. Układ pomiarowy składał się z siedmiu teleskopów z półprzewodnikowymi detektorami krzemowymi oraz scyntylacyjnymi kryształami CsI, które były umieszczone w zakresie kątów  $15.6^\circ - 100^\circ$  względem osi wiązki. Pokazane zostały przykładowe rezultaty pomiarów w postaci map typu  $\Delta E - E$ , które służą do identyfikacji produktów reakcji. Pozwalały one określać liczby atomowe cząstek w zakresie  $Z = 1 - 8$  oraz liczby masowe cząstek o  $Z \leq 5$ . Mapy  $\Delta E - E$  wykorzystane zostały także w procedurze kalibracji energetycznej detektorów. Opis kalibracji detektorów krzemowych jest zbyt zdawkowy, brakuje informacji o tym, co było dopasowywane do przebiegu linii izotopowych na mapach  $\Delta E - E$  i z jakim rezultatem. W ostatnim podrozdziale opisany jest sposób wyznaczenia absolutnej normalizacji przekrojów czynnych w oparciu o dane literaturowe.

Wyniki analizy danych pomiarowych zostały przedstawione w rozdziale czwartym. Są nimi podwójnie różniczkowe przekroje czynne na emisję lekkich cząstek naładowanych i fragmentów o pośrednich masach. Otrzymane dane obejmują szeroki zakres energii i kątów, dzięki czemu można było wyznaczyć także całkowite przekroje czynne. Wykazują one bardzo dobrą zgodność z opublikowanymi wcześniej wynikami dla reakcji  $p + Ag$  przy energii 1.2 GeV, pochodzącymi z innego eksperymentu. Nowe dane cechują się jednak znacznie mniejszymi błędami statystycznymi. Analizując rozkłady katowe Autor stwierdza, że emisja cząstek o niskich energiach jest izotropowa, natomiast natężenie emisji cząstek o wysokich energiach silnie maleje ze wzrostem kąta detekcji. Można zatem wnioskować, że wysokoenergetyczna część widm pochodzi z nierównowagowej emisji zachodzącej w początkowej fazie reakcji. Charakterystyki widm energetycznych produktów spalacji są bardzo podobne dla wszystkich trzech energii wiązki protonowej. Obserwuje się jedynie niewielki wzrost przekrojów czynnych ze wzrostem tej energii. Odnosząc się do tej części rozprawy, pewien niedosyt budzi brak informacji o tym, czy i w jaki sposób uwzględniona została przy wyznaczaniu przekrojów czynnych obecność tła oraz wydajność detekcji.

Rozdział piąty zawiera wyniki przeprowadzonych obliczeń modelowych. Zastosowany został model dwustopniowy, w którym pierwszą, dynamiczną fazę reakcji opisuje model wewnątrzjądrowej kaskady zderzeń nukleon-nukleon INCL4.3. Uwzględnia on możliwość klasteryzacji emitowanych nukleonów poprzez mechanizm powierzchniowej koalescencji. Do opisu dalszego etapu reakcji, w którym następuje rozpad stermalizowanego jądra tarczopodobnego, zastosowany został model statystycznego wyparowania cząstek GEM2 oraz model statystycznej multifragmentacji SMM. Modele zostały przedstawione we wstępnej części rozdziału. Przy opisie modelu SMM można było wspomnieć o tzw. objętości wymrożenia (freeze-out volume) i podać jaka jej wartość została założona w przeprowadzonych obliczeniach. Warto było także podać odnośnik do obszernego, przeglądowego artykułu traktującego o modelu SMM: J.P. Bondorf *et al.*, Phys. Rep. 257, 133 (1995). Porównania wyników obliczeń modelowych z danymi doświadczalnymi pokazały, że model kaskady wewnątrzjądrowej odpowiedzialny za opis emisji cząstek o wyższych energiach przewiduje zbyt niskie przekroje czynne. Obserwowane różnice w zakresie energii 50 – 150 MeV są szczególnie duże dla izotopów wodoru oraz dla małych kątów emisji. Potwierdzony został przedstawiany już wcześniej przez zespół badawczy PISA wniosek, że opis dynamiki reakcji spalacji poprzez kaskadę zderzeń nukleon-nukleon nie obejmuje w pełni mechanizmu emisji cząstek.

W rozdziale szóstym Autor wprowadza do modelowego opisu reakcji dodatkowe, hipotetyczne źródło emisji cząstek poruszające się w kierunku wiązki. Zgodnie z założeniem równowagi termodynamicznej, emisja cząstek ze źródła jest izotropowa z maxwellowskim rozkładem prędkości. Eksperymentalne rozkłady przekrojów czynnych dla lekkich cząstek naładowanych zostały dobrze opisane przez rozkłady modelowe będące sumą przeskalowanego rozkładu otrzymanego z obliczeń modelem INCL+GEM2 oraz składowej pochodzącej z poruszającego się źródła. Z warunku najlepszej zgodności wyznaczony został czynnik skalujący składową INCL+GEM2 oraz wartości parametrów źródła dla poszczególnych izotopów. Parametrami tymi są: prędkość źródła, efektywna temperatura oraz całkowity przekrój czynny. W modelu INCL4.3 procedura koalescencji uwzględnia jedynie tworzenie się lekkich klastrów. W związku z tym emisja fragmentów o pośrednich masach była opisywana tylko przez model fenomenologiczny zawierający dwa poruszające się źródła. Źródło szybkie symuluje emisję przedrównowagową, a źródło wolne emisję równowagową z jądra tarczopodobnego. Wartości parametrów tych źródeł zapewniające dobry opis danych eksperymentalnych zostały przedstawione w formie tabelarycznej na końcu rozdziału.

W rozdziale siódmym porównano otrzymane charakterystyki źródeł emisji cząstek dla reakcji  $p + Ag$  z analogicznymi wynikami uzyskanymi dla reakcji  $p + Ni$  oraz  $p + Au$  przy tych samych energiach. Porównania te były możliwe dzięki stosowaniu tej samej metody analizy danych. Pokazały one, że wartości parametrów źródeł są w przybliżeniu stałe, niezależnie od rodzaju tarczy oraz energii wiązki protonów. Przedmiotem szczegółowej analizy były wartości parametrów źródła szybkiego, przedstawiane w zależności od liczby masowej emitowanej cząstki. We wszystkich przypadkach zależności te mają podobną postać, którą można było w przybliżeniu opisać przez malejącą funkcję potęgową z dwoma parametrami, wykładnikiem i czynnikiem normalizacyjnym. Pozwoliło to scharakteryzować w zwartej formie zbiory parametrów źródła szybkiego. Na podstawie zależności parametru temperaturowego od masy emitowanej cząstki oszacowano masę i temperaturę postulowanego źródła emisji cząstek w postaci związanej grupy nukleonów określanej mianem „fireball”. Jego średnia liczba masowa wynosi  $A \simeq 7$ , temperatura  $T \simeq 46$  MeV w przypadku emisji lekkich cząstek oraz  $A \simeq 28$ ,  $T \simeq 24$  MeV gdy emitowane są fragmenty o pośrednich masach.

Podsumowanie otrzymanych wyników badań zaprezentowane zostało w rozdziale ósmym. Rozprawę uzupełnia pięć aneksów. W pierwszych dwóch znajdują się szczegółowe informacje o modelu poruszającego się źródła. W aneksie C Autor zamieścił listę publikacji, które zawierają dane eksperymentalne dla reakcji spalacji  $p + Ag$  lub jądro o podobnej masie, wraz z podaniem podstawowych charakterystyk mierzonych wielkości. Należy docenić trud Autora włożony w przygotowanie tego bardzo użytecznego zestawienia. Do rozprawy dołączone zostały pliki zawierające dane eksperymentalne oraz modelowe zapisane na płycie kompaktowej CD. Opis zawartości zbiorów z danymi oraz formatu zapisu został zamieszczony w dodatku D. Aneks E uzupełnia prezentację danych eksperymentalnych.

Rozprawa napisana jest językiem zrozumiałym, a sposób prezentacji wyników jest przejrzysty i logiczny. Najczęściej powtarzającym się błędem językowym jest stosowanie *what* zamiast zaimka względnego *which* jak np. w zdaniu znajdującym się na stronie 74 „*They cover the range from 0.0025 to 0.0051 what proofs the statement that the source is „slow”.*”. Dodatkowym błędem w tym zdaniu jest użycie rzeczownika *proof* zamiast czasownika *prove*. Powinien też być przecinek. Zamieszczone w pracy rysunki są dobrej jakości i dobrze ilustrują rezultaty badań. Ułatwieniem dla czytelnika byłoby zamieszczenie na niektórych rysunkach (np. na rys. 5.3) legendy objaśniającej różnorodność symboli, linii i ich kolorów, a nie tylko podanie opisu słownego.

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne nie umniejszają merytorycznej wartości pracy. Otrzymane rezultaty stanowią znaczący wkład do badań nad mechanizmem procesów spalacji jąder atomowych. Dostarczone precyzyjne dane doświadczalne, jak również charakterystyki źródeł emisji cząstek mogą zostać wykorzystane w dalszych pracach mających na celu doskonalenie modelowego opisu tych procesów.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązujące przepisy i w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie Pana magistra Mariusza Wojciechowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Janusz Brzychczyk