Kraków; 23.08.2022

dr hab. Krzysztof Pysz, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
Kraków

Recenzja pracy doktorskiej pani mgr Angeliny Łobejko

"Experimental studies of the three nucleon system dynamics in the proton induced deuteron breakup at 108 MeV"

Przedstawiona do recenzji praca doktorska pani mgr Angeliny Łobejko dotyczy bardzo istotnych badań nad oddziaływaniami silnymi działającymi między nukleonami, a więc w obszarze energii, w którym ścisłe rozwiązania teorii oddziaływań silnych, czyli QCD, nie są możliwe. Do opisu interakcji międzynukleonowych stosuje się więc modele sił jądrowych, tworzone przy założeniu oddziaływań binarnych, z próbami ich rozszerzenia o oddziaływania trójnukleonowe (a nawet czteronukleonowe). Wobec niewystarczalności obecnych modeli jądrowych w wyjaśnianiu wielu zjawisk obserwowanych, i w badaniach laboratoryjnych, i w skali astrofizycznej, wszelkie usiłowania, zarówno eksperymentalne jak i teoretyczne, zmierzające do lepszego zrozumienia natury sił jądrowych są cenne.

Pani Angelina Łobejko dostarcza wartości różniczkowych przekrojów czynnych na wystąpienie reakcji rozbicia jądra deuteru (breakup) przy jego bombardowaniu protonem o energii 108 MeV. Przekroje czynne zmierzone są w szerokim zakresie kątowym. Dla tej energii wiązki protonów podobne przekroje czynne nie były wcześniej mierzone. Stanowią one istotne informacje dla fizyków tworzących modele oddziaływań jądrowych oraz badających wpływ innych efektów występujących w badanych reakcjach, np. oddziaływań kulombowskich. Tym samym, dane doświadczalne przedstawione w niniejszej pracy doktorskiej są istotnym wkładem w badania nad dynamiką oddziaływań w układzie trzech nukleonów.

Praca doktorska pani mgr Łobejko została wykonana w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Śląskiego. Eksperyment, w którym zgromadzono dane doświadczalne, został przeprowadzony w Centrum Cyklotronowym Bronowice (CCB) Instytutu Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie. Wykorzystano zestaw detekcyjny BINA (Big Instrument for Nuclear Polarization Analysis) dedykowany w tym przypadku badaniom nad jądrowymi oddziaływaniami wielociałowymi. Ważne jest tutaj podkreślenie, że był to pierwszy pomiar z użyciem aparatury BINA po jej przeniesieniu z Kernfysich Versneller Instytut (KVI) Uniwersytetu w Groningen (Holandia) do CCB Bronowice.

Dysertacja napisana jest po angielsku, zawiera się na 102 stronach, składa się z pięciu dłuższych rozdziałów, wprowadzenia i podsumowania oraz obszernego spisu literatury przedmiotu. Dołączony jest też dodatek zawierający wykresy wszystkich zmierzonych różniczkowych przekrojów czynnych, w całym dostępnym zakresie kinematycznym, i ich porównanie z wynikami obliczeń dwóch grup teoretyków (krakowskiej (prof. H. Witała) oraz wileńskiej (prof. A. Deltuva)), dla sześciu wariantów modeli oddziaływań nukleonów. Treść poszczególnych rozdziałów ilustrowana jest wieloma adekwatnymi, dobrze opisanymi rysunkami. Struktura pracy doktorskiej oraz sam wywód są klarowne.

Po nakreśleniu aktualnego stanu badań teoretycznych i eksperymentalnych nad opisem oddziaływań nukleonów przy niskich energiach, w rozdziale drugim wprowadzone i krótko opisane są pojęcia i zagadnienia konieczne do zrozumienia celu i wyników podjętych badań.

Rozdział trzeci przynosi opis środowiska eksperymentalnego w CCB oraz systemu detekcyjnego BINA. Przedstawione są poszczególne detektory, system tarcz, elektronika odczytu, system akwizycji danych oraz logiczna konstrukcja warunków zapisu zdarzeń (trigger). Szczególnym wyzwaniem jest używanie ciekłej tarczy deuterowej (LD_2) wymagającej odpowiedniego systemu kriogenicznego i próżniowego wraz ze sterowaniem i oprogramowaniem. Wspominane jest ograniczenie pełnej akceptancji systemu detekcyjnego spowodowane wadliwym działaniem detektora Backward Ball, mające istotny wpływ na dostępny zakres kinematyczny badanych reakcji i sposób prowadzenia analizy danych.

W rozdziale czwartym Doktoranta przedstawia sposób selekcji istotnych zdarzeń z wykorzystaniem struktury czasowej wiązki, rekonstrukcji śladów cząstek oraz ich identyfikacji metodą ΔE-E. Omawia też procedurę pozwalającą na uzyskanie skalowania energetycznego detektorów scyntylacyjnych oraz czynników korygujących kalibrację, w przypadku niestabilnie działającego jednego z grubych detektorów E. Kalibracja energetyczna detektorów została uzyskana z pomocą symulacji Monte Carlo z użyciem programu Geant4. Pani mgr Łobejko wyliczyła też wydajność detekcyjną poszczególnych detektorów przednich. Wydajności detektorów są podane w zależności od polarnego kąta emisji θ praz w postaci dwuwymiarowych map, w funkcji kąta polarnego θ i azymutalnego φ. Przy użyciu znanego przekroju czynnego na sprężyste rozpraszanie p-d przy energii 108 MeV, oraz po odpowiedniej selekcji rozproszonych sprężyście deuteronów zarejestrowanych w przednim detektorze Wall, doktorantka wylicza całkowitą świetlność wiązki protonów w przeprowadzonym eksperymencie.

Rozdział piąty poświęcony jest wyznaczeniu wartości zmierzonych różniczkowych przekrojów czynnych. Przekroje czynne podane są w funkcji parametru S będącego kombinacją energii kinetycznych obu zarejestrowanych protonów. Szczegółowo omówione są też źródła niepewności pomiarów i oszacowane składowe błędu systematycznego. Niestety całkowity błąd pomiaru podawanych przekrojów czynnych jest zdominowany przez błąd statystyczny, który sięga nawet 24 %.

W bardzo ciekawym rozdziale szóstym, który jest zwieńczeniem dysertacji, zmierzone rozkłady różniczkowych przekrojów czynnych porównane są z wynikami obliczeń teoretycznych. Wykorzystano odpowiednio uśrednione rozkłady teoretyczne różniczkowego przekroju czynnego na reakcje rozbicia jądra deuteru, wyliczone z zastosowaniem bońskiej wersji ładunkowo czułego potencjału oddziaływania nukleon-nukleon (CD Bonn). Rozkłady teoretyczne przekroju czynnego dostępne są w sześciu wariantach uwzględniających wpływ komponentu kulombowskiego oraz siły trójciałowej w oddziaływaniu nukleonów. Przedstawione wyniki modelowe pochodzą od dwóch grup teoretyków. Do ilościowego porównania zgodności obliczeń modelowych z danymi doświadczalnymi Doktorantka wykorzystuje testy χ^2 – globalne dla wszystkich punktów doświadczalnych porównanych z odpowiednimi wynikami teoretycznymi, oraz bardziej szczegółowe – dla poszczególnych konfiguracji kątowych rejestrowanych protonów. Pani mgr Łobejko zauważa, że jej wyniki doświadczalne są systematycznie przeszacowane w obliczeniach teoretycznych. Przeprowadza dodatkowy test zgodności χ^2 zmieniając czynnik normalizacji danych, z którego wynika, że globalna zgodność teorii i doświadczenia byłaby najlepsza, gdyby otrzymane wyniki doświadczalne zostały przeskalowane o 12% w górę. Doktorantka bierze pod uwagę możliwość niedoszacowania całkowitego błędu systematycznego w jej wynikach, zwłaszcza przy wyznaczaniu absolutnej normalizacji przekroju

czynnego. Ewentualna korekta wyników powinna być zadaniem grupy po zgromadzeniu nowych danych przy użyciu tarczy stałociałowej CD_2 oraz w pełni działającego układu detekcyjnego.

Niemniej, już na podstawie obecnych wyników, praca pani Łobejko w sposób bezsporny udowadnia istotność uwzględniania oddziaływań kulombowskich w użytych do obliczeń modelach (wyniki grupy wileńskiej). Pokazuje też, że dla badanej reakcji i dostępnego zakresu kinematycznego, dodanie siły trójciałowej do modelu teoretycznego jest albo mało znaczące (obliczenia grupy krakowskiej) albo wręcz pogarsza zgodność danych i obliczeń (obliczenia grupy wileńskiej).

Na rysunku 6.10, w lewej kolumnie są przykłady wyników pani mgr Łobejko porównane do wyników podobnego eksperymenty przeprowadzonego w KVI przy energii 135 MeV (prawa kolumna). W porównaniu z tymi samymi obliczeniami teoretycznymi (z uwzględnieniem różnicy w energii wiązki) widać przeszacowanie wyników śląsko/krakowskich, które nie występuje dla wyników z Groningen. Pojawia się pytanie, czy uwzględnienie w danych otrzymanych przez panią mgr Łobejko, sugerowanego wcześniej dodatkowego czynnika skalującego (12%), nie skompensowałoby tej niezgodności wyników, przynajmniej dla modelu z uwzględnieniem sił kulombowskich ?

W pracy doktorskiej Pani Łobejko zauważono też kilka literówek oraz błędów edytorskich, np. na rysunku 5.8, gdzie pierwszy raz pojawia się przykładowy rozkład zmierzonego przekroju czynnego wraz z porównaniem do wartości teoretycznych, brakuje legendy.

Praca doktorska Pani mgr Angeliny Łobejko jest przykładem solidnie przeprowadzonych badań eksperymentalnych przez Doktorantkę pracującą w doświadczonym zespole, korzystającej z narzędzi i wiedzy wypracowanych przez współpracowników na przestrzeni wielu lat. Doktorantka wykazała się szeroką wiedzą w zakresie problematyki jądrowych oddziaływań wielociałowych, brała aktywny udział w instalacji i uruchamianiu aparatury BINA w CCB, brała udział w pomiarach eksperymentu BINA, dokonała trudnej selekcji i analizy danych wraz z kalibracjami oraz absolutnej normalizacji uzyskanych przekrojów czynnych, z uwzględnieniem wielu poprawek i niepewności pomiarowych. W efekcie dostarczono precyzyjnie zmierzone wartości różniczkowych przekrojów czynnych na reakcję rozbicia jądra deuteru, dla wielu konfiguracji kątowych rejestrowanych protonów. Pani mgr Łobejko dokonała też ilościowego porównania najnowszych obliczeń teoretycznych, w ich różnych wariantach, ze swoimi wynikami i wyciągnęła interesujące i ważne wnioski. Tym samym, wykazała dużą wartość zmierzonych przez siebie przekrojów czynnych dla dalszych prac teoretycznych nad naturą silnego oddziaływania obserwowanego na poziomie jądrowym. Wyniki swoich badań pani Łobejko prezentowała podczas czterech międzynarodowych konferencji naukowych. Jest też współautorką trzynastu artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach recenzowanych (w tym trzech jako pierwszy autor).

Moja ocena recenzowanej pracy doktorskiej pani mgr Angeliny Łobejko jest bardzo wysoka. Jej zawartości merytoryczna niewątpliwie stanowi oryginalny i istotny wkład w badania nad naturą sił jądrowych. Stwierdzam też, że recenzowana dysertacja spełnia formalne wymagania stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk fizycznych. Pozwala mi to z całym przekonaniem wnioskować o dopuszczenie pani mgr Angeliny Łobejko do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.

Krzysztof Pysz