

Recenzja rozprawy doktorskiej

zatytułowanej:

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

autorka: **mgr Angelina Łobejko**

promotor: dr hab. Elżbieta Stephan (Uniwersytet Śląski), prof. UŚ

promotor pomocniczy: dr Andrzej Wilczek

Mgr Angelina Łobejko przedstawiła napisaną po angielsku pracę zawierającą sześć rozdziałów poprzedzonych streszczeniem, uzupełnioną o spis literatury i jeden dodatek. Razem rozprawa liczy 102 strony. Poza streszczeniem w języku angielskim, rozprawa pani Łobejko jest uzupełniona o streszczenie w języku polskim, toteż spełniony jest formalny wymóg ustawy¹, która w Artykule 13 ust. 6 stwierdza: *Rozprawa doktorska powinna być opatrzona streszczeniem w języku angielskim, a rozprawa doktorska przygotowana w języku obcym również streszczeniem w języku polskim.*

Pierwszy rozdział rozprawy jest ciekawym i treściwym wprowadzeniem do fizyki oddziaływania trzech nukleonów, zarówno wprowadzeniem teoretycznym, jak i przeglądem eksperymentalnym. W odróżnieniu od często pokazywanego w tym miejscu porównania eksperymentalnego i teoretycznego różniczkowego przekroju czynnego oddziaływań proton+deuteron (pd), Autorka pokazała ciekawe porównanie danych eksperymentalnych i wyników teoretycznych dla wybranego kąta rozproszenia wynoszącego 140° . Rysunek dobrze ilustruje znaczenie sił trójciałowych z uwzględnieniem rezonansu Δ , ale może warto byłoby zwrócić uwagę czytelnika na trzykrotną zmianę zakresu na skali pionowej między dolną i górną jego częścią. Ciekawe jest też zestawienie zakresu energetycznego i kąтового pomiarów oddziaływania pd w detektorach o dużej akceptancji. Zestawienie to zawiera wyniki dla reakcji w których wykorzystywano wiązki protonowe i deuteronowe, podając wartość energii wiązki na nukleon. To utrudnia porównanie, lepszą zmienną wydaje mi się być tu energia dostępna wyrażona wzorem

$$E = \sqrt{s_{pd}} - (m_p + m_d)$$

gdzie s_{pd} jest niezmiennikiem Lorentza a m to wartości masy protonu i deuteronu ($c=1$). Ułatwiłoby to porównanie skali energetycznej reakcji, gdzie tarczą jest proton z tymi, w których tarczą jest deuteron, dostarczając informacji o energii dostępnej w układzie środka masy.

Należy zauważyć, że przedstawiona w tym rozdziale tematyka badawcza jest aktualnym problemem naukowym fizyki oddziaływań subatomowych jako podstawowe oddziaływanie

¹ Ustawa o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuk, tekst ujednolicony: Dz. U. poz. 882 z 2018 roku.

ponad układem dwunukleonowym opisywane nieperturbacyjną chromodynamiką kwantową. Postęp w opisie struktury jader atomowych, a także reakcji jądrowych, uwzględnia właśnie wpływ oddziaływań wielociałowych². Być może oddziaływania te będą z czasem uwzględnione w modelowaniu zderzeń relatywistycznych jader atomowych³, gdzie obecnie w równaniach transportu parametryzuje się tylko efekt zwiększonej gęstości materii. Oddziaływanie te mogą też mieć znaczenie dla opisu gęstej materii w gwiazdach neutronowych, zwłaszcza po spektakularnych odkryciach masywnych gwiazd neutronowych⁴ dokonanych w ostatniej dekadzie.

Rozdział drugi zawiera podstawy teoretyczne prowadzonych badań. Jest to przejrzysty opis podstaw teoretycznych ze wskazaniem tematów badawczych, gdzie nastąpić może postęp pomagający w interpretacji wyników doświadczalnych. Opis ten zaczyna się od procesu rozpraszania elastycznego (Rysunek 2.1 dobrze ilustruje wpływ zakresu pomiarowego detektora na możliwości pomiarowe). Szczególną uwagę Autorka zwróciła na rozwijaną intensywnie chiralną efektywną teorię perturbacyjną. Opis wpływu oddziaływań kulombowskich i trudności związane z implementacją tego długozasięgowego oddziaływania są jasno przedstawione pod koniec rozdziału, gdzie też Autorka opisała próby wprowadzenia kinematyki relatywistycznej i konsekwencje tych działań. Uważam ten rozdział za dobrze dopasowany poziomem do pracy przedstawiającej wyniki doświadczalne: teorie tu opisane są użyte przy interpretacji wyników doświadczalnych.

Układ eksperymentalny zastosowany w pomiarach na wiązce cyklotronu Proteus-235 w Centrum Cyklotronowym Bronowice (IFJ PAN) przedstawiony jest w Rozdziale 3 rozprawy. Sposób opisanego układu jest bardzo dobry, dostarcza wszelkich niezbędnych informacji o przeprowadzonym eksperymencie i świadczy o zaangażowaniu Autorki rozprawy w ten ważny proces badawczy. Jako drobna usterkę zauważyłem brak „m” przed „rad” przy wartości emitancji horyzontalnej wiązki z akceleratora Proteus-235. Konkludując uwagi do tego rozdziału muszę wyrazić uznanie dla zespołu, który uruchomił tak złożony układ detekcyjny krótko po jego przeniesieniu z Groningen do Krakowa.

Obszerny Rozdział 4 przedstawia metody analizy danych. Zagadnienie identyfikacji izotopów wodoru, przedstawione na Rysunku 4.2, nasuwa pytanie o pochodzenie grupy zdarzeń przy $\Delta E \sim 75$ kanałów, która rozciągają się prawie w całym zakresie całkowitej energii E. Myślę też, że separacja protonów od deuterionów jest na tyle wyraźna, że kontury cięć nie musiały mieć choćby małego przekrycia, które nie wydaje mi się uzasadnione. Na pozytywną opinię zasługują porównania pomiarów z symulacjami komputerowymi, troskliwa kalibracja energetyczna oraz uważne traktowanie efektów na brzegach detektorów oraz problemów związanych z uwzględnianiem niestabilności ich pracy. Interesująca jest analiza wydajności poszczególnych komponentów układu detekcyjnego, oparta na wynikach pomiarowych i na

² Hergert H (2020) A Guided Tour of ab initio Nuclear Many-Body Theory. *Front. Phys.* 8:379. doi: 10.3389/fphy.2020.00379

³ H. Wolter et al. (TMEP Collaboration) Transport Model Comparison Studies of Intermediate-Energy Heavy-Ion Collisions <https://arxiv.org/pdf/2202.06672.pdf>

⁴ Green Bank Observatory. "Most massive neutron star ever detected, almost too massive to exist." *ScienceDaily*. ScienceDaily, 16 September 2019. <www.sciencedaily.com/releases/2019/09/190916114030.htm>.

symulacjach. Autorka uwzględniła także efekty związane z hadronowym oddziaływaniem protonów i deuteronów w materiale detektora, skutkującym niepełną energią widzianą przez element światłoczuły. Jak pokazała Autorka na Rysunku 4.13, efekt ten narasta z energią cząstek, a przewidywania pochodzące z symulacji są w dobrej zgodności z wynikami pomiarowymi.

Dla znormalizowania otrzymanych wyników niezbędne było zmierzenie całkowitej świetlności. Tu mam komentarz do prezentowanej wartości liczbowej ($8,687 \pm 0,265$). Podawanie trzech cyfr znaczących w wartości niepewności jest nadmierne, co jest omówione szczegółowo przez Particle Data Group (Introduction, rozdział 5.3)⁵. W szczególności, jeśli trzy cyfry znaczące wyznaczonej niepewności są między 100 a 354, zaokrągła się niepewność do dwóch cyfr znaczących. Oznacza to, że wynik powinien mieć postać ($8,69 \pm 0,27$).

Analiza reakcji $pd \rightarrow ppn$, przedstawiona w Rozdziale 5, rozpoczyna się od uwzględnienia wspomnianych wcześniej oddziaływań hadronowych. Jest to tło widoczne dla ujemnych wartości zmiennej D (Rys. 5.1). Przyjęta procedura uwzględniania tego tła jako efektu stałego może być uważana za w pełni uzasadnioną. Ważnym elementem tego rozdziału jest dyskusja niepewności systematycznych, szczególnie z powodu ich zależności od konfiguracji zdarzeń. W analizie (Rozdział 5.3) uwzględniono też uśrednianie obliczeń modelowych w przedziałach przyjętych do analizy danych doświadczalnych, gdyż wyniki modelowe cechuje czasami znaczna zmienność wewnątrz tych przedziałów.

Rozdział szósty rozprawy to porównanie otrzymanych wyników z przewidywaniami licznych modeli teoretycznych. Autorka otrzymała łącznie 1767 punktów doświadczalnych. Są one przedstawione graficznie w Dodatku A (28 rysunków) razem z wynikami obliczeń różnych modeli teoretycznych. Autorka przeprowadziła ciekawe porównanie zbiorcze jakości odtwarzania wyników eksperymentu wyznaczając wartość χ^2 dla każdego z rozpatrywanych modeli. Wyniki są przedstawione zbiorczo na Rysunku 6.2, a także na szczegółowych mapach kątowych (Rysunki 6.3 – 6.6). Otrzymane wartości χ^2 na stopień swobody dla różnych modeli są z przedziału wartości między 4 a 14. Trzeba stwierdzić, że test χ^2 jest bardzo wymagający⁶ a interpretacja wyników tego testu powinna prowadzić do oceny prawdopodobieństwa. Przy otrzymanych wartościach χ^2 prawdopodobieństwa są małe, jeśli nie bardzo małe. Tym bardziej wartościowe są więc mapy lokalnych wartości χ^2 przedstawione na wymienionych wcześniej rysunkach. Pokazują one wyraźnie zakresy kątowe, w których teoria znacząco odbiega od wyników eksperymentalnych. Autorka zauważa też zakres najlepszej zgodności, wspólny dla wszystkich teorii! Ciekawy jest też wniosek (przedstawiony na Rysunku 6.9), że odpowiedzialność za taką sytuację leży po stronie błędów w globalnej normalizacji. W istocie, wartość χ^2 zmniejsza się znacznie dla 13% korekty normalizacyjnej. Należy też zauważyć, że dwuipółkrotna redukcja χ^2 (do $\chi^2/NDF=2.4$) ma ogromny (nieliniowy) wpływ na zakres prawdopodobieństwa zgodności hipotezy. Ta obserwacja wymaga na pewno dalszych badań, ale wykraczają one poza zakres pracy doktorskiej. Niejako w tym celu Autorka porównała wybrane wyniki eksperymentalne analizy przedstawionej w rozprawie z wynikami otrzymanymi w KVI przy większej energii wiązki protonów. Wskazała też na wagę planowanych analiz niedawno przeprowadzonych eksperymentów.

⁵ R.L. Workman *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 083C01 (2022)

⁶ R. Nowak, Statystyka dla fizyków, PWN 2002, Rozdział 5.6

Konkluzje rozprawy (Rozdział 7) podsumowują otrzymane wyniki oraz wskazują dalsze kierunki badawcze grupy zajmującej się własnościami oddziaływań w układzie kilku nukleonów.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim, co czyni ją dostępną dla międzynarodowej społeczności fizyków zaangażowanej w badania oddziaływań kilku nukleonów. Nie mam uwag do stylu tego naukowego tekstu, w którym z rzadka znalazły się drobne nieprawidłowości, o których nie warto wspominać.

Mam nadzieję, że liczne wyniki pomiarowe przedstawione graficznie w Dodatku są też dostępne w formie cyfrowej dla badaczy zainteresowanych ich interpretacją.

W podsumowaniu, rozprawa doktorska mgr Angeliny Łobejko to opis złożonego pomiaru wykonanego z użyciem dużego detektora BINA przeniesionego na wiązkę protonów akceleratora Proteus C-235 w Centrum Cyklotronowym Bronowice IFJ PAN w Krakowie. Zbadano reakcję $pd \rightarrow ppn$ przy energii protonów 108 MeV w szerokim zakresie kątów rejestracji emitowanych protonów, dostarczając prawie 2 tysiące punktów pomiarowych w wielowymiarowej przestrzeni kątów emisji protonów. Do opisu otrzymanych danych użyto wielu wersji współczesnych modeli teoretycznych (potencjał CD-Bonn), przeprowadzając ilościowe porównanie zgodności ich przewidywań z danymi eksperymentalnymi. Jak wykazano w rozprawie, są obszary całkiem dobrej zgodności wszystkich (!) modeli z eksperymentem, ale są też rejony znacznych rozbieżności. Interesująca jest obserwacja, że globalne skalowanie wyników może bardzo znacząco zredukować wielkość χ^2 zgodności między modelem a wynikami eksperymentalnymi.

Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez Panią mgr Angeliny Łobejko jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania, a tym samym stawiam wniosek o dopuszczenie Pani Angeliny Łobejko do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

