



Chorzów, 11 czerwca 2024

dr hab. Elżbieta Stephan prof. UŚ
Instytut Fizyki
Uniwersytet Śląski
ul. 75 Pułku Piechoty 1A
41-300 Chorzów
tel. (32) 349 7646
elzbieta.stephan@us.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Bogumiła Zalewskiego
Interaction of ${}^6\text{He}$ with hydrogen isotopes at 26 MeV/n energy

Dysertacja dotyczy projektu pomiaru różniczkowych przekrojów czynnych na procesy jądrowe z udziałem jąder ${}^6\text{He}$ oraz izotopów wodoru. Badano rozpraszanie sprężyste jąder ${}^6\text{He}$ na protonach i deuteronach oraz reakcję transferu neutronu z helu do deuteronu. Z tych trzech procesów tylko rozpraszanie sprężyste na protonie jest dosyć dobrze poznane, a reakcja transferu została zmierzona po raz pierwszy.

Jądra ${}^6\text{He}$ pozostają od lat w centrum zainteresowania z uwagi na ich szczególną budowę. Są to neutrono-nadmiarowe lekkie jądra, o których wiemy, że dwa neutrony tworzą „halo” wokół gęstego rdzenia, tj. cząstki α . W takiej sytuacji promień ładunkowy tego jądra jest znacznie mniejszy od promienia materii jądrowej. Jest to jednocześnie przykład tzw. systemu boromejskiego trzech ciał, w tym przypadku cząstki α i dwóch neutronów, tj. układu, który jest związany jako całość, ale którego żadne dwa składniki nie tworzą stanu związanego. Ostatnio zainteresowanie tym nuklidem jeszcze wzrosło. Pojawiły się obliczenia *ab-initio* jego struktury w oparciu o potencjał oddziaływania nukleonów uzyskany w ramach tzw. Chiralnej Efektywnej Teorii Pola. Wyznaczono związek między parametrami jądra: jego promieniem i energią separacji dwu neutronów, który przy porównaniu z danymi eksperymentalnymi wskazuje na istotną rolę sił 3-nukleonowych. Nowe precyzyjne dane dotyczące reakcji jądrowych z udziałem ${}^6\text{He}$ mają duże znaczenie dla zrozumienia tych niezmiernie ciekawych obiektów. Niestety jak do tej pory obliczenia *ab-initio* reakcji jądrowych w tak złożonych układach jak opisywane w pracy są niedostępne technicznie. Niezbędne jest bardziej tradycyjne podejście do opisu teoretycznego. Możliwe jest jednak uwzględnienie specyficznej budowy tych jąder i zastosowanie podejścia „klastrowego” do potencjału, czyli zastosowanie tzw. metody mikroskopowej CDCC (*continuum discretized coupled-channels method*). Niewątpliwie ważne jest dostarczenie danych, które pozwolą na testowanie i rozwój takiego podejścia.

Praca doktorska jest napisana w języku angielskim i dodatkowo zawiera streszczenia w języku polskim. Ma logiczny układ i składa się ze streszczenia, wstępu, czterech rozdziałów, konkluzji, dwu dodatków oraz bibliografii (49 pozycji). Wstęp przedstawia główne cele i motywację, która skłania do podjęcia badań reakcji z udziałem jąder ${}^6\text{He}$. Rozdział 1 zawiera teoretyczne podstawy przeprowadzonych badań, w szcze-



gólności formalizm opisu reakcji w teorii rozprożeń oraz potencjały jądrowe stosowane do opisu badanych reakcji. W rozdziale 2 znajduje się opis eksperymentu, w tym poszczególnych elementów układu detekcyjnego oraz geometrii tego układu. Rozdział 3 został poświęcony opisowi wszystkich etapów analizy danych, aż do uzyskania wartości różniczkowych przekrojów czynnych. Opisano w nim również symulacje Monte Carlo niezbędne do analizy wydajnościowej układu. Rozdział ten obejmuje też zagadnienia związane z analizą dodatkowych pomiarów kontrolnych, sprawdzających osiowość wektora pędu wiązki oraz pozycje elementów układu. Rozdział 4 przedstawia analizę teoretyczną: założenia stosowanych modeli, parametryzację potencjałów, a także wyniki fitów parametrów potencjału. Na końcu pracy znalazło się krótkie podsumowanie przeprowadzonych badań i wnioski. Dodatek A zawiera analizę grubości tarczy (gęstości powierzchniowej centrów oddziaływania) na podstawie pomiarów z tarczami gazowymi, a dodatek B – tabele wyników.

Badania reakcji z udziałem ${}^6\text{He}$ są uwarunkowane dostępnością i jakością radioaktywnych wiązek takich jonów, stąd ich rozwój wiązał się ściśle z rozwojem centrów wiązek radioaktywnych. W przypadku reakcji z izotopami wodoru niejako wymuszone są pomiary w tzw. kinematyce odwrotnej, czyli z wiązką cięższą od tarczy. Mają one przy okazji szereg zalet, jak większa energia emitowanych cząstek w układzie laboratoryjnym oraz przesunięcie ich rozkładu kąтового w kierunku kątów przednich. Umożliwia to pomiary przy niezbyt dużej energii wiązki i ułatwia detekcję produktów w szerokim zakresie przestrzeni fazowej. Te wszystkie warunki złożyły się na uzyskanie precyzyjnych rozkładów kątowych różniczkowych przekrojów czynnych.

Praca doktorska prezentuje kompleksowo cały projekt badania trzech reakcji wiązki ${}^6\text{He}$ z izotopami wodoru: począwszy od aparatury pomiarowej i warunków eksperymentalnych, przez wszystkie etapy analizy i wspomagające je symulacje, aż do porównania wyników z obliczeniami modelowymi. Doktorant jest współautorem 11 publikacji (Web of Science), w większości dotyczących podobnej tematyki. Z uwagi na dosyć szeroki zespół autorów, który jest w sposób oczywisty niezbędny dla przeprowadzenia eksperymentu, chętnie dowiedziałabym się, co poza analizą danych należało do zadań doktoranta, zwłaszcza od strony przygotowania eksperymentu. Niemniej można się spodziewać, że realizacja pracy doktorskiej wymagała od mgra Zalewskiego zapoznania się zarówno z praktyką eksperymentalną, jak i technikami analizy danych oraz prowadzenia symulacji, a wreszcie modelowaniem reakcji jądrowych. Należy podkreślić tę różnorodność zadań i wszechstronność, który musiał się wykazać Doktorant, aby je zrealizować. Analiza danych została przeprowadzona w sposób staranny i przemyślany: cięcia kinematyczne wykonano tak, aby nie tracić właściwych zdarzeń, a jednocześnie dobrze zidentyfikować kanały reakcji. Znany przekrój czynny na reakcję rozpraszania na protonach pozwolił na kontrolę dokładności. Analiza teoretyczna opierała się generalnie na potencjale optycznym. W przypadku reakcji transferu wykorzystano metodę DWBA. Funkcje falowe w kanale wyjściowym wygenerowano m.in. za pomocą potencjału optycznego uzyskanego poprzez złożenie potencjałów optycznych ${}^4\text{He}+t$ i $n+t$ z funkcją falową ${}^5\text{He}_{g.s.}$. Badane układy tarcza-pocisk posiadają cechy pozwalające na odwołanie się do obecnie rozwijanych metod klastrowych. Metody te opierają się na opisie oddziaływaniach dwóch obiektów zbudowanych ze słabo związanych między sobą klastrow.

Zrealizowane w ramach pracy zadania i główne osiągnięcia można podsumować następująco:

- Wyznaczono przekroje czynne na rozpraszanie sprężyste oraz reakcję transferu neutronu w szerokim zakresie kątowym badanych reakcji.
- Dane zostały skonfrontowane z obliczeniami teoretycznymi – Doktorant zastosował różne wersje potencjału optycznego, w tym oparte na podejściu mikroskopowym traktującym badany układ jako system słabo związanych klastrów (CDCC). Uzyskane przekroje czynne mogą służyć dalszemu rozwijaniu metody CDCC.
- Wyznaczono amplitudę spektroskopową i czynnik spektroskopowy $SF_{5\text{He}+n}$. Wynik nie pozwolił na jednoznaczne potwierdzenie czy wykluczenie czynnika *quenchingu* (tłumienia), obserwowanego dla transferu 1-nukleonowego w przypadku izotopów argonu i tlenu. Problem stanowi niepewność eksperymentalna wyniku, jak również niemożność rozdzielenia stanów podstawowego i wzbudzonego ^5He .

Praca została bardzo starannie przygotowana od strony językowej i edytorskiej. Można ewentualnie wskazać jakieś drobiazgi, jak zapis reakcji: $^6\text{He}(d,t)^5\text{He}$, podczas gdy kinematyce odwrotnej odpowiada raczej zapis $^2\text{H}(^6\text{He}, t\ ^5\text{He})$, o ile oba produkty reakcji są mierzone, lub $^2\text{H}(^6\text{He}, t)^5\text{He}$. W pracy znalazł się też pewien „skrót myślowy” dotyczący elektroniki: prawdopodobnie używane CFD były wyposażone w wyjście analogowe z jakiegoś umieszczonego w tej samej obudowie układu, ale *de facto* nie jest to wyjście dyskryminatora i sądzę, że lepiej tak go nie nazywać, by nie dezorientować czytelnika. Wyjście CFD jest sygnałem logicznym. Poza takimi drobiazgami, zarówno jakość opisu jak i strona edytorska pracy są bardzo dobre. Skomplikowane zagadnienia opisu reakcji jądrowych zostały przedstawione w wyjątkowo przejrzysty sposób.

Poniżej przedstawiam kilka uwag i pytań, które nasunęły mi się podczas czytania pracy:

1. W rozdziale 3.5.3 zostały przedstawione przyczynki od poszczególnych niepewności systematycznych. Ich dość dokładne wartości, np. 4.8%, sugerują, że zostały one oszacowane na drodze pewnej analizy ilościowej. Czy można podać jakiś przykład takiego oszacowania? Czy analizowano wpływ zastosowanych bramek (cięć) identyfikacyjnych na wynik?
2. W pracy została wyznaczona masa brakująca. Zwykle to pojęcie odnosi się do masy cząstki, której nie rejestrujemy, np. w przypadku omawianej reakcji transferu naturalne byłoby wyznaczanie masy brakującej dla neutronu. W pracy zastosowano również „masę brakującą” dla trytu i cząstki alfa, rejestrowanych w eksperymencie, przy czym w definicji czteropędu dla tych cząstek pominięto drugą rejestrowaną cząstkę. Ponadto w opisie jest informacja: „*For each reconstructed vector the missing mass was calculated by subtracting the particle rest mass from its total energy.*” Spodziewałabym się różnicy kwadratów energii całkowitej i pędu. Skąd taki sposób wprowadzania tej wielkości? Zaskakujące jest przy tym uzyskiwanie masy 0 dla neutronu i ok. 939 MeV dla cząstki alfa (rys.3.15, 3.16 i tekst).
3. Dodatek prezentuje wyniki pomiaru referencyjnego z tarczą gazową, przeprowadzonego w celu normalizacji pomiaru z tarczą stałą do określonej gęstości



powierzchniowej centrów oddziaływania. W tym przypadku zastosowano inną tarczę produkcyjną wiązki helu, ale także nieco inną geometrię detekcji. Jaki był cel takiej modyfikacji, czy nie lepiej byłoby użyć dokładnie takich samych warunków? Niepokoją trochę uzyskane wyniki: wydaje się, że rozbieżności w porównaniu z tabelą 2.2 są bardzo duże, czy nieregularności tarczy w pełni je wyjaśniają?

4. Fity dostarczyły różnych parametrów badanych potencjałów, często znacznie różne od parametrów początkowych, czy można z tego wyciągnąć jakieś dalej idące wnioski?

Powyższe wątpliwości i pytania nie wpływają na ocenę rozprawy doktorskiej, która jest jednoznacznie pozytywna. Praca prezentuje nowy i bardzo cenny wynik eksperymentalny. Już teraz pomaga on w zrozumieniu mechanizmu procesów z udziałem tak szczególnych jąder atomowych jak ${}^6\text{He}$. Sądzę, że w miarę rozwoju podejść teoretycznych, wartość tych danych będzie jeszcze rosła, umożliwiając testowanie przewidywań teoretycznych i dając wgląd w dynamikę procesu oraz same oddziaływania jądrowe.

Na podstawie przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgra Bogumiła Zalewskiego: *Interaction of ${}^6\text{He}$ with hydrogen isotopes at 26 MeV/n energy* stwierdzam, że spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Elżbieta Stephan

