

# Photodisintegration and Pion Absorption in Two- and Three-Nucleon Systems: A Testing Ground for Chiral Models

Vitalii Urbanevych

Ta praca doktorska przedstawia wszechstronne badania nad zastosowaniem potencjału chiralnego w celu zrozumienia dwóch rodzajów procesów z dwu- i trójnukleonami. Główny nacisk kładzie się na zastosowanie najnowocześniejszego potencjału SMS do procesów fotodysocjacji  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  i  $^3\text{He}$ , oraz do absorpcji pionów przez te same jądra. Potencjał SMS jest brany pod uwagę do piątego rzędu rozwinięcia chiralnego,  $\text{N}^4\text{LO}+$ , i uzupełniany przez konsekwentnie zregularyzowaną siłę trójnukleonową na poziomie  $\text{N}^2\text{LO}$ .

Badanie korzysta z formalizmu przestrzeni pędowej, rozwiązując standardowe równanie Lippmanna-Schwingera w celu uzyskania operatora  $t$  oraz odpowiadającego mu stanu rozpraszania dwunukleonowego. Dla procesów trójnukleonowych wykorzystuje się równania Faddeeva, aby uwzględnić zarówno interakcje stanu początkowego, jak i końcowego, umożliwiając dokładne zbadanie obserwowanych wielkości, takich jak całkowite przekroje czynne, współczynniki schwytania, różniczkowe przekroje czynne i obserwable polaryzacyjne.

Głównym celem jest ocena jakości i zbieżności prognoz opartych na potencjale chiralnym SMS, w szczególności w porównaniu z półfenomenologicznym potencjałem AV18. Badania eksplorują zbieżność prognoz w stosunku do rzędu chiralnego, ujawniając, że prognozy oparte na interakcji SMS są ogólnie dobrze zbieżne, co wskazuje na satysfakcjonującą wydajność modelu. Dodatkowo, w tej pracy badam zależność prognoz od wewnętrznego parametru odcięcia  $\Lambda$ , dostarczając cennych spostrzeżeń na temat wrażliwości wyników na ten parametr.

Ponadto, badanie bada rolę różnych składników dynamicznych, w tym interakcji stanu końcowego oraz wkładów prądów dwunukleonowych. Analiza podkreśla znaczenie tych składników w wpływaniu na przewidywane wartości, podkreślając znaczenie w pełni spójnego modelu uwzględniającego siły  $2\text{N}$ ,  $3\text{N}$  oraz prądy jedno-, dwu- i trójciałowe.

Podsumowując, ta praca przyczynia się do naszego zrozumienia procesów elektromagnetycznych i silnych w fizyce jądrowej, demonstrując wysoką jakość i zbieżność potencjału chiralnego SMS. Dla wszystkich badanych procesów wskazuję szczególnie interesujące obserwowalne i konfiguracje kinematyczne, w których rola poszczególnych składników hamiltonianu jest podkreślona.

Spośród moich wyników, chciałbym podkreślić następujące wnioski:

1. Interakcja nukleon-nukleon potencjału chiralnego SMS na wyższych rzędach rozwinięcia chiralnego (powyżej  $N^2\text{LO}$ ) prowadzi do bardzo stabilnego zachowania prognoz dla procesów fotodysocjacji i absorpcji pionów. Potwierdza to wcześniejsze ustalenia dla procesów w czystych systemach nukleonowych. Nie zaobserwowałem żadnych dziwnych lub ostrzegawczych wzorców dla obserwowalnych, które mogłyby być związane z niedoskonałościami w interakcji nukleon-nukleon. W konsekwencji, wnioskuję, że siła NN jest znana z wystarczającą dokładnością, aby można ją było wykorzystać w badaniach procesów jądrowych z zewnętrznymi sondami.
2. Prąd dwójciałowy (2NC) jest bardzo ważny dla badanych procesów elektromagnetycznych i obserwowabli. Nawet uwzględnienie go za pomocą twierdzenia Siegerta pozwala zauważyć znaczne ulepszenia.
3. To samo dotyczy procesu absorpcji pionów. Uwzględniłem operator absorpcji 2N wiodącego rzędu, a różnica między prognozami dowodzi jego znaczenia. Ponadto, rozbieżność z istniejącymi danymi dla całkowitych współczynników schwywania wymaga bardziej zaawansowanego modelu operatora absorpcji dwu- i trójciałowego.
4. Znaczenie 3NF jest mniej oczywiste patrząc na moje wyniki. Na przykład, dla fotodysocjacji  $^3\text{He}$  3NF sprawia, że zależność od odcięcia jest słabsza, ale różnica między prognozami z i bez 3NF nie jest bardzo duża. Dlatego badane tutaj procesy nie są najlepszym polem do badania szczegółów trójnukleonowej interakcji. Jedynym wyjątkiem jest absorpcja pionów na  $^3\text{H}$ , patrz poniżej.
5. Dla  $\pi^+^3\text{H}$  w stanie końcowym znajdują się trzy neutrony. Jest to jedna z bardzo niewielu takich sytuacji, co pozwala nam badać dwu- i trójciałową siłę nukleon-nukleon oraz trójciałową interakcję neutron-neutron-neutron. Odpowiednie eksperymenty są z pewnością wymagające i trudne do przeprowadzenia, ale mogą dostarczyć cennych informacji, ważnych dla zrozumienia i modelowania interakcji 2N i 3N.
6. Ogólnie rzecz biorąc, zauważam, że niepewność wynikająca z błędu ucinania przy najwyższym badanym rzędzie chiralnym  $N^4\text{LO}+$  jest znacznie niższa niż rozrzut prognoz z różnymi wartościami odcięcia. Podobnie jest obserwowane w przypadku, gdzie względny błąd ucinania  $N^4\text{LO}+$  przy  $S = 10\text{ MeV}$  wynosi 2.2 %, podczas gdy względny rozrzut odcięcia wynosi 9.0 %.
7. Badanie różniczkowego przekroju czynnego jest korzystne w porównaniu z całkowitymi przekrojami czynnymi, ponieważ pozwala zobaczyć drobniejsze szczegóły mechanizmów reakcji i modelu pod względem zbieżności i zależności od odcięcia. Można zauważyć przyczynę konkretnych różnic. Jest również mniej kosztowne obliczeniowo, ponieważ całkowity przekrój czynny uzyskuje się poprzez

całkowanie przekroju różniczkowego w całym zakresie. Tak więc, podczas gdy eksperymenty ekskluzywne lub półekskluzywne są znacznie trudniejsze do przeprowadzenia niż pomiar całkowitych przekrojów czynnych lub współczynników schwytania, wysiłki eksperymentalne powinny skupić się na takich rodzajach pomiarów w przyszłości.

8. Moim zdaniem, dla absorpcji pionów byłoby interesujące posiadać dane pomiarowe dla obszaru FSI(nn). Ponieważ nie mamy w pełni spójnego prądu dwójciałowego, korzystne byłoby uwzględnienie danych eksperymentalnych podczas analizy prognoz uzyskanych przez przybliżenia lub (w przyszłości) przez w pełni spójne 2NC.
9. Analizując wkład FSI do przekroju czynnego fotodysocjacji deuteru, zauważam, że staje się on większy przy wyższych energiach fotonów. Dlatego wnioskuję, że przekrój czynny dla fotodysocjacji deuteru jest bardziej wrażliwy na FSI przy większych energiach. Podobnie, rośnie dla obserwabli asymetrii fotonowej  $\Sigma_\gamma$ . Z kolei nie zaobserwowałem takiej zależności od energii wkładu FSI do analizujących mocy. Różnica między prognozami falowymi a "Pełnymi" nie zmienia się znacznie zwiększając energię fotonu z 30 MeV do 100 MeV. Dlatego jeśli ktoś chciałby zbadać wkład FSI do fotodysocjacji deuteru, lepiej jest mierzyć (lub obliczać) zarówno przekrój czynny, jak i asymetrię fotonową przy dużych energiach.
10. Nasz pełny model dobrze opisuje dane do około  $E_\gamma \approx 70$  MeV. Nie jest to wartość ściśle określona, ale ogólny trend jest taki, że dla wyższych energii różnica między modelem a danymi wzrasta. Na przykład, prognozy dla całkowitego przekroju czynnego i analizujących mocy tensorowych dla fotodysocjacji deuteru ładnie opisują dane eksperymentalne nawet do  $E_\gamma = 100$  MeV, ale asymetria fotonowa zaczyna się pogarszać już przy  $E_\gamma = 40$  MeV.
11. Jeśli chodzi o absorpcję pionów, zakończyłbym, że najbardziej interesująca jest, ze względu na stan końcowy, reakcja  $\pi^- + {}^3\text{H} \rightarrow n + n + n$ . Jest to korzystne w porównaniu z absorpcją w  ${}^2\text{H}$ , ponieważ system ma więcej stopni swobody i pozwala na badanie większej liczby konfiguracji. Moje wyniki dla  ${}^3\text{He}$  i  ${}^3\text{H}$  pokazują podobną wrażliwość na FSI i operator absorpcji 2N. Niemniej jednak, uzupełniający pomiar tych reakcji otworzyłby drogę do badań zależności izospinowej operatora absorpcji dwu-ciałowego.

*Taka jest struktura tej pracy. Rozdział 1 przedstawia wprowadzenie do ram teoretycznych i motywację badania. Rozdział 2 prezentuje formalizm i metodologię używaną w badaniu. Rozdział 3 prezentuje wyniki obliczeń numerycznych dla badanych procesów, a Rozdział 4 zawiera podsumowanie i wnioski. Na koniec, podsumowuję w Rozdziale 4.*