

Fotodezintegracja i absorpcja pionów w układach dwu- i trójnukleonowych: pole testowe dla modelu chiralnego SMS

Vitalii Urbanevych

Niniejsza praca doktorska przedstawia kompleksowe badania nad zastosowaniem jądrowego potencjału chiralnego do zrozumienia dwóch rodzajów procesów z dwoma i trzema nukleonami. Główny nacisk położony jest na zastosowanie najnowocześniejszego potencjału z półlokalną regularyzacją w przestrzeni pędowej, tzw. modelu SMS do procesów fotodezintegracji jąder ^2H , ^3H i ^3He , a także do procesu absorpcji pionów przez te same jądra. Potencjał SMS nukleon-nukleon jest wzięty aż do piątego rzędu rozwinięcia chiralnego, tzw. next-to-next-to-next-to-next-to-leading order uzupełnionego o człony kolejnego rzędu (N^4LO^+) i uzupełniony przez konsystentnie zregularyzowaną siłę trójnukleonową we wiodącym rzędzie (N^2LO).

W badaniu wykorzystano formalizm przestrzeni pędowej, rozwiązując standardowe równanie Lippmanna-Schwingera w celu uzyskania operatora t i odpowiadającego mu stanu rozproszeniowego dwóch nukleonów. W przypadku procesów trójnukleonowych wykorzystywane są równania Faddeeva pozwalające uwzględnić zarówno oddziaływania w stanie początkowym jak i końcowym. Umożliwia to dokładne wyznaczenie obserwabli, takich jak całkowite przekroje czynne, szybkości absorpcji, przekroje różniczkowe i obserwable polaryzacyjne.

Głównym celem pracy jest ocena jakości i zbieżności przewidywań opartych na chiralnym potencjale SMS, szczególnie w porównaniu z półfenomenologicznym potencjałem AV18. W pracy zbadano zbieżność przewidywań wraz ze wzrostem rzędu rozwinięcia chiralnego, pokazując, że przewidywania oparte na oddziaływaniu SMS są na ogół dobrze zbieżne, co wskazuje na zadowalającą jakość modelu. Dodatkowo, w tej pracy zbadano zależność przewidywań od wartości wewnętrznego parametru odcięcia Λ , dostarczając cennych informacji na temat czułości wyników na wartość tego parametru.

Wśród wyników mojej pracy chciałbym podkreślić następujące:

1. Chiralne oddziaływanie nukleon-nukleon SMS przy wyższych rzędach rozwinięcia chiralnego (powyżej N^2LO) prowadzi do bardzo stabilnego zachowania przewidywań dla procesów fotodezintegracji i absorpcji pionów. Potwierdza to wcześniejsze odkrycia dotyczące procesów zachodzących w układach czysto nukleonowych. Nie zaobserwowałem żadnego dziwnego lub niepokojącego wzorca dla obserwabli, który mógłby być związany z wadami modelu oddziaływania nukleon-nukleon. W konsekwencji dochodzę do wniosku, że siła pomiędzy nukleonami jest znana z wystarczającą dokładnością, aby można ją było wykorzystać w badaniach procesów jądrowych za pomocą sond zewnętrznych.

2. Dwunukleonowy prąd elektromagnetyczny jest bardzo ważny dla rozważanych procesów elektromagnetycznych i przewidywanych wartości obserwabli. Nawet uwzględnienie go za pomocą twierdzenia Siegerta pozwala dostrzec znaczną poprawę opisu danych.

3. To samo dotyczy procesu absorpcji pionów. Uwzględniłem w obliczeniach dwunukleonowy (2N) operator absorpcji we wiodącym rzędzie, a różnica między przewidywaniami bez niego i po jego uwzględnieniu dowodzi jego znaczenia. Ponadto rozbieżność z istniejącymi danymi dotyczącymi całkowitych współczynników absorpcji wymaga włączenia bardziej zaawansowanego modelu operatora absorpcji dwu- i trójciałowego.

4. Znaczenie siły trójnukleonowej (3NF) jest mniej oczywiste, patrząc na moje wyniki. Na przykład dla fotodezintegracji ^3He 3NF osłabia zależność od parametru odcięcia, ale różnica między przewidywaniami z i bez 3NF nie jest duża. Badane tu procesy nie są więc najlepszym polem do badania szczegółów oddziaływania trójnukleonowego. Jedynym wyjątkiem jest absorpcja pionów na ^3H , opisana poniżej.

5. Dla absorpcji $\pi^+ + ^3\text{H}$ w stanie końcowym znajdują się trzy neutrony. Jest to jedna z niewielu takich sytuacji, pozwalająca badać oddziaływanie dwóch neutronów a także oddziaływanie trójciałowe neutron-neutron-neutron. Odpowiednie eksperymenty są z pewnością trudne do przeprowadzenia, ale mogą dostarczyć cennych informacji, ważnych dla zrozumienia i modelowania oddziaływań 2N i 3N.

6. Badanie różniczkowego przekroju czynnego jest korzystne w porównaniu z badaniem całkowitych przekrojów czynnych, ponieważ pozwala nam zobaczyć szczegóły mechanizmów reakcji i modelu, w sensie zbieżności i zależności od parametru odcięcia. Można zaobserwować przyczynę poszczególnych rozbieżności. Jest to również mniej kosztowne obliczeniowo, ponieważ całkowity przekrój czynny uzyskuje się poprzez całkowanie przekroju różniczkowego w całej przestrzeni fazowej. Tak więc, podczas gdy eksperymenty ekskluzywne lub pół-inkluzywne są znacznie trudniejsze do wykonania niż pomiar całkowitych przekrojów czynnych lub współczynników absorpcji, wysiłki eksperymentalne powinny koncentrować się na tego typu pomiarach w przyszłości.

7. Fotodezintegracja stanu związanego 3N daje więcej możliwości badania szczegółów modelu chiralnego. Wynika to ze znacznie większej przestrzeni fazowej, w której w różnych konfiguracjach kinematycznych można uwzględnić różne składowe modelu.

8. Nasz najbardziej zaawansowany model dobrze opisuje dane do energii fotonów ok. $E_\gamma = 70$ MeV. Nie jest to ścisła wartość, ale ogólna tendencja jest taka, że dla wyższych energii różnica między modelem a danymi wzrasta. Na przykład przewidywania dla całkowitego przekroju czynnego i tensorowej zdolności analizującej dla fotodezintegracji deuteronu poprawnie opisują dane eksperymentalne nawet do $E_\gamma = 100$ MeV, ale opis asymetrii fotonowej zaczyna się pogarszać już przy $E_\gamma = 40$ MeV.

9. W przypadku absorpcji pionów, najciekawszy, ze względu na stan końcowy, jest proces $\pi^- + {}^3\text{H} \rightarrow n + n + n$. Jest to korzystne w porównaniu z absorpcją na deuteronie, ponieważ system 3N ma więcej stopni swobody i umożliwia badanie większej liczby konfiguracji kinematycznych. Moje wyniki dla ${}^3\text{He}$ i ${}^3\text{H}$ pokazują podobną czułość na FSI i wkład operatora absorpcji 2N. Niemniej jednak równoległy pomiar tych reakcji otworzyłby drogę do badań nad zależnością izospinową operatora absorpcji dwóch ciał.

Podsumowując, praca ta przyczynia się do naszego zrozumienia procesów elektromagnetycznych i silnych w fizyce jądrowej, wykazując wysoką jakość i zbieżność chiralnego potencjału SMS. Ponadto w pracy zbadano rolę różnych składników dynamicznych, w tym oddziaływań w stanie końcowym i prądów dwunukleonowych. Przeprowadzona analiza podkreśla znaczenie tych

składników we wpływie na przewidywane wartości, uwypuklając znaczenie w pełni spójnego modelu uwzględniającego siły 2N, siły 3N oraz prądy jedno-, dwu- i trójfazowe.