



Katowice, 18 czerwca 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Vitalii Urbaneycha
"Photodisintegration and Pion Absorption in Two- and Three-Nucleon
Systems: A Testing Ground for the SMS Chiral Model"

Na pracę doktorską magistra Vitalii Urbaneycha liczącą 107 stron składają się cztery rozdziały oraz odnośniki do 92 prac naukowych. W bibliografii zauważyłem jedynie jedną pracę gdzie pojawia się nazwisko doktoranta [89]. Praca została opublikowana w bardzo dobrym czasopiśmie specjalistycznym Physical Review C i dotyczy absorpcji pionów (druga część tytułu rozprawy doktorskiej) opisanych w podrozdziale 3.4. Wykorzystując repozytorium prac Inspires, ustaliłem iż na temat fotodezintegracji w układach nukleonów (pierwsza część tytułu rozprawy doktorskiej) oraz dyskutowanych w rozprawie zależności elementów macierzowych, przekrojów czynnych, tempa absorpcji od poprawek chiralnych wyższych rzędów oraz parametru odcięcia, mgr Urbaneych opublikował również artykuły pokonferencyjne w Acta Physica Polonica, J. Phys. Conf. Ser. oraz regularną pracę w bardzo dobrym czasopiśmie specjalistycznym Physical Review C (w 2021 roku).

Rozprawa poświęcona jest badaniu lekkich układów jądrowych z dwoma (2N) i trzema (3N) nukleonami. Układy te ze względu na prostotę służą do badania dynamiki oddziaływań silnych oraz elektromagnetycznych. Podstawowym modelem dyskutowanym w rozprawie jest oparty o potencjał 2N model Argonne V18. Potencjał V18 jest zaprojektowany aby odtworzyć doświadczalnie obserwowalną energię wiązania deuteronu i układu nukleon-nukleon. W modelu tym użyty jest mechanizm wymiany pojedynczych pionów dalekiego zasięgu z efektami fenomenologicznymi krótkiego zasięgu wraz z dodatkowymi poprawkami elektromagnetycznymi. Model ten uzupełniają bardziej złożone potencjały oparte o oddziaływania 3N (np. modele Tucson-Melbourne (TM) czy też Urbana IX). Oprócz tego typu modeli, w badaniach układów nukleonów stosuje się także model z chiralnym efektywnym lagranżjanem gdzie charakterystycznymi parametrami są skala miękka ($Q \sim m_\pi$) oraz skala twarda ($\Lambda \sim 0.7 \text{ GeV}$), stosunek $(Q/\Lambda)^\nu$ jest parametrem rozwinięcia modelu rzędu ν . W ten sposób w rozprawie są rozpatrywane poprawki EFT od $\nu = 0$ (LO)

do $\nu = 4$ (N^4LO), częściowo N^5LO . Modele te są trudne do interpretacji ponieważ zawierają wiele swobodnych parametrów. Potencjał V18 posiada 40 parametrów, potencjał chiralnego modelu EFT na poziomie N^4LO ma dopasowanych 27iskoenergetycznych parametrów. Jednym z celów rozprawy jest sprawdzenie jak parametr odcięcia Λ przy regularyzacji EFT w przestrzeni pędowej wpływa na przewidywania numeryczne w zależności od rzędu poprawek ν .

Rozdział drugi rozprawy wprowadza formalizm i numeryczne metody zastosowane w obliczeniach. Formalizm stanów związanych 2N oraz 3N oparty jest o równanie nierelatywistyczne Schrödingera gdzie użyto rozkład stanów kwantowych na fale parcjalne, otrzymując układy sprzężonych równań, rozwiązywanych numerycznie. Rozpraszania tych stanów realizowane są w ramach równań Lippmana-Schwingera. Formalizm ten został opracowany w pracach [50-52], których współautorami są fizycy z grupy krakowskiej. Operator elektromagnetyczny prądu dla układu 2N (3N) zbudowany jest z pojedynczych i wielociałowych prądów, w przypadku 2N użyto podejścia Siegerta z rozkładem na multipole Coulomba. W rozdziale 2.7 przedstawiono wzory (bez wyprowadzenia) na absorpcję pionów na układach ^2H , ^3He , ^3H z rozpadami $n + n$, $p + n + n$ oraz $n + n + n$. W ostatniej części rozdziału drugiego omówiono jakiego rodzaju błędy trzeba rozpatrzeć w analizie numerycznej omawianych modeli i procesów. Pierwszym z nich jest błąd związany z zaniedbaniem poprawek chiralnych wyższych rzędów, następnym jest zależność od parametru odcięcia regulatora Λ . Analiza tych dwóch błędów jest głównym tematem poruszonym w rozprawie. Pozostałe błędy wymienione w rozprawie związane są z prądami jedno i dwunukleonowymi i ograniczonym zastosowaniem twierdzenia Siegerta, nierelatywistycznym przybliżeniem, niepewnościami przy wyznaczaniu parametrów swobodnych potencjałów jądrowych, numerycznymi przybliżeniami stosowanych metod, wyborem modeli, maszynową precyzją numerycznych obliczeń i stosowanych kompilatorów.

Najobszerniejszy oraz najważniejszy jest rozdział trzeci gdzie przedstawiono wyniki numeryczne. Rozdziały 3.1-3.3 dotyczą procesów fotonowych rozpadów dla deuteronu ^2H , helu ^3He oraz trytu ^3H . Rozdział 3.4 dotyczy procesów absorpcji pionów w układach ^2H , ^3He , ^3H . W całym rozdziale umieszczono łącznie 75 wykresów, wiele z nich w podukładach do sześciu podwykresów, ograniczę się więc do omówienia najważniejszych wniosków z nich płynących oraz komentarzy i pytań, które mi się nasunęły w trakcie studiowania niniejszej rozprawy.

Jeśli chodzi o zależność wyników od rzędu chiralnych poprawek, w ogólności zaobserwowano dobrą zbieżność wyników na poziomie maksimum kilku procent wraz ze wzrostem parametru ν , aż do rzędu N^4LO oraz N^4LO^+ (częściowe poprawki rzędu N^5LO). Na przykład dla fotodezintegracji deuteronu, błąd ten jest poniżej 1% w zakresie energii fotonu $30 \div 100$ MeV.

Większe rozbieżności występują dla zależności wyników od parametru odcięcia Λ , który rozpatrywany jest w zakresie $400 \div 550$ MeV. Pokazano, że względny

błąd przewidywań dotyczący wartości odcięcia jest większy dla wyższych energii (dochodząc do ok. 10% dla $E_\gamma = 100$ MeV dla fotodezintegracji ${}^3\text{He}$, Fig. 3.28, 3.29). Podobnie duże rozbieżności rzędu 10% wyników dla fotodezintegracji ${}^3\text{H}$ świadczą o znaczeniu operatorów dwuciałowych i procesów wtórnych rozprożeń. W niektórych przypadkach, rozbieżności pomiędzy pełnymi wynikami a przybliżeniami opartymi jedynie na pojedynczym prądzie nukleonowym mogą przewyższać 50% (np. Fig. 3.10, 3.52, 3.56). Konkluzja jest taka, iż dwunukleonowe prądy są niezbędne zarówno dla procesów fotodezintegracji jak i absorpcji pionów.

W rozprawie nie zaobserwowano dla rozpatrywanych procesów dużego znaczenia sił trójnukleonowych, za wyjątkiem absorpcji pionów na trycie. Chociaż eksperymenty takie wydają się trudne do realizacji, mogłyby dostarczyć ciekawych informacji odnośnie oddziaływań 3N. Podobnie, w przyszłości warto pogłębić analizy ekskluzywnych oraz semi-inkluzywnych procesów, które dostarczają dodatkowych informacji na temat czułości procesów na parametr Λ . Również istotna jest analiza interferencji stanów końcowych, szczególnie dla wyższych energii fotonów. Biorąc pod uwagę pełny chiralny model (potencjał nukleon-nukleon w przestrzeni pędowej do rzędu $N^4\text{LO}^+$ z regularyzowanymi siłami 3N do rzędu $N^2\text{LO}$), wyniki modelowe według analizy Doktoranta są konsystentne do energii fotonów rzędu 70 MeV.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim, zauważyłem jedynie kilka błędów w tekście (np. "photodisintegraion" w tytule rozdziału 3.1 i w podsumowaniu, w kilku miejscach pojawia się nazwisko "Feynmann", "antysymmetrised" na stronie 17).

We wprowadzeniu omówiono wyniki Arenhövela dla fotodezintegracji deuteru, w których zgodność z eksperymentem jest do energii fotonu 100 MeV, w podsumowaniu niniejszej rozprawy jest mowa w ogólności o granicy 70 MeV. W tym kontekście można było omówić znaczenie poprawek relatywistycznych, które są stosowane w modelu Arenhövela a które pominięto w omawianej tutaj rozprawie, zwłaszcza, że obliczenia relatywistycznych efektów dla lekkich jąder są także tematem prac grup krakowskich. Ostatnio szeroko omawiano takie efekty również w rozprawie doktorskiej dra Alessandro Grassiego.

W rozprawie zabrakło w niektórych miejscach szerszej dyskusji wyników lub dyskusji poczynionych założeń, niektóre wzory są podane bez uzasadnienia. Uwaga ta dotyczy na przykład dodania członu $3A - 6$ do wzoru (1.3), na stronie siódmej pojawia się zwrot bez wyjaśnienia "taking into account sophisticated electromagnetic corrections". Przy opisie zastosowanej metody całkowania na stronie 7 podano iż zastosowano $N = 72$ punktów w ważonej sumie, skąd taka magiczna liczba? Poniżej wzoru (2.68) pojawia się pojęcie "negative pion mass", nie wiem co to znaczy, podana także masa pionu jest dodatnia. W pracy omawiana jest regularyzacja dla chiralnej EFT i chiralna ekspansja prowadząca do poprawek kwantowych wyższych rzędów, nie jest dyskutowana renormalizowalność takiej teorii. Jeśli chodzi o parametr odcięcia Λ , jest on stosowany w zakresie $400 \div 550$ MeV,

dlaczego takie ograniczenie? Na niektórych wykresach (np. Fig.3.4, prawy panel) nie zaznaczono danych eksperymentalnych, dlaczego? Podobnie, por. Fig.3.11 oraz 3.12. Analiza i wyniki w rozdziale 3.1.2 oparte są na wzorze (3.2) zaczerpniętym z pracy [74]. Wzór ten parametryzuje przy pomocy tensorów $T_{11,20,21,22}$ fotonowy rozpad deuteronu, wyniki dla tych tensorów przedstawiają Figs. 3.6-3.22. Niestety, nie podano genezy tego skądinąd skomplikowanego wzoru ani fizycznej interpretacji parametrów go opisujących (czy da się je zinterpretować fizycznie, tak jak na przykład czynniki postaci G_E, G_M we wzorze Rosenblutha?). Diagramatycznie na Fig.1.1 pokazano jak wygląda wymiana pionów dla potencjałów 2N, 3N, 4N. Czy podobnie można określić diagramatycznie (przynajmniej dominujące) procesy fotodezintegracji (rozdział 3.1) oraz absorpcji pionów (rozdział 3.2), które są głównymi procesami rozpatrywanymi w rozprawie?

Na wykresach 3.49 oraz 3.50 nie zaznaczono danych eksperymentalnych prawdopodobnie z prostej przyczyny iż są one zupełnie poza zakresem rozpatrywanych zależności Λ i uzyskanymi wynikami teoretycznymi. Czy więc rzeczywiście możemy uznać, że dyskutowane w rozprawie modele, w tym model poprawiony o efekty 3N są wystarczające i poprawiają przewidywania w przypadku absorpcji pionów na ${}^3\text{He}$ (oraz ${}^3\text{H}$)? Wydaje mi się, że wyniki przedstawione w podrozdziałach 3.4.2 oraz 3.4.3 wymagają w przyszłości głębszej analizy i dalszej, jakościowej poprawy modeli opisujących te procesy.

Większość powyższych uwag nie ma istotnego znaczenia dla całości rozprawy, którą oceniam pozytywnie. Moim zdaniem rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgra Vitalii Urbaneycha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Signed by /
Podpisano przez:

Janusz Gluza
Uniwersytet
Śląski

Date / Data:
2024-06-17 16:29