



Dr hab. Adam Kozela, Prof. IFJ PAN
tel. 12 6628290
NZ24 IFJ PAN

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

Rozprawa doktorska magistra Vitaliia Urbanevycha została złożona na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w marcu 2024 roku. Jest napisana w języku angielskim, składa się z czterech rozdziałów, liczy 107 stron. Jej tematem są obliczenia procesów fotodezintegracji oraz absorpcji pionów na jądrach deuteru, trytu i helu-3, z wykorzystaniem formalizmu chiralnej teorii pola. Promotorem pracy jest dr hab. Roman Skibiński.

Podstawowym celem pracy jest określenie jakości opisu wspomnianych wcześniej systemów za pomocą kolejnych rzędów rozwinięcia chiralnej efektywnej teorii pola z potencjałem SMS (Semilocal Momentum-Space regularized).

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia krótki rys historii badań nad systemami kilkunukleonowymi, które na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci doprowadziły do sformułowania najbardziej zaawansowanego opisu oddziaływań jądrowych w ramach chiralnej efektywnej teorii pola rozwijanej przez wiodące grupy teoretyków zrzeszone w ramach kolaboracji LENPIC, z których jedna działa na wydziale fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Znajdziemy tu także bardzo szczegółowe wprowadzenie do tej teorii, pozwalające docenić jej siłę, ale także zrozumieć ograniczenia i czynniki wpływające na dokładność opisu badanych systemów. Autor zwraca uwagę na niewątpliwą zaletę teorii jaką jest możliwość zastosowania podejścia perturbacyjnego, w którym dokładność przewidywań wzrasta wraz z rzędem rozwinięcia oraz fakt, że tak zwana siła 3-nukleonowa, mocno komplikująca opis oddziaływania jądrowego w innych podejściach, tu pojawia się w sposób naturalny w drugim rzędzie rozwinięcia. Problemem teorii jest natomiast jej stosunkowo słaba zbieżność okupiona olbrzymim kosztem komplikacji i, co za tym idzie, czasu obliczeń. Jest to szczególnie widoczne dla grafów odpowiadających właśnie za siłę 3-nukleonową, które do tej pory zostały wyliczone jedynie w drugim rzędzie rozwinięcia – właśnie tym, w którym pojawia się ta siła, podczas gdy dla

oddziaływań dwuciałowych atakowany jest już rząd piąty. W konsekwencji niezbędna jest ciągła kontrola zbieżności obliczeń w kolejnych rzędach oraz wypracowanie miary wprowadzanego w nich błędu. To właśnie jedno z głównych zadań jakie stawia przed sobą Autor. Kolejne wynika z konieczności zastosowania tak zwanej regularyzacji potencjału, zabiegu niezbędnego dla ominięcia osobliwości pojawiającej się na małych odległościach, bądź jak w przypadku zastosowanego w pracy potencjału SMS, przy dużych pędach. Zabieg regularyzacji wprowadza dodatkowy parametr, którego wartość jest jedynie z grubsza określona. Wpływ tej nieokreśloności na stabilność opisu badanych procesów jest drugim celem pracy.

Pomimo całej swej komplikacji formalizm teorii jest wciąż daleki od kompletności. Obok kolejnych rzędów rachunku dla siły 3-nukleonowej, efektów relatywistycznych, Autor zwraca uwagę na brak wyprowadzonych konsystentnie do potencjału oddziaływania elektrycznych prądów dwu- i więcej nukleonowych. Ważnym elementem pracy jest pokazanie, że nawet przybliżone uwzględnienie prądów dwunukleonowych prowadzi do istotnej poprawy opisu.

W rozdziale drugim magister Urbanewych wyprowadza szczegółowe wzory na elementy macierzowe wyliczane dla każdej z badanych reakcji. Rozdział ten ma na pewno dużą wartość dydaktyczną: wzory są wyprowadzane z pierwszych zasad, a kluczowe kroki dobrze dokumentowane. Czytelnik znajdzie tu także uwagi dotyczące użytych technik numerycznych, zastosowanych przybliżeń oraz analizą źródeł niepewności teorii. Wydaje mi się, że w rozdziale tym znalazłem jeden drobny błąd wynikający z zastosowania niezwykle pomocnej metody „copy-paste”, ale z całą pewnością nie mogę dać gwarancji, że takich nie ma więcej. Nie jest to jednak istotne dla jakości pracy, bo każdy kto z niej skorzysta w celach profesjonalnych i tak zmuszony będzie do głębokiego zrozumienia wszystkich przejść.

Rozdział trzeci prezentuje uzyskane wyniki. Autor stara się przedstawić obliczenia dla każdej z potencjalnie dostępnych eksperymentalnie obserwacji oraz dla wszystkich badanych reakcji. Wyniki zaprezentowane są w formie czytelnych grafów, które następnie są szczegółowo analizowane pod kątem zbieżności kolejnych rzędów rozwinięcia oraz stabilności ze względu na cztery wybrane wartości parametru odcięcia. Uzyskane przez siebie wyniki autor porównuje z danymi eksperymentalnymi, jeśli tylko są one dostępne, oraz z obliczeniami wykonanymi przy zastosowaniu potencjału fenomenologicznego AV18. Dla wybranych reakcji fotodezintegracji Autor bada także wkład od elektrycznych prądów dwunukleonowych, odpowiadających za oddziaływanie fotonu z mezonem wymienianym między nukleonami, uwzględnionym w sposób przybliżony poprzez twierdzenie Siegerta. Zakres zaprezentowanego materiału jest olbrzymi i pewnie mógłby wystarczyć na przynajmniej dwa doktoraty.

W zdecydowanej większości wyniki prezentują się w sposób wzbudzający zaufanie. Oznacza to, że różnice pomiędzy kolejnymi rzędami rozwinięcia maleją wraz ze wzrostem rzędu i mieszczą się w paśmie wyznaczonym przez wartość i wyliczony błąd w niższych rzędach. Obserwujemy także poprawę zgodności obliczeń z eksperymentem oraz z obliczeniami bazującymi na potencjale AV18. We wszystkich przypadkach Autor ma podstawę by stwierdzić, że z uwagi na dobrą zbieżność obliczeń i niewielkie zmiany w ostatnim rzędzie rachunku perturbacyjnego, dalszej poprawy opisu nie należy szukać w obliczeniach rzędu wyższego niż N^4LO+ , ale raczej w usuwaniu zastosowanych przybliżeń. Jednym z nich jest byłoby konsystentne wyliczenie

wspomnianego wcześniej operatora elektrycznych prądów dwunukleonowych. Doskonałym potwierdzeniem tej tezy jest zaobserwowana w pracy poprawa opisu reakcji fotodezintegracji deuteronu już poprzez zastosowanie przybliżenia Siegerta. Dotyczy to całkowitego przekroju czynnego, obserwabli polaryzacyjnych oraz asymetrii. Poprawa opisu, choć znaczna, nie prowadzi jednak do zadowalającej zgodności z eksperymentem, co Autor tłumaczy niedoskonałością użytego przybliżenia i co motywuje do pilnej kontynuacji prac nad prądami dwu i więcej nukleonowymi.

Jeśli chodzi o wpływ na wyniki innego składnika dynamiki kilkunukleonowej, siły 3-nukleonowej, to dla badanych reakcji okazał się on niewielki i raczej nie stanowi motywacji do obliczeń w wyższym rzędzie rozwinięcia.

Ostatni rozdział pracy zawiera podsumowanie wyników. Oprócz formy syntetycznej magister Urbanewych zamieścił też szczegółową listę zawierającą dwanaście konkluzji z wykonanych obliczeń. Czytelnik znajdzie tu między innymi uwagi bardzo cenne z punktu widzenia przyszłych, planowanych eksperymentów.

Z obowiązku recenzenta czytając dysertację magistra Urbanewycha starałem się szukać błędów i słabszych punktów. To okazało się bardzo trudnym zadaniem, więc poniżej zamieszczam pewne wątpliwości, raczaj w formie pytań niż zarzutów.

Pierwsza dotyczy zdolności analizującej iT_{11} , w fotodezintegracji deuteronu dla energii 30 MeV (Fig 3.7b). W tym wypadku obliczenia we wszystkich rzędach rozwinięcia teorii, poza najniższym, dają niemal ten sam wynik. Oczywiście można argumentować, że to właśnie najniższy rząd, który dla tej konkretnej obserwabli nie działa, jednak dla energii fotonów 100 MeV, przy której teoria na ogół powinna działać gorzej, obserwowana różnica jest dużo mniejsza (Fig 3.7b). Rozumiem, że doświadczenie zdobyte przez Autora w pracy z chiralną teorią perturbacji pozwala mu na ignorowanie tego typu sygnałów i wyeliminowanie podejrzenia o błędzie grubym obliczeń.

Jedną z metod numerycznych użytych do przybliżonego wyznaczania pojawiających się w teorii wartości całek jest metoda kwadratury Gaussa. Autor stosuje ją dla 72 punktów (choć w innym pracy miejscu pojawia się liczba 32) co jest liczbą dużą i wiąże się z koniecznością wyznaczenia odpowiedniej ilości wag. Zastanawia mnie w jaki sposób Autor upewnia się, że wartości tych wag nie wprowadzają trudnego do opanowania wzmocnienia zaokrągleń numerycznych?

Moje ogólne odczucie po przeczytaniu tej pracy jest bardzo pozytywne. Konstrukcja jest dobrze przemyślana i pasuje do omawianego materiału. Strona graficzna nie pozostawia nic do życzenia, zainteresowany czytelnik z łatwością może pogłębiać studia korzystając z bogatej bibliografii. Jest napisana językiem prostym i jak dla mnie pozbawionym błędów.

Reasumując, przedstawiona mi do recenzji praca dotyczy analizy jakości opisu reakcji fotodezintegracji deuteronu, trytu i helu-3 oraz absorpcji pionu na tych jądrach. W szerszej perspektywie, pozwalając na wnioski o działaniu konkretnej implementacji Chiralnej Efektywnej Teorii Pola, dotyczy także problemu o fundamentalnym znaczeniu dla prawidłowego opisu reakcji w układach kilkunukleonowych, przy (na razie) niewielkich energiach. Zakres zaprezentowanego materiału według mnie wykracza poza zwyczajowo akceptowalny zakres prac doktorskich. Nie mam żadnych

wątpliwości, że magister Vitalii Urbanevych opanował i osiągnął dużą biegłość w posługiwaniu się metodami pozwalającymi na zastosowanie Chiralnej Efektywnej Teorii Pola wykorzystującej najbardziej zaawansowane potencjały jądrowe. Osiągnął także zamierzone cele, a wyniki zaprezentował w sposób bardzo przekonujący. Analizując wyniki wskazał najważniejsze obserwacje dla przyszłych eksperymentów dedykowanych dalszej poprawie działania teorii. Biorąc pod uwagę także znaczenie dydaktyczne szczegółowo opisanego formalizmu oceniam, że praca jest bardzo wartościowa, a Autor spełnia kryteria stawiane kandydatom w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020r. poz 85) oraz wnioskuję o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego, jednocześnie uznając wagę naukową osiągniętych wyników, wnioskuję o wyróżnienie pracy.

Adam Kozicki

Kraków, 28.05.2024