



Katowice, 4 lipca 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Alessandro Grassiego "Neutrino and electron scattering off the lightest nuclei"

Na pracę doktorską magistra Alessandro Grassiego liczącą 137 strony składa się dziesięć rozdziałów, cztery dodatki oraz odnośniki do 143 prac naukowych. Główne wyniki rozprawy zostały opublikowane w trzech artykułach opublikowanych w latach 2018-2023 (pozycje literatury [57],[58],[70]) w bardzo dobrym czasopiśmie specjalistycznym Physical Review C.

Uwagi ogólne.

Rozprawa poświęcona jest rozpraszaniu leptonów (elektronów i neutrin) na lekkich jądrowych stanach związanych deuteronu oraz stanach trój-nukleonowych ^3H oraz ^3He (rozpraszanie neutrin). Deuteron jest najprostszym związanym układem dwóch nukleonów. Ze względu na swoją prostotę jest idealnym obiektem do szczegółowych badań dynamiki oddziaływań silnych. Z kolei udział w rozpraszaniach elastycznych i rozpadach leptonów jako obiektów penetrujących układy nukleonów pozwala na badanie efektów związanych z oddziaływaniami elektrosłabymi. W rozprawie dynamikę i strukturę stanów związanych modeluje się wykorzystując stopnie swobody całego układu nukleonów jak i jego części. Rozróżnienie tych dwóch stanów nukleonów staje się ważne w przybliżeniu relatywistycznym. Ważną częścią tych rozważań jest znalezienie postaci operatorów prądu hadronowego i amplitud rozpraszania cząstek. Amplitudy macierzowe i prądy hadronowe określają pośrednio prawdopodobieństwo zajścia danego procesu oraz gęstość i ruch silnie oddziałujących naładowanych cząstek składowych jąder i nukleonów. Reprezentacja prądu hadronowego jest w dużej mierze zdeterminowana przez reprezentację oddziaływań. Obliczenia dokonano z wykorzystaniem realistycznych oddziaływań dla zależnych od spinu rozpraszania sprężystych oraz rozpadów układów nukleonów. Zastosowano potencjał Argonne V18 który jest zaprojektowany aby odtworzyć doświadczalnie obserwowalną energię wiązania deuteronu i układu nukleon-nukleon. Ponieważ dla układów 2N przestrzeń fazowa jest duża, można badać i dopasować użyte modele oddziaływań do danych eksperymentalnych i określić ograniczenia, które można wykorzystać dla większych jąder. Co ważne, quasi-elastyczne rozpraszania na tarczach deuteronowych czy też układach 3N dostarczają ważnych informacji na temat elektrosłabych rozpraszania neutronów.

Omówienie struktury pracy i uzyskanych wyników.

Rozdział pierwszy rozprawy to krótkie wprowadzenie do oddziaływań neutrin na jądrach, układów lekkich nukleonów, gdzie wspomniano podejścia Weinberga, grup Epelbauma, Bochum-Bonn, Moscow(Idaho)-Salamanca, efektywne modele chiralne. Jak podkreślono (również w abstrakcie, rozdziale siódmym i podsumowaniu) zastosowany opis dynamiki rozpraszania leptonów na układach $2N$ i $3N$ jest ograniczony przez brak kanału produkcji pionów. Drugim ograniczeniem jest brak w opisie wkładów od dynamiki dwóch nukleonów do operatorów prądu, wynikających z lokalnej niezmienniczości cechowania chociaż kowariantność oraz zachowanie prądu hadronowego są spełnione przez zastosowanie twierdzenia Wignera-Eckarta dla grupy Poincare.

Rozdziały 2-7 opisują zastosowany w rozprawie formalizm. I tak, w rozdziale drugim opisano słaby i elektromagnetyczny prąd oraz różne parametryzacje czynników postaci dla pojedynczych nukleonów, zilustrowane odpowiednimi wykresami. Rozdział trzeci zawiera analizę procesów (kwazi-) elastycznego rozpraszania neutrin na pojedynczych nukleonach, szczegółowo przeanalizowano układy laboratoryjne (LAB) oraz środka masy (CM), energie progowe na poszczególne reakcje, elementy macierzowe amplitud. W rozdziale porównuje się numerycznie wyniki dla różnych czynników postaci protonu i neutronu oraz przekroje czynne w przypadku (nie)relatywistycznym, rozwinięciach nierelatywistycznych. Nie jestem przekonany co do ogólnie poczynionych wniosków na temat roli poszczególnych przybliżeń w obliczeniach przekrojów czynnych. To, że "całkowicie" (totally) nierelatywistyczny wynik jest bliższy relatywistycznemu wynikowi z rozwinięciami w parametrze p^2/M^2 musi być przypadkiem, co zresztą potwierdza odmiennosc zachowań reakcji $\bar{\nu} + p \rightarrow \bar{\nu} + p$. Wyniki mogą być większe/mniejsze w odniesieniu do przypadku relatywistycznego, w zależności od procesów i badanej obserwabli (energia, pędy, kąty rozpraszania).

Rozdział czwarty jest analogiczny do rozdziału trzeciego. Zamiast neutrin, rozpraszane są elektrony na nukleonach. Wyprowadzono wzory Rosenblutha, Motta, potwierdzono wzory na amplitudy rozpraszania z pracy z 1986 roku [97] autorstwa Donnelly, Raskin w układzie gdzie pęd elektronu jest równoległy do osi z oraz wzory na asymetrię $A(\sigma_N)$ z 2001 roku [98] autorstwa Golak et al.

W rozdziale piątym omawiane już są efekty nierelatywistyczne w układach związanych NN (w przestrzeniach położeń i pędów). Dwu-nukleonowy stan rozpraszania został wyznaczony przy pomocy operatora T jako poprawka do rozwiązania fali płaskiej nierelatywistycznego równania Lippmana-Schwingera. Następny rozdział opisuje elastyczne i nieelastyczne reakcje rozpraszania elektronów i neutrin na deuterze prowadzące w ogólności do pięciowymiarowych różniczkowych przekrojów czynnych według parametryzacji z pracy [109].

Najważniejsze są rozdziały 7 i 8, w których zastosowano relatywistyczne podejście do amplitud rozpraszania przy pomocy grupy Poincare oraz przedstawiono wyniki numeryczne. Rozdział siódmy rozpoczyna podręcznikowy opis reprezentacji grupy Poincare dla pojedynczych stanów cząstek, następnie uogólniony do kinematyki i reprezentacji dla stanów dwucząstkowych oraz dodano relatywistyczne oddziaływanie rozszerzające nieod-

działający operator Casimira masy. Przedyskutowano w oparciu o pracę [111] (Kamada, Glöckle) związek między relatywistycznym i nierelatywistycznym potencjałem, potencjał po zmianie inercjalnym układu odniesienia (tzw. pchnięciu) oraz uogólniono do postaci relatywistycznej dwunukleonowy operator T dyskutowany w postaci nierelatywistycznej w rozdziale piątym. Rozdział kończy obliczenie jądrowych elementów macierzowych amplitud rozpraszania na deuteronie, z równoczesnym podziałem wyników na części dotyczące inkluzywnych procesów, elastycznych i nierelatywistycznych członów i wkładów do reakcji rozpadu deuteronu.

W pełni relatywistyczne numeryczne obliczenia oraz aproksymacje dotyczące kinematyki oraz amplitud rozpraszania zawiera rozdział ósmy. Wyniki porównano z danymi eksperymentalnymi, pokazano dla jakich obserwacji istnieją odstępstwa od wyników eksperymentalnych, w przypadkach elastycznego rozpraszania elektron-deuteron (Rys.8.1-8.4), rozpadu deuteronu w zderzeniach z elektronem (Rys.8.5, 8.7-8.10) oraz (anty-)neutrinami (Rys. 8.12). Ważny jest opis oparty o ogólne, pełne wzory relatywistyczne. Jeśli istnieje rozbieżność z danymi eksperymentalnymi, można to przypisać omówionym wcześniej zaniedbaniem efektów pochodzących od kanałów produkcji pionów oraz wkładu wymiany dwóch ciał w operatorze elektromagnetycznym i słabym prądzie jądrowym. Szczególnie jest to widoczne na Rys. 8.7 (rozpad deuteronu w rozpraszaniu z elektronem) oraz w przypadku rozpraszania antyneutrin na deuteronie (Rys. 8.14).

W rozdziale dziewiątym zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych dla bardziej złożonych układów trzech nukleonów wybranych procesów rozpraszania neutron na izotopach ^3H oraz ^3He w oparciu o nierelatywistyczny formalizm Faddeeva (nie doszukałem się w literaturze odpowiednich odnośników do prac tego autora). Wyniki na (kwazi-)elastyczne rozpraszanie (anty-)neutrin na układach ^3H oraz ^3He zebrano na Rys. 9.1 i 9.2. Główne przewidywania na całkowite przekroje czynne dla rozpadów ^3He zebrano na Rys. 9.8. Dominującym procesem jest rozpad pod wpływem rozpraszania antyneutrin w kanale naładowanym, z kolei dla rozpadu ^3H dominujący jest neutralny proces rozpraszania neutron elektronowych (Rys. 9.9).

Zaniedbanie w analizie kanałów produkcji najbliższych mezonów jak i wkładu od wymiany dwóch ciał w operatorze elektromagnetycznym i słabym prądzie jądrowym z pewnością są istotne. Z tego powodu wyniki przedstawione w rozprawie, nawet w ujęciu relatywistycznym mają ograniczone znaczenie. Tym niemniej, w rozprawie pokazano, że ten uproszczony opis procesów rozpraszania i rozpadów ma zastosowanie dla wielu różnego rodzaju procesów przy kinematyce, gdzie energia wewnętrzna dwóch nukleonów pozostaje poniżej progu produkcji pionów, a wartość transferu trójpędów rozciąga się do co najmniej kilku GeV.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim, struktura pracy jest przejrzysta, zauważyłem jedynie kilka błędów w tekście (np. postać macierzy σ_3 na stronie xviii, "is a therefore a" na stronie 62) W rozprawie zabrakło mi w niektórych miejscach szer-

szej dyskusji wyników lub dyskusji poczynionych założeń. Na przykład, we wprowadzeniu wspomniano, że zaniedbano poprawki radiacyjne w rozpraszaniach, tak jak zrobiono to w innej pracy (co nie jest zbyt dobrym argumentem) i zainteresowanego czytelnika skierowano do prac [71,72]. Brak choćby zdania czy efekty te są duże czy małe w obszarze energii rzędu 1 GeV, których dotyczy rozprawa. Opisując parametryzację czynników postaci, nie podano motywacji ich wyboru, różnic w podejściach, ich zaletach i wadach. W tabeli 3.1 (podobnie dla tabeli 6.1) można było podać wartości mas według których uzyskano wyniki oraz odnośniki do wzorów, natomiast w tekście przedyskutować fizyczne powody różnic w uzyskanych wartościach pędów (energii) progowych. Na Rys.4.3, podając bardzo dokładne różnice w uzyskanych wartościach parametrów i obserwacji, warto było wspomnieć o dokładności wyznaczania tych pomiarów eksperymentalnie. Wykres 4.8 nie jest dyskutowany w tekście. Skąd biorą się różnice pomiędzy poszczególnymi liniami, czy różne wartości asymetrii dla poszczególnych linii (silna, słaba zależność od kąta θ') można zinterpretować? Tekst na stronie 97 jest niejasno napisany: "several thousands of Faddeev calculations were performed". W całej rozprawie mówi się o "subnuclear degrees of freedom" w odniesieniu do nukleonów, w podsumowaniu mowa jest o kwarkach, nie ma mowy o gluonach, w szczegółach tak samo ważnych w teorii QCD, w szczególności dla małych wartości zmiennej Bjorkena x . W związku z tym, nasuwa się pytanie czy efekty związane z partonami mogą być odpowiedzialne za rozbieżności pomiędzy wynikami numerycznymi i stosowanymi jądrowymi modelami w rozprawie a danymi eksperymentalnymi? W rozdziale trzecim brakuje mi referencji do danych eksperymentalnych, jak i analizy błędów (dokładność wyników dla poszczególnych parametryzacji czynników postaci). W rozdziale ósmym dla niektórych wykresów podano źródła danych eksperymentalnych (np. Rys. 8.7), jednak nie we wszystkich przypadkach (np. Rys. 8.12).

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 Alessandro Grassiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



prof. dr hab. Janusz Gluza