

Prof. Antoni Szczurek  
Institute of Nuclear Physics (PAN)  
ul. Radzikowskiego 152  
31-345 Kraków

### **Recenzja rozprawy doktorskiej Alessandro Grassi zatytułowanej: "Neutrino and electron scattering off the lightest nuclei"**

Praca doktorska Pana Alessandro Grassi zatytułowana "Neutrino and electron scattering off the lightest nuclei" została napisana pod kierunkiem prof. dr. hab. Jacka Golaka.

Praca dotyczy rozpraszania elektronów i neutrin/antineutrin na lekkich jądrach (deuteron,  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ). Praca dyskutuje zarówno formalizm używany do obliczeń, jak i przedstawia przewidywania wykonane używając potencjału nukleon-nukleon Argonne V18. Rozważono zarówno elastyczne rozpraszanie jak i reakcje dysocjacji tarczy ( $d$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ). W przedstawionej pracy ograniczono się do sytuacji w których produkcja ekstra pionu/pionów nie jest możliwa. Zaniedbano ponadto wkłady dwunukleonowe.

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów i czterech dodatków.

Omówię teraz szczegółowo zawartość pracy.

Praca zaczyna się od wprowadzenia notacji i używanych konwencji. W rzeczywistości przypomina (lub wprowadza) elementy algebry czterowektorów, elementy mechaniki kwantowej niezbędne w prowadzonych badaniach szczególnie związane z momentem pędu, sprzężeniem momentów pędu. Przedstawia użyteczne związki związane z rozpraszaniem w szczególności elementy macierzowe użyteczne w używanym formalizmie. Przedstawiono podstawowe związki dotyczące klasycznych dwu-wymiarowych spinorów, macierze gamma używane w formalizmie relatywistycznym. Po krótko przypomniano równanie Diraca i formalizm relatywistycznych spinorów. Na koniec zestawiono podstawowe wzory na przekrój czynny dla reakcji kilkuciałowych.

Rozdział pierwszy jest klasycznym wstępem w zagadnienia dyskutowane w pracy. Skoncentrowano się do oddziaływania nukleon-nukleon. Przedstawiono odnośniki do prac z literatury. Raczej krótko odniesiono się do reakcji wywołanych neutrinami. Odniesiono się jedynie do eksperymentu DUNE. Czy jest to jedyny eksperyment zajmujący się rozpraszaniem neutrin na jądrach? Czy dotyczy on rozpraszania na lekkich jądrach? Autor

deklaruje, że będzie się zajmował raczej niskimi energiami. Rozważone będą również procesy wywołane leptonami o energiach kilku GeV. Sugeruje to, że pewne elementy relatywistyki będą konieczne. Na koniec przedstawia zawartość swojej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale drugim omawiane są jednonukleonowe elektroślabe operatory prądowe. Przedstawiono wzory na nukleonowy prąd słaby w oparciu o nukleonowe stopnie swobody. Przedstawiono również wzory na prąd elektromagnetyczny przy pomocy formfaktorów elektromagnetycznych (Diraca i Pauliego). Zaprezentowano różne parametryzacje (formuły fenomenologiczne) formfaktorów z literatury: Budd i inni, Shen i inni, Kelly i Lomon. Na rysunkach 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 pokazano jak te różne parametryzacje różnią się dla formfaktorów elektrycznych i magnetycznych. Tak zwane słabe formfaktory pokazane są na rysunku 2.5 osobno dla prądów naładowanych jak i prądów neutralnych.

W rozdziale trzecim omawiane są reakcje dwuciałowe dla rozpraszania neutrin/antyneutrino na nukleonach. Rozważone są zarówno reakcje dla prądów neutralnych jak i dla prądów naładowanych. W tym drugim przypadku w kanale wyjściowym obserwujemy leptony naładowane. Kinematyka tego typu procesów dyskutowana jest w podrozdziale 3.1. Reakcje z wymianą prądów naładowanych mają pewien próg, który dla neutrin/antyneutrino elektronowych jest stosunkowo niski. Przedstawiono wzory na różniczkowy przekrój czynny w układzie środka masy i w układzie laboratoryjnym poprzez kwadrat elementu macierzowego. Elementy macierzowe, odpowiadające wymianie bozonów Z lub W, dyskutowane są w podrozdziale 3.2. Wprowadzono tak zwane tensory leptonowe i hadronowe, również w zmiennych sferycznych. Pokazano jak rozkłady kątowe dla procesów z prądami naładowanymi i prądami neutralnymi wyrażają się poprzez tensory leptonowe i hadronowe, zarówno w układzie środka masy jak i układzie laboratoryjnym. W rozdziale 3.5 pokazano jak kontrakcja tensora leptonowego i hadronowego może być wyrażona jako kombinacja iloczynów formfaktorów elektroślabych (16 członów). Odpowiednie wzory uzyskano przy pomocy pakietu FeynCalc. Czy obliczenia te były wykonane przez autora? Przedstawione wzory są bardzo użyteczne do wyliczenia zarówno rozkładów kątowych jak i całkowitych przekrojów czynnych dla rozpraszania neutrin/antyneutrino na protonach/neutronach. Wyniki, przekroje czynne w funkcji energii laboratoryjnej neutrin/antyneutrino, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3.3, 3.4, 3.5 i 3.6. Do obliczeń użyto kilku popularnych parametryzacji formfaktorów. Wyniki dla prądów na-

ładowanych słabiej zależą od parametryzacji niż te dla prądów obojętnych. Dla prądów obojętnych, wyniki dla tarcz protonowych są bardziej rozbieżne (dla różnych parametryzacji) niż te dla tarcz protonowych. Generalnie wszystkie prezentowane przekroje są bardzo małe i raczej niemierzalne. Trochę brak mi takiego komentarza. W rozdziale 3.6 przedyskutowano nierelatywistyczne przybliżenie jedno-nukleonowego elektrosłabego elementu macierzowego. Na rysunkach 3.7, 3.8 i 3.9 dokonano porównania podejścia relatywistycznego i nierelatywistycznego dla całkowitego przekroju czynnego w funkcji energii neutrin/antineutrin. Trochę brakuje mi podsumowującego komentarza. Przedstawiono odpowiednie elementy tensora hadronowego. Na rysunkach 3.10, 3.11 przedstawiono rozkłady kątowe dla prądów naładowanych dla reakcji  $\nu + p \rightarrow \nu + p$  dla dwóch różnych energii neutrin. Wynik ma znaczenie czysto teoretyczne gdyż nie daje się utworzyć wiązek neutrinowych o dobrze określonej energii. Ponownie porównano wynik w pełni relatywistyczny i przybliżony nierelatywistyczny.

Rozdział czwarty zajmuje się rozpraszaniem elektronów na nukleonach (protonach bądź neutronach). Rozdział ma podobną strukturę jak rozdział trzeci dedykowany neutrinom/antineutrinom. Zaczyna się od podstawowych związków kinematycznych, Następnie, podobnie jak dla neutrin przedstawiono wzory na przekrój czynny dla rozważanej reakcji typu  $2 \rightarrow 2$ . Przedstawiono wzory dla rozkładów kątowych. Wyprowadzono wzory na element macierzowy wyrażony poprzez formfaktory Diraca i Pauliego, bądź poprzez formfaktory Sachsa. Pokazano kilka przykładów rozkładów kątowych dla trzech różnych energii elektronów. Przedstawiono reprezentację zwięzienia tensora leptonowego i hadronowego w specjalnym układzie gdzie oś z skierowana jest w kierunku transferu pędu i używając składowych sferyczny. Wynik zebrany jest we wzorze (4.35) i kilku następujących. Podobnie jak dla rozpraszania neutrin przedyskutowano rozwinięcie nierelatywistyczne jedno-nukleonowego operatora prądu. Dla rozpraszania spolaryzowanych elektronów i nukleonów zdefiniowano specjalną asymetrię dla rozpraszania elektronów o różnych skrętnościach i zadanych skrętnościach nukleonów. Zdefiniowano uogólnione tenosory hadronowe, scharakteryzowane skrętnością nukleonów. Uzyskano zgrabny wzór na asymetrię, w funkcji kąta rozproszenia elektronu dla danej wartości skrętności nukleonu poprzez formfaktory Sachsa. Na rysunku 4.8 pokazano zdefiniowane wcześniej asymetrie w funkcji kąta rozproszenia, zarówno dla rozpraszania na protonie i neutronie. Pokazane asymetrie są znaczące. Czy takie

asymetrie zostały kiedyś zmierzone ?

W rozdziale piątym dyskutowane jest oddziaływanie nukleon-nukleon, Podrozdział 5.1 dyskutuje nierelatywistyczną funkcję falową. Przedstawiono główne charakterystyki deuteronu takie jak masa, spin, energia wiązania, moment magnetyczny i kwadrupolowy. Przedstawiono zarówno podejście w przestrzeni konfiguracyjnej jak i w przestrzeni pędu. Pokazano potencjały (przejścia) dla różnych konfiguracji krętu. Pokazano funkcje falowe dla różnych wartości krętu. Pokazano elementy macierzowe potencjału w przestrzeni  $(p, p')$  (rysunki 5.3), które są specyficznymi transformatami elementów macierzowych w przestrzeni konfiguracyjnej. W podrozdziale 5.2 dyskutowane jest tak zwane równanie Lippmanna-Schwingera i odpowiadającą macierz  $T$ , w podrozdziale 5.2.1 w wersji operatorowej a w podrozdziale 5.2.2 w wersji macierzowej. Dokonując dyskretyzacji otrzymuje się system równań liniowych, który może być łatwo rozwiązany.

Rozdział szósty dotyczy rozpraszania elektronów i neutronów na deuteronie. Rozważono reakcje z rozbiem deuteronu, zarówno dla prądów obojętnych jak i dla prądów naładowanych dla reakcji wywołanych neutronami/antyneutronami. Rozważono również reakcje wywołane elektronami takie jak elastyczne rozpraszanie i reakcję rozbitcia deuteronu na proton i neutron. Zapisano tak zwany prąd hadronowy. Przedstawiono proste formuły kinematyczne, w tym na pęd wychodzącego leptonu. Zaprezentowano wzory na rozkład kątowy leptonów poprzez funkcje odpowiedzi. W ogólnym przypadku wzór zawiera 6 różnych funkcji odpowiedzi. W przypadku niespolaryzowanej wiązki liczba ta redukuje się do czterech. W przypadku rozpraszania elektronów ta liczba jest jeszcze mniejsza. Przedstawiono alternatywny zapis z funkcjami  $A(Q^2)$  i  $B(Q^2)$ , które są kombinacją liniową łatwych do interpretacji funkcji  $R_L$  i  $R_T$ . Rozważono nie tylko inkluzywny przekrój czynny, ale również tak zwaną zdolność analizującą, która może być wyrażona poprzez różnicę przekrojów czynnych dla różnych kombinacji rzutów spinu deuteronu. Podrozdział 6.2 poświęcony jest reakcji breakup-u. W tabeli 6.1 zestawiono minimalne pędy wychodzących leptonów. Tak jak wcześniej są one małe, rzędu 1-2 MeV. Przedstawiono również wzory na maksymalne pędy w funkcji kąta emisji leptonu. W rozdziałach 6.2.1 i 6.2.2 zestawiono wzory na różniczkowy przekrój czynny dla trzyciałowych reakcji breakup-u wywołanych elektronami i neutronami wyrażone poprzez funkcje odpowiedzi dla tej konkretnej sytuacji (deuteron breakup).

Rozdział siódmy, dla mnie najtrudniejszy w całej pracy, przedstawia w pełni relatywistyczne podejście do rozpraszania elektronów i neutronów na

deuteronie. Dyskutowane są szczegółowo różne boost-y. Dyskutowane są różne wzory. Trochę brak jest dyskusji o co chodzi i dokąd zmierzamy. Proszę o wytłumaczenie podczas obrony co jest transformowane i po co? Jaki jest cel tych transformacji? W podrozdziale 7.2 dyskutowany jest system dwunukleonowy a w szczególności jak go skonstruować ze stanów pojedynczych nukleonów. Proszę o wyjaśnienie, który wzór jest używany w dalszych, praktycznych, obliczeniach. W podrozdziale 7.3 dyskutowane jest jak uwzględnić oddziaływanie pomiędzy nukleonami. Dyskutowane jest jak policzyć elementy macierzowe potencjału obłożonego funkcjami falowymi dwunukleonowymi. O ile dobrze rozumiem sama postać potencjału nie jest tu ważna i nie jest dyskutowana? Pokrótce dyskutowana jest dekompozycja prądu (na przykład formuła (7.58)). Autor podkreśla, że ostatni człon, związany z oddziaływaniem jest zaniewany. Autor dyskutuje jak transformują się te prądy które bierzemy pod uwagę w transformacjach Poincare'go. Autor dyskutuje relatywistyczne podejście do potencjału. Nie rozumiem czy wybór potencjału relatywistycznego jest jednoznaczny? Z tym zagadnieniem wiąże się trochę zagadnienie relatywistycznej funkcji falowej. W podrozdziale 7.4 dyskutowana jest relatywistyczna macierz T. Co według autora (autorów) sprowadza się do użycia tak zwanego "boosted potential" w równaniach Lippmanna-Schwingera. Czy to jest powszechnie przyjęte podejście? Następnie autor rozważa elementy macierzowe operatora prądu dla breakup-u deuteronu. Kilka różnych elementów macierzowych jest wyliczanych (nazywanych B, B', B'' and C). Chciałbym aby autor przekonał mnie, że właśnie takie elementy macierzowe są istotne w dalszych rachunkach. Stosunkowo proste są elementy macierzowe dla elastycznego rozpraszania. Podobnie jak w poprzednich rozdziałach dyskutowane jest przybliżenie nierelatywistyczne, które otrzymane jest ze specyficznego podejścia relatywistycznego. Czy to jest równoważne sformułowaniu nierelatywistycznemu od samego początku? Myślę że takie podejście istnieje?

Dopiero w rozdziale ósmym pojawiają się wyniki. Podrozdział 8.1 przedstawia wyniki dla elastycznego rozpraszania elektronów na deuteronie – najlżejszym faktycznym jądrem atomowym. Rysunki 8.1 i 8.2 przedstawiają funkcje A i B, zdefiniowane w poprzednich rozdziałach, w funkcji kwadratu przekazu czteropędu w dwóch różnych zakresach. Pokazano wyniki dla różnych przybliżeń dokonanych w obliczeniach. Wyniki porównano z danymi eksperymentalnymi. Dla małych  $Q^2$  wszystkie przybliżenia dają podobny wynik. Różnice pojawiają się dla większych wartości  $Q^2$ . Na rysunku 8.3

pokazano wyniki dla różnych parametryzacji form faktorów elektromagnetycznych. Wynik słabo zależy od użytej parametryzacji. Na rysunku 8.4 pokazano zdolność analizującą dla ustalonego kąta rozpraszania w funkcji wirtualności przekazywanego fotonu. Wyniki dla elektrodezintegracji deuteronu prezentowane są w podrozdziale 8.2 Na rysunku 8.5 pokazano pięciokrotnie różniczkowy przekrój czynny w funkcji kąta wylotu protonu i wartości brakującego pędu. Pokazano wyniki uwzględniając i zaniehbując tak zwany efekt rescatteringu. Poproszę o omówienie efektu rescatteringu, który nie jest w pracy jasno zdefiniowany. Na rysunku 8.6 pokazano pewne związki kinemetyczne. Na rysunku 8.7 ponownie pokazano pięciokrotnie różniczkowy przekrój czynny w funkcji kąta emisji protonu dla ustalonego przedziału energii wzbudzenia. Rozumiem że jedna krzywa otrzymana jest w podejściu fal płaskich a druga w podejściu fal zniekształconych. Proszę o omówienie tego wyniku podczas publicznej obrony. Na rysunkach 8.8, 8.9 i 8.10 pokazano inkluzywne przekroje czynne (wycalkowane po kierunku emisji protonów) w funkcji transferu energii. Trochę przeszkadza mi fakt, że szczegółowe zrozumienie co pokazano na rysunkach można uzyskać studiując rysunki (8,9,10) z innej pracy. Wyraźnie widać, że formalizm użyty w pracy nie pozwala opisać rozkładów dla dużych wartości przekazu energii. Chodzi tu o otwarcie innych kanałów reakcji – produkcję dodatkowego pionu, bądź wzbudzenie typu  $\Delta$ . W podrozdziale 8.3 dyskutowane jest elatyczne rozpraszanie na deuteronie (rysunek 8.11, w funkcji energii neutrina) jak i reakcja breakup-u deuteronu (rysunki 8.12 (w funkcji energii neutrina), 8.13, 8.14 (w funkcji kąta emisji neutrina lub elektronu)). Tylko w przypadku produkcji elektronu rozkład kątowy może być mierzony, chociaż odpowiadający przekrój czynny jest znikomo mały.

W rozdziale dziewiątym dyskutowane są reakcje rozpraszania neutrin na jądrami  ${}^3\text{H}$  i  ${}^3\text{He}$ . Chodzi o reakcje elastycznego rozpraszania jak i o procesy breakup-u. Dyskutowany jest hamiltonian dla oddziaływań trzech nukleonów. Autor pracuje w grupie która ma ogromne doświadczenie jeśli chodzi o formalizm Faddeyeva. Zaprezentowano elementy tego formalizmu. Rozpisano wyrażenia na elementy macierzowe prądu systemu trzech nukleonów. Przedstawiono nieco formalne wzory na funkcje odpowiedzi. W podrozdziale 9.2 przedstawiono pewne wyniki. Na rysunkach 9.1 i 9.2 pokazano całkowite przekroje czynne w funkcji energii neutrin/antyneutrino dla reakcji z wymianą prądów naładowanych (rysunek 9.1) i prądów neutralnych (rysunek 9.2). Zakres pewnych zmiennych kinematycznych pokazano na rysunku 9.3. Przedstawiono wzór na inkluzywny przekrój czynny

poprzez różne kombinacje funkcji odpowiedzi. Na rysunkach 9.4, 9.5, 9.6, 9.7 pokazano różne funkcje odpowiedzi w funkcji  $Q$  i energii w systemie trzech nukleonów. Brakuje podsumowania tych wyników. Na rysunkach 9.8 i 9.9 przedstawiono całkowite przekroje czynne dla różnych kanałów wyjściowych dla reakcji na  ${}^3\text{He}$  i  ${}^3\text{H}$ .

Rozdział dziesiąty jest krótkim podsumowaniem dokonań autora w przedstawionej pracy. Brakuje mi tutaj wizji przyszłości.

Załączono szereg dodatków. Dodatek A zawiera analityczną reprezentację tensora dla rozpraszania neutrin na nukleonach. Dodatek B pokazuje macierze obrotu dla spinu  $1/2$ . Dodatek C pokazuje przykłady transformacji Lorentza i obrotów. Przykład z konkretnymi liczbami wydaje mi się niekonieczny. W dodatku D przedstawiono rotacje Wignera przy pomocy macierzy  $SL(2, \mathbb{C})$ . Wynik końcowy przykładu dla macierzy  $D^{1/2}$  jest taki sam jak w dodatku C. Rozumiem, że dyskutowane są alternatywne metody i rozważane przykłady pokazują że tak jest.

Podsumowując, przedstawiona praca jest interesująca – porusza interesujące zagadnienia fizyki kilku ciał. Praca napisana jest jasno i pedagogicznie. Nie zauważyłem większych wpadek w sformułowaniach. Praca spełnia wymagania stawiane formalnie i zwyczajowo rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie Pana Alessandro Grassi do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie proszę o przedstawienie odpowiedzi i wyjaśnień o których wspomniałem w mojej recenzji.



Antoni Szczurek  
Kraków, 5.10.2023