

Wrocław, 14 grudnia 2017

dr hab. Krzysztof M. Graczyk  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
Uniwersytet Wrocławski  
pl. M. Borna 9, 50-343 Wrocław

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Monireh Kabirnezhad pt. "Improvement of Single Pion Production for T2K experiment simulation tools"**

Przedłożona praca doktorska dotyczy problemu produkcji pojedynczych pionów w oddziaływaniach neutrin z nukleonami oraz jądrami atomowymi. Zagadnienie to jest ściśle związane z badaniem podstawowych własności neutrin takich jak oscylacje oraz łamanie symetrii CP w sektorze leptonowym.

W przypadku eksperymentów neutrinowych długiej bądź krótkiej bazy, pomiar parametrów oscylacji, jak i fazy łamania symetrii CP, jest prowadzony na podstawie analizy pomiarów oddziaływań neutrin w bliskim i dalekim detektorze. Zdarzenia, w których mierzone są pojedyncze piony, stanowią istotną część wszystkich obserwowanych. Ich właściwe oszacowanie jest ważne dla pomiaru oscylacji neutrin mionowych w taonowe w tzw. pomiarze deficytu neutrin jak i pomiaru oscylacji neutrina mionowego w elektronowe, w bezpośrednim pomiarze neutrina elektronowego w dalekim detektorze. Główny problem stanowi nieznaną energię neutrina. Wiązka neutrinowa nie jest monochromatyczna, dlatego aby zrekonstruować energię neutrin, korzysta się z pomocy symulacji komputerowych, wykonanych przy pomocy neutrinowych generatorów zdarzeń Monte Carlo (MC).

Wiadomo, że dalszy postęp w badaniu podstawowych własności neutrin wymaga dogłębnierzego zrozumienia w jaki sposób neutrina oddziałują z jądrami atomowymi i nukleonami. W szczególności istnieje potrzeba dysponowania dokładnymi przewidywaniami przekrojów czynnych na oddziaływanie neutrin z nukleonami i jądrami atomowymi. Potrzeba ta spowodowała nowe zainteresowanie problemem oddziaływań neutrin z jądrami i nukleonami, w szczególności zagadnieniem produkcji pojedynczych pionów (PPP) indukowanych przez oddziaływanie neutrinonukleon. Badanie procesów typu PPP jest bardzo ważne również z punktu widzenia fizyki hadronów. Tematyką PPP w oddziaływaniach neutrin zajmują się kilka grup badawczych między innymi: prof. Nieves ze współpracownikami (Hiszpania), grupa prof. Sato (Japonia i USA), grupa prof. Mosela (Niemcy), wrocławska grupa neutrinową, grupa z Gandawy (Belgia) oraz kilka innych. W ostatnich latach udało się rozwiązać kilka istotnych problemów. Mimo tego modele PPP wciąż dalekie są od doskonałości. Należy także podkreślić, że w analizach eksperymentalnych, wciąż używa się niedoskonałego modelu Reina i Sehgała.

Model Reina-Sehgała (RS) (Annals Phys. 133 (1981) 79) jest zaimplementowany prawie we wszystkich neutrinowych generatorach Monte Carlo z wyjątkiem generatora

NuWro. Opis ten bazuje na relatywistycznym modelu kwarkowym Feynmana-Kislingera-Ravandala (FKR) (Phys.Rev. D3 (1971) 2706), który został rozwinięty przez Ravandala do modelowania elektro- i neutrino- produkcji rezonansów. Rein i Sehgal, w pracy z roku 1981, zaadaptowali model FKR oraz podejście Ravandala uzupełniając je o dodatkowe rezonanse, tym samym rozszerzając zakres stosowalności modelu do masy niezmienniczej  $W = 2$  GeV oraz zaproponowali efektywny opis tzw. wkładów nierezonansowych. Model RS nie uwzględniał w opisie efektu masy leptonowej. Słabością modelu były również: mało spójny teoretycznie opis wkładów nierezonansowych oraz uproszczona postać rezonansowych prądów hadronowych. Problem pierwszy znalazł częściowe rozwiązanie w pracy Rein'a w Z.Phys. C35 (1987) 43, gdzie stosując formalizm multipolowy wprowadzone zostały człony nierezonansowe, dokonano również przededefiniowania względnych znaków rozpadu rezonansów. Kolejne modyfikacje modelu RS zostały zaproponowane w pracach: Graczyk i Sobczyk Phys.Rev. D77 (2008) 053003, Phys.Rev. D77 (2008) 053001, Berger i Sehgal, Phys. Rev. D 76, 113004 (2007) oraz Naumov *et al.* Mod. Phys. Lett A19, (2004) 2815. Model RS został wzbogacony o lepsze czynniki postaci dla rezonansu  $\Delta(1232)$  oraz uwzględniono w formalizmie masę naładowanego leptonu. Wymienione wyżej poprawki zostały wprowadzone do generatorów MC.

Głównym celem pracy Pani mgr Monireh Kabirnezhad było poprowadzenie modelu Reina-Sehgala o lepszy opis wkładów nierezonansowych oraz implementację poprawionego modelu w generatorze MC NEUT, używanym w analizach eksperymentu T2K. Wyniki swojej pracy Doktorantka prezentowała na kilku konferencjach i zebraniach kolaboracji T2K. Część wyników została przedstawiona w dwóch krótkich komunikatach konferencyjnych. Chciałbym jednak zaznaczyć, że wiedza o tej działalności pani Kabirnezhad'i nie była zreferowana w rozprawie.

Punktem startu w rozważaniach Pani mgr Kabirnezhad'i jest praca Rein'a, z 1987 r, gdzie wprowadzono do modelu RS wkłady nierezonansowe zadane przez trzy diagramy Borna, uzyskane z liniowego modelu sigma. Rein zastosował formalizm oparty o rozwinięcia multipolowe amplitud składowościowych. Podejście to zostało sformułowane przez Adlera w 1968 r. w słynnej pracy Annals Phys. 50 (1968) 89. Wiadomo, że uwzględnienie wkładów nierezonansowych jest niezbędne, aby otrzymać zgodność z pomiarami dla wszystkich możliwych kanałów na PPP. Do opisu produkcji pojedynczych pionów Doktorantka stosuje ten sam formalizm co Rein, jednak w swoich rozważaniach tło nierezonansowe opisuje diagramami z pracy Hernandez, Nieves, Valverde (HNV) Phys.Rev. D76 (2007) 033005, otrzymanymi z nieliniowego modelu sigma. Należy podkreślić, że formalizm Adlera jest skomplikowany i bardzo techniczny. Mając model RS wzbogacony o nowy opis tła nierezonansowego pani Kabirnezhad'i uzyskała nowe dopasowanie aksjalnego czynnika postaci  $C_5^A$ . Wykonany został również szereg porównań przewidywań zmodyfikowanego modelu RS z pomiarami przekrojów czynnych na rozpraszanie neutrino-nukleon. Uzyskane zostały również nowe wartości znaków rozpadu rezonansów. Ostatnim elementem pracy doktorskiej było wprowadzenie poprawionego modelu RS do generatora NEUT. Pozwoliło to Pani magister wykonać porównanie przewidywań modelu z najnow-

szymi pomiarami PPP w oddziaływaniach neutrin z jądrami atomowymi.

Rozprawa doktorska składa się z ośmiu rozdziałów, dziesięciu dodatków oraz spisu literatury. Rozdziały 1-2 mają charakter wprowadzający. Najbardziej istotne wyniki rozprawy zawarte zostały w rozdziałach 3-7 oraz w dodatkach. Poniżej omawiam szczegółowo najważniejsze fragmenty pracy doktorskiej.

Rozdział trzeci wprowadza do opisu amplitudy skrzyżnościowe oraz formalizm multipolowy. W rozdziale tym wyprowadzone zostają formuły na różniczkowy przekrój czynny. Dla klarowności opisu część rachunków tego rozdziału została przeniesiona do dodatków. Rozdział trzeci bazuje na formalizmie dyskutowanym choćby w pracy Rein'a z 1987 r. Jednak, jak wspominałem wyżej, ojcem podejścia jest Adler. Warto wspomnieć, że w ramach zupełnie bezmodelowej analizy można wykazać, że wyrażenie na przekrój czynny zależy trywialnie od kąta pionowego  $\phi$ , patrz wzór (3.64) rozprawy. Zależność ta może być łatwo wycałkowana. Rozdział trzeci napisany jest przejrzysto, a większość wyprowadzeń przedstawiona jest klarownie, co dowodzi, że mgr Kabirnezhad'i samodzielnie rozwikłała trudny formalizm Adlera. Do rozdziału trzeciego mam jedną uwagę natury technicznej. Mianowicie przydałoby się uzupełnić wywód o podanie dokładnych formuł dla  $C_{L\pm}$  oraz  $C_{R\pm}$ , co ułatwiłoby zrozumienie wyprowadzania wzoru (3.80).

Rozdział czwarty składa się z dwóch wiodących części. Podrozdział 4.1 wprowadza amplitudy na produkcję rezonansów. Materiał ten bazuje na pracach Reina oraz Reina i Sehgała. Jednak podobnie jak w przypadku rozdziału trzeciego widać, że pani Kabirnezhad'i włożyła wysiłek by przeliczyć niezbędne elementy podejścia. Rozdział 4.2 jest najbardziej oryginalną częścią rozprawy. Pani Kabirnezhad'i adoptuje z modelu HNV wkłady nierezonansowe i wyraża je poprzez amplitudy skrzyżnościowe, tak aby mogły zostać wprowadzone do formalizmu przedstawionego w rozdziale trzecim. Podrozdział ten zawiera szczegółowe wyliczenia wspomnianych amplitud. Podobnie jak w rozdziale trzecim, część rozważań została przeniesiona do dodatków. Do rozdziału czwartego mam kilka uwag natury merytorycznej, mianowicie: nie do końca jest jasne, w jaki sposób uwzględniona została masa leptonu w części dynamicznej. Cytowane są dwie prace [13] i [14], które traktują ten problem zupełnie inaczej. Brakuje w pracy porównań przekrojów czynnych obliczonych dla: i) modelu z masą leptonu zero; ii) modelu uwzględniającego masę tylko w kinematyce; iii) modelu uwzględniającego masę w kinematyce i w części dynamicznej. Przydałoby się również uzupełnić rozważania, o porównanie przewidywań modelu z nowym tłem nierezonansowym, z wynikami pracy Reina z 1987 r. Ponadto chciałbym zauważyć, że utożsamienie rezonansowych amplitud skrzyżnościowych z odpowiednimi amplitudami rozkładu multipolowego, jest wykonane na podstawie porównania przekrojów czynnych wycałkowanych po zależności kątowej pionu. Pojawia się zatem pytanie, jak dodawane są do siebie wkłady rezonansowe i nierezonansowe, gdy rozważamy potrójny przekrój czynny zależny od kąta pionu (tak jak w rozdziale 6)? Wreszcie niech mi będzie wolno zauważyć, że czynniki postaci zadane wzorem (4.45), są używane inaczej niż w pracy źródłowej [17]. Pojawia się naturalne pytanie jak uzasadnić takie procedowanie? Pewnym mankamentem rozdziału czwartego jak i całej pracy jest brak porównań

przewidywań teoretycznych z pomiarami rozpraszania elektron-nukleon. Wydaje się to najbardziej naturalny krok w testowaniu modeli oddziaływań neutrin z materią. Pomiary elektronowe są znacznie dokładniejsze i pozwalają na ściślejszą niż w przypadku pomiarów neutrinowych falsyfikację modeli teoretycznych.

Rozdział piąty zawiera omówienie porównań przewidywań ulepszonego przez Panią Kabirnezhad'i modelu RS z pomiarami oddziaływań neutrin z nukleonami. Pani Kabirnezhad'i wprowadza funkcję tłumienia wirtualnego czynnika postaci dla pionu (wzór 5.1). Wydaje się, że obcięcie ad-hoc tła nierezonansowego poprzez formułę (5.1) powinno być nieco mocniej uzasadnione i poparte dogłębnějšíą analizą, choćby porównaniem przewidywań z obcięciem i bez. Faktycznie człony tła nierezonansowego zadane przez symetrię chiralną mają uzasadnienie tylko dla energii progowej na produkcję pionów. Jednak wprowadzenie czynników postaci, z odpowiednim zachowaniem asymptotycznym, naturalnie rozszerza zakres kinematycznej stosowalności. Ewentualny problem stanowiąc mogą singularności amplitud tła nierezonansowego oraz brak członów nierezonansowych dla drugiego i trzeciego obszaru rezonansowego. Jednak wydaje się, że zupełne wyłączenie wkładów tła, tak jak jest to prezentowane w pracy, ogranicza stosowalność modelu do zaledwie pierwszego i części drugiego obszaru rezonansowego. Rozdział piąty prezentuje również nowe dopasowanie czynnika postaci  $C_3^A$ . Jednak wynik ten został uzyskany na podstawie dyskusji pomiarów tylko eksperymentu ANL i to tylko dla pomiarów PPP w jednym kanale. W analizie zaniedbano błędy systematyczne, które jak wiadomo, choćby z pracy Phys.Rev. D80 (2009) 093001 (współpraca grup neutrinowych z Warszawy i Wrocławia) odgrywają istotną rolę w analizie neutrinowych przekrojów czynnych. Rozdział piąty zawiera również ciekawe wyniki analizy pomiarów BEBC90, z której Pani magister uzyskuje informacje o względnych znakach pomiędzy amplitudami rezonansowymi. Pragnę jednak zauważyć, że wkłady tła nierezonansowego zostały obcięte powyżej  $W = 1.6$  GeV, zatem wydaje się, że uzyskane wyniki dla rezonansów powyżej 1.6 GeV są tylko poglądowe. Podsumowując ten rozdział, przewidywania modelu rozwijanego przez mgr. Kabirnezhad'i zgadzają się na poziomie jakościowym z pomiarami przekrojów czynnych dla kilku różnych eksperymentów. Zgodność ta jest lepsza niż w przypadku przewidywań generatora NEUT. Zatem naturalnym następnym etapem pracy było wprowadzenie zmodyfikowanego modelu RS do generatora NEUT.

Rozdział 6 omawia skrótowo implementację poprawionego modelu RS w generatorze NEUT. Chciałbym nadmienić, że tekst rozprawy zyskałaby, gdyby był rozszerzony o choćby skrótowy opis kodu źródłowego, albo przynajmniej o poprowadzenie czytelnika z adresem repozytorium, w którym można znaleźć implementację.

Rozdział 7 zawiera porównanie przewidywań generatora NEUT z zaimplementowanym modelem PPP pani Kabirnezhad'i z najnowszymi pomiarami przekrojów czynnych dla rozpraszania neutrin na jądrach atomowych, zmierzonych przez eksperymenty: Mini-BooNE, Minerva oraz T2K. Trzeba jednak pamiętać, że wyniki tych porównań obciążone są niepewnością związaną z ułomnościami modelu jądrowego zaimplementowanego w generatorze NEUT.

Jeśli chodzi o warstwę redakcyjną pracy to chciałbym podkreślić, że rozprawa napisana jest przejrzystym i klarownym językiem, jednak nie udało się uniknąć w tekście pracy drobnych uchybień natury redakcyjnej. Część z nich wymieniam poniżej. Pewnym niedociągnięciem redakcyjnym jest chaotyczny styl prezentowania spisu literatury. Trudno zrozumieć logikę kolejności pozycji.

Drobne uwagi redakcyjne:

- zdanie na stronie 9 zaczynające się od "In resonance..." wychodzi na margines;
- rysunek 3.2: podpis nogi wchodzącego nukleonu mniejszy niż pozostałe podpisy cząstek wchodzących i wychodzących;
- pierwsze zdanie rozdziału 3.1.1: zamiast  $k_{02} \neq k$  powinno być raczej  $k_{02} \neq |k|$ ;
- niepotrzebne słowo nonumber po wzorze 3.23;
- wzory 3.23, 3.60 oraz 3.62 wychodzą poza margines;
- wydaje się, że we wzorze (3.58) prąd leptonowy  $\varepsilon_{R/L}^\beta$  winien być oznaczony przez  $\varepsilon_{\pm}^\beta$ .
- wydaje się, że jest błąd znaku w czynniku fazowym  $e^{i\phi}$  w wyrażeniu  $\tilde{G}_{1/2, -1/2}^{eL}$ ;
- strona 46, brak numeru równania w odnośniku, jest 3.67-??, podobnie na stronie 49;
- rysunek 5.5 i 5.11: nieco inne oznaczenia w podpisie rysunków niż etykiet na rysunku;
- numeracja podrozdziałów dodatku A jest niewłaściwa;
- nie jest do końca jasna notacja dla spinorów w dodatku C, chodzi o oznaczenie  $\chi_{s_i, \lambda}$ ;
- strona 130, cięcia na pędy we wzorze 7.2, winno być 0.2 GeV zamiast 200 GeV;
- błąd znaku we wzorze (E.7).

Podsumowując, po dokładnym zapoznaniu się z materiałem rozprawy stwierdzam, że spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pani mgr Kabirnezhad'i do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. Krzysztof M. Graczyk

