

Dr hab. Paweł Malecki  
Instytut Fizyki Jądrowej  
im. H. Niewodniczańskiego PAN  
ul. Radzikowskiego 152  
31-342 Kraków

Kraków, 13.04.2022 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej p. mgr. Grzegorza Żarneckiego  
zatytułowanej:  
*Measurement of the charged current muon antineutrino single  $\pi^-$   
production cross section at T2K***

Przedstawiona do recenzji praca pana mgr. Grzegorza Żarneckiego z Narodowego Centrum Badań Jądrowych pt. *Measurement of the charged current muon antineutrino single  $\pi^-$  production cross section at T2K* wykonana pod kierunkiem prof. Justyny Łagody opisuje pomiar przekroju czynnego dla reakcji antyneutrino – nukleon, zachodzącej przez prądy naładowane (*charged current*, CC) z produkcją pojedynczego, ujemnie naładowanego mezonu  $\pi^-$ . Pomiar ten realizowany był w ramach współpracy T2K z użyciem jednego z tzw. detektorów bliskich, ND280. Eksperyment T2K (Tokai-to-Kamioka), zlokalizowany w Japonii, to wiodący światowy eksperyment badający przede wszystkim oscylacje neutrin. Bierze w nim udział około 500 fizyków z ponad 60-ciu instytucji naukowych na całym świecie. Wiązka neutrin produkowana jest w wyniku oddziaływania wiązki protonów, przyspieszanej w akceleratorze J-PARC, z grafitową tarczą, gdzie produkowane są naładowane mezony  $\pi^-$ . W ich rozpadach powstają neutrina, które następnie mogą być rejestrowane w tzw. detektorze bliskim (280 m od tarczy) i dalekim (Super-Kamiokande, 295 km od tarczy). Oprócz badania oscylacji neutrin niezwykle istotnym elementem programu fizycznego współpracy T2K są pomiary przekrojów czynnych dla różnych typów oddziaływań neutrin i antyneutrin z nukleonami. Praca przedstawiona przez pana Żarneckiego opisuje właśnie jeden z takich pomiarów - dla procesu antyneutrino-CC $1\pi^-$ . Jest on bardzo istotny jako wkład w całkowity przekrój czynny dla reakcji antyneutrino-nukleon. Ponadto, w badanym zakresie energii antyneutrin, od 0.5 do 1.5 GeV, nie znalazłem innego pomiaru przekroju czynnego dla antyneutrino-CC $1\pi^-$ . Eksperymenty SciBoone i MiniBoone mogły to robić w tym zakresie energii, ale raportują tylko przekroje czynne dla oddziaływań kwazielastycznych (CCQE). Analiza pana Żarneckiego obejmuje dane zbierane przez

detektor bliski, ND280, w latach 2014-2018 (w trybie antyneutrinowym, Run 5 - 7 i 9,  $8 \times 10^{20}$  protonów na tarczę).

Recenzowana rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim, liczy 202 strony, składa się ze wstępu, sześciu rozdziałów, podsumowania i trzech dodatków. Zawiera także odnośniki do 142 pozycji literaturowych, włączając w to wewnętrzne noty współpracy T2K. We wstępie Autor kreśli krótki rys historyczny i główne problemy w fizyce neutrin, wspomina także, że dla analiz oscylacyjnych głównym wkładem do niepewności systematycznej są niedokładności w modelowaniu oddziaływań neutrin i antyneutrin z materią. Próba ich zredukowania wymaga właśnie pomiarów przekrojów czynnych dla tych reakcji, czyli m.in. tego, co zrobił w swojej pracy doktorskiej pan Żarnecki. We wstępie mieści się też zdawkowa, ale wystarczająca, informacja o wkładzie Autora w uzyskany wynik (który jest wynikiem "należnym" całej współpracy T2K) - Doktorant sprawdził, zoptymalizował i rozwinął procedurę wyboru przypadków do analizy, oszacował niepewności systematyczne i przeprowadził analizę statystyczną w celu uzyskania końcowych wyników. Korzystał on oczywiście z oprogramowania dostępnego we współpracy T2K.

**Rozdział 1** stanowi wstęp "teoretyczny", opisuje własności neutrin w ramach Modelu Standardowego (MS), a także, wykraczając poza MS, kwestie związane z ich oscylacjami. W rozdziale tym zaprezentowany jest także obecny stan badań oscylacji, hierarchii mas i łamania CP. Następnie opisane są rodzaje oddziaływań neutrin z materią i - co bardzo interesujące - sposób ich implementacji w generatorze Monte Carlo - NEUT, który jest używany w przedstawionej analizie. Rozdział ten kończą sekcje, w których szczegółowo zdefiniowany jest badany proces sygnałowy - oddziaływanie antyneutrin z jądrami typu  $CC1\pi^-$  - gdzie rozważane są tylko oddziaływania neutrin z tarczą węglowodorową - materiałem subdetektora Fine-Grained Detector 1 (FGD1). Taki pomiar został dotychczas wykonany tylko raz, w eksperymencie MINERvA (ref. 84), ale w zakresie energii powyżej 1.5 GeV. Pomiary tego typu, ale na ciekłym argonie prowadzone były przez współpracę ArgoNeuT w roku 2018 (ref. 85), ale też w innym zakresie energii antyneutrin, w okolicy 3.6 GeV. Widać stąd wyraźnie, że badania pana Żarneckiego i współpracę T2K są pionierskie i unikatowe.

Mam kilka drobnych uwag do tego rozdziału. Jest pewna niekonsekwencja dotycząca jednostek - na stronie 15 masa wyrażona jest w MeV, a później, np. na stronie 23 - już w  $\text{MeV}/c^2$ . Na stronie 17 we wzorze 1.5 w ostatnim sinusie powinno być 2E a nie 4E, konsekwentnie to samo dotyczy wzoru 1.6. W pierwszym wzorze na stronie 24 zamiast theta powinno być theta\_L. Brakuje też informacji czy oddziaływania typu CC COH (koherentna emisja pionu) i MEC (meson exchange current) mają znaczenie w sensie przekroju czynnego (bo nie są uwzględnione na rysunku 1.3), jakaś wzmianka o rzędach wielkości przynajmniej by się przydała, podobnie o NC (który jest przecież dość spory w sumie). Fakt, pojawia się to na rys. 2.7, ale warto było chyba go przenieść do rozdziału 1. Te drobiazgi nie zmieniają jednak faktu, że ten rozdział jest napisany bardzo dobrze i może stanowić dobry materiał wprowadzający np. dla studentów zainteresowanych tą tematyką. Ponadto, sporym plusem jest fakt, że pan Żarnecki opisał konkretną implementację poszczególnych typów oddziaływań neutrin w generatorze NEUT - to bardzo ułatwia zrozumienie całej analizy, a muszę tu przyznać, że spodziewałem się raczej ogólników i po prostu odnośnika literaturowego na ten temat.

**Rozdział 2** przedstawia całościowy opis eksperymentu T2K. Począwszy od sposobu tworzenia wiązek neutrinowych i antyneutrinowych wraz z ich właściwościami, składem "zapachowym" itp., poprzez szczegółowy opis detektora bliskiego (ze szczególnym uwzględnieniem podsystemów ND280) a na dalekim, Super-Kamiokande, skończywszy, czytelnik otrzymuje ogólny obraz całego układu eksperymentalnego na właściwym poziomie szczegółowości. Wiązki neutrin i antyneutrin używane w T2K mają energie w zakresie 0.5 do 1.5 GeV, sporym wyzwaniem w opisywanej analizie jest fakt, że wiązka antyneutrin jest, mimo wszelkich starań, mocno zanieczyszczona neutrinami. Detektory umieszczone są poza osią wiązki (2.5 stopnia) co zapewnia dużo węższe spektrum tych energii i lepszą czułość na pomiary oscylacji. Drobne uwagi, jakie mam są następujące. Interesujące byłoby przedstawienie np. profilu kątownego wiązki neutrin, żeby było wiadomo, ile się ich traci przez zastosowanie strategii off-axis. Autor prezentuje, w tabeli 2.1, stosunki rozgałęzień dla rozpadów pionów i kaonów, jednak nie podaje, jak często (w stosunku do pionów) w zderzeniach protonów z tarczą produkowane są kaony, ta informacja by się przydała dla pełnego obrazu, skoro już o tych kaonach jest mowa. Na rys. 2.7 brakuje jednostek fluxu (np. na pionowej osi z prawej strony).

**Rozdział 3** bardzo szczegółowo opisuje procedurę wyboru dwóch próbek sygnałowych i dwóch próbek tła. Optymalizacja selekcji przypadków pod kątem wysokiej wartości iloczynu czystości i wydajności tejże selekcji jest dobrze umotywowana, jako minimalizująca oczekiwaną niepewność statystyczną pomiaru przekroju czynnego. Optymalizacja ta prowadzona jest w oparciu o próbki Monte Carlo. Procedura wyboru i jej wpływ na skład wybranych próbek przedstawiony jest krok po kroku. Sporym wyzwaniem w tym etapie analizy jest zanieczyszczenie próbki antyneutrinowej przypadkami z neutrinami i dlatego wymagane jest wprowadzenie cięcia na "Z-range". Mimo obaw o wprowadzenie silnej zależności od modelu MC przez to cięcie, sekcja 3.4 jasno pokazuje, że wydajność tego cięcia jest niemal płaska w zmiennych kinematycznych pionu i mionu w ich rozważanych zakresach. Uwagi do tego rozdziału przedstawiam poniżej.

Rys. 3.2 - jak rozumiem, pokazuje on dokładność rekonstrukcji pędu w samej tylko TPC2 ? Jakkolwiek wszystko, co trzeba, właściwie widać, to przydałby się jakiś opis numeryczny szerokości połówkowych uzyskanych rozkładów (że o jakimś ficie nie wspomnę). Swoją drogą, wygląda na to, że zmniejszenie statystyki przy ostrzejszym cięciu na liczbę klastrów w TPC2 nie byłoby zbyt duże, a wzrost dokładności - spory. Rozumiem jednak, że to "cięcie" jest standardowo używane w kolaboracji.

Czy użycie dwóch osobnych cięć dla kandydata na mion i kandydata na pion nie byłoby bardziej efektywne (rozumiem że to zależy od korelacji)? Nie do końca rozumiem, dlaczego wybrano wartość (-10) cm. Argumentacja w oparciu o dane neutrinowe (FHC) jasno wskazuje, dlaczego nie jest to wartość 0, ale z rysunku 3.11 wynika, że to powinno być raczej +10 cm dla lepszej zgodności symulacji z danymi. Czy na rysunku 3.11 niepewności związane z ograniczoną statystyką próbek MC są zaniedbywalne? To dotyczy zresztą też pozostałych rysunków w tym rozdziale. Poza tym - czy we wzorze na stronie 97 (na  $\epsilon_{\text{toy}}^{\text{data}}$ ) nie brakuje po prawej stronie jakiegoś czynnika typu  $\epsilon$ ?

W **rozdziale 4** Doktorant niezwykle szczegółowo opisuje procedurę wyznaczania niepewności systematycznych, przedstawia także dokładny opis poszczególnych przyczynków i sposób ich uwzględnienia w analizie statystycznej. Dominuje tutaj niepewność związana z niezbyt dobrym opisem wtórnych oddziaływań pionów naładowanych. Oddziaływania te (i związana z nimi niepewność) są istotne dla pomiaru tylko, jeżeli zachodzą w określonej przestrzeni detektora (i mogą w ten sposób wpłynąć na wynik wyboru przypadków). Autor wniósł tu swój istotny wkład, modyfikując dla potrzeb swojej analizy metodę wyznaczania tej niepewności poprzez dynamiczny wybór granic tej określonej przestrzeni (metoda Dynamic Volume of Interest) w zależności od rodzaju wybranego przypadku. Jest to kluczowy punkt dla poprawnego wyznaczenia niepewności systematycznej w opisywanej analizie.

**Rozdział 5** opisuje szczegółowo analizę statystyczną w kierunku oszacowania wartości przekrojów czynnych. W sekcji 5.1 opisany jest wybór binowania przestrzeni fazowej, zrobiony - znów - bardzo porządnie. Następnie opisany jest sposób działania programu fitującego, ale przy tym pan Żarnecki robi krótkie wprowadzenie do metody największej wiarygodności (maximum likelihood). Rozdział kończy sekcja, w której przedstawione są cztery metody sprawdzania poprawności działania procedury statystycznej przy pomocy różnych pseudo-danych. Sformułowanie "Asimov fit" jest tu użyte trochę na wyrost, fit do tego samego MC to raczej "closure test" (test domknięcia?), sprawdzenie czy w algorytmie nie ma grubych błędów, oczywiście bardzo potrzebne. "Asimov data" to raczej dane, do których asymptotycznie zmierzałyby Toy-MC, czyli próbka o parametrach zgodnych z nominalnym MC ale statystycznie niezależna. W każdym razie test wykazuje stabilność procedury statystycznej, a dodatkowo daje nominalne przewidywania dla wartości przekroju czynnego dla generatora NEUT. Kolejny test przedstawia fit do pseudo-danych, gdzie przekrój czynny dla sygnału został zwiększony o 20%. Fit i wyliczenie przekroju czynnego odzwierciedla ten fakt. Ponadto wykonano sprawdzenie działania procedury fitującej na próbkach, do których "dodano" fluktuacje (i tu też wyniki były takie "jak trzeba") oraz do próbki symulowanych danych pochodzących z generatora GENIE. Okazuje się, że uzyskane w ten sposób wyniki są zgodne z przewidywaniami modelu użytego w generatorze GENIE (które generalnie nie zgadzają się z tymi z generatora NEUT, przynajmniej w rozważanych wersjach GENIE przewiduje więcej sygnału o ok. 50%). To bardzo dobrze świadczy o uniwersalności procedury fitującej i niewielkiej, jeśli w ogóle, zależności całej analizy od modelu fenomenologicznego. Drobne uwagi to brak opisu osi "z" (kolorowej) na rysunkach 5.1-5.5 i brak opisu osi pionowej rysunku 5.7.

**Rozdział 6** zawiera opis wyników uzyskanych we wspomniany wcześniej sposób na danych rzeczywistych. Podane są podwójne różniczkowe przekroje czynne w pędzie i cosinusie kąta emisji mionu, jednowymiarowe projekcje i wartość całkowita oraz porównanie z przewidywaniami modeli teoretycznych zawartych w generatorach NEUT (5.4.0) i GENIE (2.8.0). Uzyskano dobrą zgodność z tymi pierwszymi, te drugie zaś najczęściej przeszacowują uzyskane wartości. Wcześniej opisane jest zachowanie parametrów tzw. "nuisance parameters" (parametry niewygody?) oraz fitowanych wartości parametrów, używanych potem do wyznaczenia przekroju czynnego, przed i po ficie. W pięciu binach wartości tych ostatnich wychodzą ujemne, co jest oczywiście niefizyczne (przekrój czynny musi być nieujemny), ale może się zdarzyć ze względu na fluktuacje statystyczne

i niepewności pomiarowe (i, powiedziałbym, zdarza się w praktyce dość często). W każdym razie wartości te są, w granicach niepewności, zgodne z wartościami nieujemnymi. Uzyskane wyniki przekroju czynnego, różniczkowego i scałkowanego są w zasadzie niezależne od modelu teoretycznego. Symulacje Monte Carlo zostały wykorzystane do optymalizacji procedury wyboru przypadków oraz jako podstawa oszacowania niepewności systematycznych, których końcowe wartości pochodzą z fitu. Uwagi do tego rozdziału znajdują się poniżej.

W tabeli 6.1 brakuje wartości niepewności dla podanych wartości (choćby statystycznych), choć ich dyskusja jest w tekście głównym. Czy na rysunkach 6.1 - 6.4 niepewności dla Monte Carlo są zanedbywalnie małe? Przydałyby się tu (np. na dodatkowych panelach pod każdym rysunkiem) rysunki ilorazów dane/MC. Na rysunkach 6.5 - 6.8 brakuje opisu pionowej osi.

Pytanie do prezentacji końcowych wyników mam następujące: dlaczego wybrano przewidywania modelowe z takich a nie innych generatorów? Na przykład w pomiarach (ref. 85) w ArgoNeuT zgodny z danymi jest tylko GiBUU 2016, a inne, w tym NEUT, kiepsko opisują dane. Oczywiście tam są inne, wyższe energie neutrin i inna tarcza. Z kolei w pomiarach eksperymentu MINERvA (przy energiach "sąsiednich" do T2K i na podobnej tarczy) najlepiej "pasują" przewidywania NuWro (ref. 84). W każdym razie wyników dla anti-nuCClpi jest bardzo mało, a w tym zakresie energii właściwie nie ma (są, owszem, w kanale CCQE), co dowodzi, że praca ma naprawdę charakter pionierski.

Pracę kończy **podsumowanie**, streszczające pokrótce treść pracy i zawierające perspektywy poprawy opisywanego pomiaru po upgrade eksperymentu T2K, w szczególności detektora ND280. Zwiększenie statystyki oczywiście poprawi dokładność tego pomiaru, zwłaszcza różniczkowego, bo wynik scałkowany jest zdominowany przez niepewności systematyczne. Będzie też dostępny szerszy zakres przestrzeni fazowej.

**Dodatki** zawierają, odpowiednio, szczegółowe studia na wydajnością cięcia na "Z range", dodatkowe badania zachowania algorytmu fitującego, wreszcie opis składu pierwiastkowego scyntylatorów subdetektora FGD1.

Jest to rozprawa z gatunku twardych eksperymentalnych prac, widać w niej ogromną ilość pracy włożonej przez Autora na każdym etapie realizacji opisywanego pomiaru. Widać, że Doktorant świetnie posługuje się dostępnymi narzędziami do analizy, zna i rozumie analizę statystyczną, a także bardzo dobrze rozumie, jak działa detektor.

Praca jest długa (ponad 200 stron), ale zawiera wszystkie potrzebne informacje do zrozumienia, o co w niej chodzi (momentami przedstawione są one w sposób niemal pedagogiczny, np. sekcja 5.2), co bardzo pomogło recenzentowi, ale myślę że może też być przydatne dla młodszych studentów, którzy chcieliby nauczyć się prowadzenia tego typu prac. Recenzent przyznaje, że sam kiedyś sporo się na temat analiz z neutrinami (astrofizycznymi) nauczył, czytając doktoraty z bardzo dobrych jednostek naukowych na świecie, a recenzowana praca zdecydowanie co najmniej

dorównuje im poziomem i przystępnością opisu. Język pracy jest prosty ale poprawny. Zdarzają się literówki, drobne błędy językowe czy interpunkcyjne. Trochę dużo jest tzw. forward references - odnośników do rozdziałów późniejszych. Mnie osobiście to nie przeszkadza, ale bywa krytykowane. Kwestie redakcyjne są zresztą trochę kwestią gustu, a poza tym pewnie można by redagować tak obszerny tekst w nieskończoność, a kiedyś trzeba się obronić.

Nie ulega wątpliwości, że uzyskany wynik stanowi znaczący wkład w rozwój fizyki - pomiar nie był robiony wcześniej w takim zakresie energii antyneutrin, a jest istotny dla innych pomiarów "z pierwszej linii frontu", czyli oscylacyjnych - dlatego, że w przypadku "zgubienia" pionu, badany proces stanowi tło dla CCQE w eksperymentach z długą bazą. Przekrój czynny jest mierzony w ograniczonej przestrzeni fazowej, co ma związek z akceptancją detektora i wydajnością selekcji (dobrze umotywowane w sekcji 3.4). Jest to częsta praktyka, a ewentualna ekstrapolacja do pełnej przestrzeni fazowej wprowadziłaby silną zależność od używanego modelu Monte Carlo. Pomiar różniczkowego przekroju czynnego względem kinematyki mionu separuje od niepewności zw. z modelowaniem oddziaływań z nukleonami (i jądrem jako całością) a dodatkowo zmienne te są bezpośrednio i "czysto" mierzone w detektorze. Wyniki pracy przedstawione są w nocie wewnętrznej współpracy T2K, a w przygotowaniu jest publikacja. Szkoda, że jeszcze się nie ukazała, jednak biorąc pod uwagę ograniczony czas studiów doktoranckich oraz ilość pracy włożonej w analizę i przygotowanie rozprawy, trudno się spodziewać, że można by jeszcze zdążyć z czasochłonnym procesem akceptacji wyników przez współpracę.

Większość przedstawionych przeze mnie uwag krytycznych (literówki, braki w opisach osi) można uznać za czepialstwo i próbę wykazania, że recenzent pracę faktycznie czytał. A że czytał z przyjemnością, zatem stwierdza, że przedstawione uwagi krytyczne nie umniejszają w najmniejszym stopniu wielkiej wartości merytorycznej prezentowanej rozprawy, która zdecydowanie spełnia wszelkie, zwyczajowe i ustawowe, wymagania, stawiane pracom doktorskim i wnoszą o dopuszczenie pana mgr. Grzegorza Żarneckiego do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.