

Wrocław, 9 czerwca 2016 r.

Prof. dr hab. Jan Sobczyk
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Wrocławski

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Marceli Batkiewicz pt. *Production of $\text{Pi}0$ mesons in numu CC interactions in the tracker part of the near detector of the T2K experiment.*

Napisana pod kierunkiem prof. dr hab. Agnieszki Zalewskiej, w języku angielskim, rozprawa doktorska M. Batkiewicz liczy sobie 146 stron i składa się z sześciu rozdziałów. Pierwsze trzy mają charakter ogólnego wstępu. Rozdział I zawiera podstawowe informacje o oscylacjach neutrin oraz o oddziaływaniach neutrin, wprowadzając język używany w kolejnych częściach pracy. Rozdział II to opis eksperymentu T2K, i w szczególności bliskiego detektora ND280, z którego dane są następnie analizowane. W rozdziale III znaleźć można informacje o programach komputerowych wykorzystywanych w symulacjach i w analizie danych. Najważniejszą częścią doktoratu są rozdziały IV-VI. Rozdział IV zawiera opis przeprowadzanej analizy, czyli selekcji przypadków z jednym mionem i dwoma zrekonstruowanymi fotonami. Tekst ilustrowany jest wieloma rysunkami. Krótki rozdział V to wyliczenie przekroju czynnego, z kolei rozdział VI poświęcony jest analizie niepewności otrzymanego wyniku. Konkluzją i głównym wynikiem rozprawy jest uzyskanie wielkości przekroju czynnego na inkluzywną produkcję $\text{Pi}0$ na tarczy CH, uśredniony po wiązce neutrin mionowych T2K (średnia energia to ok. 650 MeV). Sygnał jest zdefiniowany jako co najmniej jeden neutralny pion w stanie końcowym.

Pracę M. Batkiewicz umieścić należy w szerokim nurcie badań mających na celu lepsze zrozumienie neutrinowych przekrojów czynnych. Motywacja dla tych badań pochodzi od doświadczeń oscylacyjnych. Przekroje czynne są jednym z najważniejszych źródeł niepewności systematycznej. Ograniczenie tych niepewności jest kluczowe dla powodzenia kolejnych planowanych doświadczeń z „długą bazą”: DUNE w USA oraz Hyper-Kamiokande w Japonii. Produkcja pionów jest ważna z wielu względów. Produkcja $\text{Pi}0$ w reakcji przez prąd neutralny to tło w pomiarze sygnału oscylacyjnego $\text{numu} \rightarrow \text{nue}$. Produkcja pionów w reakcji przez prąd naładowany to z kolei tło dla pomiaru sygnału oscylacyjnego $\text{numu} \rightarrow \text{numu}$, ponieważ wiele pionów ulega absorpcji w jądrze czyniąc takie zdarzenia praktycznie nierozróżnialne w detektorze Super-Kamiokande względem tych dominujących kwazielastycznych ($\text{numu} + \text{neutron} \rightarrow \text{mion} + \text{proton}$). Wszystkie to procesy, włączając w to dyskutowaną w rozprawie produkcję $\text{Pi}0$ są ze sobą blisko związane będąc modelowanymi przy pomocy identycznych modeli teoretycznych. Pomiar z recenzowanego doktoratu nie jest łatwy do interpretacji. Sygnał pochodzi od zdarzeń ze wzbudzeniem rezonansów, ale także od zdarzeń głęboko nieelastycznych, i jest mocno „uksztakowany” przez efekty jądrowe. Jednak z fizyce neutrin jest to sytuacja normalna. Można tylko mieć nadzieję, że suma informacji z wielu takich niejednoznacznych pomiarów pozwoli na wyekstrahowanie interesujących fizycznych wielkości.

Pomiar produkcji $\text{Pi}0$ polega na analizie przypadków z dwoma fotonami w stanie końcowym. W ten sposób eliminuje się tło od zdarzeń z rejestracją tylko jednego fotonu, które nie muszą pochodzić z rozpadu $\text{Pi}0$. Pomiar ma charakter „zliczeniowy”. M. Batkiewicz nie analizuje kwestii, czy zaobserwowane fotony pochodzą od jednego, czy też od dwóch (czy nawet więcej) neutralnych pionów. Ściślej biorąc, kwestia ta jest krótko dyskutowana w rozdziale 4.5.4 i zilustrowana rysunkiem 4.30a. Rozkład masy niezmienniczej (W) dwóch kaskad w detektorze Ecal zdaje się sugerować na źródło w postaci $\text{Pi}0$ (wyraźne maksimum dla ok. 100-150 MeV), ale kształt rozkładu jest rozmyty, z grubym ogonem ciągnącym się do dużych wartości W .

W analizie przeprowadzonej przez M. Batkiewicz selekcjonuje się najpierw zdarzenia, które zaszły na FGD (fine grained detector) z ujemnie naładowanym mionem w stanie końcowym. Na tym etapie doktorantka korzystała z gotowych narzędzi do identyfikacji trajektorii mionu rozpoczynającej się w FGD. Jeśli w danym zdarzeniu powstał $\text{Pi}0$, sygnałem są dwa fotony z jego niemal natychmiastowego rozpadu. W oparciu o studia Monte Carlo jak wygląda typowy sygnał pochodzący od tych fotonów, M. Batkiewicz rozwija dwie strategie ich identyfikacji. W gęstym materiale, np. w kalorymtrze otaczającym FGD, foton zapoczątkowuje kaskadę elektromagnetyczną. Akceptowane są kaskady w pełni zawarte w Ecal, oraz tylko te z energią większą niż 50 MeV. W gazowym TPC (time projection chamber) znajdującym się bezpośrednio za FGD foton może zostać zaobserwowany w wyniku konwersji w parę elektron-pozyton. Elektrony/pozytony są następnie dość łatwo identyfikowane na podstawie szybkości strat energii na jonizację. W dyskutowanej analizie jeśli obserwuje się kaskadę w Ecal, wystarczy identyfikacja albo elektronu, albo pozytonu żeby uznać to za sygnał wskazujący na foton w stanie końcowym.

W obliczeniach przekroju czynnego sygnałem są zdarzenia z dwoma kandydatami na foton. Otrzymana wartość przekroju czynnego $1.239\text{E}-39\text{cm}^2/\text{nukleon}$ jest nieco (15%) większa od przewidywań oficjalnego generatora MC NEUT ($1.052\text{E}-39\text{cm}^2/\text{nukleon}$).

Cały rozdział VI jest poświęcony ocenie niepewności otrzymanego wyniku. M. Batkiewicz identyfikuje następujące źródła niepewności systematycznej: strumień neutrin, wiedza o innych przekrojach czynnych, wtórne oddziaływania hadronów w jądrze, zachowanie się detektora. Wszystkie te niepewności traktowane są przy pomocy różniących się strategii. W przypadku strumienia neutrin doktorantka wykorzystuje oficjalne dane T2K dotyczące niepewności strumienia wraz z macierzą kowariancji. Następnie, w standardowy sposób, w oparciu o rozkład Cholesky'ego macierzy kowariancji, dokonała ona 100000 losowych modyfikacji strumienia i korzystając z techniki przeważania zdarzeń otrzymała rozkład wyników na mierzony przekrój czynny. Jest on z niezłym przybliżeniem gaussowski (z niewielkim obciążeniem) i parametry tego rozkładu są użyte do oceny niepewności. W przypadku niepewności związanej z przekrojami czynnymi analizowana jest zmienność wartości zmierzonego przekroju czynnego od wybranych parametrów. Stosownie do granicznych wartości tych parametrów modyfikowane są przewidywania generatora MC co do wielkości tła i efektywności w identyfikacji sygnału. Podobnie bada się wpływ niepewności związanej z wtórnymi oddziaływaniami hadronów.

Ostatnich kilkanaście stron rozprawy poświęconych jest analizie niepewności detektorowych. Po pierwsze, uwzględnione są niepewności związane z identyfikacją mionu. W tej części doktorantka korzystała z rozwiniętych już narzędzi kolaboracji T2K. Do tych niepewności dodanych jest kilka kolejnych, nowych, związanych z identyfikacją fotonów. Jeśli chodzi o elektron/pozyton w TPC, chodzi o rozmiar FGD: w analizie żąda się by trajektorie tych cząstek zaczynały się w FGD. W przypadku Ecal zidentyfikowanych jest kilka niepewności. Najważniejsza z nich to efektywność rekonstrukcji kaskady. Do jej oceny używa się próbki kontrolnej trajektorii elektronów w zakresie energii 100-800 MeV. Jeśli chodzi o rekonstrukcję energii kaskady w Ecal to ponieważ pomiar ma charakter zliczeniowy, jedyna niepewność pochodzi z ograniczenia na minimalną energię (50 MeV). Niepewność nazwana Ecal PID polega na zdolności rozróżniania obiektów typu kaskada od tych typu trajektoria. Do jej oceny użyto tutaj próbek zdarzeń z mionami.

Przechodząc do oceny rozprawy doktorskiej, chciałbym przede wszystkim stwierdzić, że zawarta w niej analiza jest trudna. Podział pracy w obrębie dużej kolaboracji T2K sprawił, że komuś innemu musiało przypaść zadanie analizowanie podobnego przekroju czynnego dla zdarzeń w detektorze POD, który jest zoptymalizowany do rejestracji $\text{Pi}0$ (przede wszystkim w reakcji przez prąd neutralny, ale uwzględnienie mionu w stanie końcowym nie powinno być dużą komplikacją). Doktorantka bada oddziaływania w FGD i musi zbierać informację o fotonach z innych pod-detektorów ND280. Ta trudność powoduje, że ściśle rzecz biorąc pomiar dotyczy zdarzeń z dwoma

fotonami a nie $\text{Pi}0$. Związek między tymi pomiarami jest zupełnie oczywisty na poziomie symulacji Monte Carlo, ale bezpośredniej, doświadczalnej identyfikacji $\text{Pi}0$ nie przeprowadzono, bo wymagałoby to kolejnych niełatwych studiów.

W tak skomplikowanej analizie w fizyce wysokich energii kluczowe znaczenie ma realistyczna ocena niepewności systematycznej. Doktorantka wykazała się dużą biegłością w identyfikacji i ocenie tych niepewności. Być może tylko w kilku punktach można by te oceny nieco ulepszyć. Niepewności związane ze strumieniem i przekrojami czynnymi są traktowane osobno, jako nieskorelowane. Tymczasem T2K na potrzeby analizy oscylacyjnej znajduje najlepsze dopasowanie jednocześnie do strumienia i przekrojów czynnych, z istotną korelacją między nimi. Można by spróbować wykorzystać te wyniki i nieco zredukować wyliczone niepewności. Przy przyjętej strategii badania wpływu niepewności parametrów przekrojów czynnych na ostateczny wynik, to raczej oczywiste jest że kilka z nich – te specyficzne dla efektów jądrowych na tlenie, a nie na węglu, są całkowicie nieistotne i można je pominąć (Tabela 6.2, wiersze 3, 5, 7). Poza tym, lepiej byłoby badać ich wpływ przeprowadzając taką samą analizę, jak dla strumienia tzn przeprowadzając pewną liczbę próbných losowań według ustalonego rozkładu, tak jak się to robi w analizie oscylacyjnej.

W podobnie trudnych analizach, pewien niepokój budzi konieczność nieustannego odwoływania się do przewidywań symulacji Monte Carlo. Jest oczywiste, że nie jest zadaniem doktorantki weryfikacja oficjalnego MC T2K, jakim jest NEUT. Czytając rozprawę doktorską trudno nie zadać sobie pytania: jak dobrze się on sprawdza na dostępnych danych doświadczalnych na produkcję $\text{Pi}0$ z eksperymentów BEBC czy też SKAT (dane te są w postaci krotności liczby $\text{Pi}0$ w funkcji hadronowej masy niezmienniczej). Innym pytaniem dotyczącym NEUT, już bliżej związanym z przeprowadzaną analizą, są przewidywania dotyczące produkcji mezonów eta. Jest to o tyle istotne, że mezony eta często (prawdopodobieństwo ok. 40%) rozpadają się na dwa fotony dając w zliczeniowym pomiarze identyczny sygnał co $\text{Pi}0$. Skoro dla identyfikowanych fotonów nie rekonstruuje się masy niezmienniczej cząstki matki, dobrze byłoby wiedzieć jak duże jest zanieczyszczenie pochodzące od tych cząstek. Inne pytanie jakie nasuwa się w związku z definicją sygnału jest takie: jak często zdarzenia z produkcją pojedynczego fotonu dają elektron i pozyton rejestrowane w TPC, i identyfikowane jako sygnał w przeprowadzanej analizie.

Ostatnia moja uwaga dotyczy tabeli 4.4. i rysunku 4.14. W pewnej ilości zdarzeń fotony mogą być rekonstruowane na podstawie większej liczby „obiektów” z różnych detektorów. Wydaje się, że uwzględnienie tej informacji mogłoby zredukować niepewności detektorowe. A już na pewno może to być pomocne przy próbach rekonstrukcji $\text{Pi}0$, a nie tylko pojedynczych fotonów.

Moja ocena dyskutowanej rozprawy doktorskiej jest bardzo wysoka. Rozprawa jest bardzo dobrze napisana, na pochwałę zasługuje również jakość języka angielskiego. Doktorantka ujawnia sprawny warsztat eksperymentatora, kompetentnie poruszając się na wszystkich etapach skomplikowanej analizy danych. Uzyskany wynik jest ważny i interesujący, mogący przyczynić się do ulepszenia generatorów Monte Carlo oddziaływań neutrin. Rozprawa doktorska spełnia wszystkie formalne wymagania i wnoszę o dopuszczenie mgr M. Batkiewicz do publicznej obrony.