



dr hab. Anna Kaczmarska  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
Kraków  
Zakład Eksperymentu ATLAS

Kraków, 26.08.2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
magistra Yashwanth Sanjeev Prabhu zatytułowanej  
„Expanded  $\nu_e CC1\pi^+$  sample selection and improved systematic treatments  
for neutrino oscillation parameter determination with T2K data”  
wykonanej pod kierunkiem promotora Pani dr hab. Justyny Łagody  
oraz promotora pomocniczego Pana dr. Kamila Skwarczyńskiego**

Głównym tematem rozprawy jest przygotowanie i użycie do analizy oscylacyjnej nowej próbki neutrin elektronowych zawierającej przypadki oddziaływań przez prądy naładowane z produkcją pojedynczego naładowanego pionu ( $\nu_e CC1\pi^+$ ) w dalekim detektorze Super-Kamiokande (SK) eksperymentu T2K. Jest to eksperyment badający oscylację neutrin, zlokalizowany w Japonii. Wykorzystuje on wiązkę neutrin (antyneutrin) mionowych produkowanych w ośrodku akceleratorowym J-PARC, Tokai, która po 280 m, przechodzi przez kompleks bliskich detektorów: INGRID na osi wiązki i odchylony o  $2.5^\circ$  od osi wiązki detektor ND280. Są one wykorzystywane, przed zajściem zjawiska oscylacji, do badania kierunku, kompozycji i energii wiązki. Po przebyciu dalszych 295 km pod ziemią, wiązka neutrin przechodzi przez daleki detektor SK, umiejscowiony w Alpach Japońskich. Bada się tam jaka część (anty)neutrin z wiązki pozostała (anty)neutrinami mionowymi, a jaka przeoscyłowała w (anty)neutrina elektronowe. Oba detektory, bliski i daleki, pozwalają na precyzyjne pomiary oscylacji neutrin, czego przykładem jest pierwsza na świecie, bezpośrednia obserwacja pojawienia się neutrin elektronowych w wiązce neutrin mionowych w roku 2011.

Najciekawszym celem a zarazem największym wyzwaniem dla eksperymentu T2K jest pomiar fazy  $\delta CP$ , parametru, który opisuje łamanie symetrii między materią a antimaterią w sektorze neutrin. Dotychczas łamanie symetrii CP obserwowano jedynie w sektorze kwarkowym, ale wielkość tego efektu jest zbyt mała, by móc wyjaśnić obserwowaną przewagę ilości materii nad antimaterią we Wszechświecie. W 2020 roku eksperyment T2K wykluczył prawie połowę przewidywanego zakresu wartości tego parametru, wskazując, że łamanie symetrii CP dla neutrin może być bardzo duże. Przedstawiona rozprawa ulepsza i rozwija obecnie prowadzone badania oscylacji i pomiaru parametru  $\delta CP$  w eksperymencie T2K. Należy zatem podkreślić, że prace przedstawione w przedłożonej rozprawie dotyczą próby wyjaśnienia jednego z kluczowych problemów współczesnej fizyki.

Rozprawa, napisana w języku angielskim, zawiera osiem rozdziałów, dwa dodatki oraz bibliografię liczącą 99 pozycji.

Rozdział pierwszy stanowi teoretyczne wprowadzenie do tematu rozprawy. Autor opisuje zjawisko oscylacji neutrin oraz obecny status pomiarów parametrów związanych z tym zjawiskiem. Następnie omówione zostało łamanie CP w sektorze neutrin oraz oddziaływania neutrin z materią. Szczegółowo została opisana pojedyncza produkcja pionów, ponieważ właśnie te procesy są selekcyjonowane w nowej próbce.



Uwagi:

Według mnie, rozdział pierwszy jest dobrym i kompletnym wprowadzeniem do dalszej tematyki rozprawy. Jeżeli chodzi o efekt MSW, to jako niespecjalista zastanawiałam się, czy ma on jakieś znaczenie dla pomiaru parametrów oscylacji w T2K (dla dalekiego detektora).

Rozdział drugi zawiera opis eksperymentu T2K oraz jego detektorów. Szczegółowo omówiono budowę i działanie dalekiego detektora SK oraz sposób rekonstrukcji przypadków przez niego zbieranych. Ponadto zostały przedstawione rodzaje próbek selekcjonowanych z danych SK. W końcowym podrozdziale Autor opisał status ostatnich analiz oscylacyjnych, niestety jedynie z odnośnikami do pracy doktorskiej, materiałów konferencyjnych i not technicznych (nieдоступnych dla czytelnika spoza współpracy). Rozumiem, że analizy te nie są jeszcze opublikowane.

Uwagi:

Rozdział ten mogłyby zdecydowanie ulepszyć dokładniejsze opisy niektórych zagadnień. Rekonstrukcja przypadków jest opisana moim zdaniem zbyt zdawkowo. Autor stwierdza, że poziom jej komplikacji jest zbyt wysoki, by ją w rozprawie omawiać i odsyła czytelnika do dwóch referencji, w tym innej rozprawy doktorskiej. Ze względu na to, że rekonstrukcja przypadków wiąże się ściśle z selekcją przypadków będącą tematyką pracy, dokładniejszy jej opis bardzo pomógłby czytelnikowi w zrozumieniu zagadnienia. W szczególności nie było dla mnie jasne jak tworzony jest „PID discriminator” (Fig. 2.9) i jakie są „trigger requirements”. Bardzo brakowało mi opisu na czym konkretnie polega „decay electron tagging”, przecież kluczowy dla selekcjonowanej próbki danych. Nie jest dla mnie także jasne co to jest „slow extraction” i „fast extraction mode”.

W Tabeli 2.1 nie wymieniono hadronowych rozpadów  $K^+$ , ale one chyba także kontrybuują do wiązki? W szczególności rozpad  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$  (BR  $\sim 5.6\%$ ) będzie dawał tło od rozpadów  $\pi^-$ ? Rozumiem, że jest to uwzględniane?

Rozdział trzeci zawiera opis prac wykonanych przez Autora w celu selekcji nowej próbki  $\nu_e CC1\pi^+$ , opartej na znalezieniu pierścieni czerenkowskich pochodzących od elektronu i naładowanego pionu oraz sygnaturę elektronów z opóźnionego rozpadu. W pierwszej kolejności Autor przedstawia optymalizację cięć mającą na celu odrzucenie procesów tła w wyselekcjonowanej próbce. Następnie omawia efektywności selekcji próbki, dyskutując napotkane problemy, takie jak spadek efektywności dla wysokich pędów  $e^+$ ,  $\pi^+$  i W (który wydaje się występować także dla standardowej próbki z jednym pierścieniem jak widać na Fig. 3.17). Następnie Autor opisuje połączenie nowej i standardowej próbki, prowadzące do powstania rozszerzonej próbki  $\nu_e CC1\pi^+$  użytej później w analizie. Połączenie próbek zwiększa statystykę próbki standardowej oraz znosi ostrą zależność progową na pęd  $\pi^+$ , trudną do opisanego przez MC (problem standardowej próbki używanej dotąd w analizie). Następnie Autor omawia optymalizację binowania próbek używanych w analizie oscylacyjnej. Optymalizacja ta, pierwsza tego typu w eksperymencie, przeprowadzona została na podstawie rozdzielczości zmiennych kinematycznych używanych do binowania.

Uwagi:

Czy w optymalizacji cięć na LLH( $e\pi/\pi\pi$ ) i LLH( $e\pi \pi^0$ ) (Rozdz.3.2) wykorzystywano próbki MC? Jeśli tak, to jest to opisane dopiero w następnym podrozdziale 3.3. W ogólności brakuje opisu próbek MC. Jak symulowany jest detektor (zdawkowy opis znalazłam w Rozdz. 5.4)? Czy robi to NEUT czy używany jest Geant? Jakie procesy i z jakimi przekrojami czynnymi zostały użyte? Jaka jest statystyka wygenerowanych próbek?

W Tab. 3.1 zoptymalizowane cięcie c1 to -300.0, ale na rysunku 3.10 to 0.0.



Jak obliczona jest efektywność sygnału po cięciach podana pod koniec Rozdz. 3.4? Z drugiej kolumny Tab. 3.6 to raczej 13%?

W rozdziale czwartym Autor przedstawił wyczerpujący opis bayesowskich łańcuchów Markowa (MCMC) użytych w wykonanej przez niego analizie statystycznej. Z ich pomocą przeprowadzone jest symultaniczne dopasowanie do danych z bliskiego i dalekiego detektora. Przedstawione zostały także wykonane testy z toy/Asimov MC sprawdzające np. jak dopasowanie tylko do danych detektora bliskiego redukuje niepewności systematyczne dla detektora dalekiego i jak dodanie nowej próbki, zmienia dopasowane parametry oscylacyjne.

Uwagi: Jaki jest powód asymetrii w rozkładach prawdopodobieństwa po dopasowaniu dla parametru  $\sin^2\theta_{23}$  (Fig. 4.7)?

Rozdział piąty zawiera szczegółową dyskusję źródeł niepewności statystycznych w analizie oscylacyjnej. Autor przedstawił główne grupy rozważanych niepewności, powiązanych z modelowaniem wiązki (flux), przekrojów czynnych na oddziaływania neutrin oraz modelowaniem detektorów ND280 i SK. W szczególności, opis niepewności systematycznych związanych z detektorem SK został szczegółowo omówiony w kontekście wkładu Autora w oszacowanie systematyki. Ze względu na włączenie do analizy nowej próbki, macierz niepewności detektora SK została zaktualizowana oraz dodano korelacje między próbkami pojedynczymi i wielopierścieniowymi. Spowodowało to ogólną redukcję niepewności systematycznych parametrów detektora SK. Moim zdaniem, na dodatkową uwagę zasługują przedstawione badania wpływu niepewności w parametrach odbicia fotopowielacza SK (PMT Reflectivity) na rekonstrukcję przypadków  $\nu_e CC1\pi^+$ . Dowodzą one eksperckiej znajomości detektora.

Uwagi:

Fig. 5.2 – coś złego stało się z opisem osi Y. Jakkolwiek rysunek ten nie jest może kluczowy dla rozprawy, to czytelnikowi byłoby łatwiej dostrzec różnice na wykresie typu „ratio” (jak na Fig.5.3). Jest to ogólna uwaga, dotycząca w szczególności rysunków, gdzie różnice pomiędzy przedstawionymi rozkładami nie są duże np. Fig. 4.3.

W Rozdz. 5.4.1 Autor podaje oszacowane niepewności na efektywność oznaczania elektronów, „decay electron tagging”, oraz na „fake rate”, ale nie podaje jakie są wartości tych efektywności.

Rozdział szósty zawiera wyniki analizy oscylacyjnej przeprowadzonej przez Autora przy pomocy dopasowania łańcuchami Markowa, z wykorzystaniem opisanych wcześniej ulepszeń: nowej próbki, nowego schematu binowania próbek w analizie statystycznej, oraz z ulepszoną systematyką detektora SK. Otrzymane wyniki wskazują, że wartości parametru  $\delta CP$  zachowujące CP są wykluczone w przedziale wiarygodności 90%, a preferowana jest wartość  $\delta CP$  jest bliska maksymalnemu łamaniu CP. Ponadto dane wykazują niewielką preferencję dla normalnej hierarchii mas neutrin i górnego oktantu kąta mieszania  $\theta_{23}$ . Otrzymane wyniki są spójne z wcześniejszymi wynikami otrzymanymi przez Współpracę T2K.

Uwagi: Rozdz. 6.1 - przy tak małej statystyce trudno cokolwiek powiedzieć, ale wygląda jakby MC nie doszacowało danych.

Fig. 6.4 trzeci bin to chyba  $\sin^2\theta_{13}$ ?

W Rozdz. 6.5 Autor porównuje otrzymane wyniki do najnowszych wyników Współpracy. Jako odnośnik do tych ostatnich podana jest tylko prezentacja z konferencji. Niestety, na tej podstawie trudno jest ocenić różnice pomiędzy tymi dwoma analizami. Na slajdzie 17 prezentacji mowa jest o wielopierścieniowej próbce  $\nu_e CC1\pi^+$  i znacząco zredukowanych niepewnościach systematycznych ze



względu na nową macierz kowariancji detektora SK. Czy zatem jedyna różnica pomiędzy tymi analizami to binowanie próbki FD?

W krótkim Rozdziale 7, Autor opisuje problem rozbieżności danych-MC zaobserwowany zarówno w próbkach pojedynczego pierścienia  $\nu_e CC1\pi^+$  wiązki T2K jak i atmosferycznych. Autor przeprowadził badanie w celu oceny wpływu niepewności w parametrach odbicia PMT SK na rekonstrukcję zdarzeń  $\nu_e CC1\pi$ . Badanie to wykluczyło odblaskowość PMT jako źródło rozbieżności. Ponadto Autor przeprowadził test czułości analizy dla zwiększonych statystyk próbki  $\nu_e CC1\pi^+$ . Rozdział 8 podsumowuje uzyskane wyniki oraz prezentuje i omawia perspektywy pomiarów oscylacji neutrin w przyszłości.

Rozprawa napisana jest w sposób jasny i zrozumiały dla czytelnika. Podoba mi się zamieszczenie słowniczka oraz cytaty otwierające każdy rozdział, co świadczy o starannej edycji. Słabym punktem są, moim zdaniem, niewystarczające opisy rekonstrukcji przypadków w zakresie istotnym dla przedstawionej analizy. Jeśli chodzi o stronę edycyjną to znalazłam jedynie kilka literówek. Dodatkowo kilka rysunków nie ma podanego źródła i w Eq. 1.10, 1.11 brakuje jednego nawiasu. Czasem ważna informacja podana jest w podpisie rysunku, a nie w głównym tekście (np. definicja błędu Fig.3).

Rozprawa Pana mgr. Yashwanth Sanjeev Prabhu przedstawia porządną pracę doświadczalną. Opisane metody i wyniki nie budzą moich wątpliwości. Wkład samodzielnej pracy Autora jest bardzo jasno określony. Metodologia opisanej analizy jest poprawna i typowa dla współczesnych eksperymentów z tej dziedziny. Autor udowodnił, że dysponuje wszechstronnym warsztatem doświadczalnym. Moje zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi nie umniejszają wysokiej oceny ogólnej rozprawy i otrzymanych wyników. Jest dla mnie także jasnym, że Autor wykonał dużo technicznej i użytecznej pracy dla eksperymentu. Wniósł znaczący wkład w rozwój oprogramowania. Taka praca w dużych eksperymentach jest zazwyczaj mało spektakularna i trudna, ale niezbędna dla prowadzonych przez współpracę analiz. Dowodzi też eksperckiej znajomości detektora i jego oprogramowania.

W podsumowaniu, należy podkreślić, że tematyka podjęta w rozprawie Pana mgr. Yashwanth Sanjeev Prabhu jest ważna i aktualna dla współczesnej fizyki, a uzyskane rezultaty stanowią wkład do oszacowania parametru  $\delta CP$ , opisującego łamanie symetrii między materią a antymaterią w oscylacjach neutrin. Zaproponowane przez Autora rozwiązanie pozwala na zwiększenie statystyki próbki danych oraz redukcję niepewności systematycznych. Otrzymane wyniki zostaną zawarte w tegorocznej oficjalnej analizie oscylacyjnej eksperymentu T2K.

Podsumowując, uważam, że przedstawiona mi do recenzji **rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Yashwanth Sanjeev Prabhu do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.**

Anna Kaczmarek  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
Radzikowskiego 152, Kraków  
Tel: +48 12 662 8022  
Email: Anna.Kaczmarek@ifj.edu.pl