

Prof. dr hab. Krzysztof Doroba
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
02-093 Warszawa
ul. Pasteura 5
Krzysztof.Doroba@fuw.edu.pl

Sierpień 2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Yashwanth Sanjeev Prabhu:
"Expanded $\nu_e CC1\pi^+$ sample selection and improved systematic treatments for
neutrino oscillation parameter determination with T2K data**

Jednym z ważniejszych obecnie zagadnień fizyki cząstek jest problem łamania symetrii kombinowanej CP. Ten związany z mikroświatem problem znajduje swoje odbicie w braku symetrii pomiędzy materią i antymaterią we Wszechświecie. Stanowi jeden z wymagających dalszego wyjaśnienia zagadnień Wielkiego Wybuchu, zaś badanie fizyki neutrin (w szczególności ich oscylacji) jest jedną z dróg do tego celu. Szereg eksperymentów neutrinowych wniosło ogromny wkład w zrozumienie oscylacji neutrin atmosferycznych, reaktorowych, słonecznych czy akceleratorowych. W badaniu tych ostatnich jedną z wiodących ról odgrywa od lat Tokai to Kamioka Experiment (T2K), rozbudowywany obecnie do nowocześniejszej wersji z detektorem dalekim Hyper-Kamiokande. Głównym wynikiem T2K jest precyzyjne wyznaczenie parametrów oscylacji neutrin: kątów mieszania (w szczególności $\sin^2\theta_{23}$), analiza hierarchii mas i wyznaczenie wartości odpowiedzialnego za łamanie CP parametru δ_{CP} . Właśnie tym zagadnieniom poświęcona jest recenzowana rozprawa doktorska Yashwanth Sanjeev Prabhu.

Rozprawa doktorska mgr. Yashwanth Sanjeev Prabhu liczy 158 stron i składa się z 8 Rozdziałów i dwóch Dodatków. Napisana jest w języku angielskim jasno i przejrzysto. Pracę rozpoczyna obszerne Streszczenie, napisane zarówno w języku angielskim jak i polskim.

Wstęp do rozprawy zawiera bardzo istotną informację określającą szczegółowo pola działania autora rozprawy w eksperymencie T2K. Oczywiście wyniki wykonanych pomiarów są dziełem całej współpracy T2K, lecz z zamieszczonych wyjaśnień autora jak treści samej rozprawy widać, że wkład mgr. Yashwanth Sanjeev Prabhu w przedstawianą analizę był decydujący. Autor wyodrębnił z ogółu danych dalekiego detektora eksperymentu SK (Super-Kamiokande) dwupierścieniową próbkę związaną z produkcją mezonu π , która stanowi oś przewodnią rozprawy. Wprowadził związane z tą próbką zmiany w analizie oscylacji. Uaktualnił i przeliczył systematyczne błędy związane z analizą. Przeprowadził pełną analizę oscylacji obejmującą zarówno uprzednio zgromadzone dane jak i nowo wyodrębnioną próbkę. Otrzymane wyniki są oficjalnymi wynikami współpracy T2K za rok 2024. Zatem zdaniem recenzenta, wkład mgr.

Yashwanth Sanjeev Prabhu w analizę w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim.

Rozdział 1 stanowi w pełni adekwatny do potrzeb rozprawy przegląd fizyki neutrin. Autor krótko przedstawia macierz Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS), parametry oscylacji, problem hierarchii mas, niezmiennik wprowadzony przez Cecilie Jarlskog do neutrinowej fizyki CP i oczywiście oscylacyjne formuły na znikanie i pojawianie się neutrin mionowych i elektronowych. Przy okazji podkreśla fakt, że łamanie CP ujawnia się tylko w eksperymentach typu „appearance”. W dalszej części rozdziału autor krótko opisuje różne typy oddziaływań neutrin mających znaczenie dla prowadzonej analizy. CCQE (Charged Current Quasi Elastic), produkcja pojedynczego pionu ($CC1\pi^+$) oraz wielu pionów, oddziaływania koherentne i DIS.

Rozdział 2 zawiera opis eksperymentu T2K. Autor przedstawia uzasadnienie użycia wiązki neutrin mionowych typu offset (2°) wytworzonej w Tokai (Japan Proton Accelerator Research Complex). Opisuje obydwie detektory bliskie (INGRID i N280). Głównym celem N280 jest określenie strumienia neutrin (antyneutrin) skierowanych do detektora dalekiego Super-Kamiokande. Detektor SK jest wodnym detektorem Czerenkowa zawierającym 50 kiloton wody i wyposażonym w około 13 tysięcy fotopowielaczy. Na podstawie charakteru zarejestrowanego pierścienia promieniowania Czerenkowa pozwalają one odróżnić promieniowanie pochodzące od mionów i elektronów, zaś ich czasowa zdolność rozdzielcza pozwala określić kierunek cząstki naładowanej. Dane zebrane w SK dzielone są na próbki, z których wyodrębnia się typy oddziaływań; „złotym” kanałem jest próbka $\nu CCQE$. Wraz z innymi oddziaływaniami (między innymi produkcją jednego mezonu π^+ , którego prędkość nie przekracza progu czerenkowskiego) były one (2023) podstawą badania oscylacji w ramach wniosku częstotściowego (frequentist approach). Autor wykorzystuje w swojej rozprawie po raz pierwszy do badania oscylacji w danych T2K podejście Bayesowskie (Bayesian approach) i łańcuchy Markowa (Markov Chain Monte Carlo).

Rozdział 3 zawiera opis dokonanej przez autora konstrukcji próbki $\nu_e CC1\pi^+$, którą stanowią oddziaływania neutrin elektronowych (appearance) gdzie obserwujemy pierścienie czerenkowskie od elektronu, mezonu π^+ oraz opóźniony pierścień elektronowy z kaskadowego rozpadu tegoż mezonu. Autor używa szeregu cięć w celu wydzielenia próbki spośród zdarzeń o identycznej topologii. Są to cięcia na stosunku funkcji log-likelihood (LLH) dla różnych procesów, widzialnej energii, położenia wierzchołka czy liczby zrekonstruowanych pierścieni. Ich działanie demonstruje wykorzystując stosowane dla Super-Kamiokande Monte Carlo. Zajmuje się efektywnością zastosowanych cięć oraz doбором odpowiedniego rozmiaru przedziałów energii w przyszłej analizie oscylacyjnej. Kwestie efektywności cięć są jednym z powodów połączenia utworzonej próbki z $\nu_e CC1\pi^+$, w których mezon π^+ jest poniżej progu czerenkowskiego. Główną zaletą takiego połączenia jest zmniejszenie zależności od szczegółów modeli produkcji π^+ w oddziaływaniu z jądrem.

Rozdział 4 poświęcony jest analizie oscylacyjnej. Autor przypomina, że jego podejście ma charakter Bayesowski, zaś dopasowanie odpowiednich przewidywań Monte Carlo robione jest jednocześnie do danych detektora bliskiego ND i dalekiego SK. Pozwala to wyznaczyć parametry oscylacyjne jak i wiele parametrów systematycznych (nuisance parameters) i skutkuje wyznaczeniem funkcji ich rozkładu (posterior function). Ramy statystyczne to wykorzystanie łańcuchów Markowa w dopasowaniu

Monte Carlo (MCMC). Rozdział zawiera niezbędne wzory statystyczne i ilustracje działania tego algorytmu. Opisane są stosowane mechanizmy kontrolne tego działania, do których należą pełniące role danych doświadczalnych Asimov MC, oparte o nie toy MC dla różnych parametrów oscylacyjnych i odpowiednie stosunki LLH.

W Rozdziale 5 autor zajmuje się systematycznymi niepewnościami związanymi z detektorem SK. Niepewności strumienia neutrin udało się zmniejszyć z 8 do 5 procent dzięki wynikom eksperymentu NA61/SHINE, który przeprowadził pomiary produkcji na tarczy identycznej do użytej w T2K. Niepewności związane z wartościami przekrojów czynnych zawarte są w 75 parametrach dopasowania dotyczących oddziaływań CCQE, SPP, 2p2h, Multi- π i DIS, FSI oraz innych. Wyznaczenia błędów systematycznych detektora końcowego SK autor oparł na danych i MC „atmosferycznych” Super-Kamiokande, do których zastosował pochodzące z T2K cięcia i dopasowania. Na tej podstawie skonstruował macierz kowariancji dla detektora Super-Kamiokande do prowadzenia dalszej analizy.

Rozdział 6 zawiera rezultaty analizy oscylacyjnej. Jako pierwszy krok autor przeprowadza testy na zbudowanej przez siebie próbce wielopierścieniowej. Opracowane w Rozdziale 3 (na podstawie Monte Carlo) cięcia autor stosuje do danych doświadczalnych. Rezultatem jest próbka czteroelementowa, ale jej porównanie z próbką jednopierścieniową $\nu_e \text{CC}1\pi^+$ pozwala próbki te połączyć. Następnie już na całości danych autor stosuje dopasowanie Azimova, którego celem jest sprawdzenie poprawności i mocy działania maszynerii MCMC. Jednym z wniosków z tego testu jest dołączenie do przyszłych dopasowań ograniczeń dla $\sin^2\vartheta_{13}$ pochodzącego z doświadczeń reaktorowych. Kolejne dopasowanie dotyczy już całości danych, najpierw autor omawia parametry systematyczne (których 75 posterior function zamieszczone jest w Dodatku B) aby następnie przejść do parametrów oscylacyjnych. Autor prezentuje otrzymane kontury $\delta_{CP} - \sin^2\vartheta_{13}$ w próbce „appearance” oraz $\Delta m_{23}^2 - \sin^2\vartheta_{23}$ w próbce „disappearance”. Wyniki wydają się preferować normalną hierarchie mas i kąt ϑ_{23} w górnym oktancie wartości, ale wymaga to dalszych badań.

Rozdział 7 poświęcony jest obserwowanej pewnej drobnej (lecz być może bardzo istotnej) niezgodności niskoenergetycznych danych z Monte Carlo, zarówno w próbce $\nu_e \text{CC}1\pi^+$ jak i w oddziaływaniach ν_e atmosferycznych. Jednak badana hipoteza, że niezgodność spowodowana jest niską akceptacją próbki $\nu_e \text{CC}1\pi^+$ w tym obszarze energii nie potwierdza się.

W Rozdziale 8 autor podsumowuje przeprowadzoną przez siebie analizę. Przede wszystkim podkreśla, że jest to pierwsza analiza wielopierścieniowa w T2K. Dołączenie wielopierścieniowej próbki $\nu_e \text{CC}1\pi^+$ usuwa szereg wątpliwości modelowych związanych z produkcją π^+ na jądrach i zwiększyło statystykę ważnej próbki „appearance” $\nu_e \text{CC}1\pi^+$. Wraz z redukcją błędów parametrów detektora SK przeprowadzona analiza pozwoliła stwierdzić, że wartości δ_{CP} bliskie 0 lub $\pm\pi$ są poza 90% przedziałem wiarygodności, a najbardziej prawdopodobne wydają się być okolice wartości δ_{CP} bliskie $-\pi/2$. Poza tym z dwóch możliwości normalna hierarchia wydaje się być bardziej prawdopodobna a kąt ϑ_{23} położony w górnym oktancie. Podjęte przez autora próby wyjaśnienia niskoenergetycznej rozbieżności pomiędzy MC i danymi nie przyniosły pozytywnych rezultatów.

Autor podkreśla, że wyniki współpracy T2K są wspólnym dziełem wielu badaczy, to był on głównym osobą odpowiedzialną w Super-Kamiokande za analizę w

ramach statystycznego podejścia Baysowskiego i dopasowanie Monte Carlo w ramach łańcuchów Markowa (MCMC). Ponadto wniósł istotny wkład w konstrukcje software dla Super-Kamiokande jak i oprogramowania wiązki „off axis” eksperymentu.

Z błędów redakcyjnych w pracy Yashwanth Sanjeev Prabhu znalazłem we wzorach 1.10 i 1.11 zbędny nawias, na stronie 28 w 6 wierszu od dołu powinno być tag zamiast target, w Tabeli 3.2 formalnie powinny być przy niektórych wielkościach jednostki, na stronie 50 w wierszu 22 brak jest chyba słowa „have”. Na stronie 83 wiersz 13 od dołu zawiera jedno „is” za dużo. Na Rys.6.4 jedno z $\sin^2\theta_{23}$ powinno być zastąpione przez $\sin^2\theta_{13}$. Rys 7.1 nie ma bezpośredniego odwołania w tekście. Pomimo tych jednak drobnych uchybień praca napisana jest w sposób bardzo elegancki, zwarty i dobrze czytelny.

Pracę doktorską mgr. Yashwanth Sanjeev Prabhu oceniam bardzo wysoko. Przedstawia ona w sposób ładny i przejrzysty bardzo cenną analizę oscylacyjną. Głównym osiągnięciem pracy jest dołączenie do dotychczas analizowanych danych T2K wielopierścieniowej próbki $\nu_e CC1\pi^+$ i przeprowadzenie Bayesowskiej analizy oscylacyjnej danych T2K w oparciu o łańcuchy Markowa. Ważny jest wynik dotyczący parametru δ_{CP} oraz potwierdzenie tendencji zachowania $\sin^2\theta_{23}$ i normalnej hierarchii mass. Zgodność otrzymanych wyników z podejściem częstościowym T2K świadczy też o tym, że wyniki T2K oparte są na solidnych podstawach tak jak i plany eksperymentu.

Uważam, że recenzowana praca w pełni spełnia warunki stawiane przez ustawę pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Yashwanth Sanjeev Prabhu do dalszych etapów przewodu doktorskiego.