

Wrocław, 11 maja 2023

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

Recenzja rozprawy doktorskiej pt. "Constraining neutrino cross-section and flux models using T2K Near Detector with proton information in Markov chain Monte Carlo framework"  
autorstwa magistra Kamila Skwarczyńskiego

### Tematyka pracy

Dogłębne poznanie własności neutrin jest kluczowe dla zrozumienia podstawowych praw natury. Mimo ogromnego wysiłku kilku pokoleń fizyków wciąż nie zmierzono mas neutrin i nie rozstrzygnięto, czy są cząstkami Diraca czy Majorany. W ostatnich latach uzyskano znaczny postęp w zrozumieniu zjawiska oscylacji neutrin. Organiczny wysiłek fizyków pracujących w kolejnych eksperymentach oscylacyjnych pozwolił oszacować wszystkie elementy macierzy mieszania. Ostatnie lata przyniosły również pierwsze dokładne ustalenia fazy łamania symetrii CP w sektorze leptonowym. Szczególny wkład wniósł eksperyment T2K, który zgromadził pomiary pozwalające wyznaczyć  $\sin^2 \theta_{23}$  z największą do tej pory dokładnością. Jednocześnie z analiz danych zebranych przez T2K wynika, że mamy do czynienia z maksymalnym łamaniem symetrii CP w sektorze leptonowym. Istotnie, zmierzona faza CP  $\delta_{CP}$  jest bliska wartości  $-\pi/2$ . Uzyskane wyniki są przełomowe nie tylko dla fizyki neutrin, ale również dla ogólnego zrozumienia oddziaływań fundamentalnych.

W przypadku pomiaru oscylacji neutrin bardzo istotnym jest jak najdokładniejsza rekonstrukcja energii neutrina, którego oddziaływanie zostało zaobserwowane w detektorze. Wiązka neutrin nie jest mono-energetyczna, co stanowi jeden z głównych problemów pomiarowych. Dodatkowo neutrina słabo oddziałują i są cząstkami elektrycznie obojętnymi. Zatem, aby zaobserwować neutrina buduje się detektory o olbrzymich masach. W praktyce

mierzy się oddziaływania neutrin z jądrami atomowymi, a ich energie rekonstruuje się głównie na podstawie pomiaru wyprodukowanego naładowanego leptonu. Trudności natury technologicznej oraz brak precyzyjnego modelu teoretycznego opisującego oddziaływania neutrin z jądrami atomowymi skutkuje dość dużym błędem systematycznym dla parametrów oscylacji neutrin. Dlatego jednym z istotnych celów fizyków neutrinowych jest wypracowanie metod doświadczalnych i teoretycznych, które pozwolą prowadzić pomiary własności neutrin z dużą precyzją.

Magister Skwarczyński będąc członkiem eksperymentu T2K brał udział w pracach, które pozwoliły zredukować błąd na rozkłady przypadków mierzonych w tzw. "dalekim" detektorze tj. w Super Kamiokande (SK) oraz w konsekwencji zmniejszenie błędu pomiaru parametrów oscylacyjnych. Przedłożona rozprawa podsumowuje wykonaną pracę.

W szczególności Autor rozprawy wykorzystując dane pomiarowe bliskiego detektora ND280 przeprowadził bayesowską analizę statystyczną. Magister Skwarczyński miał wkład do sześciu technicznych raportów eksperymentu T2K. Jest współautorem ponad siedmiu artykułów raportujących postępy i wyniki eksperymentów T2K i HyperT2K w tym jedno-autorski materiał po-konferencyjny, PoS ICHEP2022 (2022) (konferencja ICHEP 2022).

### **Struktura, główne wyniki oraz uwagi**

Rozprawa napisana jest w języku angielskim i składa się z dziewięciu rozdziałów (włączając wstęp) oraz dwóch dużych dodatków. Ponadto praca zawiera spis literatury. Struktura pracy, tj. prowadzenie wywodu, jest logiczna. Załączone dodatki w szczegółach uzupełniają główne wątki.

Autor rozprawy we wstępie podsumowuje główne wyniki pracy oraz omawia jej zawartość. Rozdział pierwszy wprowadza minimum teoretyczne niezbędne do zrozumienia pozostałej części rozprawy. Faktycznie w rozdziale tym uzyskujemy podstawy zagadnienia oscylacji neutrin. Ponadto znaczna część rozdziału omawia wszystkie rodzaje oddziaływań neutrin z jądrami atomowymi, które mają istotny wkład do oddziaływania w zakresie energii charakterystycznym dla eksperymentu T2K. Rozdział drugi poświęcony jest eksperymentowi T2K, omawia jego główne cele, specyfikację wiązki oraz najważniejsze cechy bliskiego detektora ND280 oraz dalekiego detektora SK. W rozdziale tym podsumowane zostały również zebrane dane, które były przedmiotem analizy magistra Skwarczyńskiego. Rozdział trzeci poświęcony jest szczegółowemu opisowi zebranych pomiarów, które zostały wykorzystane

przez autora w analizie statystycznej. Autor omawia strategię binowania, stosowane cięcia kinematyczne etc.

Rozdział czwarty poświęcony jest omówieniu błędów systematycznych w przeprowadzanej analizie. W szczególności, autor dyskutuje błędy systematyczne detektora ND280, systematykę wiązki oraz błędy systematyczne związane z modelowaniem przekrojów czynnych na oddziaływanie neutrin z jądrami. W rozdziale tym na stronie 44, rozdział 4.4, pojawia się stwierdzenie: "...jest wiadome, że dla  $Q^2 > 0.25 \text{ GeV}^2$  czynnik aksjalny nie jest w stanie w pełni opisać danych". Na czym opiera się to stwierdzenie? W praktyce pomiary neutrino-deuter pozwoliły uzyskać bardzo dobre dopasowania  $F_A$  ale dla  $Q^2 > 0.2 \text{ GeV}^2$ . Dane poniżej  $Q^2 < 0.2$  były zwykle odrzucane, ze względu na niską efektywność detektora, patrz Phys.Rev.C 99 (2019) 2, 025204. Ponadto w przypadku wkładu 2p2h, używane są dwa różne parametry normalizacyjne dla neutrin i antyneutrin. Wydaje się, że za mechanizmem 2p2h stoi ta sama fizyka, zatem skąd to rozgraniczenie?

Rozdział piąty wprowadza podstawowe narzędzia statystyczne użyte przez Autora rozprawy. Przeprowadzona analiza ma charakter bayesowski. Jednak konstrukcja bazuje na twierdzeniu Wilks'a. Zatem w celu wyznaczenia optymalnych parametrów dla modelu, magister Skwarczyński rozważa  $\Delta\chi^2$  będące logarytmem stosunków gęstości funkcji wiarygodności dla badanego modelu oraz hipotezy zerowej. Następnie wielkość ta jest zmodyfikowana poprzez uwzględnienie gęstości prawdopodobieństwa *a priori*. W tym sensie nadano analizie ducha bayesowskiego. Warto jednak zaznaczyć, że dla części parametrów założono "płaskie", nie-informatywne rozkłady gęstości, co w praktyce powoduje, że dla tych parametrów wyniki analizy będą podobne do otrzymanych z metody największej wiarygodności. Duża liczba parametrów modelu, jego złożoność, sprawia, że aby wykonać analizę numeryczną, należy użyć jednego z algorytmów Monte Carlo. Autor wykorzystuje generator łańcuchów Markowa. Uzyskane wyniki są sprawdzane przy wykorzystaniu testu Asimov-fit. W typowej analizie bayesowskiej zwykle porównuje się modele poprzez wyliczanie czynnika Bayesa. Można zatem porównać dwa modele z nieco innymi opisami efektów jądrowych, czy z innymi rodzajami czynnika postaci i sprawdzić, która z hipotez jest bardziej preferowana przez pomiary. Czy tego typu analizy były przeprowadzane? Ponadto pojawia się również pytanie jak, wyliczana w dodatku, *p*-wartość ma się do czynnika Bayesa?

Rozdział szósty podsumowuje analizę statystyczną wykonaną przez Autora z wykorzystaniem narzędzi wprowadzonych w rozdziale piątym. Wydaje się ciekawe z punktu widzenia fizyki oddziaływań neutrin, że model opisu-

jący oddziaływania w piku kwazielastycznym niedoszacowuję liczbę przypadków. Jednocześnie otrzymana z dopasowania masa aksjalna jest większa niż ta uzyskana z analizy pomiarów neutrino-deuteron (eksperymenty ANL i BNL). Pojawiają się zatem pytania co jest źródłem niezgodności i, ewentualnie, jak poprawić model teoretyczny, by uzyskać lepszą zgodność z pomiarami? W dalszej części rozdziału szóstego Autor podaje uzyskane *a posteriori* rozkłady przewidywań dla liczby zdarzeń, konkludując, że uzyskany fit prowadzi do istotnej redukcji niepewności dla tych przewidywań. Podobna redukcja błędu obserwowana jest dla przewidywań liczby zdarzeń dla dalekiego detektora. Na zakończenie rozdziału magister Skwarczyński prezentuje wyniki jednoczesnego dopasowania do danych ND280 oraz SK. Wyniki analizy prowadzą do konkluzji, że faza łamania CP jest bliska  $-\pi/2$  i wykluczona jest hipoteza zachowania symetrii CP. Magister Skwarczyński porównuje uzyskane dopasowania w ramach podejścia bayesowskiego z wynikami uzyskanymi z BANFF (bazującym na częstościowej statystyce), patrz dodatek A.6. Okazuje się, że obydwie analizy prowadzą do bardzo podobnych przewidywań, z porównywalnymi niepewnościami. Zwykle wyniki analiz bayesowskich i bazujących na częstościowej statystyce są nieco inne, różnią się w szacowaniach niepewności. Zatem pojawia się naturalne pytanie co jest źródłem zgodności wyników uzyskanych w dwóch wspomnianych analizach? Jaka zmiana założeń *a priori* prowadziłyby do nieco innych przewidywań i większych niepewności dla nich?

Rozdział siódmy wybiega nieco w przyszłość projektu T2K. Autor prezentuje studia czułości upgrade'owanego detektora ND280. W rozdziale ósmym Autor podsumowuje rozprawę.

### Drobne uwagi

- Wydaje się, że wzór (1.3) jest niekompletny, a formuła (1.4) to amplituda przejścia  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ .
- Dla zachowania logiki opisu rozdziału 1.2 byłoby trafniej najpierw wprowadzić macierz PMNS z rozdziału 1.3, a później opisywać jej własności.
- W rozdziale 1.5 wprowadzone są czynniki postaci nukleonu. Część rozdziału poświęcona elektromagnetycznym czynnikom postaci nukleonu mogłaby zostać pominięta. W przypadku oddziaływań neutrin istotną rolę odgrywa aksjalny (osiowy) czynnik postaci. Jednak powszechnie stosowana postać dipolowa tej funkcji nie jest wynikiem założenia co

do rozkładu ładunku, a raczej najprostszym możliwym, pracującym wyborem, bez głębszego uzasadnienia.

- Strona 15, komentarz do SRC: SRC uwzględnia częściowo ring RPA zaimplementowane w NuWro na podstawie pracy Eur. Phys. J. C 31 (2003) 177. Oddziaływania SRC są uwzględnione w członie kontaktowym w propagatorze pionu.
- Uwaga do opisu SPP, strona 16. W przypadku czynnika postaci  $C_5^A$  istotny wkład do dyskusji wniosła praca Phys.Rev.D 80 (2009) 093001 będąca wynikiem współpracy wrocławskiej i warszawskiej grupy neutrinowej. W pracy tej wykazano spójność statystyczną danych ANL oraz BNL (wcześniej twierdzono, że są niespójne) oraz wyznaczono wartość  $C_5^A(0)$  i rezonansowej masy aksjalnej. Wyniki te zostały potwierdzone, przy wykorzystaniu innej metody i modelu, przez grupę z Walencji Phys.Rev.D 81 (2010) 085046.
- Na stronie 59 mamy komentarz o wkładzie nierezonansowym i jego małej istotności w przypadku analizy danych z komory pęcherzykowej w eksperymentach ANL oraz BNL. Ta uwaga wydaje się zbyt daleko idąca. Oryginalnie te dane były analizowane przy użyciu modelu Adlera, który zawiera istotne wkłady nierezonansowe nawet w kanale  $I_{3/2}$ . Owszem, można dopasować model tylko na produkcje  $\Delta(1232)$  do pomiarów w jednym kanale, ale jak wykazano w pracy Phys.Rev.D 90 (2014) 9, 093001, model taki będzie niespójny z pomiarami w innych kanałach.
- Wzór (5.3) i opis do niego:  $p(Z|\theta)$  to funkcja wiarygodności.
- Część rysunków, ze względu na zbyt mały rozmiar, ma nieczytelne podpisy na osiach, np. Rysunki 4.1, 4.2, 4.10, 6.10 i inne.
- Brak skrótu ECAL w spisie.

## Podsumowanie

Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera interesujące i oryginalne wyniki. Wykonana przez Autora praca daje ważny wkład do analiz eksperymentu T2K, a co za tym idzie daje wartościowy przyczynek do zrozumienia zjawiska oscylacji neutrin. Stwierdzam, że złożona rozprawa doktorska spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie magistra Kamila Skwarczyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.