

Kraków, 26.04.2022



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

Dr hab. Grzegorz Zuzel, prof. UJ
Wydział Fizyki, Astronomii
i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Jagielloński
Lojasiewicza 11,
30-348 Kraków
E-mail: grzegorz.zuzel@uj.edu.pl
Tel.: 0048 12 664 4861

Recenzja

rozprawy doktorskiej przedłożonej Radzie Naukowej Narodowego Centrum Badań
Jądrowych w Świerku

Autor: mgr Grzegorz Żarnecki

Tytuł: Measurement of the charged current muon antineutrino single π^- production
cross section at T2K

Promotor: dr hab. Justyna Łagoda (Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku)

Rozprawa doktorska pana Grzegorza Żarneckiego dotyczy analizy danych przeprowadzonej w ramach eksperymentu Tokai-to-Kamioka (T2K). Głównym celem pracy było wyznaczenie przekroju czynnego na produkcję pojedynczego pionu π^- w oddziaływaniach antyneutrino mionowych, zachodzących z wymianą prądu naładowanego (CC), z materiałem scyntylicyjnym detektora FGD1 (Fine Grain Detector). FGD1 jest elementem bliskiego detektora ND280. Uzyskany wynik, w przypadku podwójnie różniczkowego przekroju czynnego, został przedstawiony w funkcji zmiennych kinematycznych mionu μ^+ , tj. w pędzie (p_μ) i cosinusie kąta jego emisji ($\cos\theta_{\mu,}$ mierzonego względem osi wiązki neutrin), oraz jako całkowity przekrój czynny. Analizowane dane zostały zebrane w latach 2014 – 2018.

Pomiar przekroju czynnego na wspomnianą reakcję z topologią sygnału oznaczaną jako $\bar{\nu}_\mu CC1\pi^-$ jest bardzo ważny z punktu widzenia analizy oscylacji neutrin na tzw. długiej bazie prowadzonej w ramach eksperymentu T2K. Wynika to z tego, że np. w przypadku braku identyfikacji powstałego pionu π^- omawiany proces wpływa na poziom tła w detektorze Super-Kamiokande (SK, tzw. detektor daleki). Niepewności systematyczne związane z oddziaływaniem pionu są też ciągle źródłem największego przyczynku do błędu badanego przekroju czynnego i jego zmniejszenie było jednym z celów przeprowadzonej analizy. Podejmowany przez Autora temat ma więc ogromne znaczenie dla eksperymentu T2K.

Celem naukowym realizowanego w Japonii eksperymentu T2K jest badanie oscylacji neutrin na długiej bazie włączając w to poszukiwania łamania symetrii CP w sektorze leptonowym oraz poszukiwania neutrin sterylnych. Wykorzystując wiązkę neutrin (lub antyneutrino) mionowych, formowaną w kompleksie akceleratorowym J-PARC, w detektorze Super-Kamiokande badany jest kanał oscylacji do neutrin (antyneutrino) elektronowych – tzw. kanał appearance, lub ubytek neutrin (antyneutrino) mionowych – tzw. kanał disappearance. Poprzez analizę sygnału w detektorze SK,

ul. prof. Stanisława

Lojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

biorąc pod uwagę odpowiednie przekroje czynne na oddziaływania neutrin (antyneutrin) oraz ich strumień mierzony w detektorze bliskim ND280, możliwe jest precyzyjne wyznaczenie parametrów oscylacji. ND280 umiejscowiony jest 280 m od tarczy akceleratora i 2.5° od osi wiązki (tzw. lokalizacja off-axis), co powoduje, iż rejestrowane widma energetyczne neutrin (antyneutrin), z maksimum przy energii ~ 0.6 GeV, są znacznie węższe w porównaniu do rozkładów uzyskiwanych na osi wiązki (on-axis). Detektor daleki – Super-Kamiokande – jest z kolei detektorem Czerenkowa opartym o 50 000 ton ultra-czystej wody i umiejscowiony jest 295 km od tarczy akceleratora w laboratorium podziemnym, gdzie 1000 m skały chroni go przed wpływem promieniowania kosmicznego. Lokalizacja detektora SK oraz energia produkowanych neutrin maksymalizują prawdopodobieństwo ich oscylacji. Biorąc pod uwagę fakt, iż modelowany rozkład energetyczny wiązki neutrin (antyneutrin) i sygnał w detektorze bliskim jest ekstrapolowany do detektora dalekiego, niezwykle ważna jest dokładna znajomość przekrojów czynnych na oddziaływania neutrin z różnymi materiałami gdyż ich niepewności ograniczają możliwości analizy oscylacji neutrin w T2K. W ramach eksperymentu wykonano do tej pory precyzyjne pomiary parametrów oscylacji neutrin (np. kąta mieszania θ_{23}), przekrojów czynnych oddziaływań neutrin z różnymi materiałami oraz nałożono najsilniejsze ograniczenie dotyczące niezachowania symetrii CP w sektorze leptonowym. Pomiary przekrojów czynnych oddziaływań neutrin z materiałami detektora ND280 są kontynuowane, podobnie jak precyzyjne pomiary parametrów oscylacji neutrin. Planowane są także poszukiwania neutrina sterylnego.

Przedłożona do recenzji rozprawa napisana została w języku angielskim. Liczy ona 202 strony i zawiera: streszczenie (napisane w języku polskim i angielskim), podziękowania, spis treści, wstęp, sześć rozdziałów, wnioski, dodatki (A, B i C), wykaz skrótów oraz bibliografię.

We wstępie p. Żarnecki przedstawia kontekst naukowy swojej pracy, motywację podejmowanego tematu badawczego, przytacza pokrótce treść rozprawy (zawartość poszczególnych rozdziałów i dodatków) oraz krótki opis wykorzystywanych w pracy narzędzi do analizy danych.

W rozdziale pierwszym przedstawione zostały podstawowe informacje o neutrinach oraz ich rola w Modelu Standardowym. Omówiono także oscylacje neutrin w próżni i w materii wraz z podaniem najbardziej aktualnych wartości parametrów oscylacji. Auto pokrótce prezentuje także wciąż nierozwiązane kwestie w fizyce neutrin: problem masy neutrina, hierarchii mas neutrin, niezachowania CP w sektorze leptonowym oraz natury neutrina (cząstka Diraca czy Majorany). W podrozdziale 1.3 omówiony został temat oddziaływań neutrin z jądrem atomowym/nukleonami, a w podrozdziale 1.4 Autor opisuje badaną reakcję oraz oczekiwaną sygnaturę (topologię) sygnału w detektorze ND280 wraz z zakresami, w których analizowane są dane kinematyczne. Podrozdział 1.5 dotyczy definicji i prezentacji przekroju czynnego (podwójnie różniczkowy, całkowity) dla badanej reakcji.

Rozdział drugi jest poświęcony eksperymentowi T2K. P. Żarnecki przedstawia pokrótce cele naukowe eksperymentu, sposób generowania wiązek neutrin i antyneutrin mionowych (opis kompleksu akceleratorowego J-PARC) oraz ich skład wraz z oczekiwanym rozkładem energetycznym w przypadku osiowym (on-axis) i pozaosiowym (off-axis). W podrozdziałach 2.2 i 2.3 omówiono bliskie detektory INGRID (on-axis) oraz ND280 (off-axis). W tym drugim przypadku szczegółowo przedstawiono budowę poszczególnych komponentów, w szczególności detektorów FGD i komór projekcji czasowej (TPC). Podrozdział 2.4 zawiera opis detektora dalekiego (SK), a w podrozdziale 2.5 pokazano przyrost danych rejestrowanych w eksperymencie T2K począwszy od 2010 roku.

Wydaje mi się, że w rozdziale tym zbyt pobieżnie potraktowany został opis badań naukowych zrealizowanych i ciągle planowanych do realizacji z wykorzystaniem



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

detektora T2K. Autor nie cytuje większości prac z ostatnich lat, które odnoszą się do badań oddziaływań neutrin w detektorze bliskim, czy też publikacji w Nature dotyczącej badań związanych z łamaniem symetrii CP.

Rozdział trzeci poświęcony jest opisom metod selekcji zdarzeń sygnału i tła zoptymalizowanych przy wykorzystaniu danych pochodzących z symulacji Monte Carlo. Na początku Autor wprowadza parametr, tzw. Figure of Merit (FoM), który jest iloczynem wydajności selekcji sygnału i tzw. czystości próbki. Optymalizacja FoM pozwala na osiągnięcie minimalnego oczekiwanego błędu statystycznego poszukiwanego przekroju czynnego σ_{meas} . Przy wyprowadzaniu odpowiednich wzorów Autor zakłada, że oczekiwany błąd statystyczny tła jest pomijalnie mały w stosunku do błędu statystycznego sygnału. Wydaje mi się, że założenie takie powinno zostać poparte danymi, które by je uzasadniały.

W podrozdziałach 3.1 i 3.2 opisana jest preselekcja danych z wykorzystaniem procedur stosowanych w eksperymencie T2K. W podrozdziale 3.3 Autor omawia kolejne kroki podejmowane w celu odfiltrowania sygnału. W szczególności opisana jest, wprowadzona przez niego, autorska metoda pozwalająca na ograniczenie tła neutrinowego dla sygnału typu $CC1\text{TPC}\pi^-$ (pojedynczy pion pochodzący z obszaru FGD1 i identyfikowany w TPC2 detektora ND280). We wprowadzonym tzw. cięciu ze względu na zasięg Z wykorzystuje się różnicę oddziaływania pionów i mionów z materią. Współrzędna Z końca zrekonstruowanego śladu cząstki jest więc dobrą miarą zasięgu cząstki w detektorze ND280. Dla sygnału typu $CC1\pi^-$ różnica ($Z_\mu - Z_\pi$) jest zazwyczaj dodatnia, a dla tła wywołanego oddziaływaniami neutrin ($CC1\pi^+$) częściej przyjmuje wartości ujemne. Biorąc pod uwagę parametr FoM wartość cięcia została ustalona na $(Z_\mu - Z_\pi) > -10$ cm. Zdarzenia, które nie spełniają tego warunku traktowane są jako tło. Wprowadzone przez Autora cięcie poprawia czystość próbki prawie dwukrotnie przy niewielkim spadku wydajności (o ok. 14 %), co finalnie zwiększa FoM z 0.054 do 0.076. Zasadniczo optymalną wartością graniczną wprowadzonego cięcia jest $(Z_\mu - Z_\pi) = 0$ cm (rys. 3.10), ale jak wskazuje Autor, dla takiego przypadku pojawiają się pewne rozbieżności pomiędzy rozkładami uzyskanymi dla danych rzeczywistych i symulacji Monte Carlo (rys. 3.11). Myślę, że warto byłoby tutaj dodać komentarz z możliwym wyjaśnieniem tej rozbieżności.

Podrozdział 3.4 poświęcony jest badaniom wydajności procesu selekcji próbek sygnału. Pozwoliły one m.in. na określenie zakresu zmiennych kinematycznych, dla których wyznaczany jest przekrój czynny. Autor przebadał także pod tym kątem wprowadzone cięcie ze względu na zasięg Z ponieważ może ono wprowadzać pewne zależności modelowe. Z przeprowadzonej analizy wynika, że znaczący spadek wydajności powodowany cięciem Z jest faktycznie oczekiwany dla niektórych zmiennych (np. pędu μ^+), ale ma to miejsce dla zakresów już wcześniej wykluczonych z analizy.

W podrozdziale 3.5 opisane zostały procedury selekcji próbek tła z uwzględnieniem wprowadzonego przez Autora cięcia.

Rozdział 4 poświęcony jest analizie niepewności systematycznych, którą wykonano przy pomocy symulacji Monte Carlo opartych na generatorze NEUT wykorzystywanym standardowo w eksperymencie T2K. Błędy systematyczne zostały podzielone na te związane z wiązką neutrin, modelem oddziaływań neutrin oraz detektorem.

W przypadku niepewności systematycznych związanych ze składem wiązki przechodzącej przez detektor ND280 Autor w swojej analizie wykorzystał dostępne w ramach eksperymentu T2K dane (odpowiednia macierz kowariancji). Podobnie w przypadku modelowania oddziaływań neutrin z wykorzystaniem pakietu NEUT Autor skorzystał z rekomendacji zespołu T2K co do wartości oraz niepewności parametrów modelu.

ul. prof. Stanisława
Łojasiewicza 11
PL 30-348 Kraków
tel. +48(12) 664-48-90
fax +48(12) 664-49-05
e-mail:
wydzial.fais@uj.edu.pl

Niepewności systematyczne związane z detektorem rozważano dla wielu parametrów, takich jak np. niejednorodność pola magnetycznego, dokładność rekonstrukcji pędu w TPC, rekonstrukcja ładunku czy efekty związane z oddziaływaniami pionu. Te ostatnie okazują się być dominujące spośród wszystkich niepewności systematycznych związanych z detektorem dla badanej topologii sygnału. W ich analizie Autor opracował i wprowadził kolejną zmianę w stosunku do standardowych procedur analizy danych stosowanych w eksperymencie T2K, kiedy oddziaływania pionu rozważano tylko w części detektora, która miała znaczenie przy rekonstrukcji zdarzeń (tzw. Volume Of Interest - VOI). Była to połączona objętość detektora FGD1 i część TPC2. Jednak po wprowadzeniu cięcia ze względu zasięg cząstek w detektorze ND280, Autor zaproponował aby zmieniać VOI w zależności od własności rekonstruowanego toru cząstki. Dotyczy to głównie zdarzeń sygnału ze zrekonstruowanym torem pionu w TPC2 i z wierzchołkiem w FGD1, oraz zdarzeń tła selekcyonowanych cięciem na zasięg Z. W skrajnym przypadku VOI może obejmować FGD1, TPC2, FGD2, TPC3 i kalorymetr elektromagnetyczny. W swojej analizie niepewności systematycznych Autor rozważa 5 różnych przypadków/wielkości VOI. Ostatecznie błędy systematyczne dotyczące detektora podsumowane są w tabeli 4.2, gdzie we wszystkich rozważanych przypadkach sygnału i tła niepewności związane z oddziaływaniem pionu w detektorze są najwyższe i stanowią od ok. 83 % do 95 % całkowitego błędu systematycznego.

Wydaje mi się, że dla podkreślenia wagi wprowadzonej metody z dynamicznym VOI warto byłoby (dla porównania) rozważyć przypadek statycznego VOI. Ponadto ciekawym byłoby też zestawienie i porównanie w jednej tabeli błędów (przynajmniej tych dominujących) pochodzących z różnych źródeł.

W rozdziale piątym Autor opisuje metodę wyznaczenia poszukiwanego przekroju czynnego. Jest ona oparta o dopasowanie sparametryzowanych danych uzyskanych z generatora NEUT do danych doświadczalnych.

W podrozdziale 5.1 p. Żarnecki przedstawia szczegółowo zastosowaną metodę binowania danych (sygnału i tła), tak aby można było porównać wyniki symulacji z pomiarami oraz przeprowadzić analizę przekroju czynnego. W podrozdziale 5.2 zamieszczono opis dopasowania modelu do danych doświadczalnych z wykorzystaniem metody największej wiarygodności oraz wyliczenia wartości różniczkowego przekroju czynnego (wraz z niepewnościami). Autor wykorzystuje do tego celu standardowe narzędzia software-owe T2K.

Aby zweryfikować poprawność działania zaproponowanej metody wyznaczana przekroju czynnego Autor przeprowadził szereg testów, w tym tzw. test (fit) Asimowa, tzn. dopasowanie danych modelowych do nich samych. W wyniku takiej operacji procedura dopasowująca powinna jako wynik zwrócić parametry wejściowe modelu, co też stwierdzono. W drugim teście, w symulowanych danych (z generatora NEUT) imitujących dane rzeczywiste zwiększono poziom sygnału o 20 %. W wyniku przeprowadzonego dopasowania, zgodnie z oczekiwaniami, główne parametry fitu (tzw. template parameters, które skalują przekrój czynny) uległy zwiększeniu o czynnik 1.2 natomiast parametry modelu, wiązki i detektora (tzw. nuisance parameters) zasadniczo nie uległy zmianom w stosunku do wartości początkowych. W rezultacie odtworzony przekrój czynny był o 20 % wyższy od nominalnego (symulowane dane). Autor przeprowadził także badania propagacji błędów statystycznych i systematycznych, które wskazały na możliwe korelacje głównych parametrów fitu. Nie powinno to jednak wpłynąć znacząco na wynik analiz ponieważ rozkład χ^2 uzyskiwany z uwzględnieniem statystycznych i systematycznych fluktuacji wszystkich parametrów (template i nuisance) dość dobrze zgadzał się z oczekiwanym.

W ostatnim teście wyniki symulacji z generatora NEUT dopasowano do imitujących dane rzeczywiste wyników symulacji uzyskanych z generatora GENIE. Oba kody różnią się nieco na poziomie zaimplementowanych oddziaływań neutrin (parametry wiązek i detektora były te same). Ponieważ w niektórych przypadkach przewidywania



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

modelu GENIE dawały nieco większy sygnał oczekiwano, że odtworzone główne parametry fitu będą większe niż 1 co faktycznie stwierdzono dla większości z nich (dla trzynastu na szesnaście parametrów). W znakomitej większości parametry detektora, wiązki oraz modelu oddziaływań nie uległy znaczącej zmianie w stosunku do wartości początkowych. Uzyskany przekrój czynny był zgodny z danymi z generatora GENIE, co kolejny raz potwierdziło poprawność procedury dopasowania.

Podsumowując można powiedzieć, że przygotowane przez Autora narzędzia do analizy danych zostały poprawnie przygotowane a ich działanie zostało starannie zweryfikowane poprzez przeprowadzenie szeregu testów z danymi wygenerowanymi na bazie różnych modeli.

W rozdziale 6 Autor opisuje finalną analizę danych przeprowadzoną z wykorzystaniem przygotowanych narzędzi i procedur. P. Żarnecki stosuje tzw. blind analysis, czyli sprawdza jak wyglądają dane rzeczywiste dopiero po ustaleniu wszystkich procedur związanych z analizą. Ma to zapobiec jakimkolwiek wpływowi osoby prowadzącej analizę na jej wynik. Dane modelowe pochodzą z generatora NEUT jednak wyznaczone przekroje czynne zostały porównane także z tymi, przewidywanymi przez generator GENIE. Uzyskane wyniki Autor prezentuje w postaci podwójnie różniczkowego, różniczkowego oraz całkowitego przekroju czynnego. Ten ostatni uzyskano przez całkowanie przekroju różniczkowego po rozważanej przestrzeni fazowej. W przypadku początkowo przyjętego binowania niektóre parametry fitu uzyskują wartości ujemne, co jak pokazano na rys. 6.13 przekłada się na ujemne wartości przekroju czynnego dla niektórych binów. Autor zwraca uwagę, że może to być wynik zbyt małej statystyki w odpowiednich binach dlatego też w kolejnym etapie analizy ich wielkość została zwiększona. Skutkowało to poprawą sytuacji i tylko jedną ujemną wartością przekroju czynnego (rys. 6.15). Z przeprowadzonej analizy wynika też, iż przewidywania generatora NEUT są lepiej zgodne z danymi doświadczalnymi niż przewidywania generatora GENIE. W ostatnim kroku analizy Autor wylicza całkowity przekrój czynny (wraz z niepewnościami systematycznymi i statystycznymi) na badaną reakcję.

W podsumowaniu p. Żarnecki krótko streszcza kontekst naukowy rozprawy, uzyskane przez siebie wyniki oraz przedstawia możliwości zwiększenia dokładności pomiaru rozważanego przekroju czynnego. Można to uzyskać poprzez zmniejszenie błędu systematycznego, zwiększenie ilości analizowanych danych oraz zwiększenie zakresu przestrzeni fazowej w przypadku pomiarów wykonanych zmodyfikowanym/ulepszonym detektorem ND280.

W dodatku A autor prezentuje rozszerzone badania wydajności selekcji sygnału związane z cięciem na zasięg Z. W dodatku B zamieszczono testy wpływu fluktuacji statystycznych na główne parametry fitu oraz dopasowanie modelu do danych eksperymentalnych z wykluczeniem jednej z próbek tła. W dodatku C autor zamieszcza szczegółowy skład chemiczny materiału scyntylacyjnego detektora FGD1.

Tekst rozprawy został starannie zredagowany, ma logiczną strukturę i został napisany dobrą angielszczyzną. Znalazłem tylko nieliczne błędy redakcyjne / literówki. Kilka krytycznych uwag dotyczy też niektórych wykresów - w przypadku zestawień wielu rozkładów na jednym rysunku (np. rys. 3.16, 3.17 etc.) na wydruku opisy osi są małe i słabo czytelne. W przypadku niektórych wykresów (np. rys. 3.23, 3.24, 3.25, 6.5, 6.6 etc.) brak jest opisu osi pionowych (dla rys. 6.5 – 6.8 brak także opisów osi poziomych). W niektórych przypadkach opisy wykresów znajdujące się bezpośrednio nad nimi są skrótowe (np. rys. 5.7) i czasami niezgodne z przyjętym w pracy standardem (np. na rys. 6.5 i 6.6 gdzie zamiast „ π ” jest „pi-”).

Biorąc pod uwagę stronę merytoryczną, oprócz wyszczególnionych już powyżej drobnych uwag, chciałbym zwrócić jeszcze uwagę na kilka kwestii:

ul. prof. Stanisława
Łojasiewicza 11
PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

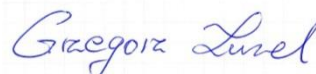
e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

- Autor zasadniczo nie podsumowuje jakie znaczenie dla eksperymentu T2K ma uzyskany wynik;
- nie jest dla mnie jasne w jaki sposób potraktowane zostały ujemne wartości podwójnie różniczkowego przekroju czynnego w trakcie wyznaczania całkowitego przekroju czynnego;
- całkowity przekrój czynny został wyznaczony z dokładnością rzędu 28 % a dominującym błędem jest błąd systematyczny. Jego głównym składnikiem jest niepewność związana z niedostatecznie dobrą nieznaną oddziaływań pionu w detektorze. Poprawa dokładności pomiaru jest więc ściśle związana z możliwością zmniejszenia tego błędu. Minimalizacja błędu statystycznego czy rozszerzenie przestrzeni fazowej, co rozważa Autor w podsumowaniu, nie poprawi chyba znacząco sytuacji. Jakie są perspektywy poprawy wspomnianego błędu systematycznego?
- Jak Autor pisze w podrozdziale 1.4 oraz w podsumowaniu, przedmiotowy przekrój czynny był już wcześniej badany w ramach innego eksperymentu (referencja nr 84), a także w ramach T2K (referencja nr 141). Warto byłoby zestawić wyniki wszystkich dostępnych analiz. Czy np. uwzględnienie wspomnianego pomiaru wykonanego w ramach T2K i skombinowanie go z wynikiem uzyskanym przez Autora nie poprawiłoby dokładności finalnego wyniku?

Wymienione błędy edytorskie oraz drobne nieścisłości wymienione w recenzji powyżej nie wpływają znacząco na wysoką wartość naukową pracy.

Nie ulega dla mnie wątpliwości, że wyniki badań przedstawione w ocenianej rozprawie doktorskiej pana Grzegorza Żarneckiego, w szczególności opracowane i zaimplementowane przez niego nowe procedury analizy danych, stanowią bardzo istotny wkład do eksperymentu T2K, a co za tym idzie do badań podstawowych. Praca zawiera wartościowe i oryginalne wyniki oraz w pełni spełnia wymogi formalne stawiane rozprawom doktorskim. W związku z powyższym rekomenduję dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Grzegorz Zuzel