

Załącznik nr 2a do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego
(plik: JŁagoda-AutorefPol.pdf)

Warszawa, 22 kwietnia 2016 r.

dr Justyna Łagoda
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Zakład Fizyki Wielkich Energii
ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa
e-mail: Justyna.Lagoda@ncbj.gov.pl

Autoreferat

Spis treści

1	Dane osobowe	2
2	Wykształcenie	2
3	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
4	Przebieg pracy naukowej	3
4.1	Okres związany z pracą magisterską i doktoratem	3
4.2	Okres po doktoracie i obecna działalność naukowa	4
4.2.1	Działalność związana z technologią ciekłoargonową	4
4.2.2	Eksperyment T2K	5
5	Prezentacja osiągnięcia naukowego	12

1 Dane osobowe

Imię i nazwisko: Justyna Łagoda

2 Wykształcenie

1999 : magister nauk fizycznych, specjalizacja: fizyka cząstek elementarnych. Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

Tytuł pracy magisterskiej: *Detektory gazowe typu RPC w układzie bieżącej detekcji mio-
nów w eksperymencie CMS*

Opiekun: dr hab. Wojciech Dominik

Data uzyskania: 22.09.1999

2006 : doktor nauk fizycznych. Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Liquid argon Time Projection Chamber for investigation of
neutrino interactions*

Promotor: dr hab. Wojciech Dominik

Recenzenci: prof. dr hab. Krzysztof Doroba,

prof. dr hab. Henryk Wilczyński

Data uzyskania: 9.01.2006

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

W odwrotnym porządku chronologicznym:

2010 – obecnie : adiunkt, Narodowe Centrum Badań Jądrowych;

2007 – 2010 : adiunkt, Instytut Problemów Jądrowych, w ramach stażu po doktoracie
POL-POSTDOC III;

2005 – 2007 : *postdoctoral fellow*, Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), Assergi,
Włochy, w ramach programu *Post-doctoral fellowship for non-Italian citizens* Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare;

2004 – 2005 : starszy referent inżynierijno-techniczny, Uniwersytet Warszawski, Wydział
Fizyki;

1999 – 2004 : studia doktoranckie, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki.

4 Przebieg pracy naukowej

4.1 Okres związany z pracą magisterską i doktoratem

Na czwartym roku studiów magisterskich na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego rozpocząłam współpracę z warszawską grupą eksperymentu CMS. Moim zadaniem w ramach pracy magisterskiej było zbadanie zachowania się gazowych detektorów typu Resistive Plate Chamber w środowisku intensywnego promieniowania, zarówno poprzez pomiary, jak i symulacje w środowisku GEANT. Studia te zostały podsumowane w pracy magisterskiej wykonanej pod opieką prof. dr. hab. W. Dominika, pt. *Detektory gazowe typu RPC w układzie bieżącej detekcji mionów w eksperymencie CMS*.

Decydując się na studia doktoranckie, miałam początkowo zamiar kontynuować prace nad detektorami RPC, jednakże w czasie pierwszego roku zainteresowałam się możliwością uczestniczenia w nowatorskim eksperymencie neutrinowym ICARUS [1] w ramach nowo powstałej Polskiej Grupy Neutrinowej, w skład której wchodził fizycy z kilku ośrodków w Polsce, m.in. Uniwersytetu Warszawskiego i Instytutu Problemów Jądrowych (obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych).

Detektor ICARUS to komora projekcji czasowej wypełniona ciekłym argonem, z odczytem z trzech płaszczyzn drutów anodowych, pozwalająca na bardzo precyzyjne badanie oddziaływań neutrin. Prototyp o masie 600 ton był wówczas przygotowywany do przeprowadzenia testowego zbierania danych z użyciem promieniowania kosmicznego. Moim pierwszym zadaniem było zaprojektowanie układu wyzwalania na miony kosmiczne, który dawałby jak najbardziej równomierne „oświetlenie” detektora oraz zapewnił dużą statystykę sygnałów dla wszystkich drutów odczytu, a jednocześnie niezbyt wysoką częstość zliczeń. Zaprojektowany układ został przeze mnie złożony i przetestowany w Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) we Włoszech, a następnie zainstalowany na detektorze i używany podczas zbierania danych w roku 2001 w Pawii, podczas których pełniłam także dyżury przy detektorze. Opis mojego systemu został zawarty we wspólnej nocie technicznej dotyczącej używanych układów wyzwalania [2].

Po zakończeniu zbierania danych zajęłam się ich podstawową kalibracją. Przeprowadziłam wizualny skanowanie przypadków poszukując szczególnie torów mionowych przecinających całą długość dryfu w komorze, których następnie użyłam do pomiaru prędkości dryfu elektronów jonizacji w polu elektrycznym w ciekłym argonie, wielkości niezbędnej do poprawnej rekonstrukcji. Brałam również udział w pracach zespołu zajmującego się rekonstrukcją energii kaskad i pomiarem masy mezonów π^0 i η^0 jako testu energetycznej zdolności rozdzielczej detektora.

Obie te prace zostały opisane w notach technicznych [3, 4], a wyniki użyte w publikacjach zespołu ICARUS [5, 6].

Moja dalsza praca w ICARUSie dotyczyła badania światła scyntylacyjnego argonu, które jest wykorzystywane w szybkim wewnętrznym układzie wyzwalania detektora. Przygotowałam symulację powstawania, rozchodzenia się i detekcji światła w środowisku GEANT 3, z uwzględnieniem pochłaniania światła w argonie i rozpraszania rayleighowskiego, efektów detektorowych związanych z budową i efektywnością fotopowielaczy zainstalowanych wewnątrz kriostatu, oraz budową wewnętrzną samego detektora. Wyniki otrzymane z symulacji porównałam z zebranymi danymi dla różnych konfiguracji torów w detektorze, co pozwoliło na wprowadzenie do symulacji stałego współczynnika kalibracji. Praca ta stanowiła znaczną część mojej rozprawy doktorskiej.

Poza pracami związanymi bezpośrednio z detektorem ICARUS, zajmowałam się również

studiami nad metodami poszukiwania oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ w wysokoenergetycznej wiązce neutron CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso). Grupa badawcza, której byłam członkiem, opracowała metodę selekcji przypadków z produkcją leptonu τ , będącego sygnaturą oscylacji, z wykorzystaniem sieci neuronowych. W trakcie uczenia wielowarstwowa sieć neuronowa otrzymywała na wejściu zestawy wybranych zmiennych kinematycznych opisujących wysymulowany przypadek (całkowity pęd, całkowita energia, brakujący pęd poprzeczny i inne) łącznie z informacją czy należy on do sygnału (oddziaływanie neutrina taonowego przez prądy naładowane) czy do tła (inne oddziaływania neutrin). Proces ten, tzw. *supervised learning*, skutkował otrzymaniem zestawu wag połączeń neuronów w sieci. Następnie gotowa, nauczona sieć sprawdzana była na innej próbce przypadków. Moim głównym zadaniem było zbadanie polaryzacji powstającego leptonu τ i jej wpływu na rozkłady zmiennych stosowanych w selekcji. Analiza ta przeprowadzona została również dla strumienia neutron atmosferycznych, a wyniki zostały włączone do noty technicznej i mojej rozprawy doktorskiej i opublikowane [7, 8].

Moja praca i wyniki były wielokrotnie prezentowane na zebraniach współpracy w CERN i LNGS. Jestem też współautorem sześciu publikacji współpracy ICARUS z lat 2000–2005.

W grudniu 2005 roku obroniłam rozprawę doktorską pt. *Liquid argon Time Projection Chamber for investigation of neutrino interactions* na Wydziale Fizyki UW.

W ramach doktoratu wyjeżdżałam wielokrotnie do LNGS na pobyty trwające z reguły kilka tygodni. Wraz z miejscową grupą pracowałam nad analizą danych oraz opracowaniem metod selekcji. Współpraca ta układała się na tyle dobrze, że uzyskałam poparcie dla mojej aplikacji o staż podoktorski w ramach programu włoskiego Istituto Nazionale di Fisica Nucleare dla obcokrajowców, który otrzymałam i rozpocząłam w grudniu 2005.

4.2 Okres po doktoracie i obecna działalność naukowa

4.2.1 Działalność związana z technologią ciekłoargonową

W okresie od grudnia 2005 do listopada 2007 przebywałam w Laboratori Nazionali del Gran Sasso we Włoszech na stażu podoktorskim.

Pierwotnie planowałam, że moja praca dotyczyć będzie zbierania i analizy danych z uruchomioną wówczas wiązką neutronową CNGS. Niestety, ze względu na incydent w podziemnych halach laboratoryjnych, związany z potencjalnym zagrożeniem ekologicznym (laboratorium znajduje się na terenie parku narodowego), wszelkie prace związane z wprowadzeniem jakichkolwiek nowych detektorów zostały znacząco opóźnione (ostatecznie detektor trafił tam dopiero po moim powrocie do Polski 2 lata później). Dlatego też kontynuowałam analizę starych danych ICARUSa: poszukiwałam torów o zadanej charakterystyce (długości i ułożeniu w przestrzeni), które służyły następnie do pomiarów strat energii na jonizację wzdłuż toru i porównania z energią zużytą na emisję światła scyntylacyjnego.

W czasie stażu zajęłam się też inną tematyką: symulacją Monte Carlo oddziaływań neutron. Pracowałam nad unowocześnieniem kodu generatora oddziaływań GENEVE, pozwalającego na symulację oddziaływań neutron o energiach od 100 MeV do kilku GeV z jądrami atomowymi. Dzięki podejściu wykorzystanemu w nim do opisu zdarzeń quasi-elastycznych, pozwalała on na bardzo precyzyjne potraktowanie kinematyki oddziaływań przez prądy naładowane, zwłaszcza przy energiach bliskich energii progowej na produkcję mionu, pozwala także wyznaczyć przekrój czynny dla oddziaływań ze związanymi nukleonami. Moja praca polegała na przepisaniu programu na język C++, reorganizacji struktury poprzez wprowadzenie obiektów, optymalizacji używanych algorytmów i zmiennych, oraz przystosowaniu do użycia w ramach

obiektowego generatora Monte Carlo GENIE. Unowocześniony przeze mnie program GENEVE był następnie używany do symulowania oddziaływań neutrin we wczesnej fazie eksperymentu ArgoNEUT [9], małego ciekłoargonowego detektora zbierającego dane na neutrinowej wiązce NuMI. Brałam również udział w pracach nad prototypem tego detektora zbudowanym, by badać procesy jonizacji i produkcji światła scyntylacyjnego w argonie.

Po zakończeniu stażu we Włoszech, zajmowałam się głównie pracą na rzecz eksperymentu T2K. Pozostałam jednak członkiem współpracy ICARUS, brałam udział w testach elektroniki odczytu detektora i zbieraniu danych, oraz kontynowałam pracę nad selekcją przypadków oddziaływań neutrin z wiązki CNGS. Od roku 2013 moja działalność w ICARUSie została znacznie ograniczona w związku z objęciem funkcji koordynatora Grupy Analizy Mionowej w eksperymencie T2K, opisanej w następnym rozdziale.

W latach 2008–2014 brałam również udział w pracach współprac LAGUNA i LAGUNA-LBNO, w ramach projektów europejskich badających możliwości i korzyści ze zbudowania w Europie olbrzymiego detektora neutrin. Pierwszy z projektów oceniał potencjalne miejsca, gdzie mógłby stanąć detektor (pod uwagę brano była m.in. kopalnia Polkowice-Sieroszowice w Polsce), natomiast drugi analizował metody poszukiwania i pomiarów oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ dla wybranej lokalizacji w kopalni w Finlandii, gdzie docierałaby wiązka neutrin produkowana w CERN. Rozważano postawienie tam m.in. detektora ciekłoargonowego o masie kilkudziesięciu tysięcy ton. Moja praca dotyczyła metod selekcji oddziaływań z produkcją leptonu τ , którego leptonowy rozpad na elektron jest jednym z głównych spodziewanych źródeł tła dla poszukiwanego kanału oscylacji przy takiej konfiguracji eksperymentu. Wyniki pracy prezentowane były na plenarnych zebraniach współpracy i włączone w raport końcowy projektu [10, 11].

4.2.2 Eksperyment T2K

Od roku 2007 do chwili obecnej jestem członkiem współpracy T2K, międzynarodowego zespołu badającego oscylacje neutrin przy użyciu infrastruktury znajdującej się w Japonii. Mój udział w tym projekcie można podzielić na trzy etapy, powiązane z różnym charakterem wykonywanej pracy i funkcjami pełnionymi w zespole: 1. udział w przygotowaniu eksperymentu, 2. praca nad tłem zewnętrznym, 3. koordynacja prac Grupy Analizy Mionowej.

W latach 2007–2010 (etap 1) eksperyment był przygotowywany do startu. Budowane były elementy znajdujące się w laboratorium J-PARC w Tokai (Japonia): układ produkcji wiązki neutrin oraz dwa bliskie detektory, jeden stojący na osi wiązki, a drugi umieszczony pod kątem 2.5 stopnia do osi (pozaosiowy, podobnie jak daleki detektor). Moja praca dotyczyła bliskiego detektora pozaosiowego, zwanego ND280. Jest to detektor wielofunkcyjny, wyposażony w pole magnetyczne i składający się z różnych podzespołów, w których wykorzystywane są różne techniki detekcyjne, w szczególności światło scyntylacyjne [12].

Polskie grupy zaangażowały się w projekt i budowę Side Muon Range Detector (SMRD), składającego się z płaskich płyt scyntylatora umieszczonych w jarzmie magnesu ND280 [13]. Zadaniem tego poddetektora jest rejestracja mionów, które opuściły wewnętrzną część ND280 i pomiar ich pędu poprzez zasięg. Jest on również istotnym elementem układu wyzwalania na miony kosmiczne, używanego w kalibracji i testach rekonstrukcji, oraz przy wyznaczaniu niektórych błędów systematycznych.

Na przygotowanie poddetektora SMRD do pracy uzyskałam grant POL-POSTDOC III, który był realizowany w latach 2007–2010.

Odczyt płyt scyntylacyjnych SMRD prowadzony jest przez nowoczesne fotodiody MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) [14]. Fotodiody te są bardzo wrażliwe na temperaturę, w jakiej

pracują — silnie zależy od niej ich wzmocnienie i prąd ciemny, dlatego też konieczne było zaprojektowanie systemu kontroli temperatury wewnątrz magnesu. Było to moim pierwszym zadaniem — na podstawie symulacji rozkładów temperatury w magnesie oszacowałam minimalną konieczną liczbę i rozmieszczenie czujników, biorąc pod uwagę ograniczenia narzucane przez elektronikę odczytu. Następnie brałam udział w testach fotodiod MPPC, mających na celu ustalenie optymalnych napięć ich pracy (napięcia te są przechowywane w bazie danych i podawane odpowiednim diodom automatycznie) i odrzucenie wadliwych egzemplarzy.

Równolegle z działalnością czysto aparaturową brałam też udział w opracowywaniu symulacji detektora. W 2008 roku rozpoczęłam pracę nad programem symulującym działanie jednego z dwóch układów wyzwalań ND280 na miony kosmiczne (trygera). Układ ten oparty jest głównie na poddetektorze SMRD i wymaga określonej konfiguracji sygnałów w jego elementach. Pozwala również wybierać określone kierunki i pozycje mionów, które zapewniają optymalne naświetlenie dla wewnętrznych podzespołów ND280. Program, który napisałam, uwzględnia wszelkie wymagania nakładane na sygnały z SMRD dotyczące amplitudy, okna czasowego oraz korelacji, i może wybierać tory mionów kosmicznych o zadanej konfiguracji zarówno z plików symulacyjnych, jak i z danych. W 2009 roku program został rozszerzony o symulację innych podzespołów wykorzystywanych w układzie wyzwalań na miony kosmiczne, a w 2010 roku został włączony do oficjalnego pakietu oprogramowania eksperymentu.

Wspólnie z kolegą z grupy warszawskiej przygotowaliśmy również symulację mionów kosmicznych dla ND280 w pakiecie symulacyjnym GEANT. Użyłam jej następnie do generacji zbioru mionów kosmicznych, które były wykorzystywane przez współpracowników z różnych zespołów T2K. Wkrótce potem symulacja ta stała się częścią oficjalnego oprogramowania, a zadanie przygotowywania nowych, większych zbiorów zostało przekazane młodszym członkom współpracy T2K jako rutynowe zadanie serwisowe (*service task*).

Wykorzystując wysymulowany strumień mionów kosmicznych i moją symulację układu wyzwalań zbadałam częstości mionów kosmicznych w różnych konfiguracjach trygera i przygotowałam macierz współczynników skalujących, które obniżały częstości takich przypadków do wartości akceptowanych przez elektronikę eksperymentu oraz optymalizowały rozkład zdarzeń w wewnętrznych podzespołach ND280. Na podstawie tej macierzy grupa elektroniczna opracowała konfigurację układu wyzwalań, która była od tej pory używana podczas zbierania danych.

W 2009 roku brałam udział w budowaniu poddetektora SMRD w Japonii. Uczestniczyłam w każdym etapie budowy — począwszy od składania kilku liczników scyntylacyjnych w moduł, wyposażenie modułu w fotodiody, czujniki temperatury i kable, testy modułu z użyciem promieniowania kosmicznego, po instalację modułu wewnątrz magnesu. Podczas kilku następnych wyjazdów w 2009 i 2010 roku brałam udział w testach kompletnego SMRD, który zbierał przypadki promieniowania kosmicznego, mapowaniu kanałów elektroniki i ulepszaniu odczytu monitorów temperatury poprzez instalację dodatkowych elementów elektronicznych.

W 2010 roku cały detektor ND280 rozpoczął zbieranie danych — zarówno przypadków oddziaływań neutrin z wiązki, jak i mionów kosmicznych, służących do testowania i kalibracji (wykorzystano tu moje wyniki dotyczące przewidywanych częstości i rozkładów mionów). Przeanalizowałam część zebranych danych kosmicznych, uzyskując rozkłady kątowe i względne częstości mionów w różnych konfiguracjach, oraz porównałam je z symulacjami. Porównania te pokazały bardzo dobrą zgodność, co oznacza, że zarówno proces symulacji, jak i zrozumienie działania detektora były poprawne. Zajmowałam się również testami rekonstrukcji torów w SMRD, dzięki którym wyeliminowanych zostało kilka znalezionych przez mnie błędów, dotyczących nie tylko samego procesu rekonstrukcji, ale również odwzorowania geometrii

SMRD i procesu detekcji światła scyntylacyjnego w symulacji.

Swoją pracę nad poddetektorem SMRD, trygerem kosmicznym, symulacjami i analizą promieniowania kosmicznego wielokrotnie prezentowałam na spotkaniach grupy bliskiego detektora ND280.

Działalność w grupie poddetektora SMRD była przeze mnie kontynuowana w roku 2011, kiedy to opiekowałam się studentem Wydziału Fizyki UW przygotowującym w grupie warszawskiej pracę magisterską na temat efektywności liczników SMRD [15].

Drugi etap mojej pracy w T2K rozpoczął się na przełomie lat 2010–2011, kiedy nawiązałam współpracę z Grupą Analizy Mionowej bliskiego detektora. Jest to grupa o kluczowym znaczeniu dla eksperymentu, zajmuje się pomiarami głównego składnika wiązki — neutrin i antyneutrin mionowych w bliskim detektorze ND280, oraz szacowaniem błędów systematycznych detektora i rekonstrukcji. Pomiary te są używane w analizach oscylacyjnych do redukcji niepewności związanych ze znajomością wiązki i przekrojów czynnych na oddziaływania neutrin, dzięki czemu znacząco poprawiana jest czułość eksperymentu. Opracowane w Grupie Analizy Mionowej algorytmy selekcji i metody szacowania i propagacji błędów systematycznych są również używane przy pomiarach przekrojów czynnych w ND280.

Mój pierwszy wkład do zadań Grupy Analizy Mionowej dotyczył badania zewnętrznego tła dla oddziaływań neutrin w detektorze ND280. Tło takie może pochodzić z promieniowania kosmicznego lub z oddziaływań neutrin z wiązką w otoczeniu detektora. Bliskie detektory znajdują się w otwartym od góry szybie o całkowitej głębokości ok. 30 m, wykopanym w ziemi i wyposażonym w betonowe ściany oraz inne wewnętrzne konstrukcje (schody, filary, podłogi).

Pierwsze oszacowanie tła od promieniowania kosmicznego przeprowadziłam już w roku 2010, kiedy jeszcze program rekonstruujący tory cząstek w ND280 był w fazie testów. Dlatego też oszacowanie zostało wykonane zarówno dla zrekonstruowanych torów, jak i dla sygnałów od pojedynczych liczników SMRD, zarejestrowanych poza czasem przyścia wiązki. W tym drugim przypadku częstość sygnałów w danych porównałam z przewidywaną częstością sygnałów od mionów kosmicznych, ciemnych impulsów MPPC i szumów elektroniki. Obie metody dały porównywalne rezultaty i pokazały dobrą zgodność między danymi i przewidywaniem [16].

Drugie źródło tła zewnętrznego związane jest z oddziaływaniem neutrin w otoczeniu detektora. Dla wiązki neutrin nie jest możliwe uzyskanie takiego zogniskowania, jak dla cząstek naładowanych, jest ona zawsze dość szeroka (dzięki czemu można wykorzystać efekt *off-axis* polegający na zwężeniu widma energii neutrin lecących pod pewnym kątem do osi wiązki) i oświetla spory obszar wokół detektorów. Wiązka nie jest też, jak w przypadku wiązek akceleratorowych, prowadzona wewnątrz rury próżniowej. Ziemia wokół szybu i beton użyty do konstrukcji szybu, które mają bardzo dużą masę, są zatem tarczą dla oddziaływań neutrin, a produkty tych oddziaływań mogą dotrzeć do detektora. W przypadku cząstek naładowanych idealny detektor powinien móc je odróżnić na podstawie początkowego punktu zrekonstruowanego toru, jednakże błędy rekonstrukcji lub nieefektywność detekcji nie pozwalają odrzucić wszystkich takich przypadków. Dodatkowo, w oddziaływaniach neutrin oraz podczas przejścia produktów oddziaływania przez ziemię powstają liczne cząstki neutralne, które w detektorze mogą wtórnie oddziaływać i produkować cząstki naładowane — takie przypadki są nieodróżnialne od przypadków oddziaływań neutrin w detektorze. Dlatego też konieczne było przygotowanie dedykowanej symulacji oddziaływań w ziemi, która pozwoliłaby przewidzieć wkład od fałszywych sygnałów z zewnętrznych oddziaływań w próbkach zdarzeń wyselekcjonowanych w detektorze i używanych do analizy fizycznej. Konieczne też było zbadanie zgodności takiej symulacji z danymi, w tym celu można użyć przychodzących z ziemi cząstek naładowanych.

Prace nad symulacją rozpoczęłam w 2011. Pierwszym pilnym etapem pracy było znalezienie optymalnej wielkości objętości, w której będą symulowane oddziaływania, oraz rozmiaru wycinka kąтового wiązki. Wynikało to z technicznego rozwiązania stosowanego w T2K do symulacji oddziaływań neutrin: przewidywany strumień przychodzących neutrin jest obliczany przez Grupę Wiazki dla płaszczyzny o określonych wymiarach umieszczonej w określonej odległości od źródła. W tym czasie przewidywania takie istniały tylko dla płaszczyzn umieszczonych tuż przed detektorem, dlatego też nie nadawały się one do moich celów.

Wspólnie z koleżanką z grupy warszawskiej użyłyśmy tych istniejących płaszczyzn do ekstrapolacji wstecz kierunków neutrin aż do punktu produkcji, dzięki czemu byłyśmy potem w stanie oszacować przybliżone strumienie neutrin w dowolnym miejscu między punktem produkcji a detektorem. Używając uproszczonego modelu oddziaływań określiliśmy optymalną objętość do symulacji, biorąc pod uwagę również ilość czasu potrzebną do generacji odpowiednio dużej liczby oddziaływań. Strumień neutrin dla określonej przez nas płaszczyzny został obliczony przez Grupę Wiazki, dołączono go też do listy strumieni, jakie rutynowo przygotowywane są dla eksperymentu przy uaktualnianiu analizy.

Używając prawidłowego strumienia i generatora oddziaływań neutrin NEUT przygotowałam pierwsze próbki oddziaływań neutrin poza ND280 dla współpracy T2K. Obliczyłam też wkład od takich oddziaływań do próbek wybieranych w poddetektorze scyntylacyjnym FGD1 (części ND280) i używanych w analizie danych z bliskiego detektora prowadzącej do zmniejszenia błędów w studiach oscylacji neutrin. Przeanalizowałam przyczyny, dla których oddziaływania spoza detektora przeszły stosowane w analizie cięcia, co przyczyniło się do poprawienia błędów rekonstrukcji i ponad dwukrotnego spadku zanieczyszczenia od zewnętrznych oddziaływań dla kolejnych analiz przeprowadzonych w następnych latach. Oszacowałam również błąd systematyczny wkładu zewnętrznych oddziaływań, używając w tym celu torów naładowanych cząstek wchodzących przez przednią ścianę detektora [17].

W selekcji próbek do analizy fizycznej używane jest veto na tory przychodzące z przedniej części detektora. Oszacowałam wpływ fałszywego veta pochodzącego od zewnętrznych oddziaływań, które nakładają się na poprawny przypadek oddziaływania w detektorze (efekt *pile-up*), na efektywność selekcji.

Analizę zanieczyszczenia i fałszywego veta przeprowadziłam również dla promieniowania kosmicznego, używając przygotowanej przeze mnie symulacji oraz torów cząstek zawartych w tzw. *empty spills*, tj. przypadków zebranych, kiedy detektor pracował w trybie wyzwalania zsynchronizowanym z czasem przyjścia wiązki, natomiast sama wiązka neutrin była wyłączona. Użycie takich danych gwarantowało zbieranie wyłącznie przypadkowych mionów kosmicznych i identyczne zachowanie detektora jak dla przypadków oddziaływań neutrin z wiązki. Oszacowane tło okazało się zaniedbywalne [18].

Opisana analiza tła zewnętrznego jest całkowicie moim wkładem w analizę T2K i została wykorzystana we wszystkich wynikach oscylacyjnych i pomiarach przekrojów czynnych opublikowanych po 2012 roku (pozycje 1–4, 7–10, 13–18 w liście publikacji T2K, załącznik nr 3a). Metody i wyniki swojej pracy prezentowałam wielokrotnie na zebraniach Grupy Analizy Mionowej i nadrzędnego względem niej zespołu bliskiego detektora. Analiza jest aktualizowana dla nowszych danych oraz kiedy wprowadzane są istotne zmiany w mechanizmie symulacji oddziaływań, strumieniu neutrin lub rekonstrukcji. Aktualizacja ta jest w dalszym ciągu moim zadaniem w Grupie Analizy Mionowej, z wyjątkiem poprawki *pile-up*, którą przekazałam innym członkom grupy.

W 2013 roku współpraca T2K po raz pierwszy zaobserwowała oscylacje neutrin w procesie *appearance*, tj. pojawienie się w wiązce neutrin o innym zapachu [19]. Odkrycie oscylacji

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ było możliwe głównie dzięki ulepszeniom w procesie analizy, zarówno w bliskim, jak i dalekim detektorze. Poza moim wkładem w analizę bliskiego detektora, podanym wyżej, byłam jednym z czterech recenzentów not technicznych opisujących nowy algorytm rekonstrukcji w dalekim detektorze, nową metodę odrzucania tła od pionów neutralnych, oraz ich testy [20, 21]. Metoda ta z sukcesem przeszła weryfikację i jest od tej pory używana przy otrzymywaniu wszystkich wyników oscylacyjnych publikowanych przez T2K (pozycje 1, 2, 6–8, 11, 14, 15) w liście publikacji T2K, załącznik nr 3a).

Jesienią 2013 roku zaproponowano mi objęcie funkcji koordynatora Grupy Analizy Mionowej ND280 (trzeci etap mojego zaangażowania w T2K), początkowo na okres dwóch lat, a jesienią 2015 zadecydowano o przedłużeniu mojej funkcji. Ze względu na swoją ważność dla eksperymentu i dużą aktywność grupa ma trójkę koordynatorów.

Kiedy zostałam koordynatorem, głównym zadaniem grupy było przygotowanie nowej analizy w bliskim detektorze. Ulepszenie poprzedniej analizy było konieczne z trzech względów, opisanych dokładniej poniżej: wprowadzenia próbek oddziaływań antyneutrin, zmian w oprogramowaniu dla bliskiego detektora oraz zmniejszenia dominującego wkładu do błędu systematycznego w analizach oscylacyjnych.

Obserwacja oscylacji $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ otworzyła drogę do poszukiwania łamania symetrii kombinowanej CP w sektorze leptonowym, co powinno przejawiać się różnymi prawdopodobieństwami oscylacji w powyższym kanale dla neutrin i antyneutrin [22]. Dlatego też współpraca T2K zdecydowała się na zbieranie danych z wiązką antyneutrinową od roku 2014. Stąd konieczne stało się wprowadzenie do analizy mionowej ND280 dodatkowych próbek oddziaływań antyneutrin. Byłam osobą nadzorującą przygotowywanie metod selekcji przypadków antyneutrinowych, które zostały potem zastosowane na danych zebranych w latach 2014–2015, i włączone do oficjalnej analizy w 2015 roku. Przeprowadziłam też analizę oddziaływań zewnętrznych dla wiązki antyneutrinowej.

Objęcie przez mnie funkcji koordynatora zbiegło się w czasie również z wprowadzeniem istotnych zmian niemal we wszystkich obszarach oprogramowania dotyczących bliskiego detektora: w przewidywanym strumieniu neutrin (dzięki nowym danym z eksperymentu NA61 / SHINE dotyczącym produkcji hadronów w zderzeniach proton-węgiel [23]), generatorze oddziaływań neutrin, kalibracji detektora i rekonstrukcji. W oczekiwaniu na zbieranie danych z wiązką antyneutrinową koordynowałam część testów poprawności nowych symulacji, w których brałam również aktywny udział, znajdując przy tym kilka błędów w rekonstrukcji długich torów, dotyczących niepoprawnego składania segmentów torów z różnych podsystemów detektora.

Zmiany w kalibracji i oprogramowaniu spowodowały konieczność powtórzenia oceny błędów systematycznych oraz pozwoliły na ulepszenie metod przy tym stosowanych. Oprócz powtórzenia analizy tła zewnętrznego byłam odpowiedzialna także za nadzór nad osobami pracującymi nad niepewnościami związanymi z poddetektorem FGD. Jedną z tych niepewności, związana z rekonstrukcją krótkiego toru w obecności długiego toru mionowego, była opracowywana przez doktorantkę WF UW bezpośrednio pod moją opieką. Przygotowałam jej środowisko pracy i próbki zdarzeń, pomagałam w przygotowywaniu programów i skryptów, oraz interpretacji danych. Byłam również recenzentem noty technicznej opisującej metodykę i wyniki jej studiów [24].

Trzecim ważnym zadaniem Grupy Analizy Mionowej w latach 2014–2015 było wprowadzenie próbek oddziaływania neutrin na wodzie. Próbkę używaną do tej pory zawierały przypadki z oddziaływaniem neutrin w poddetektorze FGD1, składającym się w całości z pasków plastikowego scyntylatora, oddziaływania zachodziły więc głównie na jądrach węgla. Ponieważ

daleki detektor wypełniony jest wodą, część błędów systematycznych związanych z jądrem-tarczą nie mogła być zredukowana przez pomiar z bliskiego detektora i stanowiła dominujący wkład do całkowitego błędu systematycznego w analizach opisanych m.in. w publikacjach [19, 25, 26]. Pomiar oddziaływań na wodzie w ND280 miał na celu poprawienie tego.

ND280 zawiera dwa poddetektory FGD, jeden zbudowany wyłącznie z warstw scyntylatora (FGD1, tylko on był używany dotychczas w analizie), a drugi zawierający między warstwami scyntylatora warstwę wody (FGD2). Dodanie próbek oddziaływań na wodzie w FGD2 wymagało przygotowania metod selekcji i oszacowania dla niej błędów systematycznych, analogicznie jak dla analizy w FGD1. Dodatkowo należało uwzględnić możliwe korelacje między błędami w poddetektorach FGD1 i FGD2. Mój wkład tutaj dotyczył analizy tła zewnętrznego i nadzoru nad pracą dotyczącą niepewności związanych z poddetektorem FGD2.

Ulepszenia wprowadzone do analizy podczas tego etapu mojej pracy w T2K zostały podsumowane w obszernej notce technicznej (ponad 170 stron), której byłam głównym redaktorem. Nota opisuje wszystkie błędy systematyczne i metody ich propagacji, oraz selekcję próbek oddziaływań z wiązki neutrinowej [27]. Selekcja próbek oddziaływań z wiązki antyneutrinowej jest opisana w dwóch innych notach, których byłam recenzentem [28, 29].

Opracowane w Grupie Analizy Mionowej nowe próbki są stopniowo wprowadzane do analiz oscylacyjnych i pomiarów przekrojów czynnych. Próbki dla wiązki antyneutrinowej zostały już użyte w pierwszym pomiarze oscylacji $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ [30]. Próbki z oddziaływaniami na wodzie natomiast zostały wprowadzone po raz pierwszy w kombinowanej analizie oscylacji neutrin i antyneutrin, będącej obecnie (w kwietniu 2016 r.) na ukończeniu.

Grupa Analizy Mionowej kontynuuje pracę nad wprowadzaniem kolejnych próbek, wykorzystując nowe możliwości dane przez wspomniane wyżej zmiany kalibracji i oprogramowania. W końcowych fazach przygotowań są m.in. próbki o znacząco zwiększonej akceptacji kątowej, gdzie wykorzystuje się czas przelotu do identyfikacji mionów wyemitowanych pod kątem większym niż 90 stopni, oraz wyodrębniona dla wiązki antyneutrinowej próbka oddziaływań z produkcją jednego pionu ujemnego, wzbogacona w oddziaływania rezonansowe. Jestem szczególnie zaangażowana w te drugie studia, gdzie pracuję nad migracją przypadków oraz przygotowuję propagację błędów systematycznych [31].

Próbki, których wprowadzenie będzie możliwe w nieco dalszej przyszłości, to oddziaływania neutrin w poddetektorze POD, wyspecjalizowanym w detekcji pionów neutralnych, oraz próbki mionów pochodzących z oddziaływań zewnętrznych. Analiza, którą przeprowadziłam badając tło od oddziaływań zewnętrznych, pokazała, że miony przychodzące z zewnątrz i penetrujące ND280 na głębokość ok. 2.5 m (przechodzące przez cały poddetektor POD) zostały wyprodukowane przez wysokoenergetyczne neutrina, które w większości pochodzą z rozpadów kaonów [32]. Jest to taki obszar strumienia, który był słabo pokryty przez dotychczas używane próbki oddziaływań neutrin w poddetektorach FGD. Dodatkowo, dzięki olbrzymiej masie ziemi, w której zachodzą oddziaływania, liczba przychodzących mionów z oddziaływań zewnętrznych pokrywających tę słabo znaną część widma energii neutrin jest wielokrotnie większa niż dla próbek zdarzeń wyselekcjonowanych w FGD. Przeprowadzone przeze mnie oszacowanie błędów systematycznych dla takich mionów pokazuje też, że pomimo braku danych na temat gęstości ziemi, niepewności dla próbek zewnętrznych mionów i dla próbek w FGD są porównywalne. Końcowe wyniki mojej analizy były prezentowane na zebraniach Grupy Analizy Mionowej, a niedawno (styczeń 2016) również na zebraniu koordynatorów bliskiego detektora oraz plenarnym zebraniu współpracy, są też opisane w dwóch notach technicznych [32, 33].

Poza uczestnictwem w pracach Grupy Analizy Mionowej, od grudnia 2013 jestem również członkiem Analysis Steering Group, która zajmuje się planowaniem przyszłych kierunków i ce-

lów T2K. W latach 2014–2015 pełniłam też funkcję łącznika między Grupą Analizy Mionowej a grupami zajmującymi się analizą oscylacyjną.

W trakcie uczestnictwa w eksperymencie T2K brałam również udział w licznych dyżurach (ang. *shifts*) przy bliskim detektorze, najczęściej pełniąc funkcję tzw. *shift leadera*, osoby odpowiedzialnej za całość operacji detektora podczas dyżuru. Wielokrotnie pełniłam również funkcję eksperta odpowiedzialnego za detektor SMRD, a w 2015 roku eksperta od wszystkich detektorów scyntylacyjnych używających systemu elektroniki Trip-T w ND280.

W latach 2008–2011 brałam też udział w zbieraniu danych i wymianie elektroniki odczytu w eksperymencie NA61/SHINE [34], dostarczającym danych o produkcji hadronów w zderzeniach proton-węgiel, które są używane w procesie przewidywania wiązki neutrin T2K.

W ramach planowania przyszłych eksperymentów neutrinowych nawiązałam współpracę z grupą projektującą detektor TITUS, który jest proponowanym detektorem pośrednim w odległości 2 km od źródła neutrin dla projektu Hyper-Kamiokande [35, 36]. Przygotowałam dla TITUSa symulację oddziaływań zewnętrznych, zostałam także niedawno wybrana na recenzenta wewnętrznego przygotowywanego propozala. Jestem również członkiem proto-współpracy Hyper-Kamiokande i wewnętrznym recenzentem rozdziału w przygotowywanym propozalu, dotyczącego tła pochodzącego spoza detektora.

5 Prezentacja osiągnięcia naukowego

zgodnego z wymogiem Art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami).”

Jako osiągnięcie naukowe przedstawiam monografię pt.:

Improving neutrino oscillation analysis with near detector measurements in T2K experiment

wydaną nakładem Narodowego Centrum Badań Jądrowych, ISBN 978-83-941410-3-5, której jestem jedynym autorem.

Praca napisana została w języku angielskim, tłumaczenie tytułu na język polski: *Ulepszenie analizy oscylacji neutrin dzięki pomiarom w bliskim detektorze eksperymentu T2K*.

Przedstawiona monografia opisuje analizę oddziaływań neutrin w bliskim detektorze pozaosiowym eksperymentu T2K, który dostarcza referencyjnych pomiarów wiązki neutrin blisko punktu jej tworzenia, kiedy prawdopodobieństwo oscylacji jest zaniedbywalnie małe. Wyselekcjonowane próbki oddziaływań neutrin z wiązki, wzbogacone w określone rodzaje reakcji służą do porównania danych z bliskiego detektora z przewidywaniami symulacji Monte Carlo. Dzięki temu parametry używane w przewidywaniach strumienia neutrin oraz w modelowaniu różnych rodzajów oddziaływań neutrin z materią mogą być zmienione tak, by osiągnąć najlepszą zgodność symulacji z danymi. Dopasowane parametry używane są następnie do przewidywania obserwacji w dalekim detektorze. Dzięki tej procedurze błędy systematyczne eksperymentu są znacząco zredukowane, co jest niezbędne, by osiągnąć czułość konieczną do precyzyjnych pomiarów parametrów oscylacji neutrin i poszukiwania subtelnych efektów oscylacji związanych z małym kątem mieszania θ_{13} i potencjalnym łamaniem parzystości kombinowanej CP w sektorze leptonowym.

Moja dotychczasowa praca badawcza w eksperymencie T2K była poświęcona głównie analizom związanym z bliskim detektorem. Od początku zbierania danych w eksperymencie zajmowałam się tym pochodzącym ze źródeł na zewnątrz detektora (promieniowanie kosmiczne, oddziaływanie neutrin z wiązką w szybie detektora i otaczającej go ziemi) i związanym z nim błędem systematycznym, a od jesieni 2013, jako koordynator Grupy Analizy Mionowej, byłam odpowiedzialna za całość przygotowań związanych z wprowadzeniem do analizy nowych próbek pozwalających na zmniejszenie dominującego wkładu do błędu systematycznego w analizie oscylacji, oraz uwzględnienie nowych danych zbieranych przy użyciu wiązki antyneutrin (od wiosny 2014 roku). Porównanie oscylacji neutrin i antyneutrin to sposób na poszukiwanie efektu łamania symetrii kombinowanej CP w sektorze leptonowym, gdzie kluczowa jest czułość eksperymentu i mały błąd systematyczny, osiągalny dzięki użyciu bliskiego detektora, co zostało opisane w monografii.

Monografia rozpoczyna się krótkim wstępem przedstawiającym najważniejsze odkrycia i pytania związane z fizyką neutrin.

W rozdziale pierwszym prezentuję krótko fenomenologiczny opis mieszania stanów zapachowych i masowych neutrin, oraz mechanizm oscylacji neutrin. Podaję też przegląd aktualnych wyników dotyczących oscylacji neutrin oraz dotychczasowe rezultaty poszukiwania łamania symetrii CP.

Ponieważ znajomość przekrojów czynnych jest kluczowa w badaniach oscylacji, przedsta-

wiam tam również podstawowe informacje na temat procesów oddziaływań neutrin o energiach rzędu 1 GeV, jakie badane są w eksperymencie T2K.

Rozdział drugi przybliża eksperyment T2K i jego cele. Opisane są tu trzy elementy eksperymentu: produkcja wiązki neutrin dzięki rozpadom zogniskowanych mezonów (głównie pionów i kaonów) z uwzględnieniem efektu wiązki pozaosiowej (*off-axis*), zespół dwóch bliskich detektorów oraz daleki detektor. Przedstawiona jest również idea pomiarów oscylacyjnych, opisana na przykładzie kombinowanej analizy próbek oddziaływań ν_μ i ν_e , przeprowadzonej przez zespół T2K w 2014 roku [26]. Opisane są metody uzyskiwania próbek danych i przewidywań oraz metoda dopasowania używana w celu otrzymania wartości parametrów oscylacji i ich poziomów ufności. Pokazany jest również efekt użycia pomiarów z bliskiego detektora, skutkujący trzy-czterokrotnym zmniejszeniem błędu systematycznego. Rozdział kończy przedstawienie obecnego stanu i planów eksperymentu T2K.

Dalsza część monografii poświęcona jest analizie w bliskim detektorze, w której brałam udział zarówno jako osoba wykonująca część pracy, jak i jako koordynator pracy zespołu.

Rozdział trzeci przedstawia krótko budowę bliskiego detektora pozaosiowego (zwanego ND280), ze szczególnym uwzględnieniem elementów, które użyte są w opisywanej analizie. Zawiera on również podstawowe wiadomości na temat metody kalibracji i rekonstrukcji w detektorze, pozwalające ocenić jakiego typu informacje są dostępne do wykorzystania w analizie.

Rozdział czwarty przedstawia szczegółowo wkład bliskiego detektora do analizy oscylacyjnej. Opisane są tu zarówno trzy próbki oddziaływań neutrin używane we wcześniejszej, przykładowej analizie z rozdziału drugiego, jak i nowe, w których wprowadzeniu miałam bardziej znaczący udział (większy niż poprzednio udział w samej analizie oraz koordynacja pracy pozostałych członków Grupy Analizy Mionowej).

Oddziaływania neutrin (lub antyneutrin) mionowych przez prądy naładowane selekcjonowane są w detektorach scyntylacyjnych FGD i identyfikowane dzięki pomiarom strat energii wiodącej cząstki w gazowych komorach projekcji czasowej. Inkluzyjna próbka oddziaływań jest następnie dzielona na podpróbki wzbogacone w konkretny typ reakcji i pokrywające różne obszary energii neutrin. Podział taki pozwala zwłaszcza na lepsze dopasowanie parametrów używanych w modelowaniu różnych typów oddziaływań (quasi-elastyczne, rezonansowe, koherentne, głęboko-nieelastyczne oraz postulowane wielonukleonowe).

Metoda podziału na podpróbki bazuje na obecności i krotności pionów w analizowanym przypadku oddziaływania lub na krotności torów. Przeanalizowanie przez mnie przyczyn migracji przypadków między podpróbkami pozwala na planowanie ulepszeń w rekonstrukcji lub selekcji w przyszłości.

Rozdział czwarty zawiera również przegląd efektów systematycznych detektora mających wpływ na selekcjonowane próbki. Oszacowanie błędów odbywa się poprzez porównanie danych i symulacji dla próbek kontrolnych o maksymalnie zbliżonych parametrach kinematycznych. Szczegóły estymacji błędów nie są zawarte w monografii (z wyjątkiem tła zewnętrznego, którego analiza przeprowadzona była wyłącznie przeze mnie), podany jest natomiast skrótowy opis próbki kontrolnej i obserwowanych różnic między danymi i symulacją. Różnice te są następnie propagowane, tj. sprawdzany ich jest wpływ na końcowe liczby i rozkłady wyselekcjonowanych przypadków, co pozwala obliczyć ostateczny błąd systematyczny próbki.

Rozkłady pędów i kątów emisji mionów, wraz z macierzą kowariancji błędów, użyte są w wielowymiarowym dopasowaniu symulacji Monte Carlo do zarejestrowanych danych. Krótki opis takiego dopasowania jest również zawarty w rozdziale czwartym, łącznie z otrzymanym w efekcie błędem systematycznym dla najnowszych analiz oscylacyjnych T2K: zanikania antyneutrin mionowych (ogłoszone w 2015, [30]) i kombinowanej analizy oscylacji neutrin i an-

tyneutrino mionowych i elektronowych (przygotowana do publikacji w 2016).

Rozdział czwarty zamyka zestawienie planów dotyczących dalszego ulepszania analizy bliskiego detektora, które koordynuję. Zalicza się tu zarówno badanie możliwości poprawienia czystości już istniejących próbek poprzez użycie dodatkowych danych z detektora, poszukiwanie metod zmniejszenia błędów systematycznych detektora, jak i wprowadzenie nowych próbek dostarczających nowych informacji (jedna z nich, badana przeze mnie, opisana jest dalej w monografii).

Rozdziały od piątego do siódmego przedstawiają bliżej tę część bieżącej i przyszłej analizy w bliskim detektorze, która została przygotowana wyłącznie przeze mnie i związana jest z tłem zewnętrznym pochodzącym z oddziaływań neutrin z wiązką T2K na zewnątrz detektora oraz z promieniowaniem kosmicznym.

W rozdziale piątym zawarty jest opis symulacji oddziaływań neutrin na zewnątrz bliskiego detektora. Częstki pochodzące z tych oddziaływań mogą wejść do detektora i zaburzać pomiar oddziaływań w samym detektorze, przez co bardzo ważne jest ich skuteczne przewidywanie. Symulację tę przygotowałam i przeprowadziłam po raz pierwszy na przełomie lat 2011–2012 i od tego czasu jest ona włączona w oficjalny pakiet oprogramowania i analizy eksperymentu. W rozdziale podane są podstawowe informacje na temat cząstek powstających w otoczeniu oraz wchodzących do detektora.

Estymacja tła od oddziaływań poza detektorem w wyselekcjonowanych próbkach opisanych w rozdziale czwartym jest przedstawiona w rozdziale szóstym, łącznie z oszacowaniem błędu systematycznego. Rozdział ten zawiera też oszacowanie tła od promieniowania kosmicznego, które, jak się okazuje, może zostać bezpiecznie zaniedbane.

Rozdział siódmy prezentuje moją ideę wykorzystania mionów pochodzących z oddziaływań neutrin na zewnątrz detektora jako dodatkowego źródła informacji o wiązce neutrin. Miony takie zostały w większości wyprodukowane przez neutrina z wysokoenergetycznego krańca widma, które pochodzą w dużej części z rozpadów kaonów. Kaony są też głównym źródłem zanieczyszczenia wiązki neutrin mionowych pierwotnymi neutrinami elektronowymi, które stanowią tło dla poszukiwania oscylacji w kanale $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, przez co informacja ich dotycząca jest bardzo cenna. W rozdziale tym zaprezentowałam selekcję takich próbek mionów, zarówno dla wiązki neutrinowej, jak i antyneutrinowej, znacząco wzbogaconych w składową kaonową w porównaniu z próbkami obecnie używanymi w analizie, oraz przeprowadziłam dla nich oszacowanie błędu systematycznego.

Wreszcie, dodatek A przedstawia wykorzystanie mojej koncepcji symulacji oddziaływań na zewnątrz detektora przy projektowaniu nowego detektora TITUS, mającego w przyszłości służyć do dalszej redukcji błędów systematycznych w projekcie Hyper-Kamiokande.

Literatura

- [1] S. Amerio *et al.*, “Design, construction and tests of the ICARUS T600 detector”, Nucl. Instrum. Meth. A 527 (2004) 329.
- [2] F. Arneodo *et al.*, “An external trigger system for the ICARUS T600 test”, ICARUS-TM/2000-05.
- [3] J. Lagoda *et al.*, “Electron Drift Velocity measurements from the T600 half-module test”, ICARUS-TM/2002-17.

- [4] G. Battistoni *et al.*, “Preliminary analysis of cosmic ray induced interactions with π^0 and η^0 production”, ICARUS-TM/2004-14.
- [5] S. Amoruso *et al.*, “Analysis of the liquid Argon purity in the ICARUS T600 TPC”, Nucl. Inst. Meth. A 516 (2004) 68.
- [6] A. Ankowski *et al.*, “Energy reconstruction of electromagnetic showers from π^0 decays with the ICARUS T600 Liquid Argon TPC”, Acta Phys. Polon. B 41 (2010) 103.
- [7] R. Sulej *et al.*, “Search for CC tau neutrino interactions in CNGS beam using neural network”, ICARUS-TM/20004-12.
- [8] J. Lagoda *et al.*, “Polarization effects in tau production by neutrinos”, Acta Phys. Polon. B 38 (2007) 2083.
- [9] C. Anderson *et al.*, “The ArgoNeuT Detector in the NuMI Low-Energy beam line at Fermilab”, JINST 7 (2012) 10019.
- [10] LAGUNA-LBNO Deliverables for European Commission: S. K. Agarwalla *et al.*, “Optimised sensitivity to leptonic CP violation from spectral information: the LBNO case at 2300 km baseline”. S. K. Agarwalla *et al.*, “The LBNO long baseline oscillation sensitivities with two conventional neutrino beams at different baselines”.
- [11] S. K. Agarwalla *et al.*, “The mass-hierarchy and CP-violation discovery reach of the LBNO long-baseline neutrino experiment”, JHEP 1405 (2014) 094.
- [12] K. Abe *et al.*, “The T2K Experiment”, Nucl. Instrum. Meth. A 659 (2011) 106.
- [13] S. Aoki *et al.*, “The T2K Side Muon Range Detector”, Nucl. Instrum. Meth. A 698 (2013) 135.
- [14] A. Vacheret *et al.*, “Characterization and Simulation of the Response of Multi Pixel Photon Counters to Low Light Levels”, Nucl. Instrum. Meth. A656 (2011) 1, 69.
- [15] A. Kiliński, „Badanie efektywności liczników w bliskim detektorze eksperymentu T2K przy użyciu mionów atmosferycznych”, praca magisterska, 2011.
- [16] K. Kowalik, J. Lagoda, W. Oryszczak, P. Przewlocki, “Off-bunch background study”, T2K-TN-024 (2010).
- [17] K. Kowalik, J. Lagoda, “The simulation of beam neutrinos interactions outside the ND280 detector”, T2K-TN-077 (2011, 2012, 2013).
- [18] J. Lagoda, “Estimation of the cosmic muons background”, T2K-TN-112 (2012, 2013, 2014).
- [19] K. Abe *et al.*, “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 061802.
- [20] S. Berkman *et al.*, “fitQun: A New Reconstruction Algorithm for Super-K”, T2K-TN-146 (2013).

- [21] S. Berkman *et al.*, “Data/Monte Carlo Simulation Comparisons with fitQun ”, T2K-TN-153 (2013).
- [22] K. Abe *et al.*, “Neutrino oscillation physics potential of the T2K experiment”, PTEP 2015 (2015) 043C01.
- [23] N. Abgrall *et al.*, “Measurements of $\pi^\pm$, $K^\pm$, K_S^0 , Λ and proton production in proton–carbon interactions at 31 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS”, Eur. Phys. J. C76 (2016) 2, 84.
- [24] W. Oryszczak, W. Warzycha, “FGD systematics: PID and IsoRecon hybrid efficiency”, T2K-TN-223 (2015).
- [25] K. Abe *et al.*, “Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter θ_{23} from Muon Neutrino Disappearance in an Off-Axis Beam”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 181801.
- [26] K. Abe *et al.*, “Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with 6.6×10^{20} protons on target”, Phys. Rev. D 91 (2015) 072010.
- [27] P. Bartet *et al.*, “ ν_μ CC event selections in the ND280 tracker using Run 2+3+4”, T2K-TN-212 (2015).
- [28] V. Berardi *et al.*, “CC $\bar{\nu}_\mu$ event selection in the ND280 tracker using Run 5c anti-neutrino beam data”, T2K-TN-224 (2015). Uzupełnienie: “CC $\bar{\nu}_\mu$ event selection in the ND280 tracker using Run 5c and Run 6 anti-neutrino beam data”, T2K-TN-246 (2015).
- [29] V. Berardi *et al.*, “ND280 Tracker analysis of ν_μ Contamination In AntiNu Beam in Run5c data”, T2K-TN-227 (2015). Uzupełnienie: “CC ν_μ background event selection in the ND280 tracker using Run 5c+Run 6 anti-neutrino beam data”, T2K-TN-248 (2015).
- [30] K. Abe *et al.*, “Measurement of muon anti-neutrino oscillations with an accelerator-produced off-axis beam”, arXiv:1512.02495 [hep-ex].
- [31] G. de Rosa *et al.*, “CC antineutrino multipion studies”, T2K-TN-273 (2016).
- [32] J. Lagoda, “Probing high energy, kaon-originated neutrinos with sand muons”, T2K-TN-289 (2016).
- [33] J. Lagoda, “Sand muon studies in ND280”, T2K-TN-271 (2015).
- [34] N. Abgrall *et al.*, “NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system”, JINST 9 (2014) P06005.
- [35] P. Lasorak, N. Prowse, “TITUS: An Intermediate Distance Detector for the Hyper-Kamiokande Neutrino Beam”, arXiv: 1504.08272 [physics.ins-det].
- [36] K. Abe *et al.*, “Letter of Intent: The Hyper-Kamiokande Experiment — Detector Design and Physics Potential”, arXiv: 1109.3262 [hep-ex].

Justyna Lagoda