

Warszawa, 24 lipca 2018

dr Katarzyna Grzelak
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

Autoreferat

Spis treści

1 Dane osobowe	1
2 Dyplomy i stopnie naukowe	1
3 Zatrudnienie	2
4 Przebieg pracy naukowej	2
5 Prezentacja osiągnięcia naukowego	6

1 Dane osobowe

Imię i Nazwisko: Katarzyna Grzelak

2 Dyplomy i stopnie naukowe

- Doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski.
Tytuł pracy: „Two-photon Production of Charged Meson Pairs at LEP”.
Opiekun - dr hab. Krzysztof Doroba.
Praca wyróżniona przez Radę Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.
Rok uzyskania: 2000.
- Magister fizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski.
Tytuł pracy: „Badanie możliwości detekcji mezonu ϕ w eksperymencie NA49”.
Opiekun - dr Helena Białkowska.
Rok uzyskania: 1993.

Katarzyna Grzelak

3 zatrudnienie

- Od listopada 2017 – Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, zatrudnienie na stanowisku starszego wykładowcy.
- 2001–2017 – Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, zatrudnienie na stanowisku adiunkta.
- Styczeń 2003 – styczeń 2005 – University of Oxford, Department of Physics, indywidualne 2-letnie stypendium Unii Europejskiej w ramach programu *Marie Curie Individual Fellowships*, otrzymywane po doktoracie. Zatrudnienie na stanowisku Post-doctoral Research Assistant. W tym czasie urlop naukowy z Uniwersytetu Warszawskiego.
- Październik 1998 – luty 2001 – etat inżynieryjno-techniczny, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki.
- 1993–1998 – studia doktoranckie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

4 Przebieg pracy naukowej

Począwszy od pracy magisterskiej, moje zainteresowania naukowe związane są z fizyką cząstek elementarnych i zdecydowanie wykraczają poza jedną, ściśle określoną tematykę. Pracę magisterską wykonywałam w warszawskiej grupie zajmującej się fizyką ciężkich jonów. Była ona poświęcona możliwościom detekcji mezonu ϕ w eksperymencie NA49 w ośrodku Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN w Szwajcarii. Napisanie pracy magisterskiej było poprzedzone miesięcznym wakacyjnym stażem w CERN. W Warszawie pracę rozpoczęłam od instalacji programu Fritiof do generacji zderzeń jądro-jądro i programu GEANT do symulacji odpowiedzi detektora. Następnie, przy użyciu wyżej wymienionych programów, przygotowałam próbkę oddziaływań relatywistycznych jąder ołowiu z tarczą ołowianą dla energii wiązki 160 GeV/nukleon i badałam możliwość obserwacji w eksperymencie NA49 mezonu ϕ rozpadającego się na dwa naładowane kaony. Zaproponowałam metodę selekcji par K^+K^- pochodzących z rozpadów mezonu ϕ i metodę wyznaczenia podstawowych parametrów tej cząstki. Przeprowadziłam także dyskusję wyników w zależności od współczynnika λ opisującego zmniejszoną produkcję kwarków dziwnych. Słuszność przewidywań, że cząstkę ϕ będzie można zaobserwować na określonym poziomie w kanale K^+K^- została potwierdzona kilka lat później. Eksperyment NA49 zastosował analogiczną procedurę do selekcji cząstek ϕ w zebranych danych i opublikował prace dotyczące produkcji tych cząstek [1, 2].

Po ukończeniu pracy magisterskiej zostałam przyjęta na studia doktoranckie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego i stałam się członkiem współpracy DELPHI, jednego z czterech eksperymentów przy akceleratorze LEP w CERN, w którym zderzane były przeciwbieżne wiązki wysokoenergetycznych elektronów i pozytonów. Warszawska grupa DELPHI była między innymi odpowiedzialna za budowę elektromagnetycznego kalorymetru HPC (Heavy Projection Chamber).

Zajmowałam się zderzeniami wysokoenergetycznych fotonów emitowanych przez wiązki elektronów i pozytonów. Tematem pracy doktorskiej była ekskluzywna produkcja par naładowanych mezonów π i K w oddziaływaniach dwóch fotonów, a jednym z jej głównych wyników pomiar przekroju czynnego na produkcję par $\pi^+\pi^-$ i K^+K^- dla dwóch energii w środku masy układu e^+e^- : $\sqrt{s}=91$ GeV i $\sqrt{s}=183$ GeV. Badałam oddziaływania dwóch kwazi-rzeczywistych fotonów, w sytuacji gdzie pierwotne elektrony i pozytony były odchylane pod tak małymi kątami, że nie były rejestrowane w żadnym z komponentów detektora. Bardzo prosty stan końcowy stanowił jednocześnie przyczynę jednego z wyzwania analizy, ponieważ układ wyzwalania eksperymentu DELPHI nie był zaprojektowany do wyboru tak zwanych nietagowanych oddziaływań foton-foton. W rezultacie

Katarzyna Gmiele

jestem autorem pierwszego, zakończonego sukcesem podejścia w eksperymencie DELPHI do wyznaczenia przy użyciu danych efektywności układu wyzwiania w trudnym kinematycznie obszarze (przypadki o niskiej krotności, z torami o małym pędzie poprzecznym).

W pracy doktorskiej szczególnie nacisk został położony na badanie słabo znanego obszaru dużych mas niezmienniczych układu dwóch fotonów, w którym można było testować modele teoretyczne oparte na perturbacyjnej chromodynamice kwantowej. Przekroje czynne na produkcję par naładowanych pionów i kaonów zostały wyznaczone w funkcji masy niezmienniczej układu foton-foton i cosinusa kąta biegunowego θ^* w układzie środka masy systemu $\gamma\gamma$ i porównane z teoretycznymi modelami. Wyniki uzyskane w czasie pracy doktorskiej były pierwszymi wynikami z eksperymentów przy akceleratorze LEP dotyczącymi ekskluzywnej produkcji naładowanych par pionów i kaonów w obszarze dużych mas niezmienniczych układu foton-foton.

Na potrzeby analizy, wszystkie pliki z wynikami symulacji oddziaływań dwufotonowych wyprodukowałam samodzielnie w Warszawie, korzystając z generatorów: Vermaseren 1.01, BDKRC (RADCOR), DIAG36 i GALUGA 2.0 i łańcucha standardowych programów eksperymentu DELPHI do symulacji odpowiedzi detektora i rekonstrukcji oddziaływań w detektorze. W latach 1993-1998 byłam odpowiedzialna za instalację i utrzymywanie w działaniu w Warszawie pakietu programów do symulacji, rekonstrukcji i analizy oddziaływań w detektorze DELPHI (DELSIM/DELANA/SKELANA) na różnych platformach UNIX'owych (IRIX, HP-UX).

W czasie pracy nad doktoratem kilkanaście razy przebywałam na krótkich, maksymalnie jednomiesięcznych pobytach w ośrodku CERN w Szwajcarii i na Uniwersytecie Pierre'a i Marii Curie, Paris VI we Francji. Brałam udział w testach starzenia się elektromagnetycznego kalorymetru HPC i wielokrotnie w zbieraniu danych w ośrodku CERN. Wyniki mojej pracy doktorskiej prezentowałam dwukrotnie na konferencjach z cyklu International Conference on The Structure and Interactions of the Photon: PHOTON'99 we Freiburgu w Niemczech i PHOTON 2001 w Asconie w Szwajcarii. W drugim przypadku prezentowałam własne wyniki z eksperymentu DELPHI i wyniki z eksperymentu ALEPH. Moja praca doktorska uzyskała dwukrotnie wsparcie z Komitetu Badań Naukowych w postaci grantu dla młodych naukowców i grantu promotorskiego.

Po ukończeniu pracy doktorskiej moje zainteresowanie skierowało się w stronę fizyki neutrin i w związku z tym złożyłam wniosek o staż po doktoracie w tej dziedzinie w ramach unijnego projektu Marie Curie Individual Fellowship. Aplikacja zakończyła się sukcesem i przez dwa lata, od stycznia 2003 do stycznia 2005, w ramach tego programu byłam zatrudniona na University of Oxford na stanowisku Research Assistant. Stałam się członkiem współpracy MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) [3] badającej zjawisko oscylacji neutrin produkowanych w ośrodku Fermilab pod Chicago w Stanach Zjednoczonych i rejestrowanych w dwóch detektorach: bliskim znajdującym się w odległości 1 km od źródła neutrin i dalekim, usytuowanym 735 km od źródła, w kopalni Soudan w stanie Minnesota.

Pracę w eksperymencie MINOS rozpoczęłam w momencie gdy daleki detektor rejestrował już oddziaływania neutrin atmosferycznych, a bliski detektor i wiązka neutrin NuMI były w trakcie budowy, dzięki czemu zdobyłam doświadczenie uczestnicząc od podstaw w procesie powstawania eksperymentu. Brałam udział w konstrukcji bliskiego detektora: zajmowałam się testami płaszczyzn złożonych z pasków scyntylatora po ich zamontowaniu na stalowych płaszczyznach w holu eksperymentu. W detektorach eksperymentu MINOS, paski scyntylatora w co drugiej płaszczyźnie umieszczone są do siebie pod kątem prostym. W związku z tym podstawowa informacja na temat oddziaływania neutrina to jego dwa - dwuwymiarowe rzuty, z których można następnie odtworzyć trójwymiarowy obraz przypadku. W takiej metodzie część informacji jest bezpowrotnie tracona, co skłoniło mnie do rozpoczęcia prac nad zupełnie nowym, trójwymiarowym podejściem do rekonstrukcji oddziaływań neutrin w detektorach eksperymentu MINOS. W rozwijanym przeze mnie trójwymiarowym algorytmie rekonstrukcja przypadków rozpoczyna się od uformowania trójwymiarowych obiektów (nazwanych przeze mnie celami), reprezentujących przecięcia pasków scyntylatora z sąsiednich płaszczyzn.

W związku z tematyką będącą przedmiotem zainteresowań grupy z Oxfordu, zajmowałam się również opracowaniem metody selekcji oddziaływań NC (z wymianą neutralnego bozonu Z). Zadaptowałam do tego celu i rozwinęłam wieloparametryczną metodę *range searching method* [4].

We wrześniu 2004 roku zostałam zaproszona do wygłoszenia referatu podsumowującego stan akceleratorowych eksperymentów neutrinowych w Stanach Zjednoczonych na sesji plenarnej Neutrino Oscillation Workshop NOW 2004 w Otranto we Włoszech.

Kontynuację pracy w eksperymencie MINOS po powrocie z Oxfordu umożliwiło uzyskanie przeze mnie rocznego grantu reintegracyjnego z Unii Europejskiej (Marie Curie Reintegration Grant). Dzięki temu grantowi w Warszawie został stworzony warsztat pracy niezbędny do analizy danych z eksperymentu MINOS. Zakupiona została macierz dyskowa i serwer do lokalnego przechowywania plików z danymi i wynikami symulacji, jak również komputer typu desktop używany przeze mnie i studentów zajmujących się analizą danych i wyników symulacji z eksperymentu MINOS. Zainstalowane zostało kompletne oprogramowanie MINOS'a, została opracowana i wprowadzona w życie automatyczna procedura kopiowania do Warszawy plików z danymi i wynikami symulacji. Stworzona została także edukacyjno-informacyjna strona WWW poświęcona fizyce neutrin [5].

Po powrocie do Warszawy stałam się członkiem Warszawskiej Grupy Neutrinowej, posiadającej duże doświadczenie w fizyce neutrin i zaangażowanej wtedy między innymi w budowę detektora ICARUS w Gran Sasso. Duża część grantu reintegracyjnego była poświęcona włączeniu się w produkcję drutów do drugiego modułu tego ciekło-argonowego detektora. Niestety w trakcie trwania grantu okazało się, że do budowy nie dojdzie i zadania sformułowane w grantie zostały w części, za zgodą Komisji Europejskiej, przeformułowane.

Dalszą kontynuację uczestnictwa w eksperymencie MINOS umożliwiło otrzymanie przeze mnie dwóch grantów (własne projekty badawcze) finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego i Narodowe Centrum Nauki. Dzięki moim staraniom Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego stał się w tym czasie (w roku 2008) oficjalnym członkiem współpracy MINOS (a następnie także członkiem współpracy MINOS+). MINOS+ to następca eksperymentu MINOS, używa tych samych detektorów co jego poprzednik MINOS, ale bada oddziaływania neutrin z wiązki o wyższej energii (ze średnią energią około 6.5 GeV w porównaniu z 3 GeV dla eksperymentu MINOS), szerszym widmie i wyższej intensywności.

Reprezentowana przeze mnie instytucja zawsze wywiązywała się z obowiązków wypływających z bycia pełnoprawnym członkiem obu eksperymentów, między innymi poprzez wypełnianie dyżurów przy zbieraniu danych i zajmowanie się rozwijaniem i badaniem jakości programów rekonstrukcyjnych. Wielokrotnie uczestniczyłam w zbieraniu danych w bliskim i dalekim detektorze. Początkowo standardowe procedury przeprowadzania dyżurów były dopiero opracowywane i wymagane były regularne wyjazdy do ośrodka Fermilab, natomiast w czasie działania eksperymentu MINOS+ stworzyłam w Warszawie zdalne centrum sterowania eksperymentem (*remote control room*) i w czasie dyżurów, z Warszawy nadzorowałam pracę bliskiego i dalekiego detektora.

Pod moją opieką, z tematyki związanej z eksperymentem MINOS powstały dwie prace magisterskie i jedna licencjacka, jak również kilkanaście krótszych studenckich projektów. Wszystkie prowadzone przeze mnie prace licencjackie i magisterskie były bardzo dobrze ocenione. Praca Macieja Pfütznera została wyróżniona przez Radę Wydziału Fizyki UW. Była także prezentowana przez autora i również bardzo dobrze oceniona na zebraniu eksperymentu MINOS+ w ośrodku Fermilab.

W eksperymencie MINOS i MINOS+ początkowo głównym przedmiotem mojego zainteresowania było poszukiwanie oddziaływań neutrin taonowych będących oczekiwanym produktem standardowych oscylacji neutrin mionowych w dalekim detektorze. Testowałam możliwości detekcji ν_τ poprzez rejestrację taonów w różnych kanałach rozpadu, za pomocą licznych zmiennych opisujących pojedyncze tory, jak również kształt oddziaływania jako całości. Dokładna analiza pokazała, że po zastosowaniu koniecznych cięć czyszczących, nawet w całej statystyce danych zgromadzonych przez eksperyment MINOS i MINOS+ można oczekiwać jedynie pojedynczych przypadków takich oddziaływań. Jednocześnie oczekiwane jest duże, bardzo trudno redukowalne tło od oddziaływania mionowych neutrin i oddziaływań z pośrednictwem bozonu Z, będące konsekwencją niskiej granularności

detektora.

Kolejnym krokiem w mojej pracy stało się poszukiwanie nowego rodzaju neutrin nazwanych sterylnymi, w tym w unikalny sposób, poprzez poszukiwanie pojawiania się neutrin taonowych w bliskim detektorze. W przypadku istnienia tylko trzech rodzajów neutrin, w niedalekich odległościach od źródła wiązki w Fermilabie, nie oczekuje się żadnych efektów oscylacyjnych, a więc także pojawiania się neutrin taonowych. Obserwacja ν_τ w bliskim detektorze byłaby więc sygnałem istnienia niestandardowych oscylacji z udziałem sterylnych neutrin.

Eksperymenty MINOS i MINOS+ stały się jednymi z wiodących eksperymentów w stawianiu ograniczeń na parametry modelu z neutrinem sterylnym. Najnowsze ograniczenia ustanowione w płaszczyźnie parametrów modelu z jednym neutrinem sterylnym ($\sin^2 \theta_{24}, \Delta m_{41}^2$) [6], są najlepszymi obecnie ograniczeniami [7, 8] w dużym obszarze $\Delta m_{41}^2 > 10^{-4} \text{ eV}^2$, gdzie Δm_{41}^2 jest różnicą kwadratów mas pomiędzy pierwszym i nowym, czwartym stanem masowym neutrina, a θ_{24} jest parametrem odpowiedzialnym za mieszanie neutrin sterylnych z mionowymi. MINOS i MINOS+ są jednocześnie jednymi z bardzo niewielu eksperymentów, które stawiają ograniczenia na kąt θ_{34} odpowiedzialny za mieszanie neutrin sterylnych z taonowymi [6].

Jednym z tematów budzących w fizyce neutrin duże zainteresowanie jest możliwość istnienia lekkiego neutrina sterylnego o masie rzędu eV, na którego istnienie wydają się wskazywać anomalie obserwowane w eksperymentach akceleratorowych LSND i MiniBooNE [21–23], reaktorowych [24] i badających neutrina słoneczne przy użyciu Galu [25, 26]. Wyniki eksperymentów akceleratorowych, obserwujących anomalne pojawianie się neutrin typu elektronowego w wiązce neutrin typu mionowego prezentowane są w płaszczyźnie parametrów ($\sin^2 2\theta_{\mu e}, \Delta m_{41}^2$) [6], gdzie $\sin^2 2\theta_{\mu e}$ jest tak zwanym kątem efektywnym zdefiniowanym jako kombinacja kwadratów dwóch elementów ($|U_{e4}|^2$ i $|U_{\mu 4}|^2$) macierzy mieszania [6] dla neutrin:

$$\sin^2 2\theta_{\mu e} \equiv 4|U_{\mu 4}|^2|U_{e4}|^2. \quad (1)$$

Pierwszy z elementów macierzy jest odpowiedzialny za mieszanie neutrin mionowych ze sterylnymi, a drugi za mieszanie neutrin elektronowych ze sterylnymi.

Eksperymenty reaktorowe badające zanikanie $\bar{\nu}_e$ ustanawiają ograniczenia na element macierzowy $|U_{e4}|^2$. Podobnie, $|U_{\mu 4}|^2$ jest ograniczane w eksperymentach takich jak MINOS, badających zanikanie ν_μ lub $\bar{\nu}_\mu$. Tak więc połączenie wyników eksperymentu MINOS z wynikami eksperymentów reaktorowych Daya Bay i Bugey-3 [20] pozwoliło na wykluczenie w bardzo dużym procencie obszaru parametrów dozwolonego dla neutrin sterylnych o masie rzędu eV. Bardzo dużą niezgodność pomiędzy obserwowanymi eksperymentalnymi anomaliami a wynikami eksperymentów badających zanikanie neutrin mionowych potwierdzają wyniki globalnych analiz, w tym najnowszej z marca 2018 [27], w której wyniki eksperymentów MINOS i MINOS+ analizowane były wspólnie z wynikami IceCube, MiniBooNE i CDHS.

Opisane powyżej anomalie i większość innych wyników doświadczalnych związanych ze sterylnymi neutrinami dotyczy mieszania pomiędzy neutrinami sterylnymi a neutrinami elektronowymi lub mionowymi. Najślabsze ograniczenia zostały ustanowione na mieszanie pomiędzy neutrinami sterylnymi a taonowymi z powodu eksperymentalnych wyzwań związanych z detekcją neutrina taonowego. W eksperymencie MINOS+ szczególnie zainteresowała mnie możliwość zbadania tego mieszania poprzez poszukiwanie anomalnej produkcji neutrin taonowych w bliskim detektorze.

Monografia opisana poniżej poświęcona jest oscylacjom neutrin w modelach z trzema i czterema neutrinami i informacjom które można uzyskać badając pojawianie się neutrin taonowych - najtrudniejszego do zaobserwowania rodzaju neutrin. Ważna część poświęcona jest metodom analizy danych i wyników symulacji, rozwiniętych przeze mnie na potrzeby badania neutrin taonowych i wyników uzyskanym w eksperymentach MINOS i MINOS+. Moja analiza zawarta w monografii została wykonana w całości w oparciu o oprogramowanie eksperymentu MINOS i MINOS+ zainstalowane w Warszawie i przy użyciu plików z danymi i wynikami symulacji obu eksperymentów, których lokalne kopie znajdują się w Warszawie.

W imieniu współpracy MINOS kilkakrotnie prezentowałam na konferencjach wyniki uzyskane przez eksperyment. Ostatnio, na początku czerwca 2018 prezentowałam swoje wyniki w postaci plakatu na największej, odbywającej się co dwa lata neutrinowej konferencji Neutrino 2018, w Heidelbergu w Niemczech [28].

Szczegółowe informacje na temat między innymi stażów naukowych, współpracy międzynarodowej, udziału w konferencjach, osiągnięć dydaktycznych, popularyzacji nauki i uzyskanych grantów i nagród znajdują się w załączniku nr 2 do wniosku.

5 Prezentacja osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe zgodne z wymaganiami art. 16, ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz.U. z 2016 r. poz 1311) przedstawiam monografię pt.:

Standard and Non-standard Neutrino Oscillations Involving Tau Neutrinos

której jestem jedynym autorem i która została wydana przez Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego w 2018 roku i otrzymała numer ISBN 978-83-235-3424-2.

Tematyka pracy dotyczy kilku, budzących obecnie bardzo duże zainteresowanie problemów z dziedziny fizyki cząstek elementarnych, a w szczególności fizyki neutrin. Praca poświęcona jest zjawisku oscylacji neutrin i możliwości obserwacji lub wykluczenia istnienia nowego typu cząstki - neutrina sterylnego, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnego mieszania neutrin taonowych z neutrinami sterylnymi. Praca stanowi unikalne spojrzenie na uzyskane dotychczas wyniki dotyczące produkcji neutrin taonowych, zawiera ich kompletne zestawienie, omówienie zastosowanych metod eksperymentalnych i przedstawia perspektywy na przyszłość dotyczące poszukiwania sterylnych neutrin poprzez badanie oddziaływań neutrin taonowych. Oddziaływań, których rejestracja jest eksperymentalnym wyzwaniem z powodu krótkiego czasu życia leptonu τ i wysokiej, progowej wartości energii potrzebnej do produkcji taonu. W związku z tymi ograniczeniami niewiele eksperymentów podjęło próbę ich poszukiwania i niewiele ma szansę to zrobić w przyszłości. Szczególnie ważną część pracy stanowi opis metod analizy danych i wyników otrzymanych przez autorkę w ramach pracy w eksperymentach MINOS i MINOS+.

Neutrino należą do rodziny cząstek elementarnych. Nie posiadają wewnętrznej struktury, nie mają ładunku elektrycznego i są kilka rzędów wielkości lżejsze od elektronów. Podobnie jak w przypadku innych cząstek elementarnych, grawitacyjne oddziaływania neutrin są zaniedbywalne. W związku z tym efektywnie neutrino oddziałują wyłącznie słabo. Obecnie znamy trzy rodzaje neutrin: neutrino elektronowe ν_e , mionowe ν_μ i taonowe ν_τ .

Neutrino mogą zmieniać swoją tożsamość w czasie propagacji w przestrzeni. Zjawisko to zostało nazwane oscylacjami neutrin. Pierwszy model oscylacji $\nu_e \longleftrightarrow \nu_\mu$ został sformułowany przez włoskiego fizyka B. Pontecorvo w 1968 roku [9] i później rozwinięty przez V. Gribov'a i B. Pontecorvo w roku 1969 [10]. Model zawarty w publikacjach z 1968 i 1969 roku był próbą wyjaśnienia wyników uzyskanych przez pierwszy eksperyment badający neutrino elektronowe produkowane we wnętrzu Słońca. W eksperymencie w kopalni Homestake w Południowej Dakocie, R. Davis obserwował [11, 12] około 30% neutrin elektronowych w stosunku do przewidywań Standardowego Modelu Słońca [13]. Pontecorvo i Gribov zapostulowali, że liczba rejestrowanych neutrin elektronowych jest mniejsza od oczekiwanej, ponieważ elektronowe neutrino mogą w drodze do Ziemi zmieniać swój zapach (oscylować) w neutrino mionowe. Istnienie takiego zjawiska ma bardzo poważne konsekwencje – neutrino żeby oscylować muszą być cząstkami posiadającymi masę. Hipoteza oscylacji została potwierdzona w roku 1998 przez eksperyment Super-Kamiokande [14], który badał oddziaływania

neutrino atmosferycznych, a następnie w latach 2001 [15] i 2002 [16] przez eksperyment SNO, który pokazał, że całkowity zmierzony strumień neutrino słonecznych jest zgodny z przewidywaniami Standardowego Modelu Słońca. Fizycy: Takaaki Kajita prowadzący analizę oscylacji w eksperymencie Super Kamiokande i Arthur B. McDonald z eksperymentu SNO zostali w 2015 roku uhonorowani Nagrodą Nobla z fizyki za ich wiodącą rolę w odkryciu oscylacji neutrino, co pokazuje że neutrino mają masę. Raymond Davis Jr otrzymał Nagrodę Nobla w 2002 roku za detekcję neutrino słonecznych.

Od czasu tych odkryć, w licznych eksperymentach badano oddziaływania neutrino pochodzących z naturalnych i sztucznych źródeł oraz ich oscylacje. Zanikanie mionowych i elektronowych neutrino zgodne z modelem oscylacji było i jest obserwowane w wielu eksperymentach: zanikanie neutrino i antyneutrino mionowych w eksperymentach badających neutrino produkowane w atmosferze Ziemi i w akceleratorach; zanikanie neutrino elektronowych w eksperymentach badających neutrino słoneczne, a zanikanie antyneutrino elektronowych w eksperymentach znajdujących się w pobliżu reaktorów. Eksperyment T2K (Tokai to Kamioka) zaobserwował jako pierwszy pojawianie się neutrino elektronowych (w wiązce neutrino mionowych) [17], a eksperyment OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) w swojej końcowej analizie z kwietnia 2018 zaprezentował 10 przypadków zgodnych z hipotezą oscylacji neutrino mionowych w neutrino taonowe [18].

Produkcja neutrino taonowych w wyniku oscylacji jest jednym z najmniej zbadanych obszarów fizyki neutrino, ponieważ poszukiwanie tego procesu jest wyjątkowo trudne. Jediną metodą odkrycia oddziaływań ν_τ jest rejestracja leptonów τ produkowanych w oddziaływaniach CC (z wymianą bozonu W). Lepton τ jest jednak krótkożyciową cząstką ze średnim czasem życia $t = (290.3 \pm 0.5) \times 10^{-15}$ s i w rezultacie w większości detektorów można zaobserwować jedynie produkty rozpadu τ . Dodatkowo nie jest możliwe sformułowanie jednego rodzaju selekcji, ponieważ taon rozpada się w wielu różnych kanałach.

Taon jest ciężką cząstką o masie około 1.7 GeV, co prowadzi do progowej energii neutrino około 3.5 GeV, potrzebnej do wyprodukowania taonu w najprostszym oddziaływaniu neutrino taonowego. Tym samym, żeby można było poszukiwać neutrino taonowych potrzebna jest wystarczająco wysoka energia wiązki neutrino. Neutrino o takiej energii można znaleźć wśród neutrino produkowanych w atmosferze ziemskiej i w akceleratorach. Większość neutrinoowych eksperymentów akceleratorowych korzysta z wiązek o niskich energiach, a wyjątkiem są tu eksperymenty OPERA i MINOS+ ze średnią energią neutrino około 17 GeV i 6.5 GeV. Eksperyment OPERA został zaprojektowany do poszukiwania oddziaływań taonowych neutrino, produkowanych w wyniku standardowych oscylacji neutrino mionowych z akceleratora. Bardzo dobra przestrzenna rozdzielczość pozwalała na identyfikację punktu rozpadu leptonu tau. Jedyne detektory eksperymentu znajdowały się w Laboratorium Gran Sasso, 730 km od źródła wiązki w CERN. Najnowsze i zarazem końcowe wyniki [18] dotyczą rejestracji dziesięciu oddziaływań neutrino taonowych z oczekiwanym tłem 2.0 ± 0.4 i oczekiwaną liczbą przypadków sygnału 6.8 ± 0.75 . W przypadku badania standardowych oscylacji neutrino atmosferycznych, eksperyment Super-Kamiokande zaprezentował w 2017 roku wyniki wykluczające hipotezę o braku produkcji neutrino taonowych na poziomie 4.6σ [19].

Model oscylacji neutrino, w którym biorą udział tylko trzy znane zapachy neutrino bardzo dobrze opisuje większość światowych danych zebranych przez neutrinoowe eksperymenty. Wyjątkiem są tu opisane w poprzednim rozdziale anomalie, które można wytłumaczyć istnieniem nowego typu neutrino - neutrino sterylne. Takie niestandardowe neutrino nie mogłyby brać udziału w słabych oddziaływaniach i w związku z tym nie jest możliwe bezpośrednie zaobserwowanie ich oddziaływania w jakimkolwiek eksperymencie. Mogłyby jednak mieszać się ze standardowymi neutrino, a tym samym modyfikować prawdopodobieństwo standardowych oscylacji.

W Standardowym Modelu (SM) cząstek i oddziaływań fundamentalnych neutrino są cząstkami bezmasowymi. Odkrycie zjawiska oscylacji neutrino powoduje konieczność uzupełnienia teorii o model nadawania neutrino masy. Istnieją różne rozszerzenia Standardowego Modelu w których neutrino nadawana jest masa i wiele z nich przewiduje istnienie prawoskrętnych neutrino, które muszą być

neutriniami sterylnymi. Tak więc możliwość istnienia sterylnego neutrina jest dobrze umotywowane teoretycznie.

Teoretycznie nie ma żadnych ograniczeń na liczbę i masę nowych neutrino. Większość wyników eksperymentalnych konfrontowanych jest więc z najprostszą hipotezą o jednym dodatkowym sterylnym neutrinie. Brak ograniczeń na masę z kolei powoduje, że sterylne neutrin o masie rzędu eV, którego istnieniem można tłumaczyć obserwowane eksperymentalne anomalie, nie jest jedynym możliwym neutrinem sterylnym.

Wiele eksperymentów poszukuje lub planuje poszukiwanie sterylnych neutrino [8, 29–53]. W rezultacie dozwolone parametry modelu z jednym sterylnym neutrinem, opisujące mieszanie neutrina sterylnego z elektronowym lub mionowym są już znacznie ograniczone. Najsłabsze eksperymentalne ograniczenia są na parametry θ_{34} i $\theta_{\mu\tau}$, opisujące mieszanie neutrino taonowych ze sterylnymi. Efektywny kąt $\sin^2 2\theta_{\mu\tau}$ został zdefiniowany [6] jako kombinacja kwadratów dwóch elementów ($|U_{\mu 4}|^2$ i $|U_{\tau 4}|^2$) macierzy mieszania dla neutrino:

$$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} \equiv 4|U_{\mu 4}|^2|U_{\tau 4}|^2, \quad (2)$$

a kąty θ_{34} i $\theta_{\mu\tau}$ są ze sobą związane w następujący sposób:

$$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} = \cos^4 \theta_{14} \sin^2 2\theta_{24} \sin^2 \theta_{34}. \quad (3)$$

Ograniczenia na te parametry mogą być uzyskane dzięki danym związanym z oddziaływaniami z wymianą neutralnego bozonu Z lub poprzez poszukiwanie anomalnej produkcji neutrino taonowych. W przypadku eksperymentu MINOS+ spektakularnym sygnałem istnienia neutrino sterylnych byłoby pojawienie się neutrino taonowych w bliskim detektorze (Rys. 2.6–2.11 w [6]), gdzie nie oczekuje się ani znaczącej liczby ν_τ z pierwotnej wiązki, ani żadnych efektów związanych z oscylacjami z udziałem trzech zapachów neutrino (Rys. 2.4, 2.5 w [6]). MINOS+ jest w dobrej sytuacji do prowadzenia takich badań i stawiania ograniczeń na $\theta_{\mu\tau}$ dzięki energii wiązki wystarczającej do produkcji taonów i wysokiej statystyce oddziaływań zgromadzonej w bliskim detektorze, co częściowo rekompensuje niską granularność detektora, utrudniającą separację sygnału pochodzącego od oddziaływań neutrino taonowych od tła.

Istnienie mieszania pomiędzy neutrino taonowymi a sterylnymi w przypadku neutrino o masie rzędu eV, może mieć duży wpływ na potencjał odkrywczy przyszłych eksperymentów z długą bazą [56]. Jeżeli kąt θ_{34} byłby duży, bliski aktualnemu limitowi, eksperyment DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) [54, 55] mógłby poszukiwać łamania symetrii CP związanej z fazą δ_{34} . Jednocześnie jednak czułość eksperymentu na określenie hierarchii mas mogłaby spaść z 5σ do 4σ [56].

Monografia zawiera przegląd wyników dotyczących badania standardowych i poszukiwania niestandardowych oscylacji z udziałem taonowych neutrino. Przedstawione są techniki używane w analizie danych i wyników symulacji w przypadku poszukiwań oddziaływań ν_τ , ze szczególnym uwzględnieniem metod rekonstrukcji i analizy opracowanych przez autorkę na potrzeby eksperymentów MINOS i MINOS+. Wśród nich jest nowa, trójwymiarowa metoda rekonstrukcji oddziaływań neutrino w bliskim i dalekim detektorze eksperymentów MINOS i MINOS+; zastosowanie transformaty Hough'a [57] do rekonstrukcji bardzo krótkich torów; metoda selekcji oddziaływań ν_τ , w której została zastosowana wieloparametryczna metoda kNN [58] i procedura wyznaczania czułości eksperymentu i limitów w płaszczyźnie ($\sin^2 2\theta_{\mu\tau}, \Delta m_{41}^2$).

W monografii zaprezentowane zostały wyniki unikalnych badań, przeprowadzonych przez autorkę, pojawiania się neutrino taonowych w bliskich odległościach od źródła neutrino w obecnych i przyszłych eksperymentach badających neutrina produkowane w akceleratorach. Zaprezentowane zostały również wyniki analiz eksperymentów MINOS i MINOS+ w wyniku których zostały ustanowione bardzo silne ograniczenia nie tylko na parametry prowadzące do ograniczenia anomalii eksperymentu LSND, ale także na kąt θ_{34} . Monografię kończy dyskusja dotycząca perspektyw dla przyszłych eksperymentów w dziedzinie poszukiwania standardowej i anomalnej produkcji neutrino taonowych.

Literatura

- [1] S.V. Afanasiev et al. (NA49), Production of ϕ mesons in p+p, p+Pb and central Pb+Pb collisions at $E_{\text{beam}}=158$ A GeV, *Phys. Lett.*B491, 59 (2000).
- [2] C. Alt et al. (NA49), Energy dependence of ϕ meson production in central Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 6$ to 17 GeV, *Phys. Rev.*C78, 044907 (2008).
- [3] D.G. Michael et al.(MINOS), The magnetized steel and scintillator calorimeters of the MINOS experiment, *Nucl. Instrum. Meth. A* **596**, 190 (2008).
- [4] T.Carli, B.Koblitz, Proceedings of Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, Batavia 2000.
- [5] Edukacyjna strona dostępna oryginalnie pod adresem <http://www.fuw.edu.pl/~neutrina>, później dołączona do strony Warszawskiej Grupy Neutrinowej, <http://neutrino.fuw.edu.pl>
- [6] K.Grzelak, Standard and Non-standard Neutrino Oscillations Involving Tau Neutrinos, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2018, ISBN 978-83-235-3424-2.
- [7] P. Adamson et al. (MINOS), Search for sterile neutrinos mixing with muon neutrinos in MINOS, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 151803 (2016).
- [8] P. Adamson et al. (MINOS), Search for sterile neutrinos in MINOS and MINOS+ using a two-detector fit, arXiv:1710.06488, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
- [9] B. Pontecorvo, Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge, *Sov. Phys. JETP* **26**, 984 (1968).
- [10] V.N. Gribov, B. Pontecorvo, Neutrino astronomy and lepton charge, *Phys. Lett. B* **28**, 493 (1969).
- [11] R. Davis, D. Harmer, K. Hoffman, Search for neutrinos from the Sun, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 1205 (1968).
- [12] B.T. Cleveland, T. Daily, R. Davis et al., Measurement of the solar neutrino flux with the Homestake chlorine detector, *Astrophys. J.* **496**, 505 (1998).
- [13] J.N. Bahcall, A.M. Serenelli, S. Basu, 10,000 Standard Solar Models: a Monte Carlo simulation, *Astrophys. J. Suppl.* **165**, 400 (2006).
- [14] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande), Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1562 (1998).
- [15] Q.R. Ahmad et al. (SNO), Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 071301 (2001).
- [16] Q.R. Ahmad et al. (SNO), Direct evidence for neutrino flavor transformation from Neutral-Current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 011301 (2002).
- [17] K. Abe et al. (T2K), Observation of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 061802 (2014).
- [18] N. Agafonova et al., Final Results of the OPERA Experiment on ν_τ Appearance in the CNGS beam, *Phys. Rev. Lett.*120, 211801 (2018).

- [19] Z. Li et al. (Super-Kamiokande), A measurement of the tau neutrino cross section in atmospheric neutrino oscillations with Super-Kamiokande, arXiv:1711.09436.
- [20] P. Adamson et al. (MINOS and Daya Bay), Limits on active to sterile neutrino oscillations from disappearance searches in the MINOS, Daya Bay, and Bugey-3 Experiments, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 151801 (2016).
- [21] A. Aguilar et al. (LSND), Evidence for neutrino oscillations from the observation of $\bar{\nu}_e$ appearance in a $\bar{\nu}_\mu$ beam, *Phys. Rev. D* **64**, 112007 (2001).
- [22] A.A. Aguilar-Arevalo et al. (MiniBooNE), Improved search for $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ oscillations in the MiniBooNE experiment, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 161801 (2013).
- [23] A.A. Aguilar-Arevalo et al. (MiniBooNE), Observation of a Significant Excess of Electron-Like Events in the MiniBooNE Short-Baseline Neutrino Experiment, arXiv:1805.12028, maj 2018.
- [24] G. Mention, M. Fechner, Th. Lasserre, Th.A. Mueller, D. Lhuillier, M. Cribier, A. Letourneau, The reactor antineutrino anomaly, *Phys. Rev. D* **83**, 073006 (2011).
- [25] W. Hampel et al., Final results of the Cr-51 neutrino source experiments in GALLEX, *Phys. Lett. B* **420**, 114 (1998).
- [26] J.N. Abdurashitov et al. (SAGE), Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III: Results for the 2002–2007 data-taking period, *Phys. Rev. C* **80**, 015807 (2009).
- [27] M. Dentler, A. Hernandez-Cabezudo, J. Kopp, P. Machado, M. Maltoni, I. Martinez-Soler, T. Schwetz, Updated global analysis of neutrino oscillations in the presence of eV-scale sterile neutrinos, arXiv:1803.10661, Marzec 2018.
- [28] Katarzyna Grzelak, Appearance of tau neutrinos in the MINOS+ near detector due to the oscillations involving sterile neutrinos, plakat na XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 4-9 June 2018, Heidelberg, Germany, DOI:10.5281/zenodo.1300962, URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1300962>
- [29] P. Adamson et al. (NOvA), Search for active-sterile neutrino mixing using neutral-current interactions in NOvA, *Phys. Rev. D* **96**, 072006 (2017).
- [30] K. Abe et al. (T2K), Search for short baseline ν_e disappearance with the T2K near detector, *Phys. Rev. D* **91**, 051102 (2015).
- [31] F.P. An et al. (Daya Bay), Improved search for a light sterile neutrino with the full configuration of the Daya Bay experiment, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 151802 (2016).
- [32] Y.J. Ko et al. (NEOS), Sterile neutrino search at the NEOS experiment, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 121802 (2017).
- [33] M.G. Aartsen et al. (IceCube), Searches for sterile neutrinos with the IceCube Detector, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 071801 (2016).
- [34] M.G. Aartsen et al. (IceCube), Search for sterile neutrino mixing using three years of IceCube DeepCore data, *Phys. Rev. D* **95**, 112002 (2017).
- [35] J.M. Berryman, A.de Gouvea, K.J. Kelly, A. Kobach, Sterile neutrino at the Deep Underground Neutrino Experiment, *Phys. Rev. D* **92**, 073012 (2015).
- [36] S. Choubey, D. Pramanik, Constraints on sterile neutrino oscillations using DUNE near detector, *Phys. Lett. B* **764**, 135 (2017).

- [37] P. Coloma, D.V. Forero, S.J. Parke, DUNE sensitivities to the mixing between sterile and tau neutrinos, FERMILAB-PUB-17-271-T (2017).
- [38] K.J. Kelly, Searches for new physics at the Hyper-Kamiokande experiment, *Phys. Rev. D* **95**, 115009 (2017).
- [39] N. Agafonova et al. (OPERA), Limits on muon neutrino to tau neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam, *J. High Energy Phys* **1506**, 069 (2015).
- [40] M. Antonello et al. (ICARUS-WA104,LAr1-ND,MicroBooNE), A proposal for a three detector short-baseline neutrino oscillation program in the Fermilab Booster neutrino beam, arXiv:1503.01520 (2015).
- [41] A. Anokhina et al., Search for sterile neutrinos in the muon neutrino disappearance mode at FNAL, *Eur. Phys. J. C* **77**, 23 (2017).
- [42] S. Bhadra et al., Letter of intent to construct a nuPRISM detector in the J-PARC neutrino beamline, arXiv:1412.3086 (2014).
- [43] M. Harada et al., A search for sterile neutrino at J-PARC materials and life science experimental facility, arXiv:1310.1437 (2013).
- [44] S.N. Axani et al., KPipe: a decisive test for muon neutrino disappearance, arXiv:1510.06994 (2015).
- [45] I. Alekseev et al.(DANSS), DANSS: Detector of the reactor antineutrino based on solid scintillator, *J. Instrum.* **11**, 11011 (2016).
- [46] A.P. Serebrov et al.(NEUTRINO-4), NEUTRINO-4 experiment: preparations for search for sterile neutrino at 100 MW reactor SM-3 at 6-12 meters, arXiv:1205.2955 (2013).
- [47] J. Ashenfelter et al.(PROSPECT), The PROSPECT Physics Program, *J. Phys. G* **43**, 113001 (2016).
- [48] I. Michiels et al.(SoLid), SoLid: Search for oscillation with a ^6Li detector at the BR2 reasearch reactor, arXiv:1605.00215 (2016); N.Ryder (SoLid), First results of the deployment of a SoLid detector module at the SCK-CEN BR2 reactor, *PoS EPS-HEP2015*, 071 (2015).
- [49] L.Manzanillas, STEREO: Search for sterile neutrinos at the ILL, *PoS NOW2016*, 033 (2017); V. Helaine, Sterile neutrino search at the ILL nuclear reactor: the STEREO experiment, arXiv:1604.08877 (2016).
- [50] G. Bellini et al.(BOREXINO), SOX: Short distance neutrino oscillations with BoreXino, *J. High Energy Phys.* **1308**, 038 (2013).
- [51] V. Barinov, V. Gavrin, D. Gorbunov, T. Ibragimova, BEST sensitivity to $O(1)$ eV sterile neutrino, *Phys. Rev. D* **93**, 073002 (2016).
- [52] M. Abs et al.(IsoDAR@KamLAND), IsoDAR@KamLAND: A conceptual design report for the technical facility, arXiv:1511.05130 (2015).
- [53] E. Ciuffoli, J. Evslin, F. Zhao, Neutrino physics with accelerator driven subcritical reactors, *J. High Energy Phys.* **1601**, 004 (2016).

- [54] R. Acciarri et al. (DUNE), Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) : Volume 1: The LBNF and DUNE Projects, FERMILAB-DESIGN-2016-01, arXiv:1601.05471.
- [55] R. Acciarri et al. (DUNE), Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) : Volume 2: The Physics Program for DUNE at LBNF, arXiv:1512.06148.
- [56] S.K. Agarwalla, S.S. Chatterjee, A. Palazzo, Physics Reach of DUNE with a Light Sterile Neutrino, *J. High Energy Phys.* **1609**, 016 (2016).
- [57] R.Duda, P.Hart, Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures, *Comm. ACM*, **15**, 11 (1972).
- [58] TMVA Toolkit for Multivariate Data Analysis with ROOT, <http://tmva.sourceforge.net>