

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Колупаева Людмила Дмитриевна

**Анализ данных эксперимента NOvA с целью
измерения параметров осцилляций нейтрино**

Специальность 01.04.16
«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена на кафедре физики элементарных частиц физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Ольшевский Александр Григорьевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Кузьмичев Леонид Александрович**,
доктор физико-математических наук,
МГУ имени М.В. Ломоносова, НИИЯФ им.
Д.В. Скобельцына, отдел космических наук,
лаборатория наземной гамма-астрономии,
заведующий лабораторией

Полухина Наталья Геннадьевна,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физический институт им.
П.Н. Лебедева Российской академии наук,
лаборатория элементарных частиц,
высококвалифицированный главный научный
сотрудник

Образцов Владимир Федорович,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ,
начальник лаборатории

Защита диссертации состоится 04 июня 2021 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 19-й корпус МГУ, аудитория 2-15, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, 119991, Москва.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА» <https://istina.msu.ru/dissertations/360861198/>.

Автореферат разослан « » апреля 2021 г.

Телефон совета для справок: +79168717750

Электронная почта совета для справок: galan_lidiya@mail.ru

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности.

Последние двадцать лет физика нейтринных осцилляций является одной из самых активно развивающихся областей физики элементарных частиц. Успешное подтверждение гипотезы осцилляций как решения проблемы недостатка солнечных [1] и атмосферных нейтрино [2–4] экспериментами Super-Kamiokande [5] и SNO [6] на рубеже XX–XXI веков не только разрешило многолетнюю загадку, но и подарило инструмент исследования фундаментальных свойств этих частиц. Это открытие было увековечено Нобелевской премией 2015 года [7], в формулировке которой особенно подчеркнута значимость этого явления для Стандартной Модели как подтверждения наличия ненулевой массы у нейтрино. Гипотеза нейтринных осцилляций была впервые выдвинута советским и итальянским физиком Б.М. Понтекорво в 1957 году [8] по аналогии с переходами $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$.

Нейтрино — это нейтральные фермионы Стандартной Модели, парные заряженным лептонам. Заложенные в теорию флейворные нейтрино (электронные, мюонные и тау) смешиваются, то есть являются суперпозицией массивных нейтрино с названиями ν_1 , ν_2 и ν_3 . Благодаря этому явлению и ненулевой массе при распространении в пространстве нейтрино способны менять свой флейвор, переходить из одного вида в другой. Осцилляции — это процесс, периодичность которого зависит от расстояния до источника и энергии частиц. Параметрами нейтринных осцилляций являются три угла смешивания θ_{13} , θ_{23} , θ_{12} из матрицы Понтекорво–Маки–Накагавы–Сакаты (PMNS матрица), два независимых из трех возможных расщеплений масс нейтрино $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ и фаза нарушения CP инвариантности в лептонном секторе δ_{CP} . Основной задачей осцилляционных экспериментов является измерение этих параметров с высокой точностью.

С начала столетия ряд экспериментов получил прецизионные измерения части параметров. Доминирующий вклад в определение «солнечных» параметров θ_{12} и Δm_{21}^2 был сделан экспериментами KamLAND [9], SNO и Super-Kamiokande, работающими с потоками реакторных и солнечных нейтрино. Реакторные эксперименты Daya Bay [10], Double CHOOZ [11], RENO [12] обеспечили измерение угла θ_{13} на беспрецедентном уровне. Точность определения расщепления масс Δm_{32}^2 также приближается к проценту. Поскольку осцилляционные эксперименты чувствительны только к расщеплению масс, получить их абсолютные значения на шкале масс в такого рода экспериментах невозможно. Неизвестным до сих пор остается и порядок расположения нейтринных масс: $m_1 < m_2 < m_3$ (прямой порядок или прямая иерархия) или $m_3 < m_1 < m_2$ (обратный порядок

или обратная иерархия). Поэтому измерения Δm_{32}^2 представляются экспериментами в предположении обеих гипотез. Измерение иерархии масс нейтрино — это одна из флагманских задач нынешних и будущих нейтринных экспериментов. Также все еще неизвестным остается октант угла θ_{23} , который ответственен за возможную симметрию ν_τ и ν_μ в ν_2 и ν_3 . Известно, что значение этого угла близко к $\pi/4$, из-за этого его прецизионное измерение все еще актуальная и нетривиальная задача. Определение последнего параметра — фазы δ_{CP} — стало возможным после измерения [13] в 2012 году угла θ_{13} , который оказался ненулевым. Получение ограничений на параметр δ_{CP} также является одной из центральных задач современных и будущих экспериментов. Таким образом, на данный момент для полноты картины необходимо определение иерархии масс, угла смешивания θ_{23} и фазы нарушения CP инвариантности в лептонном секторе δ_{CP} .

Прецизионное измерение параметров осцилляций является хорошим способом проверки этой теории. Доподлинно неизвестно, существует ли какая-то физика за пределами трехфлейворной модели. Серьезные теоретические и экспериментальные усилия прикладываются к поиску явлений вне этой парадигмы. Помимо этого, не до конца понятен механизм происхождения масс нейтрино.

Есть следующие причины для продолжения измерения параметров осцилляций.

- Согласно ряду теорий Великого объединения параметры смешивания кварков и лептонов должны быть связаны [14]. В таком случае важно, чтобы лептонные параметры смешивания были известны наравне с кварковыми параметрами (экспериментальная точность измерения элементов матрицы СКМ - до 6% [15]).
- Разные модели, в том числе генерации масс нейтрино, предсказывают разные соотношения [16] для параметров смешивания (т.н. правила сумм). Возможность проверить эти соотношения в качестве теста гипотезы также упирается в точность измерения параметров осцилляций. В такие выражения также могут входить и нейтринные массы, что может позволить определить теоретические ограничения на абсолютные значения масс в рамках этих моделей.
- Фаза нарушения CP инвариантности δ_{CP} — потенциальный новый источник CP нарушения. Ряд моделей напрямую связывают CP нарушение из PMNS матрицы и барионную асимметрию (например, [17; 18]), другим же теориям не важно значение этой фазы (например, [19; 20]). Тем не менее, на данный момент это одна из самых главных задач современных экспериментов по осцилляциям.
- Иерархия масс нейтрино играет важную роль в моделировании прохождения нейтрино от сверхновых [21] сквозь ядро и адиабатические слои звезды, а также в оценке чувствительности

экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада [22], для которого обратный порядок более предпочтителен.

Из-за зависимости вероятностей осцилляций от расстояния и энергии разные типы экспериментов (с разными источниками нейтрино и разными базами) чувствительны к разным осцилляционным параметрам. В настоящее время осцилляционные параметры измеряются в экспериментах с ускорительными, реакторными, солнечными и атмосферными нейтрино. Все они обладают разными преимуществами. Солнечные нейтрино с характерной энергией от нескольких кэВ до десятков МэВ и пролетной базой в сотню миллионов километров могут использоваться для определения θ_{12} и Δm_{21}^2 . Реакторные нейтрино имеют характерную энергию несколько МэВ, в зависимости от расстояния до детектора в таких экспериментах могут быть измерены θ_{13} , Δm_{32}^2 , θ_{12} , Δm_{21}^2 и иерархия масс нейтрино. Атмосферные нейтрино имеют широкий спектр от сотен МэВ до десятков ГэВ и расстояния до детектора 10 – 13 000 км. Эксперименты, работающие с ними чувствительны к «атмосферным» параметрам Δm_{32}^2 и θ_{23} , а также к иерархии масс и δ_{CP} (в меньшей степени). Ускорительные нейтрино имеют энергию, определяемую характеристиками ускорительного комплекса. Таким образом, энергия частиц является контролируемой. Положение детектора также выбирается наиболее оптимальным способом исходя из задач. Такие эксперименты способны измерить θ_{13} , Δm_{32}^2 , θ_{23} , иерархию масс и δ_{CP} . Преимуществом ускорительных экспериментов для определения δ_{CP} является способность переключаться между нейтринным и антинейтринным пучком. Работа с обоими типами пучка принципиально важна для определения фазы CP нарушения.

На данный момент в мире функционируют два нейтринных ускорительных эксперимента — T2K [23] (с 2010 года) и NOvA [24] (с 2014 года). Несмотря на перекрывающиеся научные программы этих двух проектов, их измерения прекрасно дополняют друг друга и могут использоваться для перепроверки. Принципиальная возможность определения иерархии масс и δ_{CP} появилась только в эпоху T2K и NOvA, а окончательного завершения этих работ следует ожидать от экспериментов следующего поколения — T2HK [25] и DUNE [26].

Основной целью данной работы является получение ограничений на осцилляционные параметры в ускорительном эксперименте NOvA с накопленной на 2018 – 2020 годы статистикой, а вспомогательной – развитие средств анализа данных эксперимента NOvA.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи.

1. Провести моделирование ускорительных экспериментов NOvA и DUNE с помощью программного пакета GLOBES [27].

2. С использованием данного моделирования и программного обеспечения эксперимента NOvA выполнить исследование чувствительности к измерению параметров осцилляций и оценку эффекта вещества в этих экспериментах.
3. Разработать процедуру и подобрать критерии отбора событий от ν_e ($\bar{\nu}_e$) взаимодействий для анализа данных дальнего детектора NOvA.
4. Провести проверку эффективности отбора классификатора CVN [28] с помощью построения и анализа гибридных событий, основанных на реальных данных из ближнего детектора NOvA.
5. Участвовать в разработке цепочки осцилляционного анализа данных NOvA, в частности в способе учета систематических ошибок, разработке процедуры экстраполяции и интерпретации данных.

Объектом исследования настоящей работы являлись данные ускорительного эксперимента NOvA. **Предметом исследования** были параметры нейтринных осцилляций: иерархия масс нейтрино, δ_{CP} , θ_{23} и Δm_{32}^2 .

Научная новизна:

1. Параметры δ_{CP} и иерархия масс, измерение которых являлось целью данного исследования, остаются последними неизвестными величинами теории трехфлейворных осцилляций.
2. Представленный в работе анализ данных 2018 года был первым анализом NOvA и с нейтринным, и с антинейтринным пучками, что принципиально важно для определения параметра δ_{CP} .
3. Полученная в работе оценка свидетельствует о том, что в эксперименте NOvA впервые на уровне $> 4\sigma$ наблюдалось появление электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино.
4. В представленной работе впервые для отбора событий электронных нейтрино и антинейтрино в NOvA было применено машинное обучение для подавления фона космических мюонов.

Практическая значимость

1. Измерение параметров осцилляций играет важную роль для развития теоретических моделей, в том числе как фильтр теорий, поскольку осцилляционные параметры θ_{23} , Δm_{32}^2 , δ_{CP} и иерархия масс, к которым имеет чувствительность NOvA, являются фундаментальными характеристиками нейтрино как элементарной частицы Стандартной Модели. Данные параметры принимаются во внимание также при планировании будущих экспериментов, в том числе, по поиску безнейтринного двойного бета-распада.
2. Параметры осцилляций, к которым чувствителен эксперимент NOvA, можно измерять также и в других типах экспериментов. В данном случае NOvA делает вклад в измерения, используемые группами глобальных подгонок для оценки параметров осцилляций. Возможные расхождения измерений одного и того же

параметра в разных типах экспериментов могут быть указанием на неизвестные фундаментальные причины.

3. Полученные результаты по изучению чувствительности NOvA к измерению осцилляционных параметров позволяют оптимизировать стратегию набора статистики и оценить дальнейшую перспективу исследований нейтринных экспериментов с длинной базой.

Методология и методы исследования. Исследование проводится с пучком ускорительных мюонных (анти-)нейтрино, которые, пролетая расстояние 810 км, сохраняются как мюонные или переходят в электронные и тау (анти-)нейтрино. Конструкция детекторов NOvA оптимизирована для регистрации мюонных и электронных нейтрино. Канал осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$) чувствителен к параметрам θ_{23} и Δm_{32}^2 . Канал $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$) несет информацию об иерархии масс, δ_{CP} , θ_{23} и θ_{13} . Измерение этих вероятностей осцилляций позволяет сделать выводы о значениях осцилляционных параметров.

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены математическим моделированием ускорительных экспериментов NOvA и DUNE с помощью программного пакета GLOBES, методами машинного обучения для отбора событий и статистическими методами обработки данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Полная экспозиция 63×10^{20} POT в эксперименте NOvA позволяет измерить иерархию масс нейтрино на уровне до 5σ , а параметр нарушения лептонной CP-четности до 2σ . Оптимальной стратегией набора данных является разделение на равные экспозиции для режимов работы с нейтринным и антинейтринным пучками.
2. Применение метода машинного обучения для подавления фона космических мюонов и использование дополнительной периферийной выборки приводит к выигрышу +17.4% в терминах экспозиции детектора.
3. В эксперименте NOvA впервые на уровне достоверности $>4\sigma$ зарегистрировано появление электронных антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино.
4. В эксперименте NOvA на новом уровне точности измерены параметры осцилляций нейтрино: иерархия масс нейтрино, δ_{CP} , θ_{23} и Δm_{32}^2 .

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов современной физики нейтринных осцилляций и экспериментальной физики высоких энергий. В процессе проведения

анализа проводились поэтапные проверки и сравнения с имеющимися результатами других экспериментов.

Апробация работы. Полученные результаты неоднократно представлялись и обсуждались автором на собраниях коллаборации и регулярных совещаниях рабочих групп NOvA.

Результаты эксперимента NOvA неоднократно докладывались автором на международных конференциях. Основные результаты работы были представлены лично диссертантом на следующих российских и международных конференциях и мероприятиях в качестве устных докладов:

1. "Matter effect in neutrino oscillations for NOvA experiment", The XX International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, Dubna, Russia, 14.03–18.03.2016 (аннотация [AYSS-2016](#))
2. "Анализ чувствительности нейтринного эксперимента NOvA после первого года работы", Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Ломоносов-2016", Москва, Россия, 11.04 – 15.04.2016 (тезисы [Ломоносов-2016](#))
3. "Настройка критериев отбора событий для анализа появления электронных нейтрино в эксперименте NOvA", Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Ломоносов-2017", Москва, Россия, 10.04 – 14.04.2017 (тезисы [Ломоносов-2017](#))
4. "New neutrino oscillation results from the NOvA experiment", Nu HoRIzons VII, Allahabad, India, 21.02 – 23.02.2018 (презентация [Nu HoRIzons 2018](#))
5. "Первый совместный анализ с нейтринным и антинейтринным пучками в эксперименте NOvA", семинар в ЛЯП ОИЯИ, Дубна, Россия, 23.11.2018 (презентация [семинар ЛЯП ОИЯИ](#))
6. "Event selection for the nue analysis in the NOvA experiment", The XXII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, Dubna, Russia, 23.04 – 27.04.2018 (презентация [AYSS-2018](#))
7. "Cross-checks for the particle-identification algorithm in nue analysis by the means of muon removal procedure at the NOvA experiment", The XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, Dubna, Russia, 15.04 – 19.04.2019 (аннотация [AYSS-2019](#))
8. "Latest three-flavor neutrino oscillation results from NOvA", EPS-HEP 2019, Ghent, Belgium, 10.07 – 17.07.2019 (презентация [EPS-HEP 2019](#))
9. "Neutrino oscillation analysis in the NOvA experiment", 126-ая сессия Ученого Совета Объединенного института ядерных исследований, Dubna, Russia, 19.09 – 20.09.2019 (презентация [Ученый Совет ОИЯИ](#))

10. "Осцилляционный анализ в ускорительном нейтринном эксперименте NOvA", семинар в ЛЯП ОИЯИ, Дубна, Россия, 3.04.2020 (презентация [семинар ЛЯП ОИЯИ](#))
11. "Recent three-flavor neutrino oscillation results from the NOvA experiment", The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 5-9.10.2020 (презентация [ICPPA 2020](#))

Личный вклад. Все положения, выносимые на защиту, были получены при определяющем участии или непосредственно автором. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад соискателя.

Публикации. Диссертант является соавтором 19 печатных работ. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, в том числе в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 2 — в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 139 страниц, включая 106 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 202 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цели и методы, излагается научная новизна, достоверность и практическая значимость представляемой работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена теоретическим аспектам и краткому историческому обзору измерений осцилляций трех типов нейтрино.

Нейтрино, благодаря ненулевым массам и смешиванию, имеют способность переходить из одного типа в другой при распространении в пространстве. Основы этой теории были заложены Б.М. Понтекорво в 1957 году вскоре после открытия электронного антинейтрино от реактора в эксперименте Ф. Райнеса и К. Коуэна [29] в 1956 году. Окончательно теория была сформирована к концу 70-х годов [30]. Приводятся основные положения современной теории осцилляций нейтрино, описываются особенности прохождения пучка в вакууме и в веществе. В последнем случае при прохождении частиц появляется дополнительный потенциал для электронных нейтрино, которые могут взаимодействовать с электронами вещества не только через нейтральные, но и через заряженные токи. В случае вещества постоянной плотности в гамильтониане появляется дополнительное слабое, которое определяется плотностью электронов материи. Вещество

Земли используется в ускорительных и атмосферных нейтринных экспериментах для извлечения информации об иерархии масс.

Экспериментальная физика осцилляций нейтрино стала активно развиваться после открытия этого явления в экспериментах SNO и Super-Kamiokande двадцать лет назад. Кратко приведены основные вехи в исследовании осцилляций и описывается логика измерений параметров в разных типах экспериментов. Чувствительность к разным типам осцилляционных параметров определяется расстоянием L и энергией E . Поэтому разные эксперименты из-за фиксированного расстояния до детектора и источника частиц чувствительны к разным параметрам.

Благодаря измерениям угла смешивания θ_{13} реакторными экспериментами Daya Bay, Double CHOOZ и RENO появилась возможность определения фазы δ_{CP} с помощью нейтринных осцилляций. Реакторные эксперименты продолжили набор данных и получили самые прецизионные на данный момент измерения еще одного параметра — Δm_{32}^2 . Приводится сравнение характеристик современных реакторных экспериментов со средней и длинной базой.

Дается описание солнечных и атмосферных осцилляционных экспериментов, в том числе Super-Kamiokande, который работает с обоими источниками и является дальним детектором ускорительного эксперимента T2K, а в прошлом и K2K [31]. Обсуждается история ускорительных нейтринных экспериментов, работавших над исследованием трехфлейворных осцилляций. Два действующих ныне комплекса, используемые для создания пучков ускорительных нейтрино, располагаются в J-PARC (Япония) и в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (США). Все современные нейтринные ускорительные эксперименты (кроме OPERA [32]) используют схему из двух детекторов. Для сокращения систематических неопределенностей в дополнение к дальним детекторам измерения проводятся и в ближних детекторах, которые расположены недалеко от источника (мишени). В случае MINOS [33], NOvA и K2K ближний детектор построен по той же технологии, что и дальний, но имеет меньшие размеры. Ближний детекторный комплекс T2K (ND280) состоит из нескольких частей [34] и представляет собой разные типы детекторов и разные виды рабочего вещества. Приводятся сравнительные характеристики ускорительных экспериментов с длинной базой.

Представлена общая концепция измерения осцилляционных параметров в ускорительных экспериментах. Форма спектра зарегистрированных ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) кандидатов, в частности, положение и глубина минимума, определяется параметрами Δm_{32}^2 и θ_{23} соответственно (Рисунок 1). Канал появления электронных нейтрино имеет чувствительность к иерархии масс, фазе δ_{CP} , углам смешивания θ_{23} и θ_{13} (к последнему параметру чувствительность меньше, чем у реакторных нейтринных экспериментов).

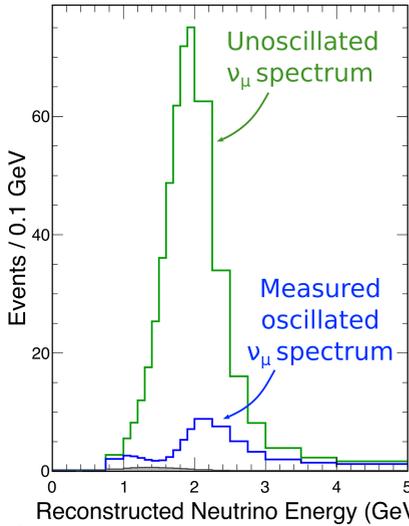


Рис. 1 — Принцип измерения параметров Δm_{32}^2 и θ_{23} с помощью спектра мюонных (анти-)нейтрино.

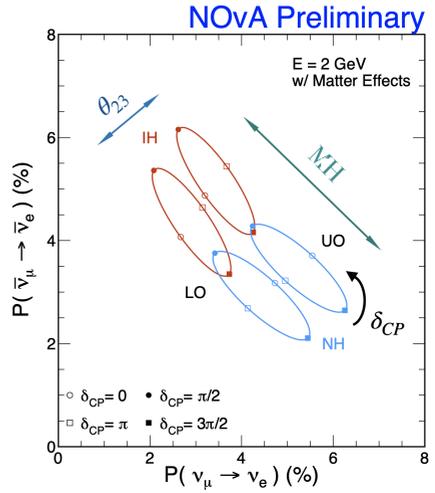


Рис. 2 — Принцип измерения иерархии масс нейтрино, фазы δ_{CP} и θ_{23} с помощью электронных нейтрино и антинейтрино.

Число событий напрямую связано с этими величинами. Принимая во внимание сложную зависимость осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$) от большого числа параметров, совместное измерение с нейтринным и антинейтринным пучками также позволяет частично решить проблему вырождения «иерархия - δ_{CP} - θ_{23} » (Рисунок 2).

К 2014 году, когда эксперимент NOvA начал набирать данные, глобальный анализ данных NuFIT [35] не имел чувствительности к иерархии масс (значимость отклонения обратной гипотезы $<1\sigma$) и октанту угла смешивания θ_{23} , не выявил серьезного предпочтения значения фазы δ_{CP} . С тех пор с большей экспозицией действующих экспериментов и вкладом NOvA точность измерения параметров нейтринных осцилляций возросла.

Вторая глава посвящена описанию NOvA (Рисунок 3).

Это ускорительный нейтринный эксперимент в США, который использует пучок из Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилаб). Приводится описание процесса получения ускорительных нейтрино. Пучок протонов с энергией 120 ГэВ после прохождения цепочки ускорителей в Фермилабе сбрасывается на неподвижную углеродную мишень. В результате этого взаимодействия рождаются мезоны, которые распадаясь порождают поток (анти-)нейтрино. Лептонный заряд определяется полярностью магнитных линз (т.н. горнов), которые фокусируют мезоны нужного знака. Изначально пучок преимущественно состоит из

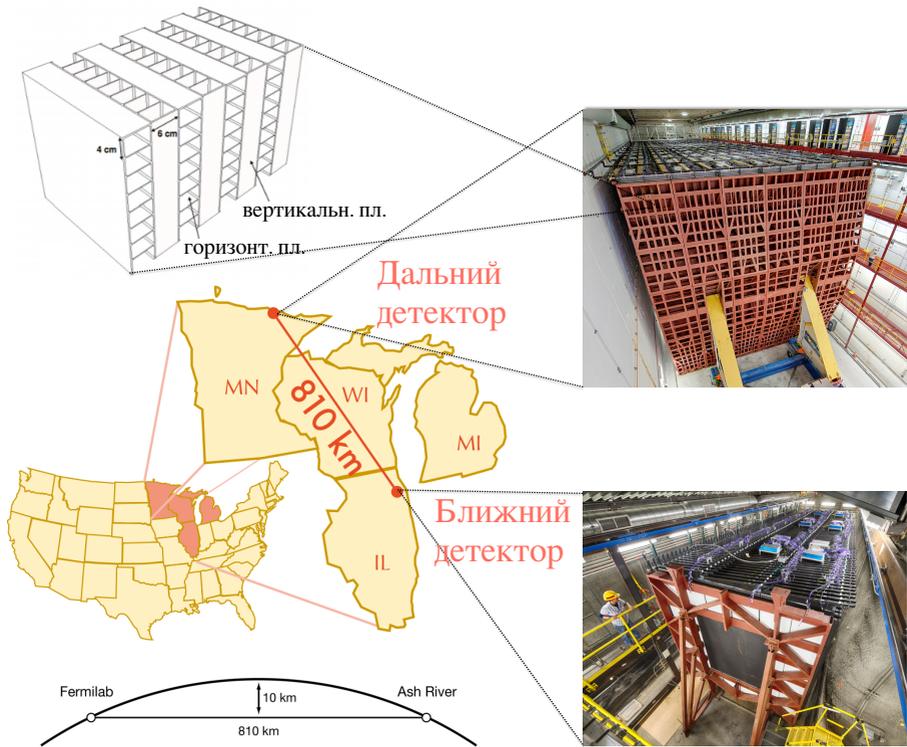


Рис. 3 — Расположение детекторов эксперимента NOvA.

мюонных (анти-)нейтрино с энергией ~ 2 ГэВ, небольшой примеси нейтрино с неправильным знаком лептонного заряда для данного режима работы и электронных нейтрино.

Кратко описывается строение детекторов эксперимента. Ближний детектор расположен в Фермилабе на расстоянии 1 км после мишени для регистрации состава изначального потока частиц. Его размер $4 \text{ м} \times 4 \text{ м} \times 16 \text{ м}$, масса 300 т. Дальний детектор расположен на границе с Канадой, на расстоянии 810 км от мишени. Его размер $16 \text{ м} \times 16 \text{ м} \times 60 \text{ м}$, масса 14 кт. В нем измеряется поток нейтрино после прохождения этого расстояния. Оба детектора имеют сходное строение, что позволяет использовать процедуру экстраполяции событий и таким образом сократить часть систематических неопределенностей.

Оба детектора хорошо сегментированы и состоят из ПВХ ячеек [36] сечением $4 \text{ см} \times 6 \text{ см}$, заполненных жидким сцинтиллятором [37] на основе минеральных масел с 5% примесью псевдокумола. Ячейки собираются в плоскости $4 \text{ м} \times 4 \text{ м}$ для ближнего и $16 \text{ м} \times 16 \text{ м}$ для дальнего

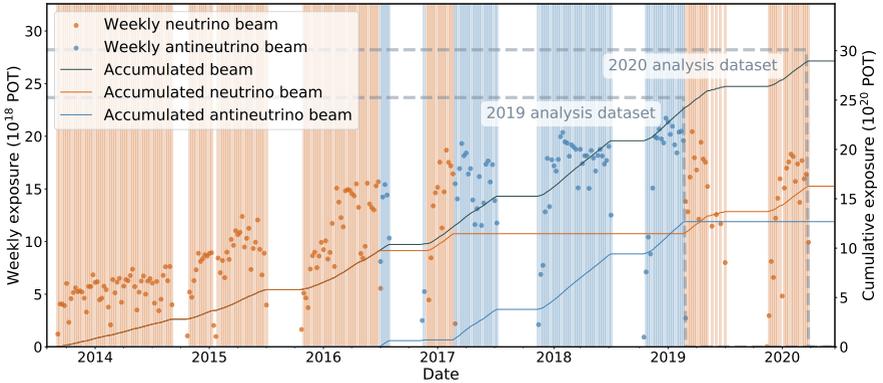


Рис. 4 — Накопленная статистика по годам набора данных эксперимента.

детекторов, плоскости с разным направлением ячеек располагаются поочередно для восстановления X и Y координат события. Конструкция детекторов оптимизирована для регистрации электронных и мюонных нейтрино. Сигнальными событиями для трехфлейворного осцилляционного анализа являются взаимодействия, произошедшие через заряженные токи, с рождением соответствующего данному типу нейтрино лептона. Для идентификации событий изображения сработавших ячеек поступают на вход классификатора CVN [28], который представляет собой сверточную нейронную сеть.

Эксперимент начал набирать данные в 2014 году, результаты осцилляционных анализов с интегральными экспозициями детекторов за разные годы представлены в коллаборационных работах [A1; A2; 38–41]. Прогресс набора данных на 2020 год представлен на Рисунке 4 в терминах числа протонов, сброшенных на мишень для получения пучка (анти-)нейтрино (POT).

Обсуждаются нюансы моделирования событий в детекторах. В NOvA используется процедура дополнительной настройки сечений взаимодействий нейтрино [42], помимо значений по умолчанию из генератора событий GENIE [43]. Поскольку это также играет роль в оценке систематических неопределенностей для осцилляционного анализа, приводится краткое описание этого метода.

Третья глава посвящена описанию разработанной соискателем процедуры отбора событий-кандидатов взаимодействий ν_e ($\bar{\nu}_e$) через заряженные токи в эксперименте NOvA. Полученная схема описывается в статье [A2] и применялась в официальном анализе данных эксперимента 2017–2019 годов.

Охарактеризованы сигнальные и фоновые события для отбора ν_e ($\bar{\nu}_e$). Основными источниками фона для анализа появления ν_e ($\bar{\nu}_e$) являются: ν_e ($\bar{\nu}_e$), изначально присутствующие в пучке из-за распадов мезонов после мишени; ν_e ($\bar{\nu}_e$) от присутствующих в пучке ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) неправильно знака лептонного заряда; неправильно классифицированные события с нейтральными токами, космическими мюонами и ν_μ , ν_τ , которые имеют сходную топологию с сигналом. События фона с ν_e ($\bar{\nu}_e$) в финальном состоянии самые сложные в отборе, единственный способ их контроля — измерение состава пучка в ближнем детекторе, экстраполяция и предсказание ожидаемого числа фоновых событий такого типа. Поскольку в детекторах нет магнитного поля, события с нейтрино и антинейтрино неразличимы.

Представлено описание процедуры настройки критериев отбора и предложенной финальной схемы. При разработке и оптимизации критериев отбора событий баланс чистоты и количества сигнальных событий проверялся с помощью конструкции $s/\sqrt{s+b}$, где s — сигнал, b — суммарный фон. Итоговая схема отбора событий для анализа данных представляет собой смесь традиционных критериев отбора (ограничений на значения различных параметров событий) и отбор с применением метода машинного обучения BDT из библиотеки TMVA [44] ROOT. События разделяются на две выборки — Центральную и Периферийную. Периферийная выборка отобранных кандидатов для анализа состоит из событий, которые не прошли в Центральную выборку, но имеют очень высокие значения классификаторов CVN и дерева решений BDT, таким образом почти наверняка представляя собой сигнал от ν_e ($\bar{\nu}_e$) взаимодействия. В основном это события, расположенные вне доверительного объема. Так как события могут лежать очень близко к границе детектора, доверять реконструированной энергии таких событий нельзя. Поэтому Периферийная выборка представляет собой один бин вместо спектра по энергии, как Центральная выборка. Финальная разработанная схема представлена на Рисунке 5. В терминах экспозиции детектора в 2017 году по сравнению с предыдущим отбором данных в 2016 году оптимизация критериев Центральной выборки дала выигрыш +6.8%, что суммарно с введением группы событий из Периферийной выборки составило +17.4%.

Приведено описание процедуры проверки эффективности отбора ν_e ($\bar{\nu}_e$) взаимодействий с помощью CVN. Учитывая важную роль, которую играет классификатор CVN в отборе нейтринных событий, одним из способов проверки правильности его работы на реальных данных является валидация на данных из ближнего детектора. Главным недостатком этой процедуры является малое количество событий с электронными нейтрино. Для решения этой проблемы в эксперименте была разработана процедура MRE (от англ. Muon Removed Electron added) изъятия реконструированного мюона из события ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) взаимодействия через заряженные токи и

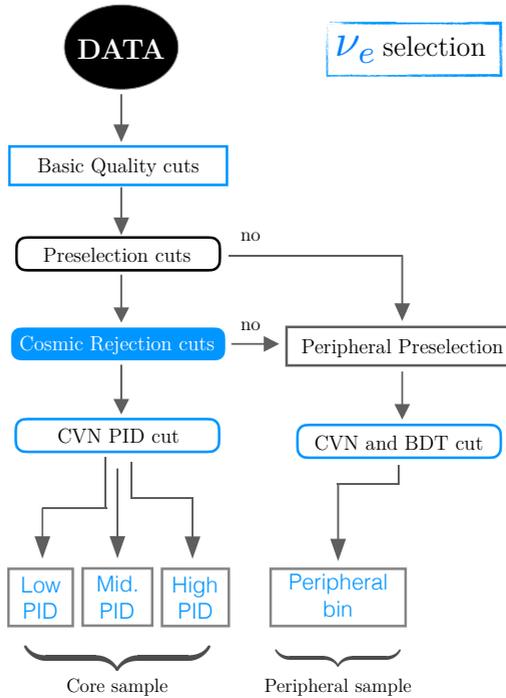


Рис. 5 — Схема основных категорий критериев отбора событий от ν_e взаимодействий в дальнем детекторе эксперимента NOvA.

замещения его промоделированным электроном (позитроном) той же энергии и направления, что изначальный мюон. Эта процедура проводится с реальными данными и данными от моделирования методом Монте-Карло. Поскольку электрон (позитрон) являются результатом моделирования в обоих случаях, основную роль при изучении разницы в отборе событий играют оставшиеся нетронутыми адронные ливни. Таким образом, MRE позволяет оценить различие в отборе событий, вызванное разницей между моделированными и настоящими адронными ливнями.

Проверка CVN методом MRE осуществлялась на реальных данных и Монте-Карло ближнего детектора для анализов 2019 и 2020 годов.

В **четвертой главе** приведено описание анализа данных эксперимента NOvA и результатов подгонки с целью извлечения осцилляционных параметров. Соискатель участвовал в трех кампаниях NOvA, посвященных трехфлейворному осцилляционному анализу данных, в частности, им выполнялась подгонка данных в дальнем детекторе с целью извлечения значений параметров осцилляций. Полученные результаты стали официальными для эксперимента в 2018 – 2020 годах и освещаются в работах [A1; A4; A5; A7; A8]. Помимо финальной аппроксимации данных деятельность

соискателя включала в себя совместную работу с коллегами из коллаборации над разработкой различных частей осцилляционного анализа: в способе учета систематических ошибок, разработке процедур экстраполяции и интерпретации данных.

Дано общее описание процедуры анализа данных, приведены систематические неопределенности и полученные физические результаты. Эксперимент NOvA использует ближний детектор для корректировки Монте-Карло предсказаний (процедура декомпозиции) и экстраполяции их в дальний детектор для использования в подгонке данных. Эквивалентное строение двух детекторов дает преимущество при использовании этой процедуры, поскольку при этом сокращается часть систематических неопределенностей. Обсуждаются источники погрешностей в анализе. Нынешний подход к аппроксимации данных в NOvA можно охарактеризовать как частотный с профилированными систематическими неопределенностями. Далее приведены полученные физические результаты. Путем варьирования δ_{CP} , θ_{23} и Δm_{32}^2 в предположении нормальной и обратной иерархий масс, а также θ_{13} с неопределенностью измерения из PDG [15] и всех систематических неопределенностей в виде штрафных членов делается вывод о предпочитаемых значениях осцилляционных параметров. Ввиду низкой статистики нейтринных событий в эксперименте гауссово приближение не является корректной формой интерпретации результатов. Эксперимент NOvA выбрал частотный путь корректировки $\Delta\chi^2$ с помощью поправок Фельдмана-Казинса [45]. Приводятся полученные в 2018 – 2020 годах результаты.

В 2018 году состоялся первый анализ данных эксперимента NOvA и с нейтринным, и антинейтринным пучками. Интегральная статистика эксперимента на тот год составила 8.85×10^{20} POT с пучком нейтрино и 6.9×10^{20} POT с пучком антинейтрино. В процессе подгонки в анализе данных NOvA используются предсказания, экстраполированные из ближнего детектора в дальний, предсказания со сдвигами в систематических неопределенностях получаются с помощью этой же процедуры. В 2018 году был разработан фреймворк для совместной подгонки данных каналов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ и $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ с корректным учетом всех систематических неопределенностей. В результате аппроксимации данных с помощью этого фреймворка были получены следующие результаты: лучшее значение подгонки лежит в точке с нормальной иерархией, $\delta_{CP} = 0.17\pi$, $\sin^2\theta_{23} = 0.58 \pm 0.03$, $\Delta m_{32}^2 = +2.51_{-0.08}^{+0.12} \times 10^{-3}$ эВ². Исходя из формы доверительных контуров (Рисунок 6) и одномерных уровней значимости для разных параметров (Рисунок 7) были сделаны следующие выводы: с данными на момент 2018 года NOvA исключает область обратной иерархии, $\delta_{CP} = \pi/2$ на уровне $>3\sigma$; на уровне 1.8σ предпочтительна нормальная иерархия для всех значений δ_{CP} , значение максимального смешивания для угла θ_{23} исключается на уровне 1.8σ . Эти результаты стали новыми официальными [46] ограничениями на

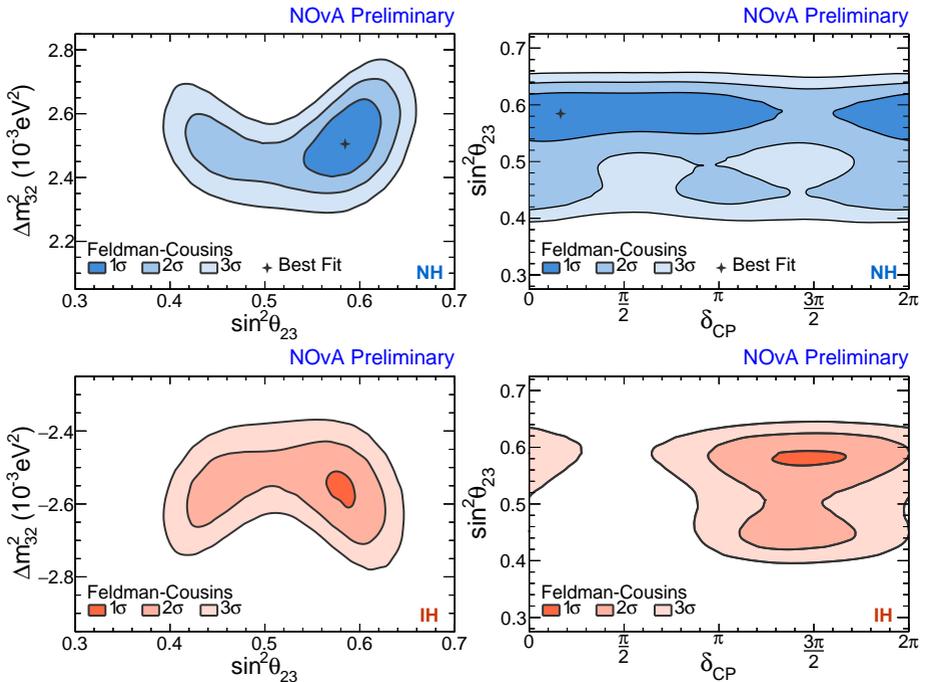


Рис. 6 — Доверительные контуры с уровнями значимости 1σ , 2σ , 3σ на плоскостях параметров $\Delta m_{32}^2 - \sin^2\theta_{23}$ (сверху) и $\delta_{CP} - \sin^2\theta_{23}$ (снизу) для нормальной (слева) и обратной (справа) иерархий, полученные с данными эксперимента на 2018 год.

осцилляционные параметры эксперимента NOvA со статистикой на 2018 год. Было найдено 18 $\bar{\nu}_e$ событий, это было четвертое в мире наблюдение появления электронного антинейтрино в пучке мюонных антинейтрино от ускорителя после K2K, T2K и MINOS. С помощью разыгрывания Монте-Карло экспериментов была сделана оценка уровня значимости, на котором эксперимент NOvA наблюдал появление электронных антинейтрино. Эта величина впервые составила значение $>4\sigma$.

В 2019 году был проведен анализ с дополнительной статистикой с пучком антинейтрино (+75% по сравнению с анализом 2018 года). Экспозиция на 2019 год составила 8.85×10^{20} POT с пучком нейтрино и 12.33×10^{20} POT с пучком антинейтрино. Идея заключалась в том, чтобы сделать анализ со средствами 2018 года, но большей статистикой с антинейтринным пучком для проверки результата. Совместная подгонка спектров $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ и $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ позволила сделать следующие выводы об осцилляционных параметрах: лучшее значение подгонки лежит в точке с нормальной иерархией, $\delta_{CP} = 0\pi$, $\sin^2\theta_{23} = 0.56_{-0.03}^{+0.04}$, $\Delta m_{32}^2 = +2.48_{-0.06}^{+0.11} \times 10^{-3}$ эВ².

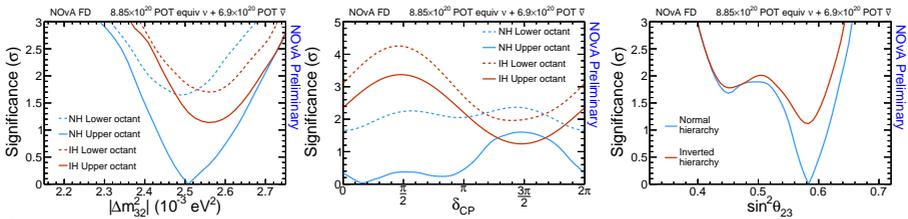


Рис. 7 — Уровни значимости, на которых отвергаются разные значения Δm_{32}^2 (слева), δ_{CP} (центр) и θ_{23} (справа) полученные с данными на 2018 год.

Исходя из формы доверительных контуров были сделаны следующие выводы: с данными на момент 2019 года NOvA исключает область обратной иерархии, $\delta_{CP} = \pi/2$ на уровне $>3\sigma$; на уровне 1.9σ предпочтительна нормальная иерархия для всех значений δ_{CP} , нижний октант угла смешивания θ_{23} исключается на уровне 1.6σ . В 2019 году было найдено 27 $\bar{\nu}_e$ событий, что является наблюдением электронных антинейтрино в пучке мюонных с уровнем значимости 4.4σ . Результат этого анализа был опубликован в статье [A1].

Для анализа данных 2020 года были сделаны существенные изменения в процедуре моделирования (новые версии пакетов GENIE и GEANT4, новая мишень), реконструкции (новый алгоритм кластеризации, новая архитектура CVN), анализа данных (оценка энергии, отбор событий, новые систематические неопределенности, модифицированная экстраполяция). Помимо этого, была увеличена статистика с нейтринным пучком на 50% по сравнению с 2018 и 2019 годами. Полная экспозиция на 2020 год составила 13.6×10^{20} POT с пучком нейтрино и 12.5×10^{20} POT с пучком антинейтрино. Была проведена подгонка спектров, которая позволила сделать следующие выводы об осцилляционных параметрах. Лучшее значение подгонки лежит в точке $\delta_{CP} = 0.82\pi$, $\sin^2\theta_{23} = 0.57^{+0.03}_{-0.04}$, $\Delta m_{32}^2 = +(2.41 \pm 0.07) \times 10^{-3}$ эВ². Нормальная иерархия масс нейтрино и верхний октант угла θ_{23} ($\theta_{23} > \pi/4$) слабо предпочтительны на уровне 1σ и 1.2σ , соответственно. Регион $\delta_{CP} = \pi/2$ в Обратной иерархии был исключен на уровне $>3\sigma$. Значение $\delta_{CP} = 3\pi/2$ в Нормальной иерархии и верхнем октанте θ_{23} исключается на уровне $\sim 2\sigma$. В 2020 году в результатах NOvA и T2K [47] есть разногласие, которое предстоит проверить в будущих анализах данных и в совместной работе NOvA-T2K [48].

Сравнение всех результатов анализов NOvA в 2015–2020 годах приведено в Таблице 1. Результаты NOvA согласуются между собой с учетом величины неопределенности.

Описана процедура получения оценки уровня значимости появления $\bar{\nu}_e$ в пучке $\bar{\nu}_\mu$ для анализов 2018 и 2019 годов.

Таблица 1 — Сравнение результатов, полученных NOνA в 2015 - 2020 годах. Подгонки 2018 - 2020 годов выполнены в виде диссертантом.

анализ ^a , год	экспозиция $\nu(\bar{\nu})$ $\times 10^{20}$ POT	число в ПД $\nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$	$\nu_e(\bar{\nu}_e)$	$\sin^2\theta_{23}$	Δm_{32}^2 $\times 10^{-3}$ эВ ²	δ_{CP}	иерархия масс
2015 [38; 39]	2.74 (-)	33 (-)	6 (-)	$[0.38, 0.65]^b$	$+2.52^{+0.20}_{-0.18}$	$0.05\pi, 1.15\pi^c$	НИ, 0.5σ
2016 [40; 41]	6.05 (-)	78 (-)	33 (-)	$0.404^{+0.030}_{-0.022}$ $0.624^{+0.030}_{-0.030}$	$+2.67 \pm 0.11$	$1.48^{+0.55}_{-0.47}\pi$ $0.74^{+0.40}_{-0.79}\pi$	НИ, 0.46σ
2017 [A2]	8.85 (-)	126 (-)	66 (-)	$0.56^{+0.04}_{-0.04}$	$+2.44^{+0.08}_{-0.07}$	$1.21^{+0.91}_{-0.30}\pi$	НИ, 1.6σ
2018	8.85 (6.9)	113 (65)	58 (18)	0.58 ± 0.03	$+2.51^{+0.12}_{-0.08}$	$0.17^{+0.97}_{-0.35}\pi$	НИ, 1.8σ
2019	8.85 (12.33)	113 (102)	58 (27)	$0.56^{+0.04}_{-0.03}$	$+2.48^{+0.11}_{-0.06}$	$0.0^{+1.3}_{-0.4}\pi$	НИ, 1.9σ
2020	13.6 (12.5)	211 (105)	82 (33)	$0.57^{+0.03}_{-0.04}$	$+2.41 \pm 0.07$	$0.82^{+0.24}_{-1.00}\pi$	НИ, 1σ

^aГод проведения самого анализа и отлащения результатов, статьи зачастую выходяли на год позже.

^b 1σ диапазон, вырожденные минимумы в точках 0.43, 0.60.

^cЛучшие значения подгонки, 1σ диапазон включает в себя все значения δ_{CP} .

^dМинимум в нижнем октанте θ_{23} отстоит на 0.36σ и находится в точке 0.47 ± 0.04 .

В **пятой главе** приводятся результаты моделирования NOvA, выполненные в программной среде самого эксперимента, обсуждаются дальнейшие перспективы по измерению иерархии масс нейтрино и δ_{CP} . Эта работа освещена в следующих статьях [A3; A4; A6] за авторством соискателя.

Эксперимент планирует набирать данные до 2025 года, предполагается ряд улучшений в учете систематических неопределенностей, техниках анализа и повышение интенсивности пучка. Оптимальной схемой набора данных является работа 50% : 50% времени с нейтринным и антинейтринным пучками. Интегральная статистика с пучком нейтрино и антинейтрино составит 63×10^{20} POT суммарно (существенно больше первоначально планируемых 36×10^{20} POT).

Потенциально к 2025 году NOvA может измерить иерархию масс от 0.5 до 5σ в зависимости от параметров, реализованных в природе. Чувствительность к δ_{CP} составит величину до 2σ (Рисунок 8). Оценено влияние статистических флуктуаций на чувствительность NOvA, которые являются существенными даже с полной статистикой эксперимента на 2025 год.

Помимо разработки программных средств анализа NOvA диссертантом было выполнено моделирование ускорительных экспериментов DUNE и NOvA в пакете GLoBES [27], приближенное насколько возможно в данном ПО к описанию эксперимента из Главы 2. Проведена оценка эффекта вещества для этих экспериментов, благодаря которому возможно измерение иерархии масс и δ_{CP} в ускорительных экспериментах. В высокоточных будущих осцилляционных экспериментах возможно измерение средней плотности пройденного вещества [49].

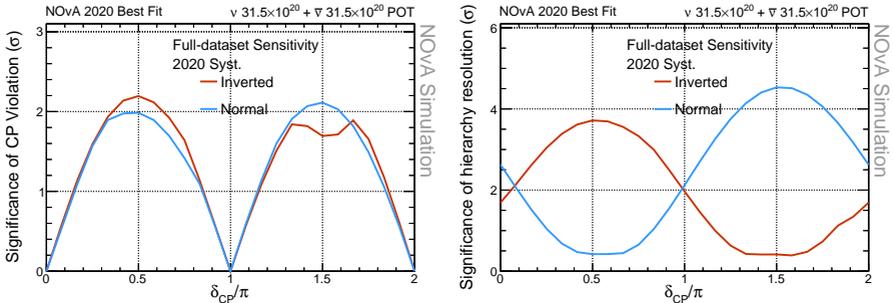


Рис. 8 — Чувствительность NOvA к измерению δ_{CP} (слева) и иерархии масс нейтрино (справа) к 2025 году.

В **шестой главе** обсуждаются полученные результаты, проводится сравнение с выводами других экспериментов, которые проводили такие же измерения.

Из-за малой статистики нейтринных экспериментов результаты подвержены изменениям от года к году. Эксперименты NOvA, T2K и Super-Kamiokande стабильно предпочитают разные значения фазы δ_{CP} . Из-за существующего вырождения « δ_{CP} – иерархия» определение последней затруднено на нынешнем уровне точности. Помимо этого разногласия есть и в измерении θ_{23} . В случае измерения Δm_{32}^2 результаты сходятся лучше. В последние годы ускорительные эксперименты достигли уровня точности реакторных.

Помимо этого, для полноты картины представлен статус измерения остальных осцилляционных параметров (θ_{13} , θ_{12} и Δm_{21}^2) на 2020 год, к которым NOvA не имеет чувствительности. Точность измерения θ_{13} , достигнутая Daya Bay, Double CHOOZ и RENO, останется непревзойденной в ближайшие годы. В измерении θ_{12} и Δm_{21}^2 определяющий вклад принадлежит SNO, Super-Kamiokande и KamLAND. В определении Δm_{21}^2 на протяжении последних нескольких лет существует разногласие в измерении с солнечными и реакторными нейтрино. В этом году оно сократилось до уровня значимости 1.4σ .

Описывается экспериментальная программа будущих нейтринных экспериментов. Точное определение параметров необходимо для проверки существующей трехфлейворной парадигмы осцилляций и унитарности матрицы смешивания. Планируемые эксперименты своими основными задачами в осцилляционной физике видят измерение иерархии масс нейтрино и фазы δ_{CP} , а также уточнение остальных параметров. Ускорительная нейтринная программа NOvA и T2K будет продолжена в DUNE и T2HK. Реакторный эксперимент JUNO [50] за счет большей базы осцилляций, чем у Daya Bay, получит также чувствительность к иерархии масс, Δm_{21}^2 и θ_{12} , что позволит уточнить измерения KamLAND и солнечных экспериментов. Атмосферные нейтрино станут предметом исследований в экспериментах INO [51], Hyper-Kamiokande, ORCA [52] и IceCube-gen2 [53].

В **заключении** приведены основные результаты работы. Данное исследование посвящено измерению параметров трехфлейворных осцилляций в эксперименте NOvA. Непосредственно автором или при его определяющем участии были получены следующие основные результаты:

1. Проведена оценка чувствительности NOvA к измерению иерархии масс нейтрино и фазы нарушения CP-четности δ_{CP} с помощью программных средств NOvA.

Данная работа позволяет уточнить дальнейшую перспективу исследований и оптимизировать условия набора статистики. С ожидаемой полной экспозицией 63×10^{20} POT с нейтринным и антинейтринным пучками эксперимент может измерить иерархию масс нейтрино на уровне до 5σ , а δ_{CP} — до 2σ . Стоит отметить, что данные ожидания сильно зависят от истинных параметров осцилляций, реализованных в природе. Моделирование NOvA и

ускорительного эксперимента следующего поколения DUNE также проводились с помощью программного пакета GLOBES. Была проведена оценка эффекта вещества и чувствительности к нему экспериментов NOvA и DUNE.

2. Разработана процедура и подобраны критерии отбора событий от ν_e ($\bar{\nu}_e$) взаимодействий для анализа данных в дальнейшем детекторе эксперимента NOvA.

Впервые для этого анализа применялось BDT для подавления фона космических мюонов. Введение двух выборок данных — Центральной и Периферийной — позволило получить выигрыш +17.4% в терминах экспозиции эксперимента по сравнению с критериями отбора предыдущего анализа. Данные NOvA 2017 – 2019 годов отбирались с помощью этой последовательности отбора событий. Для анализа 2020 года данная схема разделения на две выборки сохранилась, но сами критерии отбора изменились. Посредством метода MRE для создания гибридных событий, основанных на реальных данных, осуществлялась проверка эффективности отбора событий от ν_e ($\bar{\nu}_e$) взаимодействий с помощью нейронной сети CVN. В настоящее время ведется разработка метода учета различий в эффективности отбора для данных и Монте-Карло в виде поправок к предсказаниям в дальнейшем детекторе.

3. Выполнен анализ данных эксперимента NOvA с целью определения ограничений на осцилляционные параметры.

При активном участии автора велась разработка цепочки осцилляционного анализа данных, включающая учет систематических ошибок, процедуру экстраполяции и интерпретации данных. Полученные соискателем результаты аппроксимации данных с разными срезами набранной статистики использовались в качестве официальных результатов эксперимента в 2018 – 2020 годах. В 2018 году состоялся первый анализ данных NOvA и с нейтринным, и с антинейтринным пучками, что является принципиально важным для измерения δ_{CP} . Полученное значение уровня значимости появления электронных антинейтрино в пучке мюонных составило величину $>4\sigma$. В данный момент в эксперименте ведутся работы по улучшению имеющейся на данный момент цепочки анализа. В ближайшие годы ожидаются байесовский анализ, матрица ковариаций для систематических неопределенностей, методы одновременной подгонки данных ближнего и дальнего детекторов.

Несмотря на то, что физика нейтринных осцилляций в 10-х годах XXI века вошла в эру прецизионных измерений, точность действующих на данный момент экспериментов недостаточна для окончательного определения

параметров этой теории. В этом десятилетии будут запущены крупные проекты следующего поколения — DUNE, Hyper-Kamiokande, JUNO, IceCube Upgrade, ORCA. Окончательное измерение всех параметров трехфлейворной теории нейтринных осцилляций можно ожидать в следующие 10–15 лет.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и SCOPUS

- A1. First Measurement of Neutrino Oscillation Parameters using Neutrinos and Antineutrinos by NOvA [Текст] / М. Acero [и др.] // **Phys. Rev. Lett.** (импакт-фактор 8.448). — 2019. — Т. 123, № 15. — С. 151803. — arXiv: [1906.04907](https://arxiv.org/abs/1906.04907) [[hep-ex](#)].
- A2. New constraints on oscillation parameters from ν_e appearance and ν_μ disappearance in the NOvA experiment [Текст] / М. Acero [и др.] // **Phys. Rev. D** (импакт-фактор 4.719). — 2018. — Т. 98. — С. 032012. — arXiv: [1806.00096](https://arxiv.org/abs/1806.00096) [[hep-ex](#)].
- A3. *Kolupaeva, L.* Matter effect in neutrino oscillations for long-baseline experiments [Текст] / L. Kolupaeva, O. Samoylov, I. Shandrov // **Phys. Part. Nucl. Lett.** (импакт-фактор 0.621). — 2017. — Т. 14, № 7. — С. 975–980.
- A4. *Колупаева, Л.* Изучение нейтринных осцилляций в эксперименте NOvA [Текст] / Л. Колупаева, О. Самойлов // **Ядерная физика** (импакт-фактор 0.568). — 2021. — Т. 84, № 1.
- A5. *Колупаева, Л.* Статус и перспективы исследования осцилляций трех типов нейтрино [Текст] / Л. Колупаева, А. Ольшевский, О. Самойлов // **Физика элементарных частиц и атомного ядра** (импакт-фактор 0.409). — 2021. — Т. 52, № 3.
- A6. Some uncertainties of neutrino oscillation effect in the NOvA experiment [Текст] / L. D. Kolupaeva [и др.] // **Mod. Phys. Lett. A** (импакт-фактор 1.399). — 2016. — Т. 31, № 12. — С. 1650077. — arXiv: [1603.07451](https://arxiv.org/abs/1603.07451) [[hep-ph](#)].

В сборниках трудов конференций

- A7. *Kolupaeva, L.* Latest three-flavor neutrino oscillation results from NOvA [Текст] / L. Kolupaeva // **EPS—HEP2019**. — 2020. — С. 395.
- A8. *Kolupaeva, L.* Recent three-flavor neutrino oscillation results from the NOvA experiment [Текст] / L. Kolupaeva // **J. Phys. Conf. Ser., ICCPA-2020** / под ред. Р. Teterin. — 2020. — Т. 1690, № 1. — С. 012172.

Список литературы

1. *Davis, R.* Search for neutrinos from the sun [Текст] / R. Davis, D. S. Harmer, K. C. Hoffman // Phys. Rev. Lett. — 1968. — Т. 20. — С. 1205–1209.
2. Calculation of Atmospheric Neutrino Induced Backgrounds in a Nucleon Decay Search [Текст] / Т. Haines [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 1986. — Т. 57. — С. 1986–1989.
3. Atmospheric Neutrino Background and Pion Nuclear Effect for Kamioka Nucleon Decay Experiment [Текст] / М. Nakahata [и др.] // J. Phys. Soc. Jap. — 1986. — Т. 55. — С. 3786.
4. Experimental Study of the Atmospheric Neutrino Flux [Текст] / К. Hirata [и др.]. — 1988. — Март.
5. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos [Текст] / Y. Fukuda [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 1998. — Т. 81. — С. 1562–1567. — arXiv: [hep-ex/9807003](https://arxiv.org/abs/hep-ex/9807003).
6. Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory [Текст] / Q. Ahmad [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2002. — Т. 89. — С. 011301. — arXiv: [nucl-ex/0204008](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0204008).
7. The Nobel Prize in Physics 2015 [Текст]. — <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2015/summary/>.
8. *Pontecorvo, B.* Inverse Beta Processes and Nonconservation of Lepton Charge [Текст] / В. Pontecorvo // ЖЭТФ. — 1957. — Т. 7. — С. 172.
9. First results from KamLAND: Evidence for reactor anti-neutrino disappearance [Текст] / К. Eguchi [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2003. — Т. 90. — С. 021802. — arXiv: [hep-ex/0212021](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0212021).
10. A Precision measurement of the neutrino mixing angle θ_{13} using reactor antineutrinos at Daya-Bay [Текст] / X. Guo [и др.]. — 2007. — Январ. — arXiv: [hep-ex/0701029](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0701029).
11. Double Chooz: A Search for the neutrino mixing angle θ_{13} [Текст] / F. Ardellier [и др.]. — 2006. — Июнь. — arXiv: [hep-ex/0606025](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0606025).
12. RENO: An Experiment for Neutrino Oscillation Parameter θ_{13} Using Reactor Neutrinos at Yonggwang [Текст] / J. Ahn [и др.]. — 2010. — Март. — arXiv: [1003.1391](https://arxiv.org/abs/1003.1391) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/hep-ex)].
13. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay [Текст] / F. An [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Т. 108. — С. 171803. — arXiv: [1203.1669](https://arxiv.org/abs/1203.1669) [[hep-ex](https://arxiv.org/abs/hep-ex)].

14. *Smirnov, A. Y.* Neutrino mixing in SO(10) GUTs with a non-Abelian flavor symmetry in the hidden sector [Текст] / A. Y. Smirnov, X.-J. Xu // Phys. Rev. D. — 2018. — Т. 97, № 9. — С. 095030. — arXiv: [1803.07933 \[hep-ph\]](#).
15. Review of Particle Physics [Текст] / P. Zyla [и др.] // РТЕР. — 2020. — Т. 2020, № 8. — С. 083C01.
16. Neutrino Mass and Mixing: from Theory to Experiment [Текст] / S. F. King [и др.] // New J. Phys. — 2014. — Т. 16. — С. 045018. — arXiv: [1402.4271 \[hep-ph\]](#).
17. *Pascoli, S.* Connecting low energy leptonic CP-violation to leptogenesis [Текст] / S. Pascoli, S. Petcov, A. Riotto // Phys. Rev. D. — 2007. — Т. 75. — С. 083511. — arXiv: [hep-ph/0609125](#).
18. *Branco, G.* A New bridge between leptonic CP violation and leptogenesis [Текст] / G. Branco, R. Gonzalez Felipe, F. Joaquim // Phys. Lett. B. — 2007. — Т. 645. — С. 432–436. — arXiv: [hep-ph/0609297](#).
19. Insensitivity of flavoured leptogenesis to low energy CP violation [Текст] / S. Davidson [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2007. — Т. 99. — С. 161801. — arXiv: [0705.1503 \[hep-ph\]](#).
20. A Bridge between CP violation at low-energies and leptogenesis [Текст] / G. C. Branco [и др.] // Nucl. Phys. B. — 2001. — Т. 617. — С. 475–492. — arXiv: [hep-ph/0107164](#).
21. *Scholberg, K.* Supernova Signatures of Neutrino Mass Ordering [Текст] / K. Scholberg // J. Phys. G. — 2018. — Т. 45, № 1. — С. 014002. — arXiv: [1707.06384 \[hep-ex\]](#).
22. *Dolinski, M. J.* Neutrinoless Double-Beta Decay: Status and Prospects [Текст] / M. J. Dolinski, A. W. Poon, W. Rodejohann // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. — 2019. — Т. 69. — С. 219–251. — arXiv: [1902.04097 \[nucl-ex\]](#).
23. The T2K Experiment [Текст] / K. Abe [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2011. — Т. 659. — С. 106–135. — arXiv: [1106.1238 \[physics.ins-det\]](#).
24. NOvA: Proposal to Build a 30 Kiloton Off-Axis Detector to Study $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Oscillations in the NuMI Beamline [Текст] / D. Ayres [и др.]. — 2004. — Март. — arXiv: [hep-ex/0503053](#).
25. Hyper-Kamiokande Design Report [Текст] / K. Abe [и др.]. — 2018. — Май. — arXiv: [1805.04163 \[physics.ins-det\]](#).
26. Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume II DUNE Physics [Текст] / B. Abi [и др.]. — 2020. — Февр. — arXiv: [2002.03005 \[hep-ex\]](#).

27. *Huber, P.* Simulation of long-baseline neutrino oscillation experiments with GLOBES (General Long Baseline Experiment Simulator) [Текст] / P. Huber, M. Lindner, W. Winter // Comput. Phys. Commun. — 2005. — Т. 167. — С. 195. — arXiv: [hep-ph/0407333](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0407333).
28. A Convolutional Neural Network Neutrino Event Classifier [Текст] / A. Aurisano [и др.] // JINST. — 2016. — Т. 11, № 09. — P09001. — arXiv: [1604.01444](https://arxiv.org/abs/1604.01444) [[hep-ex](#)].
29. Detection of the free neutrino: A Confirmation [Текст] / C. Cowan [и др.] // Science. — 1956. — Т. 124. — С. 103–104.
30. *Bilenky, S.* Lepton mixing and neutrino oscillations [Текст] / S. Bilenky, B. Pontecorvo // Physics Reports. — 1978. — Т. 41. — С. 225–261.
31. Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment [Текст] / M. Ahn [и др.] // Phys. Rev. D. — 2006. — Т. 74. — С. 072003. — arXiv: [hep-ex/0606032](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0606032).
32. OPERA: An appearance experiment to search for $\nu/\mu \leftrightarrow \nu/\tau$ oscillations in the CNGS beam. Experimental proposal [Текст] / M. Guler [и др.]. — 2000. — Июль.
33. P-875: A Long baseline neutrino oscillation experiment at Fermilab [Текст] / E. Ables [и др.]. — 1995. — Февр.
34. T2K ND280 Upgrade - Technical Design Report [Текст] / K. Abe [и др.]. — 2019. — Янв. — arXiv: [1901.03750](https://arxiv.org/abs/1901.03750) [[physics.ins-det](#)].
35. *Gonzalez-Garcia, M. C.* Updated fit to three neutrino mixing: status of leptonic CP violation [Текст] / M. C. Gonzalez-Garcia, M. Maltoni, T. Schwetz // JHEP. — 2014. — Т. 11. — С. 052. — arXiv: [1409.5439](https://arxiv.org/abs/1409.5439) [[hep-ph](#)].
36. PVC Extrusion Development and Production for the NOvA Neutrino Experiment [Текст] / R. L. Talaga [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2017. — Т. 861. — С. 77–89. — arXiv: [1601.00908](https://arxiv.org/abs/1601.00908) [[physics.ins-det](#)].
37. Liquid scintillator production for the NOvA experiment [Текст] / S. Mufson [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2015. — Т. 799. — С. 1–9. — arXiv: [1504.04035](https://arxiv.org/abs/1504.04035) [[physics.ins-det](#)].
38. First measurement of muon-neutrino disappearance in NOvA [Текст] / P. Adamson [и др.] // Phys. Rev. D. — 2016. — Т. 93, № 5. — С. 051104. — arXiv: [1601.05037](https://arxiv.org/abs/1601.05037) [[hep-ex](#)].
39. First measurement of electron neutrino appearance in NOvA [Текст] / P. Adamson [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Т. 116, № 15. — С. 151806. — arXiv: [1601.05022](https://arxiv.org/abs/1601.05022) [[hep-ex](#)].
40. Measurement of the neutrino mixing angle θ_{23} in NOvA [Текст] / P. Adamson [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Т. 118, № 15. — С. 151802. — arXiv: [1701.05891](https://arxiv.org/abs/1701.05891) [[hep-ex](#)].

41. Constraints on Oscillation Parameters from ν_e Appearance and ν_μ Disappearance in NOvA [Текст] / P. Adamson [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Т. 118, № 23. — С. 231801. — arXiv: [1703.03328](https://arxiv.org/abs/1703.03328) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)].
42. Adjusting neutrino interaction models and evaluating uncertainties using NOvA near detector data [Текст] / M. A. Acero [и др.] // Eur. Phys. J. C. — 2020. — Т. 80, № 12. — С. 1119. — arXiv: [2006.08727](https://arxiv.org/abs/2006.08727) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)].
43. The GENIE Neutrino Monte Carlo Generator [Текст] / C. Andreopoulos [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2010. — Т. 614. — С. 87–104. — arXiv: [0905.2517](https://arxiv.org/abs/0905.2517) [[hep-ph](https://arxiv.org/archive/hep)].
44. TMVA - Toolkit for Multivariate Data Analysis [Текст] / A. Hocker [и др.]. — 2007. — Март. — arXiv: [physics/0703039](https://arxiv.org/abs/physics/0703039).
45. *Feldman, G. J.* A Unified approach to the classical statistical analysis of small signals [Текст] / G. J. Feldman, R. D. Cousins // Phys. Rev. D. — 1998. — Т. 57. — С. 3873–3889. — arXiv: [physics/9711021](https://arxiv.org/abs/physics/9711021).
46. *Sanchez, M.* NOvA Results and Prospects [Текст] / M. Sanchez. — June 2018. — URL: <https://zenodo.org/record/1286758#.YBumSS16BBw> ; Neutrino 2018.
47. *Dunne, P.* Latest Neutrino Oscillation Results from T2K [Текст] / P. Dunne. — 2020. — URL: https://indico.fnal.gov/event/43209/contributions/187830/attachments/129636/%20159603/T2K%5C_Neutrino2020.pdf ; NEUTRINO.
48. Introduction of Gadolinium into Super-Kamiokande and the Start of New Observations [Текст]. — URL: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/news/2020/08/sk-gd-detail-e.html>.
49. *Kelly, K. J.* Matter Density Profile Shape Effects at DUNE [Текст] / K. J. Kelly, S. J. Parke // Phys. Rev. D. — 2018. — Т. 98, № 1. — С. 015025. — arXiv: [1802.06784](https://arxiv.org/abs/1802.06784) [[hep-ph](https://arxiv.org/archive/hep)].
50. Neutrino Physics with JUNO [Текст] / F. An [и др.] // J. Phys. G. — 2016. — Т. 43, № 3. — С. 030401. — arXiv: [1507.05613](https://arxiv.org/abs/1507.05613) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/archive/physics)].
51. Physics Potential of the ICAL detector at the India-based Neutrino Observatory (INO) [Текст] / S. Ahmed [и др.] // Pramana. — 2017. — Т. 88, № 5. — С. 79. — arXiv: [1505.07380](https://arxiv.org/abs/1505.07380) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/archive/physics)].
52. Letter of intent for KM3NeT 2.0 [Текст] / S. Adrian-Martinez [и др.] // J. Phys. G. — 2016. — Т. 43, № 8. — С. 084001. — arXiv: [1601.07459](https://arxiv.org/abs/1601.07459) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
53. *Santen, J. van.* IceCube-Gen2: the next-generation neutrino observatory for the South Pole [Текст] / J. van Santen // PoS. — 2018. — Т. ICRC2017. — С. 991.

Колупаева Людмила Дмитриевна

Анализ данных эксперимента NOvA с целью измерения параметров
осцилляций нейтрино

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

