

Форма продления Проекта

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____ / _____ /

“ _____ “ _____ 202_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОДЛЕНИЯ
ПРОЕКТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы

02-2-1099-2010/2023 Изучений нейтринных осцилляций

1.2. Шифр проекта

Проект NOvA/DUNE

1.2. Лаборатория

ЛЯП, ЛФВЭ, ЛТФ, ЛИТ

1.3. Научное направление

Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика

1.4. Наименование проекта

NOvA/DUNE

1.5. Руководитель проекта

А.Г. Ольшевский

1.6. Заместитель руководителя проекта (научный руководитель проекта)

Н.В. Анфимов, О.Б. Самойлов

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Нейтринная физика — это активно развивающаяся область физики высоких энергий, которая за последние 25 лет получила дополнительный импульс благодаря открытию явления нейтринных осцилляций в экспериментах Super-Kamiokande и SNO. Руководители этих экспериментов были совместно удостоены Нобелевской премии в 2015 году. За два десятилетия, прошедшие после этого открытия, были проведены обширные исследования этого явления с использованием множества уникальных экспериментов, которые обеспечили выдающиеся точные измерения параметров, определяющих этот процесс.

Нейтринные осцилляции являются периодическими переходами между различными ароматами нейтрино. Впервые этот процесс был предложен Бруно Понтекорво, всемирно известным ученым из ОИЯИ, еще в 1950-х годах. Осцилляции возможны, потому что нейтрино — массивные частицы, которые могут смешиваться друг с другом. Параметрами осцилляций нейтрино в случае трех нейтринных ароматов являются две разности квадратов масс и три угла смешивания. Поведение нейтринных осцилляций зависит от этих параметров, а также от плотности вещества, пройденного пути и их энергии. Кроме того, еще одним параметром, входящим в формулу вероятности осцилляций, является фаза нарушения CP-четности в лептонном секторе. Осцилляции не чувствительны к возможным майорановским фазам, которые (если они существуют) также входят в матрицу смешения.

В настоящее время целью осцилляционных экспериментов является измерение порядка масс нейтрино и фазы CP-нарушения. Между тем, дополнительная цель состоит в том, чтобы повысить точность измерения уже известных параметров. Все эти параметры являются фундаментальными характеристиками нейтрино как частицы Стандартной модели с многочисленными приложениями как в теории, так и в других экспериментах с нейтрино.

Существует несколько типов экспериментов, предназначенных для изучения нейтринных осцилляций. Традиционно эти эксперименты делятся на четыре категории в зависимости от типа источника нейтрино: солнечные, атмосферные, реакторные и ускорительные. Первые три типа используют бесплатные источники частиц, но эксперименты с ускорительными нейтрино имеют преимущество, которое заключается в точном контроле параметров пучков. Из-за различий в экспериментальных установках каждый тип эксперимента чувствителен к различным параметрам осцилляций. Однако как порядок масс нейтрино, так и фазу нарушения CP-четности можно измерить с помощью нейтринных пучков ускорителя, которые также имеют возможность переключаться между режимами работы с нейтрино и антинейтрино, что важно для измерения δ_{CP} и устранения вырождений.

В настоящее время в мире проводятся два ускорительных нейтринных эксперимента, целью которых является изучение осцилляций трех ароматов. Одним из них является NOvA, нейтринный эксперимент с длинной базой, проводимый в Национальной ускорительной лаборатории имени Ферми в США. NOvA использует два функционально идентичных трековых калориметра, расположенных на расстоянии 809 км друг от друга, для наблюдения за появлением электронных (анти)нейтрино и исчезновением мюонных (анти)нейтрино в пучке NuMI мощностью 850 кВт с преобладанием мюонных (анти)нейтрино. Наблюдая эти осцилляции нейтрино и антинейтрино, NOvA исследует нерешенные вышеупомянутые вопросы в физике нейтрино, включая порядок масс нейтрино, лептонное CP-нарушение, параметризованное δ_{CP} , большее расщепление массы нейтрино Δm_{32}^2 и угол смешивания θ_{23} .

Ожидается, что эксперимент NOvA будет продолжаться до 2026 года. Предполагается, что он будет иметь чувствительность примерно до 4 сигма к порядку масс нейтрино и менее 2 сигма к нарушению CP-четности. Эти параметры станут целью экспериментов следующего поколения, таких как DUNE. DUNE, который является мега-сайенс проектом и следующим флагманским экспериментом в Лаборатории Ферми в физике нейтрино, имеет очень амбициозную программу, которая станет возможной благодаря самой высокой мощности пучка нейтрино, огромным точным время-проекционным детекторам с жидким аргоном и очень длинной базой 1300 км. Несмотря на конкурентный характер физики нейтринных осцилляций, ожидается, что конструктивные характеристики DUNE обеспечат ему значительное преимущество перед другими проектами. Целью DUNE является завершение измерения порядка масс нейтрино и фазы CP-нарушения.

Группа ОИЯИ участвует в эксперименте NOvA с 2014 г., выполняя широкий спектр задач, включая экспериментальные методы, компьютерные вычисления, программное обеспечение DDT и DAQ, анализ трехфлейворных осцилляций (аппроксимации данных, выполненные учеными из ОИЯИ, стали официальными результатами NOvA в 2018-2020 гг.), а также другие физические анализы и поиски новой физики. Кроме того, в Дубне построен Центр удаленного управления (англ. Remote Operation Center, ROC) NOvA для управления набором данных. Группа ОИЯИ присоединилась к эксперименту DUNE в 2020 году и принимает участие в создании ближних детекторов этого эксперимента и подготовке к анализу. ОИЯИ отвечает за проектирование, производство и эксплуатацию системы считывания света в жидкоаргоновой TPC ближнего детектора DUNE (ND-LAr).

Еще одним предлагаемым вкладом ОИЯИ является строу-трекер (англ. Straw Tube Tracker, STT) DUNE ND. Этот вариант с самого начала основывался на опыте группы ОИЯИ (ЛФВЭ), полученном в ходе предыдущего производства строу-трубок. Ожидается, что ОИЯИ расширит этот опыт и сохранит ведущую научную позицию в строу проекте. Группа ОИЯИ уже провела некоторые НИОКР, и в ближайшие годы предполагается провести обширное исследование конструкции и испытания прототипа, а также специальные НИОКР, посвященные технологии производства строу-трубок.

Ученые ОИЯИ участвуют в менеджменте коллабораций NOvA и DUNE, занимая различные должности, такие как менеджер L3 группы создания светосчитывающей системы DUNE ND-LAr, со-руководитель группы экзотической физики NOvA, со-руководитель группы продакшен NOvA, менеджер ROC-Dubna, специалисты по сбору данных, DDT и ROC.

Несмотря на очень высокую конкуренцию в физике осцилляций нейтрино, все текущие и планируемые эксперименты прекрасно дополняют друг друга. Таким образом, работающие эксперименты NOvA и T2K признают сильные стороны друг друга и проводят полностью совместный анализ с участием ОИЯИ со стороны NOvA. Будущие эксперименты IceCube, JUNO, ORCA, Hyper-Kamiokande и DUNE наверняка обеспечат не только перекрестную проверку друг друга, но и, будучи правильно скомбинированными, привнесут новые особенности относительно индивидуальных результатов.

Работа NOvA/DUNE в ОИЯИ привлекает большое внимание студентов и молодых сотрудников. Это дает большой хороший потенциал для роста и расширения участия ОИЯИ в современной и актуальной физике с хорошей заметностью этого участия.

2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Цель

Основная цель проекта NOvA/DUNE состоит в измерении еще неизвестных параметров нейтринных осцилляций, а именно порядка масс нейтрино и фазы CP-нарушения. Кроме того, проект направлен на повышение точности остальных, уже известных параметров в этой области исследований. Ожидается, что проводимый в настоящее время эксперимент NOvA¹ внесет ценный вклад в глобальное понимание этих параметров. Объединение результатов NOvA с результатами других текущих и предстоящих экспериментов может дать важную информацию о значениях этих неизвестных параметров. Но окончательный ответ дадут эксперименты следующего поколения, такие как DUNE². Опыт, полученный группой ОИЯИ в эксперименте NOvA, также является важной подготовкой к будущим измерениям в DUNE.

¹ Ayres D et al. (NOvA Collab), hep-ex/0503053 (2004)

² Abi B et al. (DUNE Collab) JINST 15 08 T08008 (2020)

Помимо основной цели, проекты NOvA и DUNE имеют множество других научных целей. К ним относятся поиски за пределами Стандартной Модели и изучение природных источников частиц, таких как нейтрино от сверхновых, атмосферные мюоны и обнаружение магнитных монополей, если они существуют. Дальнейшее планирование DUNE включает в себя рассмотрение различных конструкций модуля FD³, которые позволят достичь более широкого спектра научных задач при сохранении потенциала в исследовании осцилляций. В случае их принятия DUNE также сможет вести поиск безнейтринного двойного бета-распада и распада протона.

Актуальность и научная новизна

Научные причины для проведения исследований нейтринных осцилляций многочисленны. Одной из причин является значительная роль, которую порядок масс играет в моделировании потоков нейтрино при взрывах сверхновых⁴. Кроме того, этот параметр имеет решающее значение для оценки перспектив целого класса экспериментов в нейтринной физике, направленных на поиск безнейтринного двойного бета-распада⁵, и является входным параметром для экспериментов по прямому измерению масс нейтрино⁶ и поиску реликтовых нейтрино⁷. Фаза CP-нарушения в лептонном секторе, δ_{CP} , также имеет одно основное приложение, которое невозможно переоценить — оно связано с проверкой возникновения асимметрии между материей и антиматерией во Вселенной⁸.

Все параметры осцилляций нейтрино являются фундаментальными характеристиками этой частицы и необходимы для понимания процесса распространения нейтрино, который влияет на любые возможные практические применения этих частиц, связанные с их движением. Некоторые из применений пучков нейтрино включают мониторинг работы ядерных реакторов, томографию Земли и исследование космоса с использованием нейтрино сверхвысоких энергий.

За последние два десятилетия был достигнут значительный прогресс в физике нейтринных осцилляций. В экспериментах SNO⁹ и KamLAND¹⁰ параметры нейтрино Δm_{21}^2 и θ_{12} были очень точно измерены с помощью солнечных нейтрино. Однако в настоящее время существует интересное противоречие¹¹ между измерениями Super-Kamiokande¹² и KamLAND+SNO, хотя в последние годы Super-Kamiokande показал тенденцию к уменьшению значимости этого несоответствия. Атмосферный параметр Δm_{32}^2 также хорошо известен благодаря таким экспериментам, как Super-Kamiokande, MINOS¹³, T2K¹⁴, NOvA и Daya Bay¹⁵, но угол смешивания θ_{23} все еще неизвестен, и неясно, к какому октанту он принадлежит.

³ Askins M et al. (Theia Collab) Eur. Phys. J. C 80 5 416 (2020)

⁴ Scholberg K J. Phys. G 45 1 014002 (2018)

⁵ Dolinski M J et al. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 69 219 (2019)

⁶ Qian X et al. Prog.Part.Nucl.Phys. 83 1 (2015)

⁷ De Salas P F et al. Front. Astron. Space Sci. 5 36 (2018)

⁸ Pascoli S et al. Phys. Rev. D 75 083511 (2007), Branco G et al. Phys. Lett. B 645 432 (2007)

⁹ Ahmad Q et al. (SNO Collab) Phys. Rev. Lett. 89 011301 (2002)

¹⁰ Eguchi K et al. (KamLAND Collab) Phys. Rev. Lett. 90 021802 (2003)

¹¹ Nakajima Y. Recent results and future prospects from Super-Kamiokande., NEUTRINO-2020 conference (2020)

¹² Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab) Phys. Rev. Lett. 81 1562 (1998)

¹³ Adamson P et al. (MINOS Collab) Phys.Rev.Lett. 125 (2020) 13, 131802

¹⁴ Abe K et al. (T2K Collab) Phys.Rev.D 103 (2021) 11, 112008

¹⁵ Adey D et al. (Daya Bay Collab) Phys.Rev.Lett. 121 (2018) 24, 241805

Эксперимент Daya Bay впервые измерил¹⁶ ненулевой угол смешивания θ_{13} в 2012 году, что открыло возможность изучения CP-нарушения в лептонном секторе посредством нейтринных осцилляций.

Таким образом, эксперименты с нейтрино на ускорителях, такие как T2K и NOvA, сделали одной из своих основных целей изучение δ_{CP} . Однако из-за статистических неопределенностей текущий потенциал этих экспериментов недостаточен для обеспечения надежных измерений, даже несмотря на то, что они могут переключаться между пучками нейтрино и антинейтрино. В то время как длинная база NOvA также позволяет измерять порядок масс нейтрино, наличие больших вырождений с другими параметрами осцилляций затрудняет точное измерение. Другой тип нейтринных экспериментов, которые могут измерять как δ_{CP} , так и порядок масс нейтрино — это эксперименты с атмосферными нейтрино, в которых используются нейтрино и антинейтрино, рожденные естественным путем в результате столкновения космических лучей с атмосферой. В настоящее время основным игроком в этой области является эксперимент Super-Kamiokande. Однако измерение δ_{CP} с атмосферными нейтрино затруднено из-за сложности разделения событий нейтрино/антинейтрино. Тем не менее, NOvA, Super-Kamiokande и T2K являются единственными текущими экспериментами по осцилляциям, представляющими измерения δ_{CP} и порядка масс. В последние годы сообщалось об интересном расхождении между этими экспериментами: и Super-Kamiokande¹⁷, и T2K¹⁸ предпочитают значения δ_{CP} , близкие к максимальному нарушению CP ($3\pi/2$), в то время как NOvA не видит никакой асимметрии между нейтрино и антинейтрино¹⁹. Однако следует отметить, что значимость этого расхождения довольно мала, $< 2\sigma$. Несмотря на то, что T2K, Super-Kamiokande и NOvA будут работать еще несколько лет, по текущим оценкам ясно, что они не смогут завершить измерение порядка масс нейтрино и δ_{CP} . Есть некоторые ожидания относительно совместного анализа данных этих экспериментов. Совместная чувствительность в открытом доступе не указана, но почти наверняка она будет выше, чем индивидуальная.

Несколько готовящихся экспериментов имеют целью завершить измерения δ_{CP} и порядка масс нейтрино. Чувствительность к порядку масс текущих и будущих проектов показана на Рисунке 1. DeepCore IceCube²⁰ находится в стадии модернизации, которая должна обеспечить возможность этого эксперимента не только измерять Δm_{32}^2 и θ_{23} , но и порядок масс со скромной чувствительностью не выше 4σ после 5 лет работы. Примерно через год эксперимент JUNO²¹ должен начать собирать данные. Этот реакторный эксперимент сможет обеспечить чистое измерение порядка масс нейтрино без каких-либо вырождений с другими параметрами осцилляций. Это очень ценно для перекрестной проверки. Чувствительность эксперимента составляет около 3σ после 6 лет работы. Нейтринный телескоп ARCA KM3NeT в Средиземном море будет иметь соседний кластер ORCA²² с плотной расстановкой гирлянд, развернутых для изучения осцилляций с атмосферными нейтрино. Этот эксперимент будет иметь очень приличную чувствительность к порядку масс нейтрино, что позволит ему провести это измерение для всех случаев параметров осцилляций после примерно 10 лет сбора данных.

¹⁶ An F et al. (Daya Bay Collab) Phys. Rev. Lett. 108 171803 (2012)

¹⁷ Linyan Wan. (2022, June 23 at Neutrino-2022) "New Results with Atmospheric Neutrinos at Super-Kamiokande" <https://doi.org/10.5281/zenodo.6694761>

¹⁸ Abe K et al. (T2K Collab) e-Print: 2303.03222 [hep-ex]

¹⁹ Acero M A et al. (NOvA Collab) Phys.Rev.D 106 (2022) 3, 032004

²⁰ Ishihara A (IceCube Collab) PoS ICRC2019 1031 (2020)

²¹ Adam T et al., 1508.07166 [physics.ins-det] (2015)

²² Adrian-Martinez S et al. (KM3Net Collab) J. Phys. G 43 8 084001 (2016)

Ускорительные эксперименты с длинной базой Hyper-Kamiokande²³ и DUNE имеют очень похожую постановку. В случае DUNE чувствительность к порядку масс нейтрино составляет $>5\sigma$ после нескольких лет сбора данных для всех возможных значений параметров осцилляций. Оба эксперимента имеют схожее разрешение на измерение δ_{CP} (Рисунок 2).

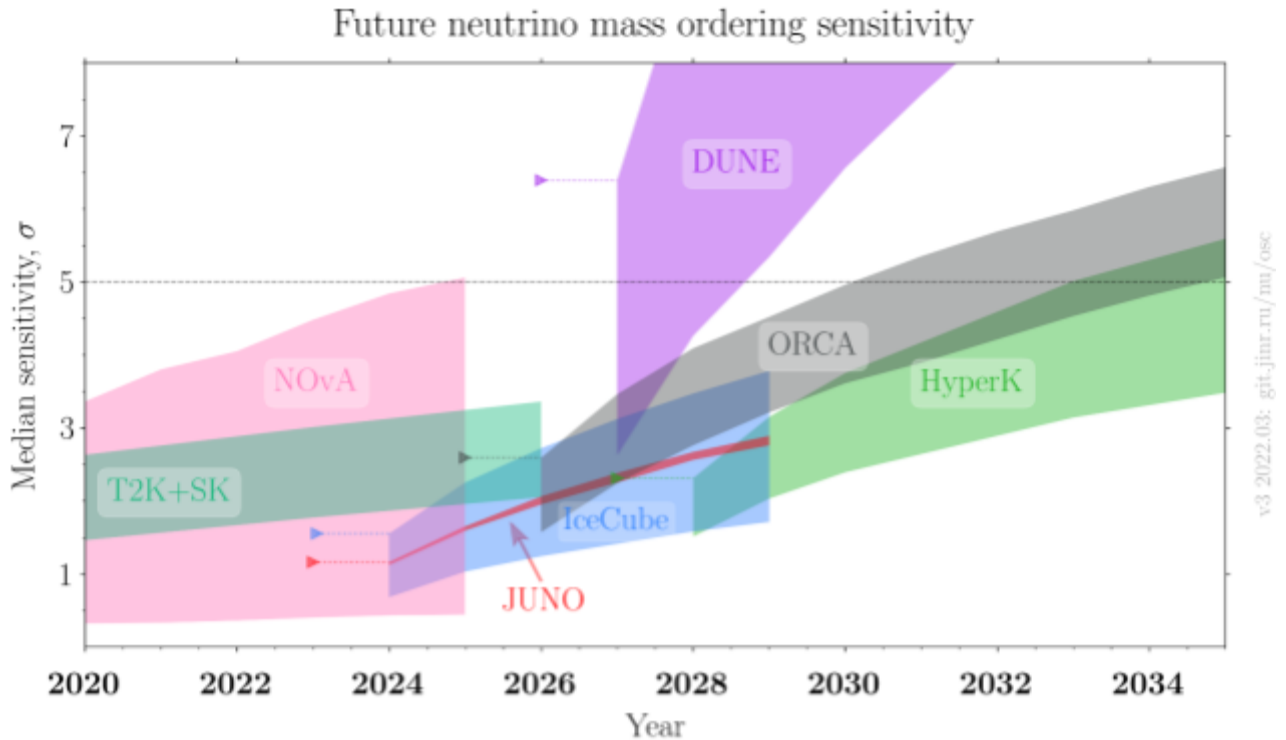


Рисунок 1. Ожидаемая чувствительность текущих и будущих экспериментов к порядку масс нейтрино по годам. Полосы представляют области возможных измерений, ограниченные комбинациями параметров осцилляций, что приводит к экстремальным значениям чувствительности для каждого эксперимента. Треугольные маркеры отмечают начало набора

На текущем ландшафте также есть несколько будущих проектов с неясным статусом: PINGU²⁴, ICAL@INO²⁵, ESSvSB²⁶, Protvino-to-ORCA²⁷, SuperCHOOZ²⁸, второй дальний детектор в Корее²⁹ для Hyper-Kamiokande. В случае их одобрения, скорее всего, они начнут давать результаты в конце 2030-х годов.

²³ Abe K et al. (Hyper-Kamiokande Collab), 1805.04163 [physics.ins-det] (2018)

²⁴ Aartsen M et al. (IceCube Collab) J. Phys. G 44 5 054006 (2017)

²⁵ Ahmed S et al. (ICAL Collab) Pramana 88 5 79 (2017)

²⁶ Blennow M et al. Eur. Phys. J. C 80 3 190 (2020)

²⁷ Akhmedov A V et al. Eur. Phys. J. C 79 9 758 (2019)

²⁸ A. Cabrera (29 Nov 2022, seminar at CERN) "The SuperChooz Experiment: Unveiling the Opportunity" <https://indico.cern.ch/event/1215214/>

²⁹ Abe K et al. (Hyper-Kamiokande Collab) PTEP 2018 6 063C01 (2018)

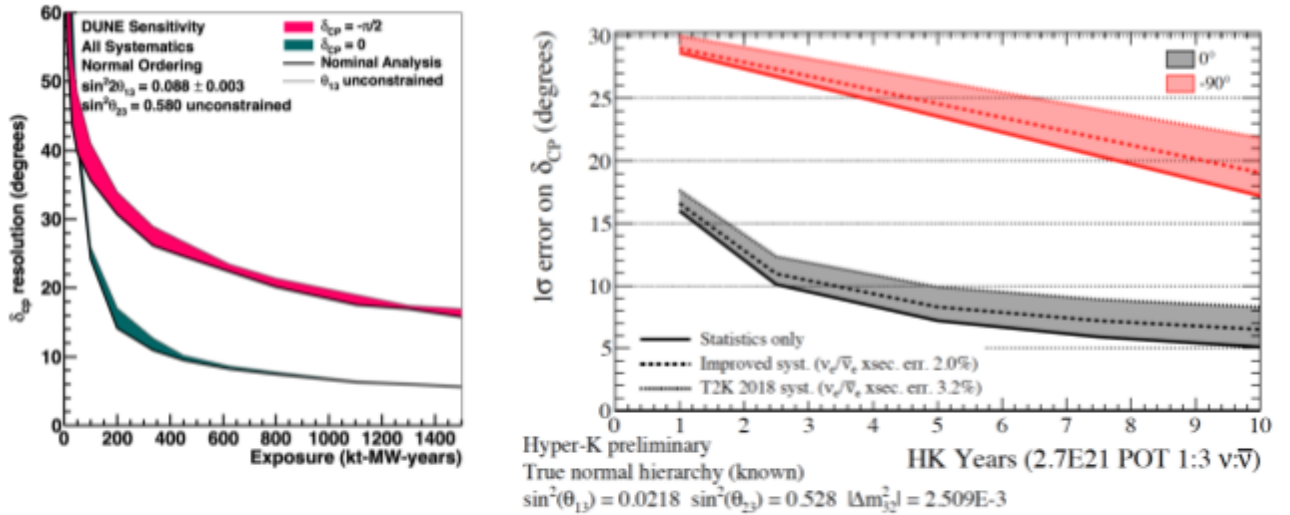


Рисунок 2. Ожидаемая чувствительность экспериментов DUNE (слева) и Hyper-Kamiokande (справа) к разрешению CP для случаев фазы нарушения CP-четности, равной 0 и $3\pi/2$.

Методы и подходы

И NOvA, и DUNE представляют собой ускорительные нейтринные эксперименты с длинной базой. В случае NOvA ускорительный комплекс в Фермилабе, унаследованный от Tevatron, используется для производства протонов с энергией 120 ГэВ, которые сталкиваются с углеродной мишенью. Пучковая линия унаследована от предшественника NOvA, эксперимента MINOS. Магнитные горны, расположенные после мишени, фокусируют либо положительно, либо отрицательно заряженные мезоны в зависимости от режима, в котором работает эксперимент (нейтрино или антинейтрино). Переключение тока горна позволяет менять знак электрического заряда фокусируемого пучка. Получившиеся пионы и каоны рождают нейтрино при движении по распаднему каналу. В случае нейтринной моды (антинейтринной моды) пучок имеет следующий состав — 95% ν_μ , 4% $\bar{\nu}_\mu$, 1% $\nu_e + \bar{\nu}_e$ (93% $\bar{\nu}_\mu$, 6% ν_μ , 1% $\nu_e + \bar{\nu}_e$). Добавление фона неправильного знака и ν_e компонента в основном возникает из-за распадов мюонов. Ускорительный комплекс в Фермилабе постоянно модернизируется, чтобы производить больше нейтрино. Так, проектная мощность протонного пучка для NOvA составляла 700 кВт, а недавно были установлены мишень и горны, способные принять пучок мощностью 900 кВт. В настоящее время эксперимент работает при мощности пучка 850 кВт. Эксперименты с нейтрино на ускорителе измеряют экспозицию в терминах протонов, доставленных на мишень (POT). Самый последний анализ NOvA был выполнен с 13.6×10^{20} POT (пучок нейтрино) и 12.5×10^{20} POT (пучок антинейтрино). Ожидается, что к концу набора данных NOvA примерно удвоит эту экспозицию.

Нейтрино проходят через земную кору, чтобы достичь Ближнего детектора, который расположен в 1 км после мишени для измерения первоначального потока нейтрино. Это важный инструмент для контроля исходного состава пучка, особенно существующих фонов и систематики. Дальний детектор находится на расстоянии 810 км от мишени и измеряет поток нейтрино после осцилляций. Оба детектора NOvA смещены с оси пучка на угол 14 мрад, что позволяет получить узкий энергетический пик при 2 ГэВ и подавить высокоэнергетичный фон в хвосте спектра. Детекторы NOvA представляют собой идентичные трековые калориметры,

изготовленные из ПВХ-ячеек, заполненных жидким органическим сцинтиллятором на основе минерального масла с 5% примесью псевдокумола. Эти ячейки составлены в плоскости, причем плоскости с горизонтальной и вертикальной ориентацией чередуются друг с другом. Дальний детектор (Ближний детектор) имеют размеры 15,4 м x 15,4 м x 60 м (4 м x 4 м x 16 м). Схема эксперимента показана на Рисунке 3.

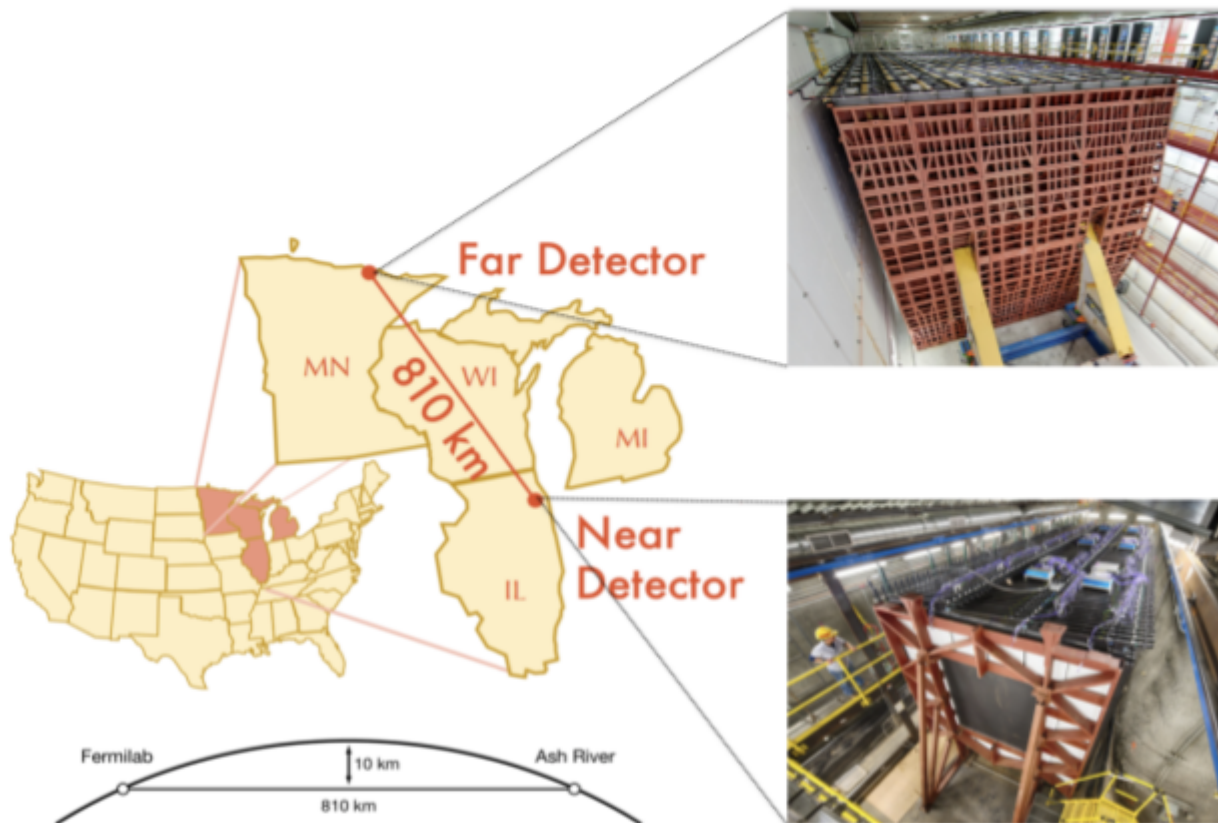


Рисунок 3. Эксперимент NOvA, постановка и детекторы.

Детекторы оптимальны для измерения $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ и $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$, провзаимодействовавших через заряженные токи. Из-за одинаковых детекторов систематические погрешности, связанные с сечениями взаимодействия нейтрино и потоком, частично сокращаются. Прогнозы на основе экстраполяции измеренного числа событий в Ближнем детекторе используются для подгонки данных в Дальнем детекторе. Коллаборация NOvA разработала два подхода к аппроксимации данных, основанные на частотной и байесовской парадигмах, и оба показали схожий результат. Сотрудники ОИЯИ работают в группе трехфлейворного осцилляционного анализа в NOvA с различными видами деятельности в зависимости от потребностей группы. В настоящее время они работают над оценкой энергии нейтрино, подгонкой и чувствительностью в рамках подготовки к анализу в 2024 году.

Еще одним интересным применением данных NOvA является совместный анализ с другими экспериментами. В настоящее время коллаборации NOvA и T2K разрабатывают совместный трехфлейворный анализ данных экспериментов, результаты которого, как ожидается, будут оглашены в 2023 году. Сотрудники ОИЯИ участвуют в разработке этого анализа со стороны коллаборации NOvA.

NOvA имеет различные анализы с природными источниками нейтрино и других частиц. Одним из интересных измерений с точки зрения определения параметров осцилляций является анализ осцилляций атмосферных нейтрино. NOvA регистрирует тысячи таких нейтрино в год, и эти осцилляции обладают чувствительностью к основной цели NOvA. Это также хорошая

проверка гипотезы нестандартных взаимодействий (NSI) и фон для нескольких физических анализов в дальнем детекторе. В настоящее время группа ОИЯИ приступила к разработке этого анализа.

NOvA — крупнейший из работающих в настоящее время детекторов сверхновых на основе углерода. В случае вспышки сверхновой в нашей Галактике он предоставит бесценные данные, которые в сочетании с данными других детекторов, использующими различные материалы для детектирования нейтрино, позволят получить содержание состава ароматов нейтрино от вспышки сверхновой. ND и FD имеют примерно одинаковые возможности детектирования сверхновых, при этом небольшая масса ND компенсируется его низким фоном. NOvA обладает собственным триггером на запись данных при вспышке сверхновой, который сработает, если сверхновая находится в пределах 7 кпк (13 кпк) для звезды с массой 9,6 (27) солнечных масс. Также запись данных запускается от системы оповещения SNEWS. При расчетной частоте появления сверхновых в Галактике, равной 3 в столетие, существует 15%-ная вероятность того, что NOvA зафиксирует вспышку сверхновой до 2025(6), причем вероятность линейно возрастает с каждым дополнительным годом. Группа из ОИЯИ разработала комбинированную систему обнаружения сверхновых для ближнего и дальнего детекторов и вовлечена в процесс её мониторинга.

Дальний детектор NOvA, расположенный на поверхности Земли, обладает уникальной способностью регистрировать магнитные монополи с малой массой (менее 10^{10} ГэВ), которые не достигают подземных детекторов. Что позволяет соответствовать и даже превосходить пределы MACRO и SLIM, охватывая более широкий диапазон масс монополей. Текущие возможности эксперимента NOvA (конструкция, аппаратное и программное обеспечение) позволяют регистрировать треки монополей со скоростью $>10^{-4}$. Поиск монополей делится на две опции, медленные и быстрые монополи, для которых используются различные идеи по регистрации сигнала, скорость трека для медленных монополей и сверхвысокая ионизация для быстрых монополей соответственно. Для обоих сигналов практически нет фоновых событий. Группа из ОИЯИ проводит поиск медленных монополей в NOvA.

Благодаря наземному расположению дальнего детектора NOvA его можно использовать в качестве телескопа для космических и атмосферных частиц. Прекрасная возможность для детального изучения потоков мюонов в атмосфере: сезонные вариации, корреляция с солнечными и погодными явлениями, геомагнитные эффекты, измерение спектров мюонов и ливней высоких энергий и т.д. Дубненская группа анализирует геомагнитные эффекты из восточно-западной асимметрии мюонных спектров и тестирует методику измерения спектра мюонов высоких энергий, предложенную Р.П. Кокоулиным и др.

По сравнению с NOvA эксперимент DUNE будет иметь несколько существенных отличий. Ожидается, что этот эксперимент начнет сбор данных в конце 2020-х годов. Ускорительный комплекс в Фермилабе в настоящее время модернизируется, чтобы обеспечить протонный пучок мощностью $\sim 1,2$ МВт для DUNE (Фаза-I эксперимента), с планами увеличить мощность пучка до 2,4 МВт после нескольких лет работы путем замены некоторых частей ускорительного комплекса (Фаза-II). Кроме того, все компоненты процесса получения нейтринного пучка (мишень, горны, распадный канал) будут новыми, а нейтрино пройдут 1300 км до Дальнего детектора (Рисунок 4). Оба детекторных комплекса будут располагаться на оси пучка, а широкий энергетический пик будет охватывать два максимума осцилляций, повышая чувствительность к δ_{CP} . Благодаря хорошему энергетическому разрешению детекторов будут устранены все недостатки расположения на оси.

Дальний детектор DUNE будет состоять из четырех модулей, два модуля TPC с размерами 19 м x 18 м x 66 м и объемом 17 кт жидкого аргона (LArTPC), каждый из которых будет установлен во время фазы I. Два других модуля находятся на рассмотрении для фазы II

эксперимента, при этом обсуждаются различные технологии для добавления, например, поиска безнейтринного двойного бета-распада к научным целям. Комплекс ближних детекторов³⁰ будет состоять из трех детекторов (Рисунок 5). Первый из них — NDLAG — TPC с жидким аргоном из 35 модулей для сохранения сходства с дальним детектором DUNE, но меньшего размера. Еще один детектор — NDGAr — будет измерять заряд мюонов, рожденных в нейтринных взаимодействиях и покидающих NDLAG. Он будет состоять из магнита и TPC с газообразным аргоном. Эти два детектора будут размещены на подвижной платформе, что позволит им проводить измерения пучка на различных положениях вне оси (концепция DUNE-PRISM). Третий детектор — система для обнаружения нейтрино на оси (SAND) - будет размещен на оси пучка и будет состоять из трекера из строу-трубок (STT), помещенного внутри магнита. Основной задачей этого детектора является обеспечение контроля пучка, особенно когда другие детекторы производят измерения вне оси. Предсказания DUNE-PRISM для дальнего детектора значительно отличаются от экстраполяции NOvA. Основная идея состоит в точном измерении потока нейтрино и составлении взвешенной суммы всех этих спектров, чтобы подавить зависимость от систематических неопределенностей, связанных с потоками и взаимодействиями нейтрино. Сотрудники ОИЯИ работают в группе DUNE-PRISM, разрабатывая предсказания числа событий для осцилляционного анализа в дальнем детекторе.

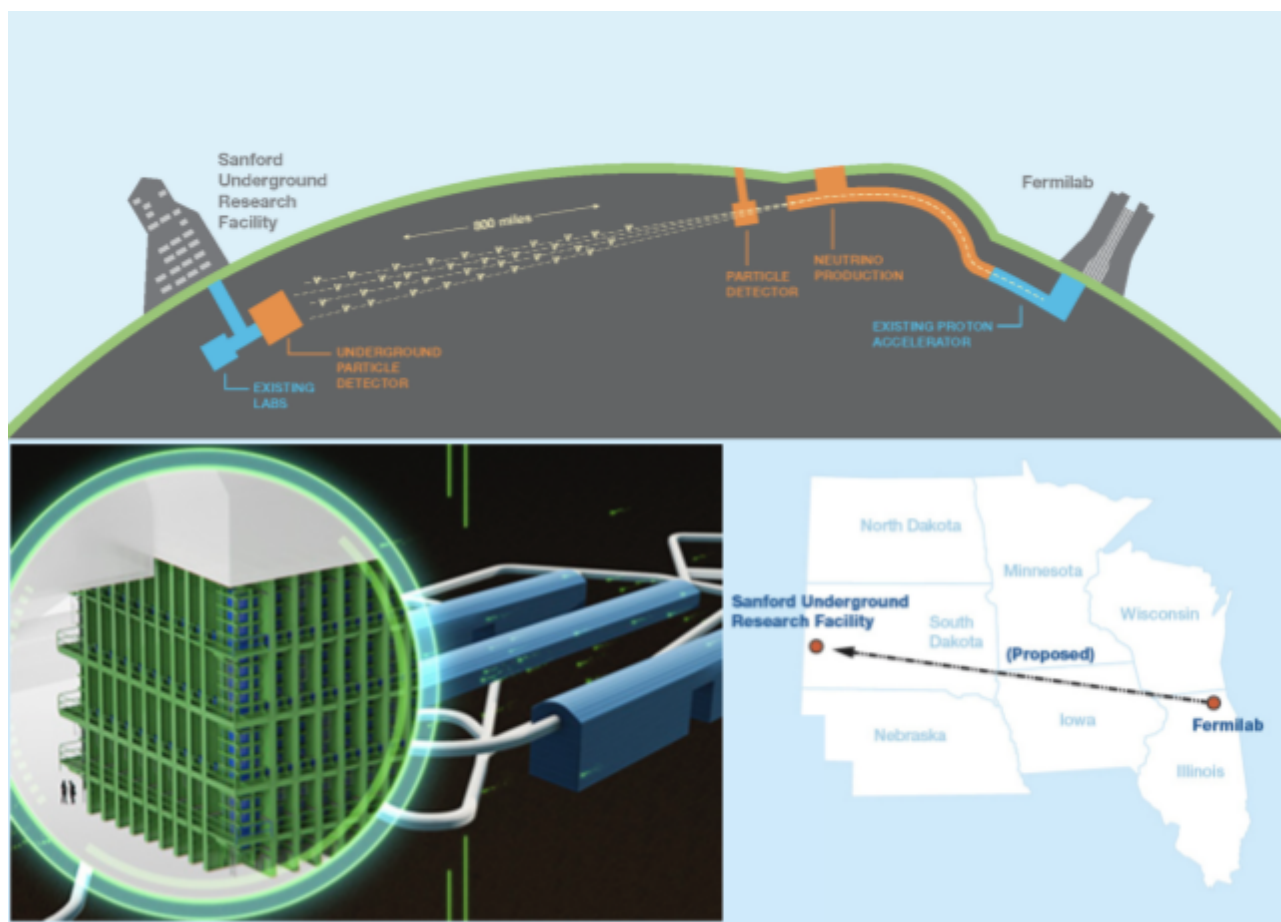


Рисунок 4. Эксперимент DUNE.

Благодаря различным детекторам, используемым в DUNE, можно будет проводить различные интересные измерения в физике элементарных частиц и физике нейтрино, особенно при изучении взаимодействия нейтрино. Для системы STT в SAND рассматривается размещение слоев полипропилена и углерода между модулями, что позволит идентифицировать

³⁰ Abed Abud A et al. (DUNE Collab) Instruments 5 4 31 (2021)

взаимодействия нейтрино с водородом методом вычитания $\text{CH}_2\text{-C}$. Долгое время единственные доступные измерения сечений взаимодействия нейтрино с водородом ограничивались результатами низко статистических экспериментов с пузырьковыми камерами. SAND обеспечит ценные данные для анализа осцилляций благодаря дополнительной тонкой мишени из жидкого аргона, помещенной внутри детектора. Ожидается, что сравнение сечений с водородом и аргоном уменьшит неопределенности в расчетах взаимодействий нейтрино, связанных с ядерными эффектами. SAND позволит изучать спиновую физику (поляризацию Λ -гиперонов, спиновую асимметрию векторных мезонов), множественность и выходы рождения частиц, сечения взаимодействия нейтрино на различных мишенях, которые можно поместить внутри детектора, угол Вайнберга, квазиупругие и резонансные взаимодействия. Группа ОИЯИ занимается разработкой реконструкции в STT, программного обеспечения для мониторинга пучка, резонансных взаимодействий нейтрино и анализа рождения странных частиц.

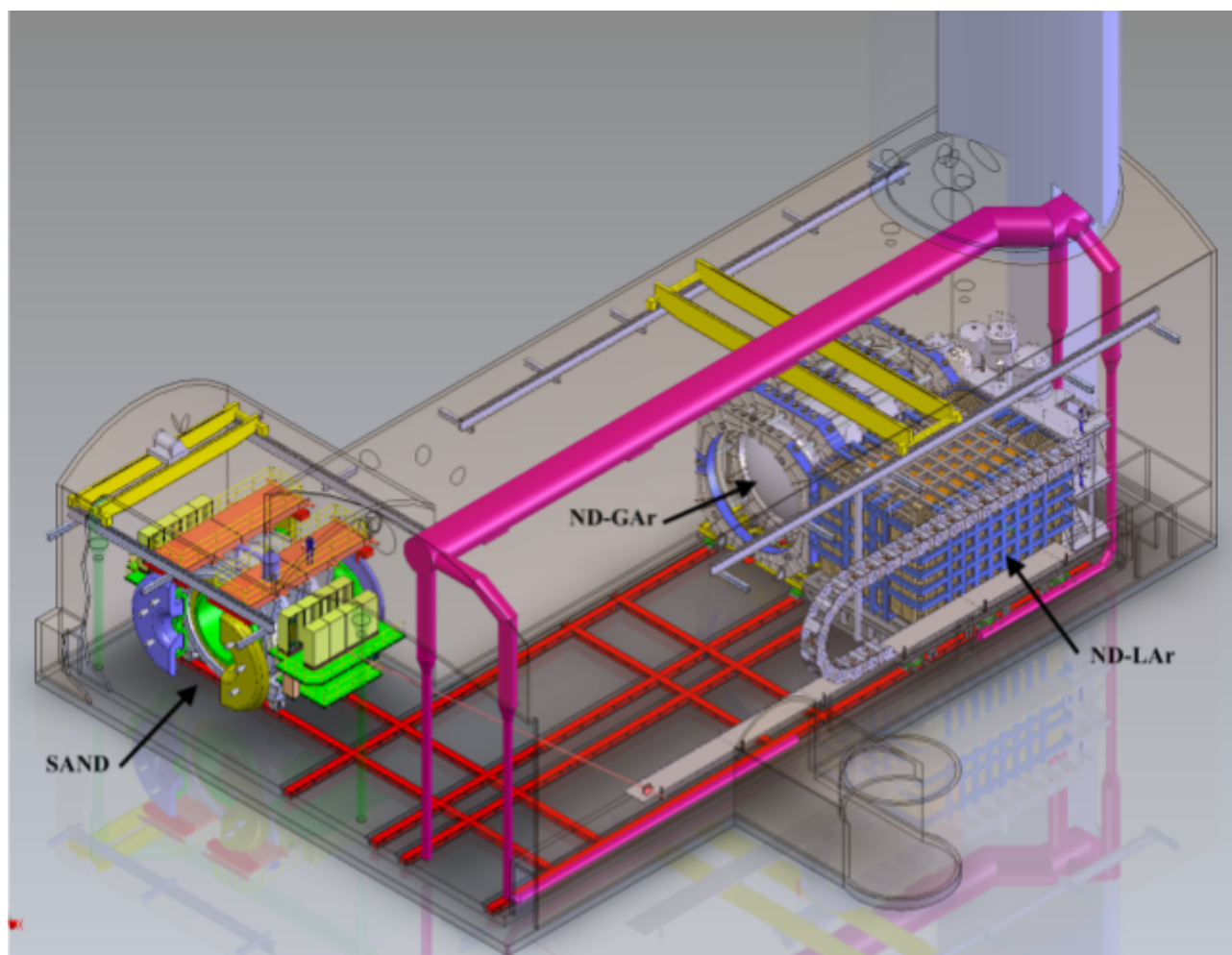


Рисунок 5. Комплекс ближнего детектора DUNE в Лаборатории Ферми. ND-LAr и ND-GAr расположены на подвижной платформе для измерения нейтринного пучка в различных положениях от его оси.

В течение многих лет ОИЯИ является частью компьютерной сети набора и обработки экспериментальных данных и моделирования Монте-Карло эксперимента NOvA. В ОИЯИ была развернута компьютерная инфраструктура, включающая вычислительные ресурсы и хранилище данных с различными механизмами доступа для обеспечения потребностей совместной работы коллаборации, а также задач Дубненской группы учёных. Впоследствии эта компьютерная инфраструктура превратилась в так называемую Нейтринную платформу (Neutrino Platform) —

набор вычислительных сервисов и ресурсов, совместно используемых всеми нейтринными экспериментами в ОИЯИ.

Недавно наш институт также присоединился к компьютерным задачам эксперимента DUNE. Общие объемы данных нейтринных экспериментов меньше, чем, например, у текущих крупных экспериментов на БАК (LHC), DUNE в свою очередь будет использовать значительные вычислительные ресурсы. Ожидается, что значительная часть емкости дисков и вычислительных ядер (CPU) находится за пределами США (~ 50%), и требуется национальный вклад в размере не менее 5–20%, в зависимости от обстоятельств и возможностей каждой вычислительно-активной страны. ОИЯИ уже предоставил как CPU, так и дисковую емкость в качестве нашего национального вклада вычислительных мощностей для эксперимента через грид-сайт в ОИЯИ, который изначально был развернут для эксперимента NOvA. Поскольку DUNE планирует расширить свои вычислительные потребности до ~20 тыс. ядер CPU и ~40 ПБ дискового пространства к 2025 г. (по сравнению с 14 тыс. и ~25 ПБ дискового пространства в 2023 г.), вычислительные мощности ОИЯИ необходимо будет соответственно увеличивать.

В отличие от DUNE, NOvA не предъявляет жестких требований к сотрудничающим институтам по вычислительным ресурсам. Поэтому ожидается, что совместное использование существующей вычислительной инфраструктуры нейтринной платформы (вместе с другими нейтринными экспериментами, в которых участвует ОИЯИ) покрывает потребности эксперимента.

Методики

Исследования сцинтиллятора NOvA

Проблемой при моделировании отклика детектора NOvA является световыход сцинтиллятора при прохождении различных заряженных частиц. В частности, известно, что свет сцинтиллятора насыщается для частиц с большой плотностью ионизационных потерь (так называемый закон Биркса). Другой эффект возникает, когда высокоскоростной электрон (или другая заряженная частица) проходит через диэлектрическую среду быстрее, чем скорость света внутри среды, излучаемые волны складываются, что приводит к когерентному излучению, известному как черенковское излучение.

В ОИЯИ построены два тестовых стенда для измерения свойств световыхода жидких сцинтилляторов: постоянной Биркса для протонов и вклада черенковского света. Постоянная Биркса была точно измерена для сцинтиллятора NOvA, но вклад черенковского света до сих пор уточняется. Сейчас основной задачей является измерение вклада черенковского света.

Стенд состоит из нескольких компонентов:

- Черный ящик, представляющий собой светонепроницаемый металлический ящик с оборудованием и с проходными разъемами. Черный ящик прикреплен к вращающейся платформе.
- 3 дюймовый ФЭУ Hamamatsu R12772 с цилиндрической кюветой из оптического стекла (диаметром 1 дюйм), расположенной внутри «черного ящика» в вертикальном положении.
- Кювета с жидким сцинтиллятором внутри используется как первый детектор схемы совпадений. В качестве второго детектора используется 2" NaI с ФЭУ.

Общая идея измерения заключается в использовании комптоновского гамма-рассеяния для «подготовки» электронов с различными энергиями и, следовательно, с разными скоростями в жидком сцинтилляторе.

Мы используем монохроматический источник ^{137}Cs с $E = 661,7$ кэВ. Вращая черный ящик, мы меняем угол рассеяния и, следовательно, энергию электронов отдачи. Затем мы

применяем поправку Биркса к световыходу. И в самом конце происходит подгонка ниже и выше черенковского порога и извлечение разницы наклона.

Сейчас мы подготовили стенд для черенковских измерений света и рассчитываем закончить исследования сцинтилляторов в 2024 году.

Система светосбора DUNE ND-LAr

Считывание заряда в LArTPC традиционно выполнялось с помощью набора проекционных проволочных плоскостей, что было успешно продемонстрировано, например, в экспериментах ICARUS, ArgoNeUT, MicroBooNE и ProtoDUNE-SP, а также, как и планировалось, для первого большого детекторного модуля эксперимента DUNE, который в настоящее время готовится для размещения в подземной лаборатории Sanford Underground Research Facility (SURF) в Южной Дакоте. Однако этот подход приводит к неопределенностям в трехмерной реконструкции информации о заряде, что создает серьезные проблемы для ближних детекторов на основе LArTPC, где нельзя избежать высокой интенсивности взаимодействий нейтрино и связанного с ним счета мюонов. В частности, трехмерная реконструкция становится ограниченной из-за наложения зарядовых кластеров в одной или нескольких проекциях, а ассоциация этих кластеров с одиночными взаимодействиями становится трудноразрешимой.

Для разделения накладывающихся событий был предложен и разрабатывается в настоящее время новый подход для LArTPC комплекса ближнего детектора (ND) эксперимента DUNE, получившего название ND-LAr, рядом с источником нейтрино в Фермилабе. Эта технология реализует три основных новшества по сравнению с традиционными проволочными LArTPC: пикселизированное считывание заряда, обеспечивающее настоящую 3D-реконструкцию, высокопроизводительную систему считывания света, обеспечивающую быстрое и эффективное обнаружение сцинтилляционного света и сегментацию на оптически изолированные области. Достигая малой загрузки сигнала в обеих системах считывания, сегментация обеспечивает эффективную реконструкцию и однозначное сопоставление зарядовых и световых сигналов.

Система ND-LAr будет представлять собой структуру из 5x7 модулей TPC размером 1,0 x 1,0 x 3,5 м³. Для проверки работоспособности модульной структуры детектора строится демонстратор 2x2 для испытаний на пучке NuMI в Фермилабе. Демонстратор содержит 4 прототипа меньших по размеру модулей TPC 0,67 x 0,67 x 1,81 м³. В 2024–2025 годах планируется изготовить полноразмерный модуль ближнего детектора, так называемый Full-Scale Demonstrator (FSD), и провести его испытания.

ND-LAr предлагает истинную информацию о трехмерном отслеживании, используя считывание заряда в пикселях. Окно считывания заряда (время дрейфа) 137 мкс является большим по сравнению с 10 мкс временем сброса пучка NuMI или LBNF. Взаимодействия нейтрино в детекторе перекрываются, и отдельные энерговыделения не могут быть легко связаны с конкретной вершиной нейтрино. Эта проблема может быть решена путем включения быстрой временной информации от сигнала сцинтилляционного света, излучаемого заряженными частицами в жидком аргоне на длинах волн ~127 нм одновременно с ионизацией. Непрозрачный катод и стенки модуля локализуют сцинтилляционный свет внутри каждого TPC (половина модуля), что повышает эффективность регистрации быстрой компоненты сцинтилляционного света. Решение, предложенное и разработанное группой ОИЯИ, – это модуль сбора света (англ. Light Collection Module, LCM) (существует также другой вариант: ArCLight), который представляет собой компактную диэлектрическую ловушку света, позволяющую собирать свет с большой площади и внутри сильных электрических полей.

Регистрация света основана на двухступенчатом смещении длины волны: сначала от 127 нм (УФ) в 425 нм (синий), который увеличивает проникновение света, а затем улавливает

синий свет, смещая его в зеленую область (~ 510 нм). Наконец, зеленый свет считывается с помощью кремниевых фотоумножителей.

В консорциуме ND-LAr ОИЯИ взял на себя ответственность за производство и поставку системы считывания света под ключ. Сюда входят: модули LCM/ArCLight, электроника внешнего интерфейса (предусилители), АЦП, система электропитания, сигнальные/силовые линии, DAQ и Slow Control. Наши совместные работы также заключаются в реализации считывания одновременно света и заряда с использованием синхронизации времени и данных между двумя системами.

Общий вид системы считывания света в ND-LAr-TPC представлен на рисунке 6. Прототип LCM представляет собой раму, консольно закрепленную пластиной из ПВХ, которая удерживает оптические волокна WLS, согнутые в два пучка и оптически связанные с двумя SiPM. Волокна сгруппированы и удерживаются планками с отверстиями, закрепленными на пластине из поликарбоната с помощью поликарбонатных винтов для обеспечения согласования коэффициентов термического сжатия. Пластина из ПВХ с оптическими спектросмещающими волокнами WLS покрыта тетра-финил-бутадиеном (TPB), который переизлучает поглощенный УФ свет в синий. Этот свет затем смещается внутри 1,2-мм оптоволокну Kuraray Y-11 с несколькими оболочками в зеленый цвет и, следовательно, улавливается за счет полного внутреннего отражения, направляя его к считывающему устройству SiPM на конце пучка волокон. LCM имеет размеры 100 мм x 300 мм x 10 мм (FSD - 100 мм x 500 мм x 10 мм) и сгруппирован по три модуля.

Модуль ArCLight разработан Бернским университетом. Общая концепция заключается в том, что синий свет, излученный TPB, входит в объемное пространство пластика с переизлучающей добавкой, где повторно излучается в виде зеленого света, а это пространство имеет покрытие, отражающее зеленый свет, со всех сторон, кроме окошек, где свет считывается SiPM. Со стороны TPB используется дихроичный фильтр, прозрачный для синего света и отражающий для зеленого. Размеры модуля составляют 300 мм x 300 мм x 10 мм (FSD - 300 мм x 500 мм x 10 мм).

Цепочка считывания выглядит следующим образом (рис. 7). Группа из трёх LCM или одного ArcLight считывается с помощью шести SiPM, расположенных на трёх печатных платах, прикрепленных к E-PCB (печатная плата в форме буквы E) с усилителями. Конструкция FSD - одна печатная плата, работающая в холоде с шестью SiPM и холодной электроникой (усилители). Электроника работает при криогенной температуре жидкого аргона. E-PCB имеет шесть предусилителей, которые передают сигнал на длинные сигнальные линии вне криостата TPC. Затем сигналы (см. рис. 7) настраиваются и преобразуются в линии дифференциальных сигналов с помощью усилителей с переменным коэффициентом усиления и после этого отправляются на АЦП. АЦП представляют собой преобразователи с выборкой по времени с частотой дискретизации 62,5 МГц, имеют 14-разрядное амплитудное разрешение и 64 канала (дифференциальные сигналы), разработанные в ОИЯИ (ЛФВЭ) для системы считывания NICA/MPD ECAL и адаптированные для наших нужд.

С 2021 года изготовлено и успешно испытано на космических лучах 4 прототипа модулей TPC. Пройден важный этап согласования конструкции и эксплуатации ND-LAr – предпроектная экспертиза. Готовится сборка массива модулей 2x2 и тестовые испытания на нейтринном пучке в Фермилабе в 2023–2024 гг. Изготовление полномасштабного демонстратора запланировано на 2024 год, а его характеристика — на 2024–2025 годы. Затем ожидается окончательное утверждение детектора (англ. Final Design Review, FDR).

ND LArTPC Module Design

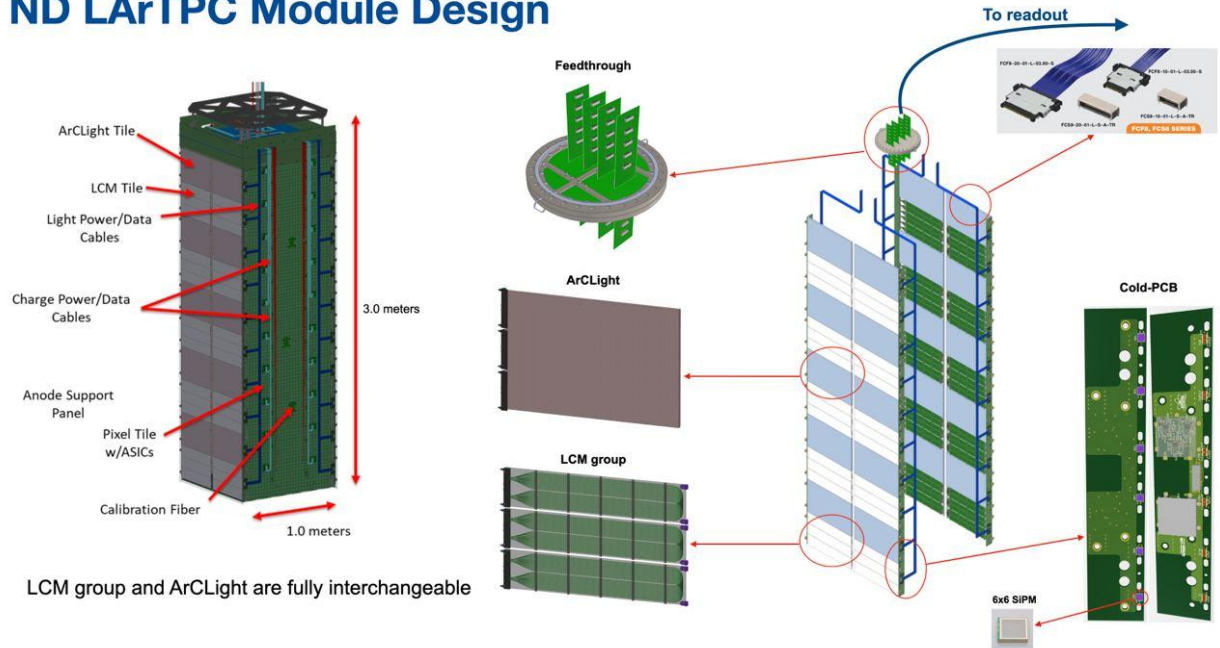


Рисунок 6. Компоненты системы светосбора ND-LAr.

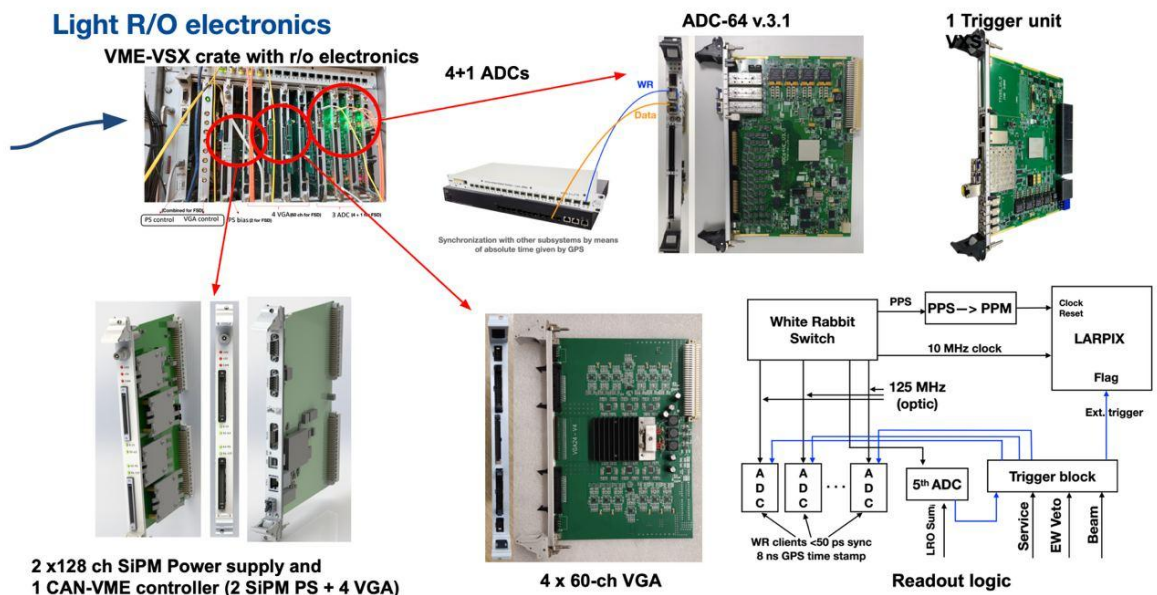


Рисунок 7. Электроника системы светосбора.

В рамках НИОКР мы построили в ОИЯИ (ЛЯП) криогенный стенд, на котором были проведены многочисленные испытания системы светосбора: эффективность детектирования света различных модулей, электроника, механические напряжения и т. д. Этот стенд важен для обеспечения НИОКР по производству световодов с имплантированным в оболочку TPВ.

Система регистрации нейтрино на оси пучка в DUNE

В "фазе 1" DUNE комплекс ближнего детектора включает систему для регистрации нейтрино на оси пучка (англ. System for on-Axis Neutrino Detection, SAND), этот детектор постоянно расположен на оси нейтринного пучка. Детектор SAND (рис. 8) основан на соленоидальном сверхпроводящем магните, создающем магнитное поле 0,6 Тл и 4π электромагнитном калориметре (ECAL). И магнит, и калориметр экспортированы из эксперимента KLOE. Внутренний магнитный объем (около 43 м³) будет представлять из себя

трекер с мишенью, основанный на технологии строу-трубок (англ. Straw Tube Tracker, STT). Эта технология была выбрана коллаборацией DUNE в сентябре 2021 года вместо альтернативных вариантов. Внутренний трекер дополняется аргоновым детектором (англ. GRanular Argon for Interaction of Neutrinos, GRAIN), обеспечивающей тонкую активную мишень из жидкого аргона (LAr) (~ 1 тонну), расположенную перед STT.

Основной целью SAND является выполнение измерений в режиме реального времени для ограничения основных систематических неопределенностей, влияющих на анализ нейтринных осцилляций на длинной базе (LBL), включая следующее:

- непрерывный мониторинг числа событий, профилей пучков и энергетических спектров нейтрино;
- прецизионные измерения первичных потоков ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$, ν_e , $\bar{\nu}_e$ в режиме реального времени в зависимости от энергии;
- прямые измерения ядерных эффектов и ограничения на связанное с этим разрешение.

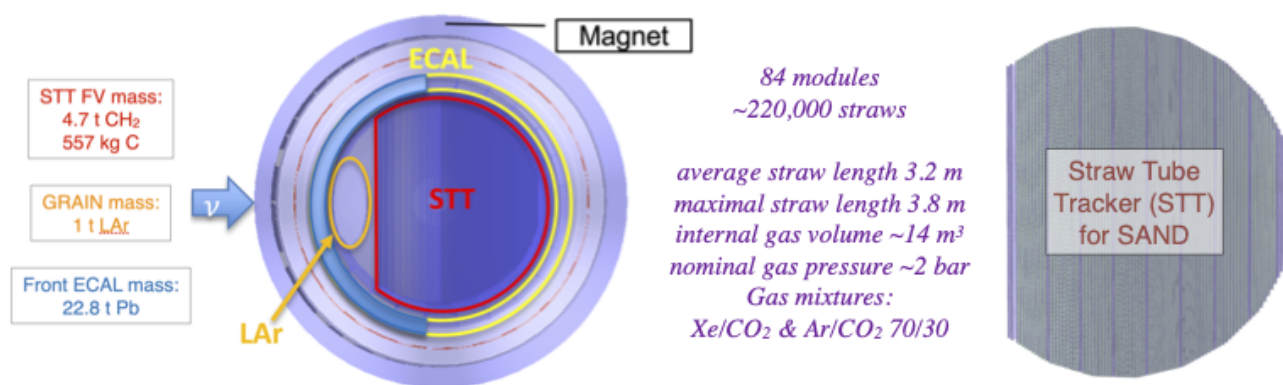


Рисунок 8. Слева: вид сбоку детектора SAND, показывающий основные элементы, расположенные внутри соленоидального сверхпроводящего магнита. Справа: вид сбоку геометрии STT и его основные характеристики.

С этой целью SAND должен точно реконструировать 4-импульсы регистрируемых частиц в конечном состоянии, рождающихся при взаимодействии (анти)нейтрино, а также общую кинематику события и соответствующее сохранение импульса в плоскости, поперечной направлению нейтринного пучка. Кроме того, он должен иметь отличные возможности идентификации μ^\pm и e^\pm и точную калибровку шкал импульса/энергии. Те же самые требования в сочетании с беспрецедентной интенсивностью пучков (анти)нейтрино в нейтринной установке с длинной базой (LBNF) позволят реализовать широкую программу физических измерений фундаментальных взаимодействий и свойств нуклонов и ядер, синергичных с другими аспектами.

Трекер строу-трубок (STT) для SAND

STT представляет собой новую концепцию детектора для физики нейтрино, устраняющую основные ограничения прошлых экспериментов. STT предназначен для обеспечения точного контроля конфигурации, химического состава и массы нейтринных мишеней, аналогично экспериментам по рассеянию электронов путем физического отделения нейтринных мишеней от фактической системы детектирования. Большое количество тонких плоскостей – каждая обычно составляет 1–2% радиационной длины X_0 – из различных пассивных материалов сопоставимой толщины чередуются с активными регистрирующими слоями, состоящими из четырех плоскостей строу незначительной массы, чтобы гарантировать одинаковую

идентификацию частиц в конечном состоянии, рождающихся при взаимодействии (анти)нейтрино (рис. 9). STT позволяет минимизировать толщину отдельных активных слоев и приблизиться к идеальному случаю детектора чистой мишени — мишени составляют около 97% массы — при сохранении общей толщины слоев, сравнимой с одной радиационной длиной. Каждая мишенная плоскость может быть удалена или заменена различными материалами во время сбора данных, что обеспечивает гибкую мишенную конфигурацию. Среднее импульсное разрешение, ожидаемое для мюонов, составляет $\delta p/p \sim 3,5\%$, а среднее угловое разрешение — лучше 2 мрад. Шкала импульса может быть откалибрована примерно до 0,2% с использованием реконструированных распадов $K_0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$.

STT предлагает уникальные возможности детектора, которые могут расширить физический потенциал LBL DUNE. Ключевой особенностью является концепция «твердой» водородной мишени, полученной путем вычитания измерений на специальных мишенях из графита (чистый углерод) и полипропилена (CH_2) (рис. 9).

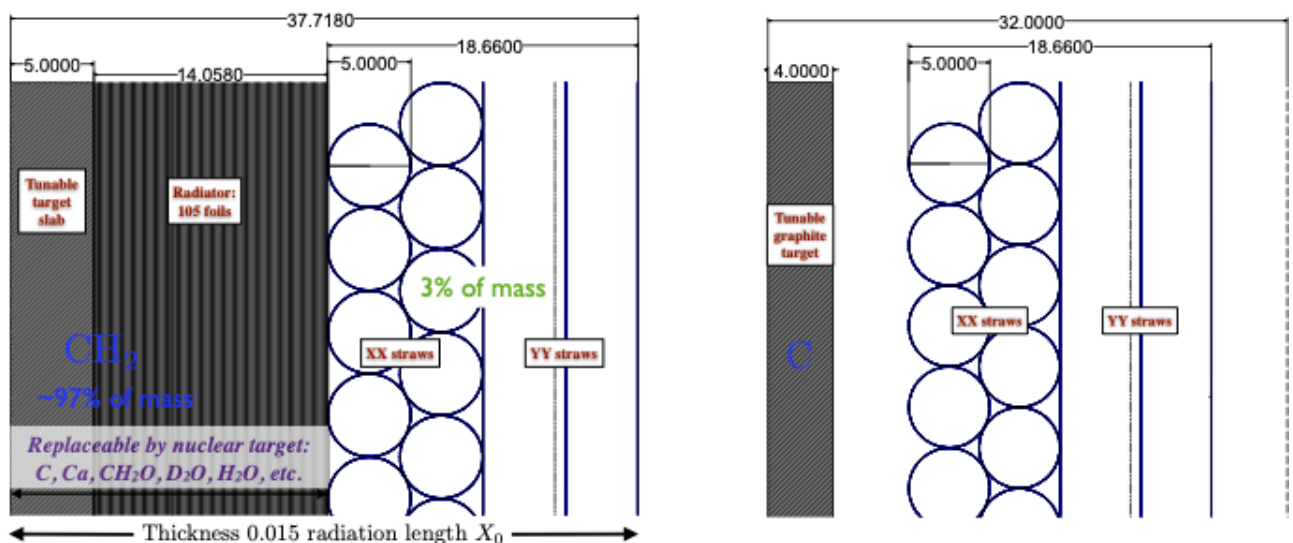


Рисунок 9. Слева: вид сбоку стандартного STT модуля, включающего три основных элемента (слева направо): настраиваемая полипропиленовая мишень CH_2 , радиатор со 105 пропиленовыми пленками для идентификации электронов и позитронов, четыре слоя строу ХХУУ. Справа: пластик и радиатор заменены на ядерную мишень, например, на графит в представленном случае.

Этот метод считается модельно независимым, поскольку данные по графитовым мишеням автоматически включают все типы процессов, а также эффекты детектора, важные для выбора взаимодействий на Н. Для взаимодействий по каналу заряженного тока (CC) коэффициент разбавления по отношению к чистой H_2 мишени может быть уменьшен в 5-7 раз с помощью кинематического анализа, основанного на сохранении энергии-импульса. «Твердая» водородная мишень в STT обеспечивает мощный инструмент для уменьшения систематических погрешностей в различных измерениях в DUNE ND. В частности, это позволяет определять поток (анти)нейтрино с точностью, недостижимой другими известными методами. Кроме того, прямое сравнение взаимодействий на водороде, не включающего ядерных эффектов, с соответствующими взаимодействиями, полученными от ядерных мишеней, включая тонкий LAr, позволяет напрямую ограничить ядерное разрешение, что приводит к точной калибровке шкалы энергий нейтрино в (анти)нейтринные взаимодействия на ядрах.

Уменьшение систематических неопределенностей, обеспечиваемое STT, также позволило бы использовать уникальные свойства избирательности нейтрино при взаимодействии на отдельных структурных элементах для прецизионных исследований фундаментальных взаимодействий и структуры нуклонов и ядер. ND может стать центром физики нейтрино и антинейтрино общего назначения с широкой программой физических измерений, дополняющей существующие экспериментальные данные и измерения в области фиксированных мишеней (программа 12 ГэВ в лаборатории Томаса Джефферсона), на коллайдере (электронно-ионный коллайдер) и эксперименты по ядерной физике. Достижимый уровень точности может дать представление о различных областях, порождая сотни различных физических исследований, включая некоторые традиционные измерения и другие, которые могут исследовать новую физику или устранять существующие расхождения. Прецизионные тесты электрослабой физики могут быть выполнены с использованием различных дополнительных физических процессов во взаимодействиях нейтрино и антинейтрино. Уникальное сочетание ядерных и «твердых» водородных мишеней в рамках STT позволяет проводить прецизионные исследования структурных функций и партонных распределений, КХД, правил сумм, высших твистов и непертурбативных эффектов, содержания странности в нуклоне, очарования, физики изоспина, проверки зарядовой симметрии, структура слабого тока и т. д. Эта разнообразная программа прецизионных измерений одновременно будет чувствительна к новой физике за пределами Стандартной модели, что дополняет прямые поиски, такие как стерильные нейтрино, нестандартные взаимодействия, физика темного сектора и т. д.

С технологической точки зрения проект STT для SAND позволит разработать оптимизированный строу-трекер следующего поколения с интеграцией внешней электроники. Полученный детектор может представлять собой ценное решение для ряда других приложений в различных современных экспериментах по физике высоких энергий.

Полное рассмотрение предварительного дизайна (PDR) проекта SAND состоится в ноябре 2023 года. До конца 2024 года будет подготовлен технический отчет (TDR) всего комплекса ND. Завершение окончательного проекта и соответствующее рассмотрение ожидается в 2025 г. Фактическое производство необходимых модулей STT планируется начать в 2026 г. и продлится до конца 2029 г., при этом частично параллельно идет установка на площадке Fermilab ND. Ожидается, что первый нейтринный пучок LBNF будет запущен в DUNE в конце 2020-х годов. Готовность SAND с первого дня имеет решающее значение для обеспечения правильного анализа данных, собранных дальним детектором DUNE.

На период 2023-2026 гг. в ОИЯИ предусмотрены следующие мероприятия:

- Сборка и испытание прототипа размером 1,2 м × 0,8 м с рамой из С-композита и четырьмя слоями строу XXYY в 2024 году.
- Сборка и испытания полноразмерного прототипа с одним размером 4 м, С-композитной рамой и трубками XXYY в 2025 году.
- Разработка входной (FE) считывающей электроники для STT, включая пересмотр ASIC в 2023-2026 гг.
- Измерения на тестовом пучке небольших прототипов размером 0,35 м × 0,35 м в ЦЕРНе для оценки производительности различных вариантов/прототипов FE считывания в 2023–2026 гг.
- Подготовка центра производства строу в ОИЯИ к производству STT в 2024-2026 гг., включая: (а) переоборудование лаборатории с чистым помещением; (б) линия по производству строу, оснащенная технологией ультразвуковой сварки и соответствующим контролем качества; (с) установка для сборки и тестирования полных модулей STT.

Группа строу-трекера ОИЯИ

Трековые детекторы на основе строу-дрейфовых трубок имеют широкий спектр применения в физике элементарных частиц благодаря хорошему пространственному и импульсному разрешению, относительно низкой стоимости и хорошо налаженному производству. Группа ОИЯИ активно участвует в разработке, строительстве и установке различных строу-детекторов (ATLAS, COMPASS, NA62, NA64, SHiP, COMET). В 2014 г. ОИЯИ зарегистрировал два патента на изготовление цилиндрических трубок для газонаполненных дрейфовых детекторов и на измерение положения проводов в них. Пример работающего строу-спектрометра в эксперименте NA62 показан на рисунке 10.



Рисунок 10. Процесс установки одной из четырех строу-камер в эксперименте NA62

В течение последних нескольких лет 2021-2023 гг. группа ОИЯИ продемонстрировала следующие аспекты конструкции СТТ. Линия ОИЯИ (рис. 11) производила строу длиной 5 м по технологии ультразвуковой сварки требуемого качества и максимальной длины. Строу прошли измерения максимального внутреннего давления, радиальной и продольной деформации в зависимости от давления, релаксации в зависимости от времени и влажности, газонепроницаемости и т. д. Был создан прототип размером 1 м x 1 м ХХУУ для проведения испытаний на склеивание и опрессовку. Был собран и испытан макет с рамой из плексигласа с проводом 20 мкм в рабочих условиях СТТ. Группа ОИЯИ совместно с ПИЯФ (Гатчина, Россия) провела испытания строу-прототипов и электронных установок (ВММЗ/3а, TIGER) для будущих проектов NA64, SPD NICA и DUNE. Последний испытательный стенд в ЦЕРНе показан на рис. 12. Анализ данных продолжается и ожидается в 2023 году.



Рисунок 11. 5м строу для STT прототипа, произведенные в ОИЯИ.

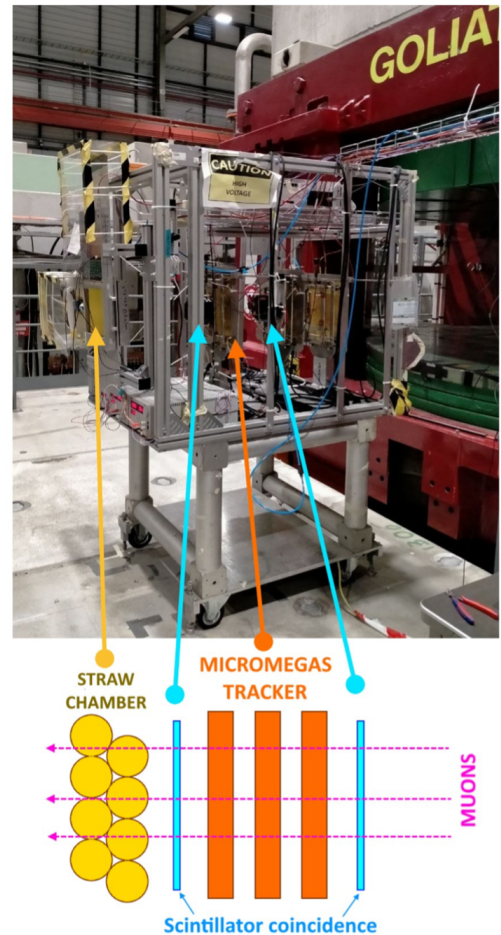


Рисунок 12. Тестовый стенд в ЦЕРН в 2022 году: XX+YY STT прототип, сцинтилляционные плоскости для триггера, микромега трекер и электроника.

ЛФВЭ обладает уникальными технологиями, позволяющими создать надежные строу-детекторы для текущих экспериментов NA-62, NA-64. Ультразвуковая сварка позволила изготовить 17 км вакуумно-плотного шва для NA-62, который успешно эксплуатируется 10 лет (за это время вышла из строя только одна строу-трубка). Для процесса сборки детекторов NA-62, NA-64 создано множество инструментов, без которых невозможно создание полноценных детекторов.

В настоящее время в ОИЯИ имеется опытный образец линии по производству строу-трубок, на которой можно изготавливать строу со следующими параметрами: производительность - 1 м/мин, длина до 5,5 м, диаметры - 5,10,20 мм, толщина - 15,20 мм. 36,50 мкм, что в основном соответствует характеристикам STT: внешний диаметр строу: 5 мм, толщина стенки: 20 мкм и менее, двойная металлизация пленки: 70 нм (внутренняя) + 70 нм (внешняя), проволока диаметром 20 мкм, 4 слой строу XXYU, клееный узел, работающий при внутреннем избыточном давлении около 1 бар (2 бар абс.), тонкие модули с легкими рамами из С-композита, компактный маломощный внешний считыватель, интегрированный в рамы.

Всего для SAND STT необходимо изготовить около 220 000 строу-трубок (длиной до 4 м). Ожидается, что этот объем будет произведен совместно консорциумом нескольких производственных центров, где ОИЯИ, как ожидается, будет играть ведущую научную роль благодаря признанной компетентности.

Ожидаемые результаты

При участии коллектива ОИЯИ ожидаются следующие результаты.

Эксперимент NOvA:

- ❖ измерение порядка масс нейтрино и отклонение гипотезы сохранения CP-четности со статистической значимостью $\leq 4\sigma$ и $\leq 2\sigma$ соответственно;
- ❖ совместные анализы с другими экспериментами, которые улучшат эту чувствительность, а именно анализ NOvA+T2K;
- ❖ новые ограничения на существование магнитного монополя с данными о высоком усилении, более высокой статистикой и обновленным триггером и анализом;
- ❖ подготовка к мониторингу и анализу триггеров для обнаружения сигналов нейтрино сверхновых;
- ❖ измерения спектров атмосферных мюонов для различных условий;
- ❖ первый осцилляционный анализ NOvA с использованием атмосферных нейтрино;
- ❖ характеристика свойств скинтиллятора, а именно вклад черенковского света;
- ❖ ROC-Dubna и эксплуатация вычислительного комплекса.

Эксперимент DUNE:

- ❖ Разработка системы считывания света для ND-LAr;
- ❖ 2x2, тесты и измерения FSD на нейтринном пучке NuMI;
- ❖ прототипирование строу-трубок, испытания STT и электроники, подготовка к производству;
- ❖ разработка вычислительной инфраструктуры и настройка;
- ❖ подготовка анализов.

Риски

	Плюсы	Минусы
Внутренние	СИЛЬНЫЕ СТОРОНЫ <ul style="list-style-type: none">● Уже полностью действующий эксперимент NOvA● Утвержден график работы NOvA до 2026 года и переход на DUNE.● Протестированный и подтвержденный модульный подход DUNE ND-LAr (утвержден на уровне PDR)● ОИЯИ отвечает за две основные подсистемы в DUNE ND (Light Detection, Straw-tracker)● Богатая неосцилляционная программа	НЕДОСТАТКИ <ul style="list-style-type: none">● Источники систематических ошибок, зависящие от неизвестных сечений и характеристик детектора● Позднее начало DUNE ~ 2032 г.● Ограничения для российских участников на посещение лабораторий DOE● Экспортно-импортные ограничения в РФ.

Внешние	ВОЗМОЖНОСТИ	УГРОЗЫ
	<ul style="list-style-type: none"> • Взрыв сверхновой, существование новой физики • Снижение систематических погрешностей за счет новых измерений или усовершенствования теории • Разработка новых методов и технологий • Лучшие мировые стандарты менеджмента 	<ul style="list-style-type: none"> • Крупная авария с детекторами или пучковым оборудованием • Неожиданное изменение планов Fermilab из-за значительного сокращения бюджета • Основные изменения ситуации в мире

2.3. Предполагаемый срок выполнения

до 2040

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

Лаборатория ядерных проблем, Лаборатория физики высоких энергий, Лаборатория теоретической физики, Лаборатория информационных технологий

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты	1 Пб (Облака)	1.3 Пб (Облака)	1.5 Пб (Облака)		
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)					
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU					
Облака (CPU ядер)	1000	1250	1500		

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

В коллаборации NOvA участвует около 40 организаций, а в DUNE — около 200. Мы внесли в таблицу реальных партнеров деятельности группы из ОИЯИ.

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
Лаборатория Ферми	США	Батавия, Иллинойс	Alex Himmel + 3 Jennifer Raaf + 4	Продление соглашения ОИЯИ-Ферми лаб
Университет Берна	Швейцария	Берн	Michele Weber + 2	Соглашение консорциума

ЦЕРН	Швейцария		Francesco Lanni, Filippo Resnati	Соглашение в рамках Neutrino Platform
LBNL	США	Беркли, Калифорния	Daniel Dwyer + 1	Коллаборация DUNE
SLAC	США	Стэнфорд, Калифорния	Hirohisa Tanaka + 1	Коллаборация DUNE
Университет Калифорнии Ирвайн	США	Ирвайн, Калифорния	Juan Pedro Ochoa Ricoux Jianming Bian	Коллаборация DUNE Коллаборация NOvA
Университет Миннесоты	США	Миннеаполис, Миннесота	Matt Strait	Коллаборация NOvA
Университет Миннесоты Дулут	США	Дулут, Миннесота	Alec Habig	Коллаборация NOvA
Университет Южной Алабамы	США	Мобил, Алабама	Martin Frank	Коллаборация NOvA
Университет Южной Каролины	США	Колумбия, Южная Каролина	Roberto Petti + 2	Коллаборация DUNE
INFN	Италия	Пиза	Stefano di Falco + 1	Коллаборация DUNE
INFN	Италия	Болонья	Gabriele Sirri	Коллаборация DUNE
INFN	Италия	Падова	Matteo Tenti	Коллаборация DUNE
Институт ядерной физики	Казахстан	Алматы	Саябек Сахиев + 6	Коллаборация DUNE
Институт ядерных исследований РАН	Россия	Москва	Буткевич А.В. + 1	Коллаборация DUNE
Лондонский университет королевы Марии	Великобритания	Лондон	Alexander Booth	Коллаборация NOvA
Университет Флориды	США	Гейнсвилл, Флорида	Mayly Sanchez + 2	Коллаборация NOvA
Калтех	США	Пасадена, Калифорния	Ryan Patterson, Zoya Vallary + 2	Коллаборация NOvA
Колледж Уильяма и Мэри	США	Вильямсбург, Вирджиния	Patricia Vahle, Erika Catano-Mur	Коллаборация NOvA

Университет Стоуни Брук	США	Стоуни-Брук, Нью-Йорк	Michael Wilking	Коллаборация DUNE
Университет Миссисипи	США	Оксфорд, Миссисипи	Gavin Davis, Jeffrey Kleykamp	Коллаборация NOvA

2.6. Организации-соисполнители *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)*

Национальная ускорительная лаборатория имени Ферми (США),
Университет Берна (UniBe),
Университет Южной Каролины, Колумбия (США)

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№ № п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	7+3	3
2.	инженеры	4+5	3
3.	специалисты	—	
4.	служащие	—	
5.	рабочие	—	
	Итого:	19	6

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научный сотрудник	Ольшевский Александр Григорьевич	ЛЯП	начальник отдела (руководитель проекта)	0.6
2.	научный сотрудник	Анфимов Николай Владимирович	ЛЯП	начальник сектора (заместитель проекта)	0.5
3.	научный сотрудник	Самойлов Олег Борисович	ЛЯП	начальник сектора (заместитель рук. проекта)	0.8

4.	научный сотрудник	Еник Темур Львович	ЛФВЭ	начальник группы	0.3
5.	научный сотрудник	Мовчан Сергей Александрович	ЛФВЭ	начальник сектора	0.3
6.	научный сотрудник	Кекелидзе Георгий Дмитриевич	ЛФВЭ	начальник сектора	0.2
7.	научный сотрудник	Чуканов Артем Владиславович	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.5
8.	научный сотрудник	Чалышев Вячеслав Владимирович	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.5
9.	научный сотрудник	Большакова Анастасия Евгеньевна	ЛЯП	научный сотрудник	0.5
10.	научный сотрудник	Колупаева Людмила Дмитриевна	ЛЯП	научный сотрудник	1.0
11.	научный сотрудник	Антошкин Александр Игоревич	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.9
12.	научный сотрудник	Климов Олег Леонидович	ЛЯП	научный сотрудник	1.0
13.	научный сотрудник	Петрова Ольга Николаевна	ЛЯП	младший научный сотрудник	1.0
14.	научный сотрудник	Рыбников Арсений Владимирович	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.3
15.	научный сотрудник	Селюнин Александр Сергеевич	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.7
16.	научный сотрудник	Шаров Владислав Игоревич	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.4
17.	научный сотрудник	Шешуков Андрей Сергеевич	ЛЯП	научный сотрудник	0.8
18.	научный сотрудник	Шкирманов Дмитрий Сергеевич	ЛЯП	инженер	1.0
19.	научный сотрудник	Васина Светлана	ЛЯП	научный сотрудник	0.5

		Геннадьевна			
20.	инженер	Громов Василий Олегович	ЛЯП	ведущий инженер	0.5
21.	инженер	Соколов Сергей Анатольевич	ЛЯП	старший инженер	0.6
22.	инженер	Кожукалов Владимир Александрович	ЛЯП	инженер	1.0
23.	инженер	Кузнецова Ксения Игоревна	ЛЯП	инженер	0.5
24.	инженер	Федосеев Дмитрий Веславович	ЛЯП	инженер-электроник 1 категории	0.5
25.	инженер	Четвериков Алексей Викторович	ЛЯП	инженер-электроник 2 категории	0.5
26.	инженер	Сотников Альберт Петрович	ЛЯП	инженер-электроник 1 категории	0.2
27.	аспирант	Калиткина Анастасия Игоревна	ЛЯП	инженер (ассоциированный)	1.0
28.	аспирант	Морозова Анна Дмитриевна	ЛЯП	инженер (ассоциированный)	1.0
29.	студент	Иванеев Юрий Валерьевич	ЛЯП	ассоциированный	1.0
30.	студент	Иванова Александра Денисовна	ЛЯП	старший лаборант (ассоциированный)	1.0
31.	студент	Степанова Анна Вячеславовна	ЛЯП	старший лаборант (ассоциированный)	1.0
32.	студент	Ленский Петр Игоревич	ЛЯП	ассоциированный	1.0
33.	ученый	Колесников Александр Олегович	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.2
34.	ученый	Павлов Алексей	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.1

		Викторович			
35.	ученый	Байгарашев Досбол	ЛФВЭ	младший научный сотрудник	0.2
36.	ученый	Саламатин Кирилл Маркович	ЛФВЭ	научный сотрудник	0.2
37.	ученый	Мухамеджанов Ержан	ЛФВЭ	научный сотрудник	0.2
38.	ученый	Ковалев Юрий Сергеевич	ЛФВЭ	старший научный сотрудник	0.4
39.	инженер	Васильева Евгения Владимировна	ЛФВЭ	старший инженер	0.2
40.	инженер	Азорский Николай Иванович	ЛФВЭ	ведущий инженер	0.2
41.	инженер	Баутин Виталий Викторович	ЛФВЭ	инженер	0.2
42.	аспирант	Камбар Ысмайыл	ЛФВЭ	инженер (ассоциированный)	0.2
43.	ученый	Какорин Игорь Дмитриевич	ЛТФ	научный сотрудник	1.0
44.	ученый	Кузьмин Константин Сергеевич	ЛТФ	старший научный сотрудник	0.5
45.	ученый	Матвеев Виктор Анатольевич	ЛТФ	научный руководитель Института	0.1
46.	ученый	Наумов Вадим Александрович	ЛТФ	начальник сектора	0.5
47.	инженер	Балашов Никита Александрович	ЛИТ	инженер-программис т 1 категории	0.2
48.	студент	Широков Никита Михайлович	ЛЯП	ассоциированный	1.0
	Total:				27.0

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

В проекте участвуют 8 студентов (аспирантов, магистров и бакалавров). Их FTE уже учтены в Таблице 3.2.1.

№ № п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	студенты	Московский государственный университет	4.0
2.	студенты	Иркутский государственный университет	1.0
3.	студенты	Московский физико-технический университет	2.0
4.	студенты	Алматинский государственный университет	1.0
	Итого:		8.0

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП). Детализация приводится в отдельной форме.

1,22 млн \$ за три года

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

—

Руководитель проекта _____ / _____ /

Дата представления проекта в ДНОД _____

Дата решения НТС Лаборатории _____, номер документа _____

Год начала проекта _____

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту _____

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
	Международное сотрудничество (МНТС)	540	150+30	150+30	150+30		
	Материалы	350	100+30	80+30	80+30		
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	140	50+10	30+10	30+10		
	Пуско-наладочные работы	30	10	10	10		
	Услуги научно-исследовательских организаций	100	30	40	30		
	Приобретение программного обеспечения	60	20	20	20		
	Проектирование/строительство						
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)						
Необходимые ресурсы	Нормочас Ресурсы						
	– Мастерские и конструкторское бюро,	150	50	50	50		
	–ускорителя/установки,						
	–реактора,.....						
Источники финансирования	Бюджетные средства	1220	430	400	390		
	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета)						

В н еб ю д ж ет (д о п. с м ет а)	<p>Вклады соисполнителей</p> <p>Средства по договорам с заказчиками</p> <p>Другие источники финансирования</p>						
--	--	--	--	--	--	--	--

Руководитель проекта

_____ / _____ /

Экономист Лаборатории

_____ / _____ /

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

NOvA/DUNE

Шифр проекта: 02-2-1099-2-2015/2023

Шифр темы: 02-2-1099-2010/2023

Руководитель: Ольшевский Александр Григорьевич

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА /
ПОДПРОЕКТА КИП

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

1. Общие сведения по проекту

1.1. Научное направление

Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика

1.2. Наименование проекта

NOvA/DUNE

1.3. Шифр проекта

02-2-1099-2-2015/2023

1.4. Шифр темы

02-2-1099-2010/2023

1.5. Фактический срок реализации проекта

с 2015

1.6. Руководитель(ли) проекта

А.Г. Ольшевский

2. Научный отчет

2.1. Аннотация

Проект NOvA в ОИЯИ был открыт в 2015 г. и преобразован в совместный проект NOvA/DUNE в 2020 г. За эти годы группа ОИЯИ добилась значительных успехов в различных областях как в NOvA, так и в DUNE.

NOvA уже является действующим экспериментом, дающим научные результаты. Это нейтринный эксперимент с длинной базой в Лаборатории имени Ферми, целью которого является измерение параметров осцилляций. Самый последний результат, объявленный в 2020 году с 13.6×10^{20} POT в режиме нейтрино и 12.6×10^{20} POT в режиме антинейтрино, не показал асимметрии в числе нейтрино и антинейтрино и получил умеренное предпочтение нормальному порядку масс нейтрино. Группа ОИЯИ участвует в трехфлейворном анализе NOvA, и несколько официальных анализов, в том числе результат 2020 года, были выполнены участниками из ОИЯИ. Эти результаты были официальными для NOvA и были опубликованы в нескольких коллаборационных статьях. Хотя основной задачей NOvA является измерение параметров нейтринных осцилляций, существует широкий спектр задач в области физики, не связанной с осцилляциями, в которые группа ОИЯИ внесла ценный вклад. Сотрудники из Дубны разработали триггер для обнаружения нейтрино от взрывов сверхновых, несколько анализов с атмосферными мюонами и ведут поиски экзотических сигналов, таких как магнитные монополи. Методологические исследования, проведенные группой ОИЯИ, внесли ценный вклад в изучение детекторов и моделирование. В Дубне был построен удаленный центр управления детекторами для смен участников, работающих в России. В ЛИТ были развернуты большие компьютерные ресурсы, которые выполняют задачи продакшена эксперимента, задачи анализа участников из ОИЯИ и имеют локальное хранилище данных NOvA.

DUNE — это эксперимент, который находится на стадии подготовки, он также будет базироваться в Лаборатории Ферми и станет его следующим флагманом после NOvA. Эти эксперименты имеют схожие цели, но основные ожидания в нейтринных осцилляциях трех ароматов связаны с DUNE. Способность этого эксперимента оправдать эти ожидания напрямую связана с характеристиками детекторов. Участники ОИЯИ были приглашены присоединиться к DUNE благодаря их большому опыту в области систем сбора света. В обязанности группы ОИЯИ входит полная система сбора света в жидком аргоне в ближнем детекторе DUNE. После

выбора конструкции детектора для другого ближнего детектора DUNE (SAND), другая группа ОИЯИ из ЛФВЭ была приглашена присоединиться к DUNE благодаря их очень большому опыту в производстве строу-трубок для различных экспериментов в физике высоких энергий. Несмотря на то, что DUNE начнет набирать данные через несколько лет, в настоящее время ведется подготовка различных анализов. Компьютерные ресурсы ОИЯИ для NOvA также делятся с задачами под DUNE.

2.2. Развернутый научный отчет

2.2.1. Описание режима работы и функционирования основных систем и оборудования.

Работа детекторов NOvA. ROC-Dubna

Эксперимент NOvA как на площадках ND, так и на FD имеет хранилища данных и системы передачи файлов для накопления данных детекторов. Хотя это безопасно проводится на FD и ND локально, более эффективно одновременно контролировать работу обеих систем из одного места, что можно выполнить из удаленного центра управления (англ. Remote Operation Center, ROC).

В настоящее время для эксперимента NOvA в разных местах работают двадцать пять ROC'ов. В ОИЯИ разработан и введен в эксплуатацию в октябре 2015 г. первый не американский центр удаленного управления, ROC-Dubna. Он обладает всеми необходимыми функциями и позволяет осуществлять полный мониторинг и управление работой детектора, а также осуществлять связь с Фермилабом и другими центрами.

Программное обеспечение NOvA для хранения и передачи данных на базе Linux-узлов собирает информацию из системы NOvA DAQ. ROC подключается к узлам управления и эксплуатации на обеих площадках FD/ND через VNC-туннелирование по защищенным протоколам. Основная идея заключается в том, что сервер VNC передает сеанс VNC многим центрам управления. Всего имеется 5 активных VNC-сессий на базе Scientific Linux, подключенных напрямую к узлам ближнего и дальнего детекторов и через шлюзы (gateway) в глобальную сеть. Система включает 1 узел Linux для веб-мониторинга эксплуатируемых систем (нейтринный пучок, камеры ND/FD, контроль передачи данных, Ganglia, Nearline) и 1 узел Windows для связи (электронный журнал NOvA, последняя версия контактов экспертов, Slack-chat, Zoom).

ROC-Dubna в ОИЯИ имеет развитую инфраструктуру для 8-часовой непрерывной работы смены (стабильный интернет, междугородняя связь, кухня, ROC также является общественной территорией ОИЯИ). Система мониторинга вычислений на Zabbix контролирует локальные Linux-узлы, интернет-соединение, состояние серверов и уведомляет специалистов ОИЯИ в случае возникновения проблем.

ROC-Dubna также является очень популярным публичным местом для экскурсионного посещения учеными, преподавателями, студентами, журналистами и другими гостями ОИЯИ. Его наличие в ОИЯИ значительно повысило интерес молодежи к эксперименту NOvA.

Вычислительная инфраструктура

NOvA и DUNE — это крупномасштабные нейтринные эксперименты, требующие огромного количества вычислительных ресурсов для обработки всех своих данных. Хотя основной объем вычислительных ресурсов оба эксперимента получают из локальной инфраструктуры Fermilab — Fermigrid — они также полагаются на вклад других участвующих организаций через глобальную распределенную вычислительную инфраструктуру Open Science Grid (OSG). DUNE, являясь международной коллаборацией, планировала к 2022 году собрать

около 5000 процессорных ядер и 24 ПБ хранилища данных в качестве общего вклада в сотрудничество. ОИЯИ уже имеет созданный Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс (МИВК) в Лаборатории информационных технологий (ЛИТ), два компонента которого (кластер уровня 2 и облако ОИЯИ) были настроены и расширены для обеспечения вычислительной поддержки экспериментов NOvA, Mu2e и DUNE через OSG.

Специально для эксперимента NOvA было закуплено и добавлено 24 новых сервера в облако ОИЯИ, что расширило его ресурсы на 540 ядер и ~3 ТБ ОЗУ. Эти серверы использовались для размещения виртуальных машин нового пакетного кластера и сайта OSG, что позволяло ему обрабатывать задачи как от локальной группы NOvA ОИЯИ, так и задачи NOvA, поступающие от OSG, что напрямую способствовало сотрудничеству NOvA. В этой системе каждый компонент грид-сайта виртуализируется, что является первым опытом для грид-сайтов ОИЯИ и важным шагом для дальнейшего развития вычислительных моделей в ОИЯИ.

С ростом виртуального вычислительного кластера разработка локального хранилища данных для хранения копии наиболее востребованных экспериментальных данных становится наиболее актуальной задачей. Создание такой системы хранения имеет решающее значение для эффективности выполнения локального анализа данных. Для формирования серверной части хранилища были приобретены 4 сервера хранения данных, добавленные в облачную систему хранения Ceph. Уже существующее хранилище dCache в ОИЯИ было зарегистрировано в системе обработки данных Sequential Access via Metadata (SAM), а выделенная облачная виртуальная машина с большим блочным устройством Ceph была создана и настроена для присоединения к пулу NOvA dCache, что расширило его квоту NOvA на 50 ТБ. Задания Grid используют дверь GridFTP для передачи данных по протоколу GridFTP.

Участие ОИЯИ в качестве Tier-2 Grid-площадки в вычислительной инфраструктуре DUNE предъявляло более жесткие требования к мощности как вычислительного кластера, так и к хранению данных в ОИЯИ, поэтому необходимо было увеличить общую мощность вычислительной инфраструктуры ОИЯИ.

В рамках эксперимента DUNE планируется построить многоуровневую распределенную вычислительную инфраструктуру (по аналогии с CERN) для укрепления международного сотрудничества. Оценка за прошедший период должна была иметь ~5000 ядер CPU и 24 ПБ дискового хранилища к 2022 году (разделение 25/75 % между Фермилаб и остальной частью коллаборации), а серьезным вкладом от отдельного института считается 5-10 %.

Что касается CPU, то ОИЯИ уже смог выполнить требования DUNE «Tier-2» за счет совместного использования существующих общих ресурсов NOvA (и других нейтринных экспериментов) до 2022 г. и последующего увеличения количества CPU до 1000, которые были закуплены и введены в эксплуатацию, позволяют покрыть потребности CPU на 2023 год.

Поскольку существующее хранилище нельзя использовать совместно, как процессоры, необходимо было приобрести выделенное дисковое хранилище DUNE. Дополнительные дисковые серверы использовались для создания облачного хранилища на основе Ceph с 2 ПБ дискового пространства и будут использоваться в качестве серверной части хранилища для Grid-хранилища для выполнения требований центра обработки данных уровня 2 DUNE.

Текущая общая емкость сегмента NOvA/DUNE Grid-кластера составляет 38 вычислительных серверов с 1000 ядер CPU и 12 серверов хранения с общей емкостью необработанных дисков ~2 ПБ.

Исследования сцинтилляторов NOvA

Сцинтилляционный отклик S зависит от природы и энергии E пролетающей ионизирующей частицы и её пробега r . Удельная флуоресценция dS/dr , как правило, не пропорциональна удельным потерям энергии dE/dr .

$$\frac{ds}{dr} = \frac{A \cdot dE/dr}{1 + k_B \cdot dE/dr}$$

где A и k_B — константы, которые были оценены для сцинтиллятора по наблюдениям S и E и данным по энергии пробега. Коэффициент k_B известен как константа Биркса. В случае $NOvA$ необходимо было измерить постоянную Биркса для протонов в энергетическом масштабе МэВ.

Схема установки представлена на рис. 1 слева. Нейтрон испускается изотопным $PuBe$ -источником одновременно с гамма-квантом ($\sim 4,4$ МэВ), который запускает стартовый счетчик (NaI-кристалл + ФЭУ). Протоны сцинтиллятора $NOvA$, находящегося в кювете, выбиваются нейтронами. Кювета считывается ФЭУ, который генерирует стоп-сигнал. В качестве DAQ использовалась плата АЦП DRS4, которая может работать в режиме совпадения каналов. Для калибровки ФЭУ мы использовали светодиод в импульсном режиме, со вспышками света очень низкой интенсивности. Кювета, ФЭУ и светодиод размещены внутри черного ящика. Кювета обернута белой тефлоновой лентой для увеличения световыхода. Со стороны ФЭУ кювета соединена оптической смазкой.

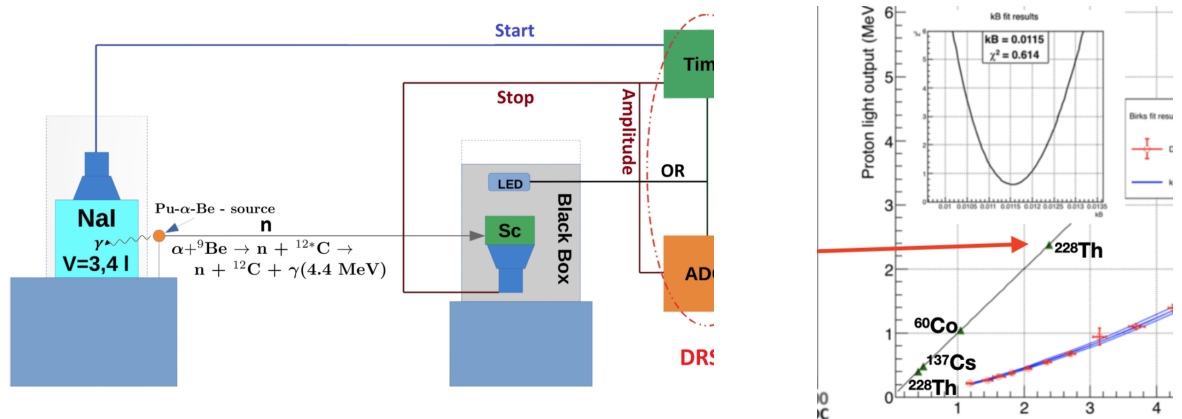


Рисунок 1. Слева: блок-схема тестового стенда, справа: кривая калибровки, линейная аппроксимация - черная сплошная линия, точки – 405 кэВ (^{228}Th), 477 кэВ (^{137}Cs), 1041 кэВ (средняя энергия двух линий ^{60}Co), 2381 кэВ (^{228}Th); отклик сцинтиллятора на протоны отдачи: красные точки – экспериментальные данные, синие сплошные линии – Монте-Карло аппроксимация с 1σ доверительным интервалом.

Отклик от протонов был прокалиброван по гамма-источникам ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{228}Th в предположении пренебрежимо малого эффекта гашения для быстрых электронов (вклад черенковского света не учитывался). Чтобы извлечь постоянную Биркса, мы использовали численное интегрирование, варьируя k_B , чтобы получить S как сцинтилляционный отклик на протоне. Постоянная A принималась за кинетическую энергию первичного протона. Мы выполнили численное интегрирование от 0 до E_p с шагом 1 кэВ, используя значения dE/dr из таблиц NIST PSTAR. Сцинтиллятор $NOvA$ представляет собой раствор на основе минерального масла с массовыми показателями для углерода $\sim 85,5\%$, водорода $\sim 14,5\%$ и пренебрежимо малыми для всех остальных добавок.

Наконец, данные были проанализированы с использованием программного обеспечения моделирования $NOvA$, которое пропагирует энергии на основе пакета GEANT и

пользовательского моделирования для светоотдачи (см. рис. 1, правые синие сплошные линии). И в итоге была найдена постоянная Биркса $k_B = 1.15 \pm 0.07 \text{ g}/(\text{MeV} \cdot \text{cm}^2)$.

Сейчас мы подготовили стенд для черенковских измерений света, чтобы улучшить измерения Биркса и рассчитываем завершить исследования сцинтилляторов в 2024 году.

Тестирование модулей 2x2 для DUNE NDLAG

Прототипы модулей обеспечивают крупномасштабное, полностью интегрированное тестирование системы считывания света, что позволяет получить подробную характеристику производительности модулей ArCLight и LCM, считывания, сбора данных, запуска и синхронизации с большой статистикой событий. Используя данные от космических лучей и специальные диагностические наборы с различными конфигурациями детекторов, был проведен ряд тестов для оценки спектров сигналов, точности синхронизации между событиями и внутри них, а также эффективности регистрации фотонов.

Перед набором данных на космических лучах была выполнена калибровка усиления SiPM с использованием светодиодного источника, где напряжение смещения для каждого канала SiPM было отрегулировано для получения равномерного распределения усиления по каналам.

LCM использовались для обеспечения внешнего запуска системы считывания заряда с эффективным порогом около 15 фотоэлектронов (p.e.). Триггерное маркер пишется в непрерывный автоматически запускаемый поток данных системы считывания заряда и обеспечивает точный флаг с отметкой времени для идентификации совпадений между данными зарядовой и световой системам.

События, сформированные атмосферными мюонами, пересекающими объем TPC, использовались для определения временного разрешения детекторов света (см. рис. 2 слева и рис. 4 слева). Измерение времени происходит следующим образом: каждый сигнал передискретизируется с помощью преобразования Фурье, чтобы увеличить количество точек на нарастающем фронте (oversampling), что обеспечивает его хорошее линейное соответствие. Затем выполняется линейная аппроксимация базовой линии и вычисляется точка пересечения нарастающего фронта сигнала с базовой линией, что обеспечивает надежное извлечение времени одиночного сигнала в каждом канале.

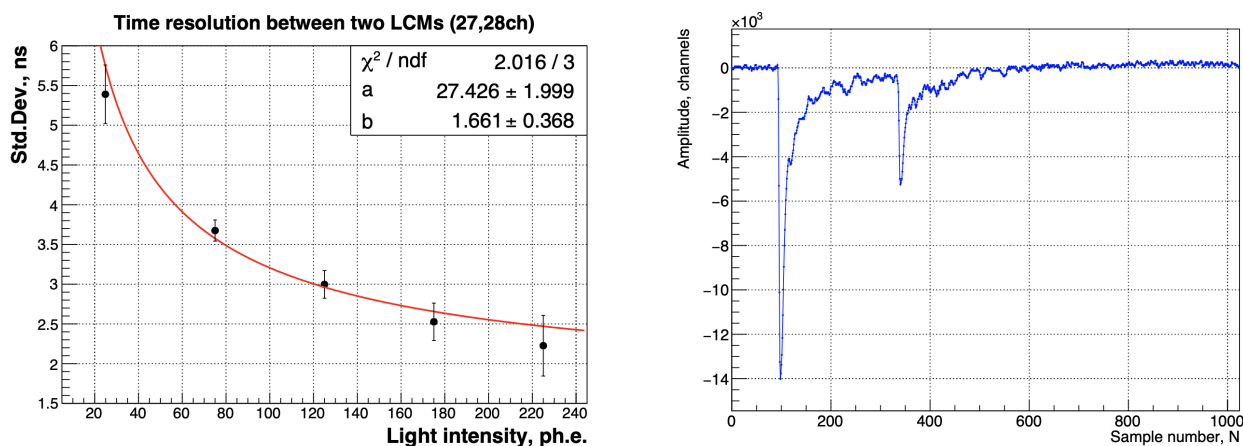


Рисунок 2. Модуль-0: Временное разрешение между двумя LCM как функция отклика сигнала (слева). Сигналы останавливающегося мюона и задержанного мишелевского электрона, обнаруженные LCM (справа).

Примером применения превосходного временного разрешения для LCM является идентификация мишелевских электронов (см. рис. 2 справа) по остановке распада мюона, где относительное время между сигналами мюона и электрона определяется средним временем жизни мюона, $\tau \sim 2$ мкс.

Два примера сигналов от останавливающегося мюона и задержанного электрона Мишеля, зарегистрированных LCM, показаны на рис. 2. Поскольку время распада мюона является переменным, но подчиняется хорошо понятному экспоненциальному закону, такие события можно использовать, например, для изучения накладывающихся событий во взаимодействиях нейтрино.

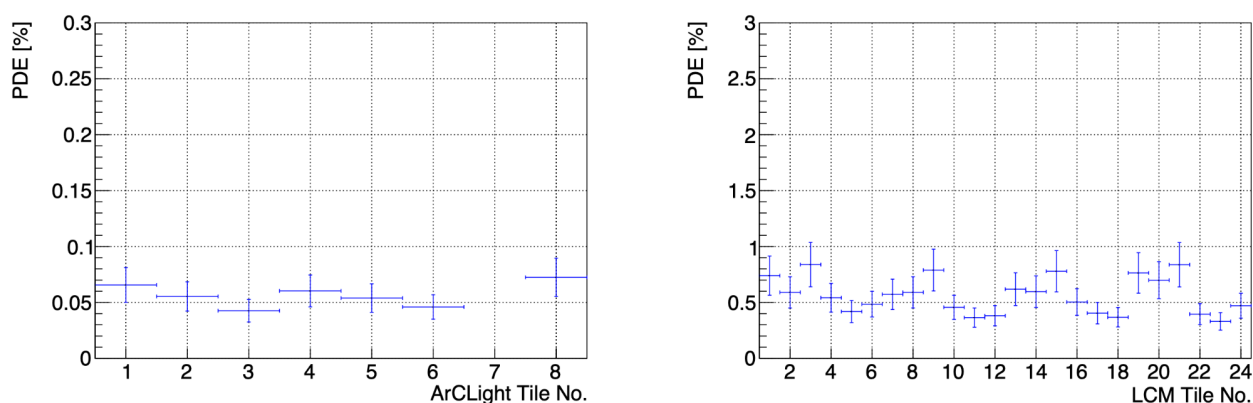


Рисунок 3. Абсолютный PDE для каждого элемента ArCLight (слева) и LCM (справа) (произвольная нумерация). Элемент 7 ArCLight был отключен во время сбора данных Модуля-0. Элементы LCM размещаются наборами по 3 штуки, чтобы покрыть ту же площадь, что и один элемент ArCLight.

Для оценки эффективности системы считывания света используется сцинтилляционный свет, индуцированный треками, восстановленными по данным считывания заряда в ТРС. В частности, рассматриваются треки атмосферных мюонов, пересекающие весь детектор по вертикали.

В трехмерном моделировании заряд трека дискретизируется в отдельные точки с миллиметровым разрешением вдоль трека, предполагая бесконечно тонкую истинную траекторию.

Для каждой точки в этом вокселизованном событии вычисляется телесный угол под которым падает свет на светосчитывающую поверхность детектора. Затем, предполагая изотропное сцинтилляционное излучение света, можно использовать телесный угол для вычисления геометрической эффективности падения света для каждой ячейки детектора.

Количество фотонов, попадающих на поверхность детектора, оценивается путем умножения геометрического аксептанса на количество излучаемых фотонов на единицу длины трека и интегрирования по всей длине трека. Здесь количество излучаемых фотонов на единицу длины трека рассчитано для номинальной напряженности электрического поля 0,5 кВ/см.

Рэлеевское рассеяние, которое дает небольшой эффект на соответствующих масштабах расстояний, в этом расчете не учитывается.

Эффективность регистрации фотонов (PDE) системы считывания света можно оценить, сравнив измеренное количество фотоэлектронов и расчетное количество фотонов, попадающих на поверхность детектора, полученное в результате моделирования, описанного выше.

Поскольку формы сигналов, полученные с помощью детекторов света, были интегрированы в ограниченном окне, реальный сцинтилляционный свет может быть недооценен.

Эффект был исправлен путем умножения количества реконструированных фотонов на коэффициент нормировки на полную длину сигнала, который рассчитывается на основе отклика детектора и временных характеристик сцинтилляций. На рис. 3 показаны измеренные PDE для всех модулей ArCLight и LCM, используемых в детекторе Модуль-0.

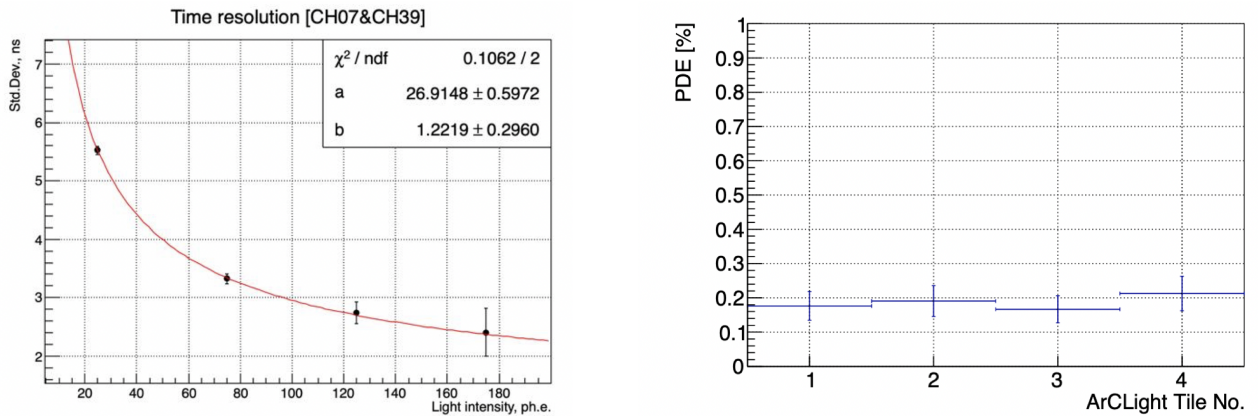


Рисунок 4. Модуль-1: временное разрешение между двумя LCM в зависимости от отклика сигнала (слева). Абсолютный PDE для каждого элемента LCM (справа) (произвольная нумерация).

С 2021 года изготовлено и успешно испытано на космических лучах 4 прототипа модулей ТРС. В модулях-1,2,3 мы изменили частоту дискретизации АЦП на 62,5 МГц (по сравнению со 100 МГц) с 14-битным амплитудным разрешением (по сравнению с 10-битным), что не влияет на временное разрешение (рисунок 4 слева), но значительно улучшает динамический диапазон. Мы также улучшили экранировку криогенной электроники считывания света от цифровых наводок от системы считывания заряда, что несколько улучшает временное разрешение по сравнению с модулем-0.

В модулях-1,2,3 был использован SiPM с повышенной эффективностью, PDE=35% по сравнению с PDE=25% (мод-0), используемый для считывания света с модулей. Технология ArCLight была значительно усовершенствована за счет применения новых отражающих покрытий. Рис. 5. Показывает PDE для всех модулей ArCLight, используемых в детекторе Module-1 (справа).

Все четыре модуля были собраны, протестированы и отправлены в Фермилаб для тестирования в демонстраторе 2x2.

2.2.2. Описание проведенных экспериментов (для экспериментальных проектов).

2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.

Самые последние трехфлейворные осцилляционные результаты NOvA были получены в 2020 г., с дополнительным повторным анализом тех же данных, выполненным в 2022 г. Эксперимент набрал статистику 13.6×10^{20} POT (ν) + 12.5×10^{20} POT ($\bar{\nu}$). NOvA имеет своей целью изучение осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ и $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ путем обнаружения нейтрино в

конечном состоянии, которые провзаимодействовали через заряженные токи, и сравнения результатов с начальным потоком нейтрино, измеренным ближним детектором. События, отобранные в дальнем детекторе, показаны на Рисунках 5 и 6.

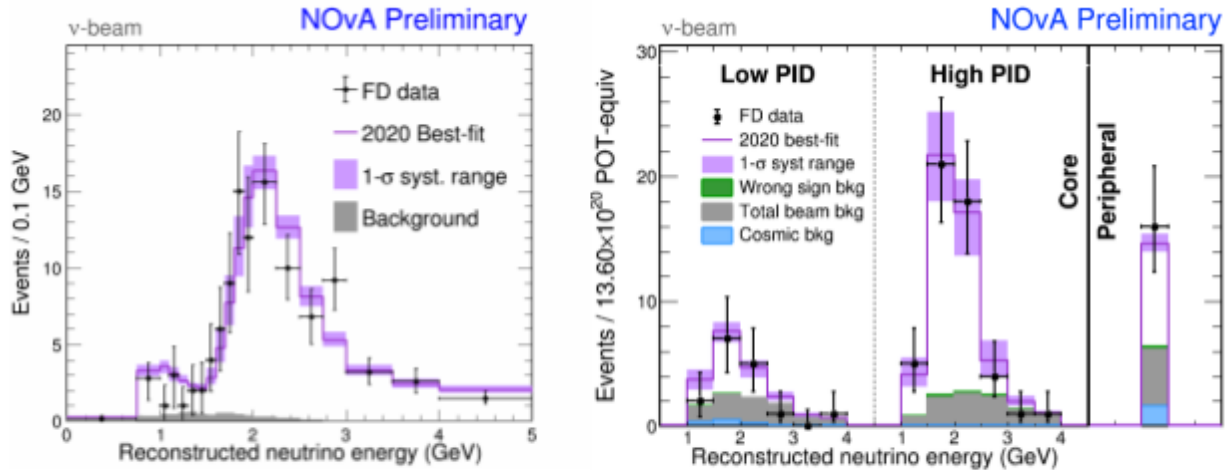


Рисунок 5. Спектры событий мюонных и электронных нейтрино, отобранных в дальнем детекторе NOvA при работе с пучком нейтрино. Эти спектры использовались для аппроксимации данных.

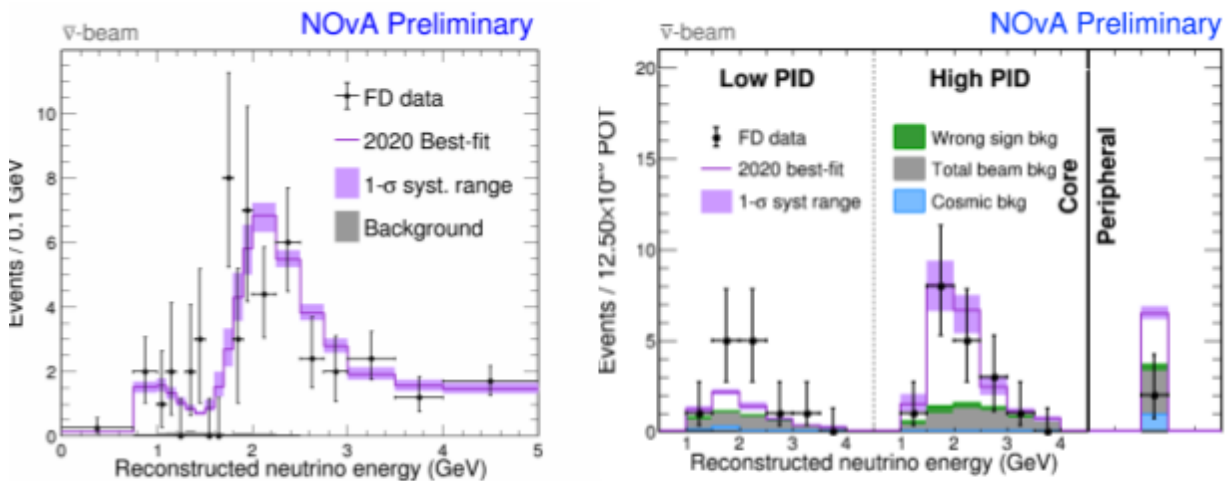


Рисунок 6. Спектры событий мюонных и электронных нейтрино, отобранных в дальнем детекторе NOvA при работе с пучком антинейтрино. Эти спектры использовались для аппроксимации данных.

Спектры отобранных событий используются в совместной подгонке для извлечения параметров нейтринных осцилляций. Результат, полученный в 2020 году, был получен в рамках частотной парадигмы (Frequentist). Из-за малой статистики подгонка была скорректирована с использованием подхода Фельдмана-Казинса. Полученные результаты показаны на Рисунке 7. В повторном анализе 2022 года для NOvA впервые использовалась другая парадигма для получения результатов — байесовский подход с использованием Монте-Карло с цепями Маркова (MCMC), результат на Рисунке 8. Оба результата имеют аналогичные физические выводы.

Наилучшее значение NOvA находится в точке $\delta_{CP} = 0.82\pi$, $\sin^2 \theta_{23} = 0.57^{+0.03}_{-0.04}$, $\Delta m_{32}^2 = (2.41 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$. Нормальный порядок массы нейтрино и верхний октант угла θ_{23} ($\theta_{23} > \pi/4$) слабо предпочтительны на уровнях 1σ и $1,2\sigma$ соответственно. Область $\delta_{CP} = \pi/2$ при

гипотезе обратного порядка масс нейтрино была исключена на уровне $>3\sigma$. Значение $\delta_{CP} = 3\pi/2$ в гипотезе прямого порядка масс нейтрино и верхний октант θ_{23} исключается на уровне $\sim 2\sigma$.

Таким образом, NOvA не видит асимметрии в появлении нейтрино/антинейтрино.

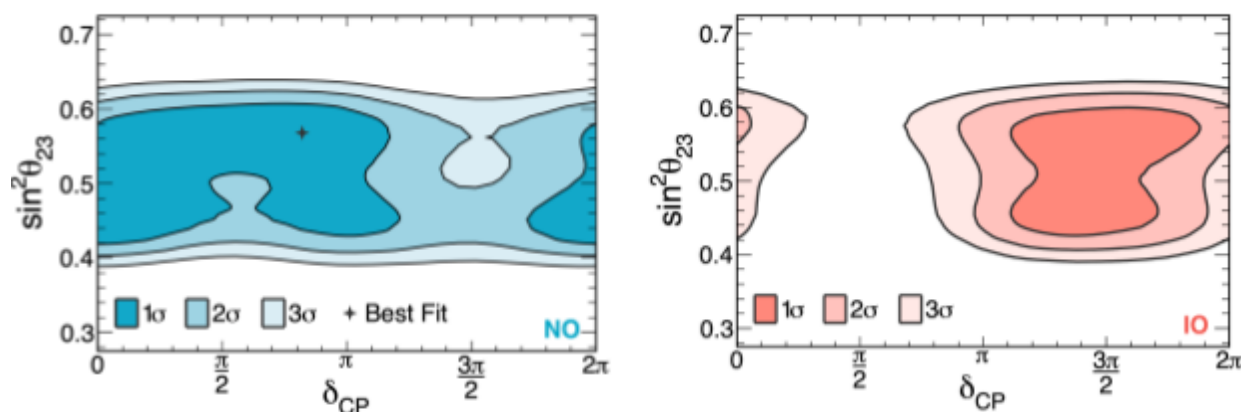


Рисунок 7. Доверительные контуры, полученные экспериментом NOvA с данными 2020 г., при гипотезе о нормальном порядке масс нейтрино (слева) и обратном порядке (справа). Использован частотный подход.

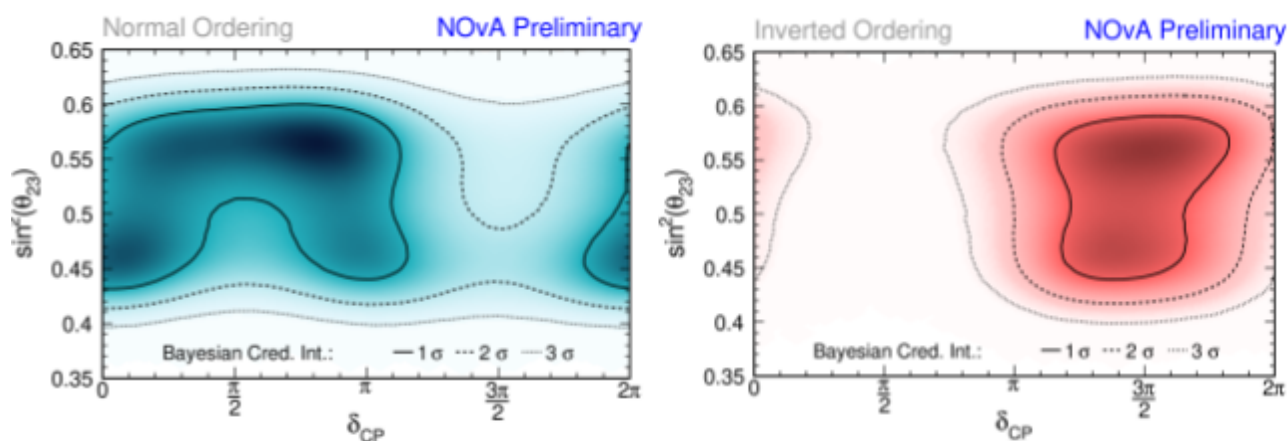


Рисунок 8. Достоверные интервалы, полученные экспериментом NOvA при повторном анализе данных 2020 г. в 2022 г. при гипотезе нормального порядка масс нейтрино (слева) и обратного порядка (справа). Использован байесовский подход.

Группа ОИЯИ участвует в деятельности группы трехфлейворного анализа данных NOvA. Анализ 2020 года, соответствующий частотному подходу (Frequentist), был получен членами группы ОИЯИ. Эти результаты стали официальными для NOvA и были опубликованы в коллаборационной статье Phys.Rev.D 106 (2022) 3, 032004. В 2021 - 2023 гг. члены группы ОИЯИ выполняли следующие работы в группы трехфлейворного анализа: оценка энергии нейтринных событий, декомпозиция спектров в ближнем детекторе, чувствительность эксперимента, измерение CP асимметрии и вероятностей осцилляций в реальных задетектированных данных, проверка кода фреймворка анализа (code review).

Результаты NOvA хорошо согласуются с другими экспериментами по осцилляциям (Рисунок 9), хотя с экспериментом T2K возникает разногласие в измерении δ_{CP} , что вызвало некоторое волнение в сообществе. Но следует отметить, что статистическая значимость этого расхождения достаточно низкая ($< 2\sigma$). Предложенные теоретиками гипотезы разрешения этого противоречия в основном связаны с новой физикой. Другим возможным решением является просто статистическая флуктуация или неизвестная систематическая неопределенность.

В настоящее время NOvA и T2K готовят совместный анализ данных. Члены группы ОИЯИ участвуют в этом анализе со стороны эксперимента NOvA.

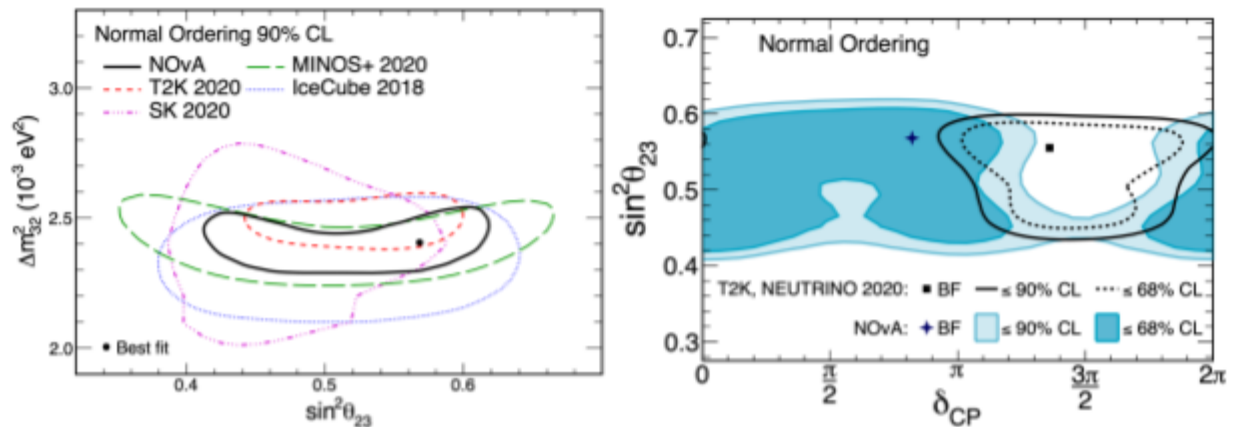


Рисунок 9. Результаты NOvA по сравнению с другими измерениями экспериментов по осцилляциям. На левом рисунке показано сравнение атмосферных параметров осцилляций нейтрино. На правом рисунке показано расхождение NOvA и T2K в измерении фазы нарушения CP.

Поиск медленного магнитного монополя на основе 95-дневной экспозиции в 2015 г. опубликован в Phys. Rev. D 103 (2021) 1, 012007. Никаких событий, соответствующих монополям, не наблюдалось, установлен верхний предел потока $2 \times 10^{-14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ при 90% CL для скорости монополя $6 \times 10^{-4} < \beta < 5 \times 10^{-3}$ и массы более $5 \times 10^8 \text{ ГэВ}$. Из-за небольшой перекрывающей породы NOvA, равной 3 метрам водного эквивалента, это ограничение охватывает ранее не изученную область с малой массой. В дополнение отметим, что группа из ОИЯИ провела измерения медленных сигналов на созданном тестовом стенде в ОИЯИ для проверки моделирования монополя. Установка имитировала сигнатуру сигнала монополей, считываемых фото-детекторами и электроникой NOvA, световыми импульсами, генерируемыми светодиодами. Импульсы имели длительность, соответствующую времени прохождения через ячейку монополей различных скоростей и интенсивностей, соответствующих ожидаемому монополю dE/dx .

Проведен анализ объединения сигналов нейтрино от сверхновой в различных экспериментах (JCAP12(2021)053). Обнаружение нейтрино сверхновых в экспериментах с нейтрино и темной материей обычно реализуется как триггерная система в реальном времени, основанная на подсчете взаимодействий нейтрино в движущемся временном окне. Чувствительность таких экспериментов может быть улучшена за счет учета временного профиля ожидаемого сигнала. Члены группы ОИЯИ предложили анализ формы поступающих экспериментальных данных на основе переменной логарифмического отношения правдоподобия, содержащей предполагаемую форму сигнала. Этот подход также позволяет комбинировать потенциальные сигналы сверхновых в разных детекторах для дальнейшего повышения чувствительности. Метод апробирован на детекторах NOvA для изучения их совместной чувствительности к сигналу коллапса ядра сверхновой, а также на KamLAND, Bogexino и SK-Gd в качестве потенциальных детекторов нейтрино предсверхновой. Использование анализа формы повышает значимость сигнала для обнаружения и предсказания сверхновых, а также повышает чувствительность эксперимента. Это также увеличивает время предсказания сверхновых применительно к обнаружению сигналов нейтрино до появления сверхновых. Улучшения, достигнутые с помощью анализа формы, сохраняются даже в том случае, когда фактический сигнал не соответствует ожидаемой модели сигнала. Опубликована

статья о поиске SN-подобных сигналов в совпадении с обнаруженными гравитационными волнами LIGO/VIRGO (Phys. Rev.D 104 (2021) 6, 063024).

Несколько анализов атмосферных мюонов продолжаются. Дубненская группа анализирует геомагнитные эффекты в восточно-западной асимметрии спектров мюонов и тестирует методику измерения спектра высокоэнергетических мюонов, предложенную Р.П. Кокоулиным и др.

2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, включая ассоциированный персонал по результатам работы по проекту (список библиографических ссылок).

2.2.5. Полный список публикаций (приложение в электронном виде, для журнальных публикаций с указанием импакт-фактора журнала).

Список публикаций со значимым вкладом членов группы ОИЯИ в 2020-2023 гг. Общее количество публикаций NOvA с включенными авторами ОИЯИ за этот период — 12, общее количество публикаций DUNE — 26.

2020:

1. M. Acero et al (NOvA Collaboration) “Supernova neutrino detection in NOvA” *JCAP* 10 (2020), 014
2. N. Anfimov, A. Antoshkin, A. Aurisano, O. Samoylov and A. Sotnikov “JINR stand measurements for improvements in the NOvA detector simulation chain” (2020) *JINST* 15 C06066.
3. N. Anfimov, R. Berner, I. Butorov, A. Chetverikov, D. Fedoseev, B. Gromov, D. Korablev, I. Kreslo, K. Kuznetsova, A. Olshevskiy, A. Rybnikov, A. Selyunin, V. Sharov, J. Sinclair, S. Sokolov, “Development of the Light Collection Module for the Liquid Argon Time Projection Chamber (LArTPC)”, (2020) *JINST* 15 C07022
4. I.D. Kakorin, K.S. Kuzmin, V.A. Naumov “A Unified Empirical Model for Quasielastic Interactions of Neutrino and Antineutrino with Nuclei”, *Phys.Part.Nucl.Lett.* 17 (2020) 3, 265-288

2021:

1. L. Kolupaeva, O. Samoylov “Study of Neutrino Oscillations in the NOvA Experiment”, *Yad.Fiz.* 84 (2021) 1, 48-52
2. A. Sheshukov, A. Vishneva, A. Habig “Combined detection of supernova neutrino signals” *JCAP* 12 (2021) 12, 053
3. M. A. Acero et al. (NOvA Collaboration) “Search for Slow Magnetic Monopoles with the NOvA Detector on the Surface”, *Phys. Rev. D* 103, 012007
4. A. D. Morozova, A. A. Kochanov, T. S. Sinegovskaya, S. I. Sinegovsky “High-energy spectra of the atmospheric neutrinos: predictions and measurements” e-Print:2109.13000
5. N.A. Balashov, I.S. Kuprikov, N.A. Kutovskiy, A.N. Makhalkin, Ye. Mazhitova, R.N. Semenov “Quantitative and qualitative changes in the JINR cloud infrastructure”, Proceedings of the 9th International Conference "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID'2021)
6. N. Balashov, N. Kutovskiy, N. Tsegelnik “Resource management in private multi-service cloud environments” Proceedings of the 9th International Conference “Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education” (GRID'2021), Dubna, Russia (2021)

7. M.A.Acero et al (NOvA Collaboration) “Extended search for supernovalike neutrinos in NOvA coincident with LIGO/Virgo detections” *Phys.Rev.D* 104 (2021) 6, 063024
8. V Hewes et al (Dune Collaboration) “Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Near Detector Conceptual Design Report” *Instruments* 5 (2021) 4, 31
9. Luis Alvarez-Ruso et al (GENIE Collaboration) “Recent highlights from GENIE v3” *Eur.Phys.J.ST* 230 (2021) 24, 4449-4467
10. I.Kakorin, K.Kuzmin “Resonance axial-vector mass from experiments on neutrino-hydrogen and neutrino-deuterium scattering” *Phys.Rev.D* 104 (2021) 9, 9
11. I.Kakorin, K.Kuzmin, V.Naumov “Running axial mass of the nucleon as a phenomenological tool for calculating quasielastic neutrino–nucleus cross sections” *Eur.Phys.J.C* 81 (2021) 12, 1142
12. L.D. Kolupaeva, A.G. Olshevskiy, O.B. Samoylov “Status and Research Prospects of Three-Flavor Neutrino Oscillations”, *Phys.Part.Nucl.* 52 (2021) 3, 357-373
13. S.Al Kharusi et al. (SNEWS Collaboration) “SNEWS 2.0: a next-generation supernova early warning system for multi-messenger astronomy” *New J.Phys.* 23 (2021) 3, 031201

2022:

1. M. Acero et al (NOvA Collaboration) “Improved measurement of neutrino oscillation parameters by the NOvA experiment” *Phys.Rev.D* 106 (2022) 3, 032004
2. I. Ruiz Simo, I.D. Kakorin,, V.A. Naumov,, K.S. Kuzmin,, J.E. Amaro “Analysis of the kinematic boundaries of the quasielastic neutrino-nucleus cross section in the superscaling model with a relativistic effective mass” *Phys.Rev.D* 105 (2022) 1, 013001
3. Julia Tena-Vidal et al (GENIE Collaboration) “Neutrino-nucleus $CC\pi_0$ cross-section tuning in GENIE v3”, *Phys.Rev.D* 106 (2022) 11, 112001
4. A. Stepanova, L.Kolupaeva «Development of a shell for calculating the sensitivity of accelerator experiments in GNA based on the DUNE experiment» Scientific notes of the Faculty of Physics of Moscow State University (2022) № 4. 2240304
5. A. Stepanova, M. Gonchar, L. Kolupaeva, K. Treskov «Deep underground neutrino experiment DUNE – calculation of sensitivity to the measurement of oscillation parameters». *PEPAN letters* (2022) 19 5

2023:

1. L.D. Kolupaeva, M.O. Gonchar, A.G. Olshevskiy, O.B. Samoylov “Neutrino oscillations: status and research prospects for measurement of neutrino mass ordering and CP-violation phase” accepted for publication in *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (2023)
2. A.Olshevskiy “Results of Neutrino Oscillations and the Search for Sterile Neutrino States” accepted to be published in *PEPAN letters* (2023)
3. A. Stepanova, L. Kolupaeva «Joint fit of long-baseline accelerator neutrino experiments in GNA software», sent to *PEPAN Letters* (2023)

Технические внутриколлекторные заметки, написанные участниками группы ОИЯИ в 2020-2023 гг.:

2020:

1. A. Antoshkin, A. Habig, M. Strait, H. Britt, M. Frank, M. Greene, E. Milliner, J. Robbins, P. White, C. Dukes, R. Ehrlich, E. Song “NOvA Slow Monopole Analysis”, 30 Jun 2020, DocDB 22610
2. L.Kolupaeva, T. Warburton “2020 Sensitivity and Fitting Technote”, 6 Mar 2020, DocDB 44043

2021:

1. L. Kolupaeva “Technote on appearance oscillation probability and Acp measurement”, DocDB 50477, 26 May 2021

2022:

1. A. Antoshkin, N. Anfimov, A. Chetverikov “Test bench for measurements of scintillators (NOvA, LAB-based etc.) properties. Cherenkov light.”, Technical note # 57219, NOvA Collaboration document database, 22 Dec 2022
2. A. Antoshkin, M. Frank “Slow monopole Pre-selection”, December 27, 2022, Technical note # 57246
3. O. Petrova “East-West asymmetry Technote”, DocDB 56425, 28 Sep 2022
4. Light System ADC64ve_v3.2, technote, DUNE-doc-26097, 2 June, 2022
5. Light System VGA board, technote., DUNE-doc-24868-v3, 1 June, 2022
6. Light Readout System SiPM PS control board ORC, technote., DUNE-doc-25650-v1, 8 June, 2022
7. Light Readout System SiPM PS PCB ORC, technote, DUNE-doc-25655-v1, 8 June, 2022
8. Light Readout System Adapter card ORC, technote., DUNE-doc-25653-v2, 8 June, 2022
9. Light Readout System VGA control module ORC, technote., DUNE-doc-25657-v2, 9 June, 2022

2.2.6. Список докладов на международных конференциях и совещаниях (приложение в электронном виде).

Список докладов, сделанных на различных конференциях и публичных научных мероприятиях членами группы ОИЯИ в 2020-2023 гг.:

2020:

1. Andrey Sheshukov, “Real-time detection of supernova neutrino signal”, 127th session of the JINR Scientific Council, Dubna.
2. Andrey Sheshukov, “Detecting neutrinos from the next galactic supernova in the NOvA detectors”, CNNP-2020, Cape Town, South Africa, Feb 2020.
3. Nikolay Anfimov, “Improvements in the NOvA Detector Simulation based on JINR stand measurements”, Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-20), February 24-28 2020, Budker Institute, Novosibirsk, Russia.
4. O. Samoilov, “Study of neutrino oscillations in the NOvA experiment”, Session-conference of the Nuclear Physics Section of the Physical Sciences Department of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, March 10-12, 2020.
5. L. D. Kolupaeva, “Oscillation analysis in the NOvA accelerator neutrino experiment”, seminar at DLNP JINR, April 3, 2020.
6. N. Balashov, “JINR Computing Infrastructure for the NOvA Experiment”, seminar at DLNP JINR, April 7, 2020.
7. Andrey Sheshukov, “Non-oscillation analyses of the NOvA experiment”, seminar at DLNP JINR, April 10, 2020.
8. Liudmila Kolupaeva, Thomas Warburton, “Long-baseline neutrino oscillation results from NOvA in neutrino and antineutrino modes”, Neutrino 2020, Chicago (USA), online poster session, June 2020.
9. Liudmila Kolupaeva, Anna Hall, “Data-Driven Cross Checks for nue selection efficiency in NOvA”, Neutrino 2020, Chicago (USA), online poster session, June 2020.
10. Alec Habig, Andrey Sheshukov, Justin Vassel, “Galactic Supernova Neutrino Detection with the NOvA Detectors”, Neutrino 2020, Neutrino 2020, Chicago (USA), online poster session, June 2020.

11. Matthew Strait, Oleg Samoylov, "The Astrophysics Program of NOvA", Neutrino 2020, Chicago (USA), online poster session, June 2020.
12. Andrey Sheshukov, "NOvA in 10 minutes", New Perspectives 2020, FNAL (USA), July 2020.
13. Liudmila Kolupaeva, "Recent three-flavor neutrino oscillation results from the NOvA experiment", ICPPA-2020, oral talk, October 2020.
14. A.G. Olshevsky, "Investigation of neutrino oscillations in reactor and accelerator experiments", invited talk at the INR RAS conference, December 4, 2020

2021:

1. L. Kolupaeva, "Current status and future prospects of three flavor neutrino oscillations", AYSS-2021, 11-15 Oct, Almaty, Kazakhstan (Hybrid Event). (invited plenary talk)
2. O. Petrova, "East-West asymmetry in atmospheric muon fluxes in the Far Detector of NOvA", AYSS-2021, 11-15 October, Almaty, Kazakhstan (Hybrid Event). (oral talk)
3. O. Samoylov, "The Astrophysics program of the NOvA experiment", TeV Particle Astrophysics conference (TeVPA 2021), 25-29 October 2021, Chengdu, China (Hybrid Event) (oral talk)
4. N.V. Anfimov, "Liquid-argon TPC of the near detector of the DUNE experiment", DLNP JINR seminar, May 20, 2021
5. N.A. Balashov, I.S. Kuprikov, N.A. Kutovskiy, A.N. Makhalkin, Ye. Mazhitova, R.N. Semenov "Quantitative and qualitative changes in the JINR cloud infrastructure", 9th International Conference "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID'2021), 5-9 July 2021, Dubna, Russia. (oral talk)
6. N. Balashov, N. Kutovskiy, N. Tsegelnik "Resource management in private multi-service cloud environments" 9th International Conference "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID'2021), 5-9 July 2021, Dubna, Russia
7. V.Sharov "Development of a multi-channel power supply for the TAO and DUNE experiments", AYSS-2021, 13.10.2021 (oral talk)
8. S. Sokolov "Light detection system prototype for DUNE Near Detector TPC", AYSS-2021, 13.10.2021 (oral talk)
9. A. V. Stepanova "Underground accelerator neutrino experiment (DUNE) - calculation of sensitivity to measuring oscillation parameters" XXVIII International scientific conference of students, postgraduate students and young scientists "Lomonosov-2021", 12.04.2021 – 23.04.2021, Moscow, Russia
10. A. Stepanova, M. Gonchar, L. Kolupaeva, K. Treskov «Deep underground neutrino experiment DUNE – calculation of sensitivity to the measurement of oscillation parameters» AYSS- 2021, 11.10.2021 – 15.10.2021

2022:

1. L. Kolupaeva, A.Sutton on behalf of the NOvA Collaboration "Latest Long-baseline 3-flavor Neutrino Oscillation Results from the NOvA Experiment", Neutrino 2022, 30.05-4.06.2022 (poster talk)
2. A.G. Olshevsky "Results of neutrino oscillations and the search for sterile states of neutrinos", International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology, 18-21 July 2022, Dubna (invited plenary talk)
3. O. Samoylov, "Astrophysics and beyond the Standard Model of particle physics in the NOvA experiment", ICPPA-2022, 29.11-02.12.2022, Moscow, Russia. (oral talk)
4. A. Sheshukov, "Neutrino signals of the next galactic supernova" 06 June 2022, JINR AYSS Conference "Alushta-2022" (oral talk)
5. A. Sheshukov, "SuperNova Early Warning System", ICPPA-2022, 29.11-02.12.2022, Moscow, Russia (poster talk)
6. N. Anfimov. "Methodical activities at DLNP JINR for international neutrino experiments JUNO and DUNE" Conference "Kruger 2022: Discovery Physics at the LHC", South Africa, December 4-9, 2022.

7. A. V. Stepanova, L. D. Kolupaeva "Development of a shell for calculating the sensitivity of accelerator experiments in GNA based on the DUNE experiment", International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Lomonosov-2022", , 04/11/2022 - 04/22/2022, Moscow, Russia
8. A. Stepanova, L. Kolupaeva, «The DUNE experiment PRISM method for data-driven predictions» Young Scientist Forum at Moscow International School of Physics 2022, 24.07.2022 - 02.08.2022, Dubna
9. A. Stepanova «Joint fit of long-baseline accelerator neutrino experiments in GNA software» The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022), 24.10.2022 — 28.10.2022

2023:

1. A.S. Selyunin “Light Detection System of the DUNE Near Detector LAr TPC”, poster, 56th session of the JINR Program Advisory Committee for Particle Physics at JINR, January 24, 2023
2. A.S. Selyunin, DLNP JINR Scientific and Methodological Seminar, "Light reading system in liquid argon of the modular TPC near detector of the DUNE experiment", March 9, 2023
3. O. Samoylov “Study of neutrino oscillations in NOvA/DUNE accelerator experiments” DLNP Seminar March 16, 2023
4. A. Antoshkin “Slow magnetic monopoles search in NOvA”, poster, 56th session of the JINR Program Advisory Committee for Particle Physics at JINR, January 24, 2023
5. V. Sharov, “Light readout system for liquid argon TPC of the DUNE ND”, poster, 56th session of the JINR Program Advisory Committee for Particle Physics at JINR, January 24, 2023
6. A. Stepanova "Calculation of the accuracy of determining the parameters of neutrino oscillations in accelerator neutrino experiments with a long baseline", International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Lomonosov", 10.04.2023 - 21.04.2023, Moscow, Russia
7. A. Stepanova "The accuracy of determining the oscillation parameters in the DUNE experiment in comparison with other long-baseline accelerator neutrino experiments" Kurchatov Youth Scientific School, 03/20/2023 - 03/23/2023. Moscow, Russia
8. L. Kolupaeva “JINR neutrino program”, seminar at INP, Almaty, Kazakhstan, 5.01.23

Неполный список избранных докладов, представленных членами группы ОИЯИ на коллаборационных мероприятиях NOvA и DUNE в 2020-2023 гг.:

2020:

1. Nikolay Anfimov, “NOvA benchmarking at Dubna”, NOvA Collaboration Meeting at the University of California, Irvine, 13-16 February 2020.
2. Alex Antoshkin, Martin Frank et. al., “Slow monopole analysis”, NOvA Collaboration Meeting, 13-16 February 2020.
3. N. Balashov, “JINR Computing Infrastructure Status”, NOvA Collaboration Meeting, 13-16 февраля 2020.
4. Jeremy Hewes, Oleg Samoylov, “Detector Simulation Summary”, Plenary talk, NOvA Collaboration Meeting at the University of California, Irvine, 13-16 February 2020.
5. Alex Antoshkin, Martin Frank et. al., “Slow monopole Paper Update”, NOvA Collaboration Meeting, 11-14 мая 2020.
6. Olga Petrova, “East-West Asymmetry”, NOvA Collaboration Meeting, 4-15 May 2020.
7. Olga Petrova, “East-West Asymmetry update”, NOvA Collaboration WG, 6 October 2020.
8. L. Kolupaeva, “2020 sensitivities with mock data”, NOvA Collaboration WG, 16 Jan 2020.

9. L.Kolupaeva, "T2K - NOvA comparisons", NOvA Collaboration WG, 15 Jul 2020.
10. A. Chukanov "Beam monitoring with ECAL+STT configuration", DUNE collaboration meeting, 28.01.2020
11. A. Chukanov "Beam Monitoring with SAND detector", DUNE physics meeting, 09.06.2020

2021:

1. O. Petrova, "EWA update: surface simulations and artificial asymmetry", Exotics at NOvA collaboration Virtual Meeting, 23 February, NOvA DocDB-49259.
2. A. Kalitkina, "Summary of the horn current impact. Three approaches to compare the horn current impact on the analysis", Beam/3F/DQ Parallel at NOvA collaboration Virtual Meeting, 01 March 2021, NOvA DocDB-49367.
3. K. Warburton, L. Suter, R. Nichol, L. Kolupaeva "3 Flavour Oscillation Group Summary", Plenary at NOvA collaboration Virtual Meeting, 14 Jun 2021, DocDB 50882.
4. A. Sheshukov, "DDSN status and tasks", Exotics at NOvA collaboration Virtual Meeting, 15 June 2021, NOvA DocDB-50738.
5. A. Antoshkin, "Slow monopole reconstruction", Exotics at NOvA collaboration Virtual Meeting, 21 September 2021, NOvA DocDB-51975.
6. N. Anfimov, "Cherenkov Studying", Detector systematics at NOvA collaboration Virtual Meeting, 28 September 2021, NOvA DocDB-52053.
7. A. Morozova, "The small updates of high energy muons", Exotics at NOvA collaboration Virtual Meeting, 5 October, NOvA DocDB-52131.
8. O. Petrova, "East-West Asymmetry update", Exotics at NOvA collaboration Virtual Meeting, 5 October, NOvA DocDB-52134.
9. A. Sheshukov, "Supernova trigger: post-shutdown status and plans", Exotics at NOvA collaboration Virtual Meeting, 12 October 2021, NOvA DocDB-52218.
10. L. Kolupaeva "CP asymmetry measurement and data taking optimization checks", NOvA Collaboration WG, 1 Apr 2021
11. A. Kalitkina, "Ana2020 MC POT accounting compared to the data", 3-Flavor Oscillation at NOvA collaboration Virtual Meeting, 19 October 2021, NOvA DocDB-52330.
12. I.Kakorin, K. Kuzmin, V. Naumov "Comparison of NOvA ND Data and simulation with running MA model", DocDB 52590, 03 Nov 2021
13. A. Chukanov "Beam monitoring in SAND for STT configuration", DUNE Collaboration meeting, 19.05.2021
14. A. Chukanov "Beam monitoring with SAND", DUNE collaboration meeting, 22.09.2021

2022:

1. A. Antoshkin "Cherenkov measurements. Angular systematic studying" NOvA Collaboration meeting. Parallel working group "Detector Systematics". October 13, 2022, DocDB-56651.
2. A. Antoshkin, "Slow monopole reconstruction". Working group "Exotics: monopole", 22 March 2022, DocDB-54195.
3. A. Antoshkin, "Slow monopole freight train validation", NOvA Collaboration meeting, Parallel working group "Exotics", 28 June 2022, DocDB-55540.
4. A. Kalitkina, "New Energy Estimators retraining". NOvA Collaboration meeting. Parallel working group "3Flavor + Reco". October 14, 2022, DocDB-56696.
5. O. Samoylov (for the Exotics convenors), "Status of Exotics" October 2022, Plenary talk at the NOvA collaboration virtual meeting, 11-14 October 2022, DocDB-56735.
6. A. Ivanova "Task with atmospheric neutrinos: expected result and work plan", 7 Dec 2022, docdb 57252
7. L.Kolupaeva "T2K-like Fake Data Study", NOvA Collaboration WG , 9 Feb 2022,

8. L. Kolupaeva "Three-flavor infrastructure improvements", NOvA Collaboration WG, 14 Oct 2022
9. A.S. Selunin, «Light readout», Internal DUNE Collab report, 24-28 January 2022
10. A.S. Selunin, «Light readout», Internal DUNE Collab report, DUNE Collaboration meeting, Fermilab, USA, 16-20 May 2022
11. N. Anfimov «Light module and readout: status and logistics», Internal DUNE Collab report, DUNE Collaboration meeting, Manchester University, UK, 12-16 Sept 2022
12. A. Chukanov "Beam monitoring with new geometry - status update", DUNE collaboration meeting, 25.01.2022
13. A. Chukanov "Beam monitoring with GRAIN detector", SAND GRAIN review, 23.02.2022
14. Anna Stepanova «Wrong Sign Flux Studies» , Internal DUNE Collab report at DUNE-PRISM working group, 9.06.2022
15. Anna Stepanova «Wrong-Sign Flux Matching», Internal DUNE Collab report at DUNE-PRISM working group, 3.11.2022

2023:

1. L. Kolupaeva "Minerva 1 pi fits & bias metric", NOvA Collaboration WG, 2 Mar 2023
2. A.S. Selunin «Light readout progress», Internal DUNE Collab report, DUNE Collaboration meeting, CERN, Switzerland, 23-27 January 2023
3. V. Kozhukalov "Light readout DAQ walk through", Internal DUNE Collab report, DUNE Collaboration meeting, CERN, Switzerland, 23-27 January 2023
4. Anna Stepanova «Wrong Sign Background Update», Internal DUNE Collab report at DUNE-PRISM working group, 12.01.23

2.2.7. Патентная деятельность (при наличии)

2.3. Статус и стадия (TDR, CDR, ongoing project) реализации проекта

(включая процент реализации заявленных этапов по проекту *(если применимо)*)

действующий эксперимент - NOvA

CDR - DUNE

PDR - ND-LAr DUNE.

2.4. Результаты сопутствующей деятельности

2.4.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.

Образовательная деятельность:

1. Н.В. Anfimov – доцент Университета «Дубна» (2021 г. – настоящее время) с полугодовыми курсами «Ядерная электроника» и «Физическая электроника».
2. А.Г. Ольшевский – профессор МГУ (2003 г. – по настоящее время) с полугодовым курсом «Современные исследования в физике элементарных частиц».

Защищенные кандидатские диссертации:

1. Н.В. Anfimov «Разработка и применение методов исследования фотоприемников», защита 04.03.2021 в ОИЯИ
2. Л.Д. Колупаева «Анализ данных эксперимента NOvA с целью измерения параметров осцилляций нейтрино», защита 06.04.2021 в МГУ
3. А.С. Шешуков «Анализ нейтринных взаимодействий для поиска сигналов сверхновых», запланирована защита в 2023 г. в ОИЯИ

Защищенные дипломы:

1. А. Победимов «Оценка возможности регистрации солнечных и атмосферных нейтринных событий в эксперименте NOvA», МГУ, 2020, бакалавриат
2. В. Корсунов «Анализ чувствительности эксперимента NOvA к поиску стерильных нейтрино», МГУ, 2020, бакалавриат
3. М. Петропавлова «Моделирование нейтринного сигнала от взрыва сверхновой в эксперименте NOvA», МГУ, 2020, магистр
4. А. Калиткина «Развитие средств анализа данных по осцилляциям нейтрино и их применение в эксперимента NOvA», МГУ, 2020, магистр
5. А. Степанова «Подземный ускорительный нейтринный эксперимент DUNE - расчет чувствительности к измерению параметров осцилляций», МГУ, 2021, бакалавриат
6. Ю. Иванеев «Исследование вклада черенковского света в нелинейность отклика жидкого сцинтиллятора», МГУ, 2022, кандидатская диссертация
7. А. Победимов «Изучение возможности регистрации событий атмосферных нейтрино в эксперименте NOvA», МГУ, 2022, кандидатская диссертация
8. А. Степанова "Расчет точности определения параметров осцилляций нейтрино в ускорительных нейтринных экспериментах с длинной базой", МГУ, 2023, магистр

2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.

1. Н. Балашов - гранты ОМУС в 2020, 2021, 2023 годах
2. Д. Федосеев - гранты ОМУС в 2021, 2022 гг.
3. А. Четвериков - грант ОМУС в 2023 году
4. В. Шаров - грант ОМУС в 2022 году
5. А. Степанова - грант ОМУС в 2022 году
6. Л. Колупаева - грант ОМУС в 2020 г., стипендия имени Бруно Понтекорво (ЛЯП) в 2021 г.

2.4.3. Награды и премии.

1. А. Степанова : лучший доклад в секции на Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022», 11.04.2022 - 22.04.2022, г. Москва
2. А. Степанова: лучший доклад на Форуме молодых ученых Московская международная школа физики 2022, 24.07.2022 - 02.08.2022, г. Дубна, Московская область
3. Л. Колупаева: Премия Губернатора Московской области для молодых ученых и специалистов в области науки, техники, техники и инноваций (2022 г.)
4. Первая премия ОИЯИ за 2021 г. в номинации «Научно-исследовательские экспериментальные работы»: «Исследования нейтрино в эксперименте OPERA» - С.Васина, Ю.Горнушкин, С.Дмитриевский и др.

2.4.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризационная деятельность).

Экспертная деятельность:

А.Ольшевский является редактором раздела в PEPAN Letters и экспертом комитетов по присуждению грантов.

Н. Анфимов – рецензент в

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A - 4 статьи,
- Instruments, MDPI - 1 статьи,
- PEPAN Letters - 4 статьи

А. Селюнин – рецензент в

- PEPAN Letters - 2 статьи

Научно-организационная деятельность:

1. О. Самойлов - со-руководитель группы экзотики в NOvA (2020 - по настоящее время);
2. Н. Анфимов - ответственный за систему сбора света в жидкоаргоновом детекторе NDLAG DUNE (L3 manager) (2020 - по настоящее время);
3. Л. Колупаева - со-руководитель группы продакшена NOvA (с 2023 г. по настоящее время), руководитель рабочей группы по code review фреймворка трехфлейворного анализа данных NOvA (с 2021 г. по настоящее время), член исполнительного комитета коллаборации NOvA (с 2023 г. по настоящее время);
4. А. Антошкин - менеджер ROC-Dubna (с 2017 г. по настоящее время);

Научно-популяризационная деятельность:

1. Регулярные экскурсии на установки Зеленой лаборатории - А. Селюнин, А. Антошкин, В. Шаров, Н. Анфимов
2. Фестиваль науки и технологий «Техносреда на ВДНХ» (2021), стенд ОИЯИ - В. Шаров
3. Всероссийский фестиваль науки «Наука 0+», лектор Курчатовской школы (2022 г.) - В. Шаров
4. Лекторий УНЦ ОИЯИ, периодические лекции для студентов и школьников - В. Шаров, Н. Анфимов, Л. Колупаева
5. Марафон «ОИЯИ в гостях у школ Дубны» (2021-2022 гг.) - В. Шаров, Н. Анфимов
6. Лекция «Физика элементарных частиц для детей» (2022 г.) - Н. Анфимов
7. Лекция для студентов МГУ (2022 г.) - Л. Колупаева
8. Лекция в институте Винча, Сербия (2022) – Н. Анфимов
9. Цикл лекций "Нейтринные эксперименты" Байкальская школа по физике элементарных частиц и астрофизике (2022 г.) - А. Шешуков

3. Международное научно-техническое сотрудничество.

Фактически участвующие страны, институты и организации

В коллаборации NOvA участвует около 40 организаций, а в DUNE — около 200. Мы заполнили таблицу реальными партнерами деятельности группы из ОИЯИ.

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
FNAL	USA	Batavia, IL	Alex Himmel + 3 Jennifer Raaf + 4	JINR-FNAL agreement extension
University of Bern	Switzerland	Bern	Michele Weber + 2	Consortium agreement
LBNL	USA	Berkeley, CA	Daniel Dwyer + 1	DUNE Collaboration
SLAC	USA	Stanford, CA	Hirohisa Tanaka + 1	DUNE Collaboration
University of California, Irvine	USA	Irvine, CA	Juan Pedro Ochoa Ricoux Jianming Bian	DUNE Collaboration NOvA

				Collaboration
University of Minnesota	USA	Minneapolis, MN	Matt Strait	NOvA Collaboration
University of Minnesota Duluth	USA	Duluth, MN	Alec Habig	NOvA Collaboration
University of South Alabama	USA	Mobile, AL	Martin Frank	NOvA Collaboration
University of South Carolina	USA	Columbia, SC	Roberto Petti + 2	DUNE Collaboration
The Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences	Russia	Moscow	Anatoly Butkevich + 1	DUNE Collaboration
University of Florida	USA	Gainesville	Mayly Sanchez + 2	NOvA Collaboration
Caltech	USA	Pasadena	Ryan Patterson, Zoya Vallary + 2	NOvA Collaboration
The College of William & Mary	USA	Williamsburg	Patricia Vahle, Erika Catano-Mur	NOvA Collaboration
Stony Brook University	USA	Stony Brook, NY	Michael Wilking	DUNE Collaboration

4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных

4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета)

Здесь мы приводим два числа: запрос в проекте 2020 против фактического количества на данный момент.

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	11.9 / 13.1	—
2.	инженеры	4.3 / 4.0	—
3.	студенты	5.0 / 7.0	5.0 / 7.0
	Итого:	21.2 / 24.1	5.0/7.0

4.2. Фактическая сметная стоимость проекта

Финансовая информация проекта учтена в ОИЯИ на уровне темы: «Исследование нейтринных осцилляций (02-2-1099-2010/2023)» и будет представлена в соответствующем отчете по теме.

4.3. Другие ресурсы

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты	0.5 Пб (Облака)	0.7 Пб (Облака)	1 Пб (Облака)		
Tier 1 (ядро-час)	0	0	0		
Tier 2 (ядро-час)	0	0	0		
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU	0	0	0		
Облака (CPU ядер)	1000	1000	1000		

5. Заключение

За последние три года группа ОИЯИ внесла заметный вклад в эксперимент NOvA как физическими, так и методическими исследованиями. В это же время группа ОИЯИ укрепила свое участие в эксперименте DUNE весьма заметным вкладом в создание детекторов. Пройдено несколько очень важных вех в этих двух экспериментах, и впереди ожидается еще больше интересных физических результатов.

6. Предлагаемые рецензенты

Каржавин Владимир Юрьевич (ЛФВЭ, ОИЯИ)

Руководитель темы

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Руководитель проекта (шифр проекта)

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Экономист Лаборатории

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.