

УТВЕРЖДАЮ

Вице-директор Института

_____/_____/_____
“ ____ “ _____ 202_ г.

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

1. Общие сведения о теме

1.1. Шифр темы (для продлеваемых тем)

02-2-1099-2010/2023

1.2. Лаборатория

ЛЯП (ЛФВЭ, ЛИТ, ЛТФ)

1.3. Научное направление

Элементарные частицы и релятивистская ядерная физика

1.4. Наименование темы

Изучение нейтринных осцилляций

1.5. Руководители темы

Д.В. Наумов, А.Г. Ольшевский

1.6. Заместитель(и) руководителя темы

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Физика нейтрино в настоящее время рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений для открытия явлений, выходящих за рамки Стандартной модели. Главным образом это связано с особой ролью, которую нейтрино может играть как уникальный нейтральный фермион с очень маленькой, но ненулевой массой - факт, который недавно был доказан экспериментальным открытием нейтринных осцилляций.

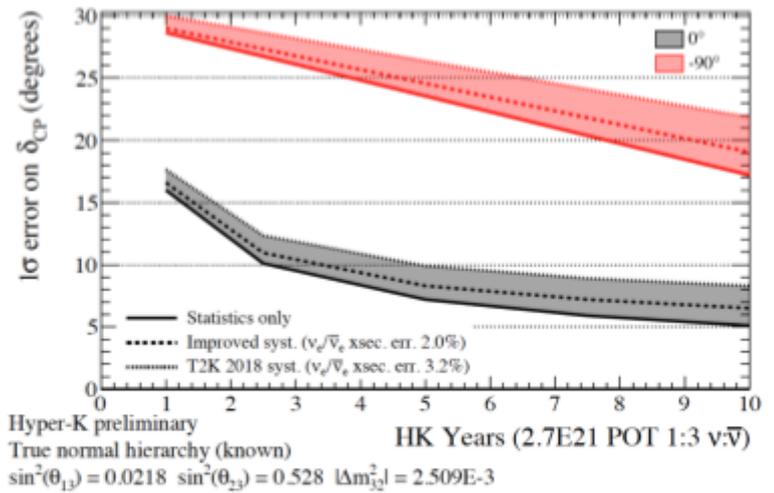
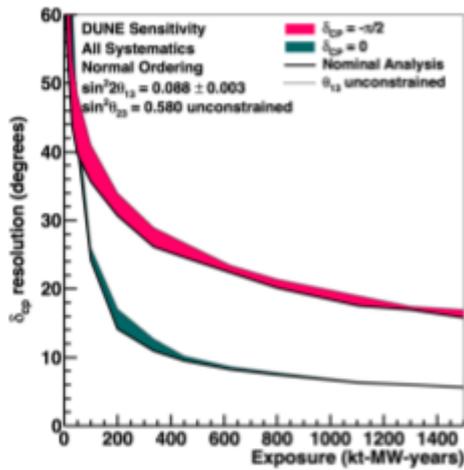
ОИЯИ имеет очень давнюю традицию разработки и изучения этого явления. В частности, Институт внес очень ценный вклад в эксперименты по нейтринным осцилляциям, такие как: NOMAD, OPERA, Borexino, Daya Bay и др. Настоящее предложение о продлении темы “Изучение нейтринных осцилляций” включает расширение участия ОИЯИ в проектах JUNO и NOvA/DUNE - первоклассных мега-сайенс проектах, которые продолжают этот замечательный список по исследованиям осцилляций. Кроме того, в рамках темы мы занимаемся несколькими менее масштабными активностями.

2.2. Проекты в теме

1. JUNO
2. NOvA/DUNE

Будущая чувствительность к порядку масс нейтрино реакторных, ускорительных и атмосферных экспериментов по осцилляциям нейтрино.

Единственные эксперименты по осцилляциям, в которых в настоящее время измеряется δ_{CP} в дополнение к порядку нейтринных масс, являются NOvA, Super-Kamiokande и T2K, но точность этих измерений пока довольно низкая. Несмотря на то, что T2K, Super-Kamiokande и NOvA проработают еще несколько лет, из текущих оценок ясно, что они не смогут завершить измерение порядка нейтринных масс и фазы CP-четности. Эта задача поставлена перед двумя будущими ускорительными экспериментами с длинной базой: DUNE в Fermilab и HyperK в J-PARC. Оба эксперимента будут иметь схожее разрешение на определение параметра δ_{CP} , но будут значительно дополнять друг друга с точки зрения систематических неопределенностей из-за различных баз и используемых детекторов.



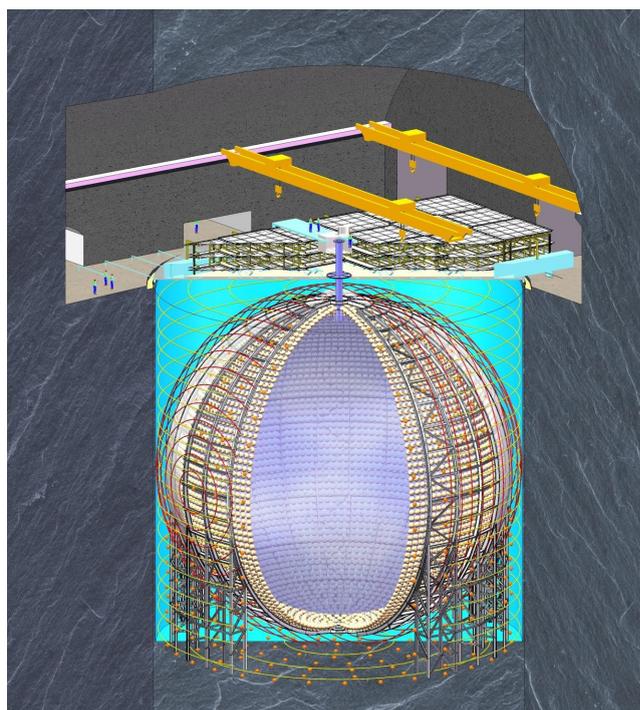
Ожидаемая чувствительность экспериментов DUNE (слева) и Hyper-Kamiokande (справа) к разрешению на измерение фазы CP нарушения в случаях ее равенства 0 и $3\pi/2$.

В рамках темы группа ОИЯИ использует оба вышеупомянутых подхода, участвуя в исследованиях осцилляций в реакторных и ускорительных экспериментах с длинной базой.

Проект JUNO

Помимо основной задачи определения порядка нейтринных масс, эксперимент JUNO планирует измерение Δm^2_{32} , Δm^2_{21} , θ_{12} с точностью меньше 1%; поиск распада протона; поиск сверхновых нейтрино; детектирование гео-, атмосферных и солнечных нейтрино; поиск физики за пределами Стандартной модели и др.

Центральный детектор JUNO (CD) представляет собой сферический акриловый резервуар диаметром 35 м, заполненный 20 тыс. тонн жидкого сцинтиллятора (LS). Сцинтилляционный свет регистрируется примерно 18'000 20-дюймовых PMT (LPMT) и примерно 26'000 3-дюймовых PMT (sPMT), обеспечивающими покрытие поверхности примерно на 78%. CD расположен в 52,5 км от АЭС Янцзян и Тайшань общей мощностью 26,6 ГВт.



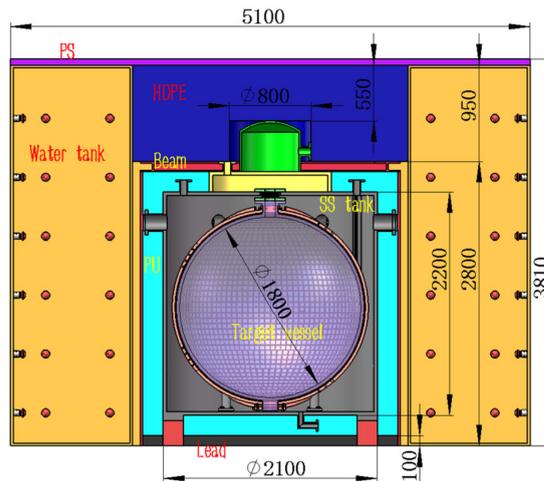
Центральный детектор JUNO и его Top Tracker. Диаметр акриловой сферы CD составляет около 35 метров. CD окружен набором катушек Гельмгольца для компенсации магнитного поля Земли.

За шесть лет набора данных JUNO накопит около 100 тыс. событий обратного бета-распада (IBD), определяющих поток и энергетический спектр антинейтрино с точностью более 3% при видимой в LS энергии 1 МэВ. Точное измерение энергетического спектра IBD позволяет определить порядок масс нейтрино.

Чувствительность JUNO не ухудшается из-за неизвестных значений фазы CP-нарушения и $\sin 2\theta_{23}$. Основной проблемой этого метода является энергетическое разрешение, которое не должно быть хуже 3% при 1 МэВ.

Другой проблемой является возможная тонкая структура в реакторно энергетическом спектре. Если она присутствует, то потенциально может повлиять на определение порядка масс и/или ухудшить чувствительность эксперимента. Чтобы устранить зависимость от спектра антинейтрино, будет установлен дополнительный (ближний) детектор ТАО, который будет измерять энергетический спектр реакторных антинейтрино на очень коротком расстоянии от активной зоны реактора с точностью даже лучше, чем у JUNO CD.

Детектор ТАО представляет собой сферу диаметром 1,8 метра, заполненную 2,8 тоннами жидкого сцинтиллятора LAB, легированного гадолинием, аналогичного CD, чтобы иметь аналогичные систематические погрешности. Чтобы достичь разрешения, лучшего, чем в Центральном детекторе, ТАО будет использовать кремниевые фотоумножители (SiPM) с более высокой эффективностью регистрации фотонов PDE по сравнению с традиционными вакуумными фотоумножителями (PMT). Одним из неприятных параметров использования SiPM является огромная скорость темнового счета (DCR) при комнатной температуре, что может повлиять на энергетическое разрешение и свести на нет все преимущества высокого PDE. Чтобы подавить DCR на три порядка, установка будет работать при низкой температуре -50°C .



Схематический вид детектора ТАО.

Группа ОИЯИ внесла значительный вклад в создание и подготовку анализа детекторов JUNO и ТАО. Эта работа будет продолжена на протяжении всех лет реализации проекта:

- Группа из ОИЯИ является одной из ключевых групп в JUNO, осуществляющих статистический анализ данных и оценку чувствительности. Было разработано специальное программное обеспечение GNA (Global Neutrino Analysis) (C++), чтобы обеспечить общую базу для анализа осцилляций реакторных антинейтринных данных в экспериментах Day Bay и JUNO. GNA было дополнительно расширено для поддержки экспериментов с ускорительными нейтрино и атмосферными нейтрино. В частности, оно использовалось в качестве инструмента параллельного анализа при окончательном анализе данных эксперимента Daya Bay и оценки чувствительности эксперимента JUNO с дополнительным детектором ТАО.
- Мы разрабатываем программное обеспечение для реконструкции мюонных треков с помощью сферических функций. В этом случае мы можем описать сигнал трека мюона, прошедшего через детектор, ограниченным числом параметров, которое намного меньше числа PMT, и таким образом мы можем ускорить нашу процедуру реконструкции.
- ОИЯИ является одним из узлов распределенной вычислительной инфраструктуры JUNO (DCI от англ. Distributed Computing Infrastructure), которая предназначена для хранения, обработки и анализа огромных объемов данных JUNO. Ожидается, что наряду с двумя другими европейскими центрами обработки данных ОИЯИ будет играть важную роль в JUNO DCI: центр хранения исходных данных, региональный центр обработки данных и моделирования.
- Одним из основных вкладов ОИЯИ в создание эксперимента JUNO является разработка и производство высоковольтной электроники для всех PMT JUNO: ~18'000 LPMT и ~26'000 sPMT в CD и ~2000 LPMT в черенковском вете. Поскольку HVU является частью электроники, расположенной под водой вблизи PMT, особое внимание было уделено надежности конструкции, компонентов и производственных процессов. Это включает в себя создание прототипов, выбор компонентов, разработку протоколов заводских испытаний и испытания на старение, ускоренное температурой. Кроме того, материалы, используемые в HVU, были протестированы на радиоактивность. Полное производство было завершено к концу 2021 года (25'000 штук), и в настоящее время высоковольтные блоки устанавливаются в детектор JUNO вместе с остальной подводной электроникой.
- Top Tracker (TT) детектора JUNO был построен с использованием модулей, ранее произведенных ОИЯИ для эксперимента OPERA. В дополнение к предоставлению этих

модулей, группа ОИЯИ отвечает за проектирование, изготовление и конструкцию механической опоры детектора ТТ; мониторинг работоспособности модулей ТТ в период их хранения; принимает участие в разработке программного обеспечения системы сбора данных и автономной разработки программного обеспечения для проведения анализа данных ТТ.

- Центральный детектор JUNO вместе с Вето-детектором содержат около 20'000 больших 20-дюймовых ФЭУ. Все PMT прошли тестирование в складском хранилище, где были расположены 4 контейнерных тестовых системы и 2 системы сканирования. Сканирующие системы были разработаны в ОИЯИ и использовались для получения подробной информации о производительности PMT. Все 20'000 PMT были протестированы в контейнерах, и около 4000 PMT прошли квалификацию сканирующей системой ОИЯИ за почти три года проведения испытаний в 2020-2022 годах. Теперь PMT установлены в детекторе и подключены к электронике.
- Одной из основных задач ОИЯИ в детекторе ТАО является разработка и обеспечение питанием $\sim 4'100$ тайлов (матриц) SiPM. Эта система будет содержать экранированные кабели 3М с 68 жилами, которые необходимо произвести специально. Всего нам нужно 900 метров на внешнюю часть и 300 метров на распределение внутри криостата. План производства и закупок включает также 40 VME модулей питания, 1200 метров кабеля, 3 крейта VME и десяток переходных плат. Мы планируем построить систему в течение 2023-2024 годов и ввести ее в эксплуатацию в 2024 году.
- Одним из важнейших аспектов проектирования ТАО является правильная работа SiPM фотодетекторов. ОИЯИ принимал участие в разработке критериев принятия SiPM. В общей сложности нам предстоит протестировать около 4'100 тайлов SiPM и их производительность при температуре минус 50 °С. Была разработана специальная методика, которая позволяет охарактеризовать SiPM с точки зрения PDE, усиления, перекрестных помех, остаточных импульсов, SPE и IV-кривой. Установка сейчас введена в эксплуатацию и будет использоваться для испытаний, которые мы планируем завершить к концу 2024 года.

В ходе продления проекта в 2024-2026 годах мы ожидаем получения следующих результатов:

1. Реконструкция (2024):
 - a. Реконструкция треков мюонов и электромагнитных ливней с учётом моделирования электроники.
 - b. Реконструкция мюонов с короткими треками в центральном детекторе.
 - c. Определение эффективности и качества восстановленных мюонных треков.
 - d. Адаптация процедуры реконструкции мюонных треков к реальным данным.
2. Установка и запуск ТТ вето
3. PMTs:
 - a. Заключительное тестирование PMT с HVU.
 - b. Установка PMT на центральный детектор JUNO.
4. Наполнение и запуск JUNO в 2024.
5. ТАО:
 - a. Все SiPM для ТАО протестированы и установлены в детекторе.
 - b. Производство и ввод в эксплуатацию системы питания ТАО SiPM.
 - c. Наполнение и запуск ТАО.
6. Осцилляционный анализ:
 - a. Первое измерение параметров осцилляций нейтрино Δm^2_{31} , Δm^2_{21} и $\sin^2 2\theta_{12}$ в эксперименте JUNO.
 - b. Первые ограничения на параметры колебаний стерильных нейтрино $\sin^2 2\theta_{14}$ и δm^2_{41} основаны на данных детектора ТАО.

Ожидается, что эксперимент JUNO станет огромным шагом вперед по масштабу и точности как среди реакторных нейтринных экспериментов, так и экспериментов с жидкостными сцинтилляторами. Детектор JUNO будет в 20 раз больше, чем самый большой в настоящее время реакторный детектор антинейтрино KamLAND. Требования к эксперименту включают максимальное покрытие ФЭУ и 3%-ное энергетическое разрешение при 1 МэВ выделенной энергии. Такой уникальный детектор сопряжен с рядом технических проблем, но потенциальные риски сводятся к минимуму благодаря тщательному тестированию подсистем и высоким требованиям к надежности компонентов детектора и электроники.

Проект NOvA/DUNE

Основная цель проекта NOvA/DUNE состоит в измерении еще неизвестных параметров нейтринных осцилляций, а именно порядка масс нейтрино и фазы CP-нарушения. 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 FD¹, которые позволят достичь более широкого спектра научных задач при сохранении потенциала в исследованиях осцилляций. В случае их принятия DUNE также сможет вести поиск безнейтринного двойного бета-распада и распада протона.

Научные причины для проведения исследований нейтринных осцилляций многочисленны. Одной из причин является значительная роль, которую порядок масс играет в моделировании потоков нейтрино при взрывах сверхновых². Кроме того, этот параметр имеет решающее значение для оценки перспектив целого класса экспериментов в нейтринной физике, направленных на поиск безнейтринного двойного бета-распада³, и является входным параметром для экспериментов по прямому измерению масс нейтрино⁴ и поиску реликтовых нейтрино⁵. 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 Вселенной⁶.

И NOvA, и DUNE представляют собой ускорительные нейтринные эксперименты с длинной базой. NOvA - это продолжающаяся программа в этой области, один из двух проводящихся в настоящее время экспериментов с нейтринными осцилляциями на самых мощных ускорителях.

В случае NOvA ускорительный комплекс NuMI в Фермилаб используется для получения протонов с энергией 120 ГэВ, которые сталкиваются с углеродной мишенью. 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.

Ускорительный комплекс в Фермилабе постоянно модернизируется, чтобы производить больше нейтрино. В настоящее время эксперимент работает при мощности протонного пучка 850 кВт, и самый последний анализ NOvA относится к $13,6 \times 10^{20}$ POT (пучок нейтрино) и $12,5 \times 10^{20}$ POT (пучок антинейтрино). Ожидается, что NOvA примерно удвоит эту экспозицию к концу сбора данных, планируемого к концу 2026 года.

¹ Askins M et al. (Theia Collab) Eur. Phys. J. C 80 5 416 (2020)

² Scholberg K J. Phys. G 45 1 014002 (2018)

³ Dolinski M J et al. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 69 219 (2019)

⁴ Qian X et al. Prog.Part.Nucl.Phys. 83 1 (2015)

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

⁶ Pascoli S et al. Phys. Rev. D 75 083511 (2007), Branco G et al. Phys. Lett. B 645 432 (2007)

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).

Группа ОИЯИ участвует в эксперименте NOvA в течение многих лет с широким спектром задач, включая исследования детекторов и физические анализы. В частности, команда внесла значительный вклад в основной анализ трехмерных колебаний, разработку методов обнаружения сверхновых, поиск магнитных монополей, исследования космических лучей и т.д. Например, в группе трехфлейворного осцилляционного анализа в NOvA сотрудники ОИЯИ в настоящее время работают над оценкой энергии нейтрино, подгонкой данных и расчетом чувствительности для выпуска анализа в 2024 году.

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 ~ 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 на этапе 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 детекторов⁷ 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 в 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

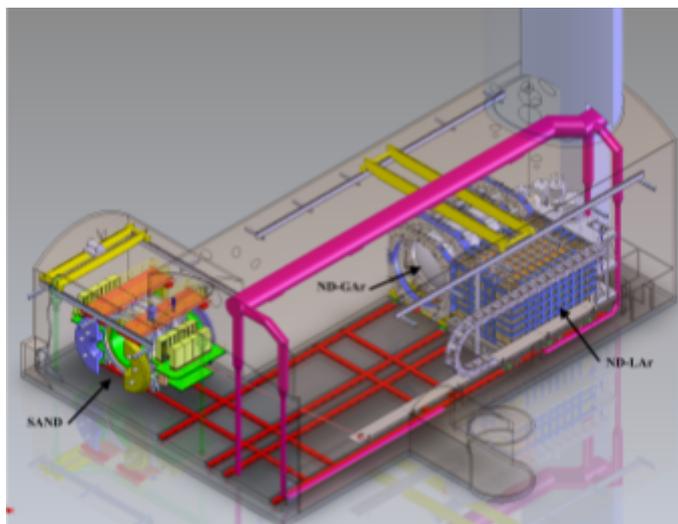
⁷ Abed Abud A et al. (DUNE Collab) Instruments 5 4 31 (2021)

составлении взвешенной суммы всех этих спектров, чтобы подавить зависимость от систематических неопределенностей, связанных с потоками и взаимодействиями нейтрино.

Группа ОИЯИ присоединилась к эксперименту DUNE в 2020 году и принимает участие в создании ближних детекторов этого эксперимента и подготовке к анализу. В частности, опыт, полученный в NOvA, распространяется на анализ физики осцилляций нейтрино и поиск экзотических объектов. Кроме того, сотрудники ОИЯИ также работают над подготовкой программы физических измерений SAND и разработкой предсказаний DUNE-PRISM для осцилляционного анализа в дальнем детекторе.

Что касается конструкции детектора DUNE, то ОИЯИ активно участвует в проекте NDLAG, отвечая за проектирование, производство и эксплуатацию системы считывания света в жидкоаргоновом TPC детектора DUNE Near Detector (ND-LAr).

Другим предлагаемым вкладом ОИЯИ является строу-трекер DUNE ND. Этот вариант с самого начала был основан на опыте группы ОИЯИ (ЛФВЭ), накопленном в ходе предыдущего производства строу-трубок. Ожидается, что ОИЯИ расширит этот опыт и сохранит лидирующие научные позиции в проекте строу. Группа ОИЯИ уже провела некоторые НИОКР, и в ближайшие годы планируется провести обширное исследование конструкции и тестирование прототипа, а также специальные НИОКР, посвященные технологии производства строу трекеров.



DUNE Near Detector complex at Fermilab. NDLAG and NDGAR are placed on movable platform to perform measurements of neutrino flux at different positions from beam axis.

Ожидается, что в ходе расширения проекта NOvA/DUNE при значительном вкладе группы ОИЯИ будут получены 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 сцинтиллятора, а именно вклад черенковского света;
- ❖ ROC-Dubna и эксплуатация вычислительного комплекса.

Эксперимент DUNE:

- ❖ Разработка системы считывания света для NDLAG;
- ❖ 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.

Более подробная информация о проектах JUNO и NOvA/DUNE приведена в соответствующих формах продления проекта, которые предоставляются одновременно с запросом на продление темы.

В дополнение к этим двум проектам в рамках темы будет продолжено несколько активностей меньшего масштаба:

- Чтобы обеспечить возможность дальнейшей работы с даннымиorexino в ОИЯИ, их полная копия, а также необходимое программное обеспечение были размещены на серверах Института. Далее мы продолжим анализировать данные этого эксперимента, в ходе которого уже было выполнено несколько уникальных измерений спектров солнечных нейтрино и других.
- Продолжаются работы по созданию детектора DarkSide-20k. В то же время завершается анализ данных DarkSide-50.
- Эксперимент NA65/FASTER(v) успешно начал сбор данных. Группа ОИЯИ продолжит работу по анализу данных и разработке компонентов детектора, в частности, системы термической стабилизации детектора.

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛЯП, ЛФВЭ, ЛТФ, ЛИТ

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

| Организация | Страна | Город | Участники | Тип соглашения |
|-------------|--------|-----------|---------------------------------------|----------------|
| IHEP | China | Beijing | Yifang Wang + 10 | JUNO MoU |
| SYSU | China | Guangzhou | Wei Wang + 10 | JUNO MoU |
| SINP MSU | Russia | Moscow | Alexander Chepurinov, Maxim Gromov | JUNO MoU |
| INFN | Italy | Catania, | Giuseppe Adronico +1 | JUNO MoU |

| | | | | |
|---------|---------|----------|-----------------------|----------|
| | | Rome | Stefano Maria Mari +1 | JUNO MoU |
| FZJ-IKP | Germany | Jülich | Livia Ludhova +4 | JUNO MoU |
| EKUT | Germany | Tübingen | Tobias Lachenmaier +1 | JUNO MoU |

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|
| FNAL | USA | Batavia, IL | Alex Himmel + 3 Jennifer Raaf + 4 | JINR-FNAL agreement extension |
| University of Bern | Switzerland | Bern | Michele Weber + 2 | Consortium agreement |
| CERN | Switzerland | | Francesco Lanni, Filippo Resnati | Neutrino Platform 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 |
| INFN | Italy | Pisa | Stefano di Falco + 1 | DUNE Collaboration |
| INFN | Italy | Bologna | Gabriele Sirri | DUNE Collaboration |
| INFN | Italy | Padova | Matteo Tenti | DUNE Collaboration |
| Institute of Nuclear Physics | Kazakhstan | Almaty | Sayabek Sakhiyev + 6 | DUNE Collaboration |
| The Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences | Russia | Moscow | Anatoly Butkevich + 1 | DUNE Collaboration |

| | | | | |
|---------------------------------|-----|-----------------|----------------------------------|--------------------|
| Queen Mary of London University | UK | London | Alexander Booth | NOvA 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 |
| University of Mississippi | USA | Oxford | Gavin Davis, Jeffrey Kleykamp | NOvA Collaboration |

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

- Институт физики высоких энергий, Пекин, Китай
- Национальная ускорительная лаборатория Ферми (FNAL), США
- Бернский университет (UniBe), Берн, Швейцария
- Университет Южной Каролины, Колумбия, США
- CERN

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 | 24 | - |
| 2. | инженеры | 14 | - |
| 3. | студенты | - | 11 |
| | Итого: | 38 | 11 |

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ (общее количество участников)

| № № п/п | Категория работников | Подразделение | Должность | Сумма FTE |
|---------------|-------------------------|---------------|-----------|-----------|
| 1. | научные работники | | | 30 |
| 2. | инженеры | | | 10 |
| 3. | студенты | | | 13 |
| | Итого: | | | 53 |

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ (уже учтен в Таблице 3.2.1)

| № № п/п | Категория работников | Организация-партнер | Сумма FTE |
|---------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | Студенты | МГУ, Иркутский государственный университет, МФТИ, Алматинский государственный университет, Дубненский государственный университет | 13 |
| | Итого: | | 13 |

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость темы /КИП

| №№ п/п | Наименование работ | Стоимость | Расходы в год (тыс. долл. США) | | |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------|---------------|
| | | | 1-й год | 2-й год | 3-й год... |
| 1. | Международное сотрудничество (МНТС) | 1290 | 430 | 430 | 430 |
| 2. | Материалы | 630 | 230 | 210 | 190 |
| 3. | Оборудование и услуги сторонних организаций | 290 | 110 | 90 | 90 |
| 4. | Пуско-наладочные работы | 30 | 10 | 10 | 10 |
| 5. | Услуги научно-исследовательских организаций | 130 | 40 | 50 | 40 |
| 6. | Приобретение программного обеспечения | 120 | 40 | 40 | 40 |
| 7. | Проектирование/строительство | 15 | 5 | 5 | 5 |
| 8. | Сервисные расходы (<i>планируются в случае прямой принадлежности к проекту</i>) | 15 | 5 | 5 | 5 |
| ВСЕГО: | | 2520 | 870 | 840 | 810 |

4.2. Внебюджетные источники финансирования

В рамках темы предполагается финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков

в следующем объеме (указать суммарно по проектам).

СОГЛАСОВАНО:

Главный ученый секретарь Института

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Руководитель ДБиЭП

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Руководитель ДНОД

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Руководитель ДКиД

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Директор лаборатории

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Ученый секретарь лаборатории

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Экономист лаборатории

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Руководитель темы

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

**Руководитель проекта (шифр проекта) /
(шифр подпроекта КИП)**

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

**Руководитель проекта (шифр проекта) /
(шифр подпроекта КИП)**

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории

_____/_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

**ОТЧЕТ ПО ТЕМЕ
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

1. Общие сведения о теме / КИП

1.1. Шифр темы / КИП

02-2-1099-2010/2023

1.2. Лаборатория

ЛЯП (ЛФВЭ, ЛИТ)

1.3. Научное направление

Элементарные частицы и релятивистская ядерная физика

1.4. Наименование темы / КИП

Исследование нейтринных осцилляций

1.5. Руководитель темы / КИП

Д.В. Наумов, А.Г. Ольшевский

1.6. Проекты в теме / подпроекты КИП

JUNO, NOvA/DUNE

2. Научный отчет об исполнении темы / КИП

2.1. Аннотация

На ранее утвержденный период исследования темы включали два крупных проекта: JUNO и NOvA/DUNE, основной целью которых является изучение параметров нейтринных осцилляций различными методами на ядерных реакторах и ускорителях соответственно. Описание работы и полученные результаты представлены ниже.

В дополнение к этим проектам за этот период времени было также проведено несколько активностей меньшего масштаба, а именно: Daya Bay, Borexino, DarkSide и NA65/FASER(ν). Полученные ими результаты также представлены ниже.

2.2. Развернутый научный отчет

2.2.1. Описание выполненных работ и полученных результатов по всем проектам и активностям темы.

Проект JUNO

Сборка детектора

В 2022 г. в Китае начата сборка крупнейшего детектора с жидким сцинтиллятором JUNO. Для детектора в ОИЯИ была разработана система высоковольтного питания ФЭУ. Все модули системы (>25 000) изготовлены, протестированы и готовы к установке. Команда ОИЯИ также

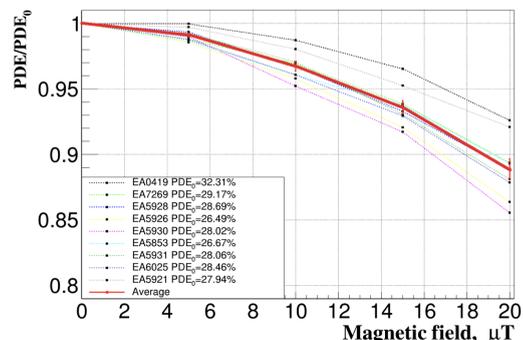
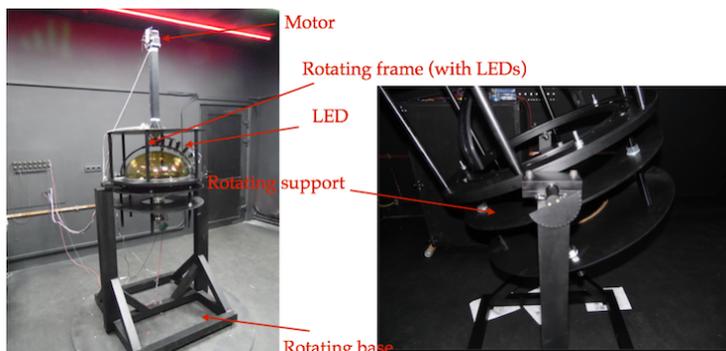
провела НИОКР по источнику питания для кремниевых фотоумножителей (SiPM) детектора ТАО. Модули питания были спроектированы и подготовлены к производству в Китае. Также был разработан проект станции для массового тестирования SiPM.

Массовое тестирование ФЭУ

Центральный детектор JUNO вместе с Вето содержат около 20000 больших 20-дюймовых ФЭУ. Все ФЭУ прошли испытания на складе, где размещены 4 контейнера тестирования и 2 системы сканирования.

Контейнер представляет собой инструмент, в котором тестируют ФЭУ с помощью равномерной импульсной засветки от светодиода или пикосекундного лазера. Прибор был разработан немецкими сотрудниками и представляет собой стандартный 20-футовый светонепроницаемый контейнер с магнитным экраном, в котором можно одновременно тестировать 36 ФЭУ. Он извлекает, так называемые, интегральные измерения характеристик ФЭУ, таких как PDE, коэффициент усиления, TTS, SPE и уровень темнового шума при рабочем напряжении. Один из контейнеров, работа с которым ведётся группой ОИЯИ, оборудован для проведения испытаний на долговременную стабильность ФЭУ, где 36 ФЭУ различных типов подвергались ускоренному старению, чтобы оценить и гарантировать их работоспособность в течение всего 20-летнего периода эксплуатации JUNO.

Система сканирования представляет собой гораздо более сложный инструмент, разработанный в ОИЯИ, позволяющая извлекать те же параметры по измерениям на 168-и точках на поверхности ФЭУ. Сканирование дает лучшее представление о производительности РМТ, но выполняется медленнее по сравнению с тестированием в контейнерах. Важной характеристикой ФЭУ является его эффективность в присутствии магнитного поля. Прибор помещается в темную комнату, окруженную катушками Гельмгольца для изменения и компенсации магнитного поля Земли (см. рис. 1 справа). Все ФЭУ прошли испытания в контейнерах и около 4000 ФЭУ прошли квалификацию в системе сканирования в течение 3-х лет в 2020-2022 гг.



Сфера сканирующей системы (слева). Эффективность обнаружения фотонов трубками Hamamatsu R12860 в зависимости от магнитного поля (справа).

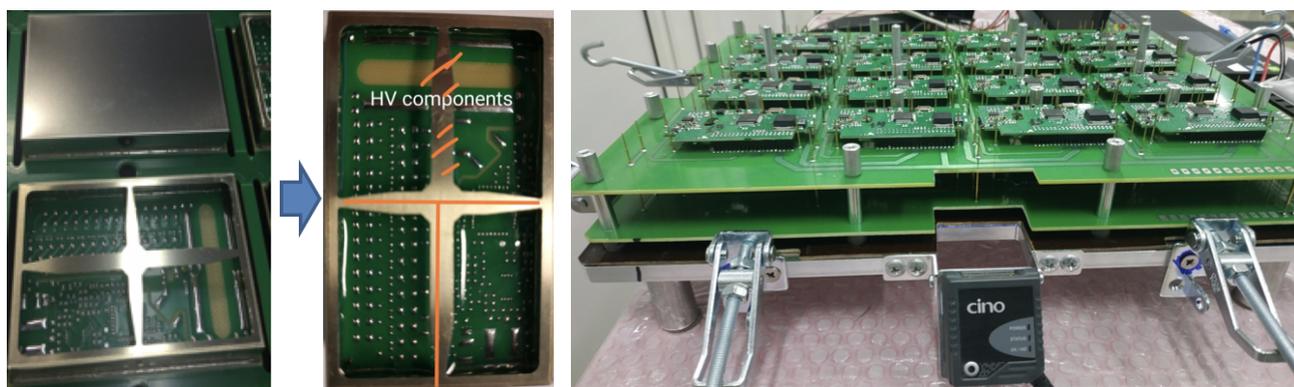
Высоковольтное питание ФЭУ

В предыдущие годы проекта ОИЯИ завершил проектирование, прототипирование и обширные испытания модулей высоковольтного питания (HVU), которые будут использоваться в эксперименте JUNO.

Поскольку HVU являются частью электроники, находящейся под водой вблизи ФЭУ, возможность ремонта или замены отсутствует. Соответственно особое внимание уделялось надежности конструкции, узлов и производственных процессов, в том числе:

прототипирование, выбор компонентов, разработка протоколов заводских испытаний и испытания на ускоренное старение при повышенной температуре. Кроме того, материалы, используемые в HVU, были проверены на радиоактивность.

Все тесты были пройдены успешно. HVU были признаны соответствующими требованиям JUNO. Конструкция HVU была одобрена Коллаборацией в ходе ряда ревю, в ходе которых проверялось соответствие требуемым параметрам, в первую очередь надежности. Наконец, после проверки готовности к производству был подписан контракт с заводом по производству электроники в Шэньчжэне. Полное производство было завершено к концу 2021 года (25'000 штук). В настоящее время блоки HV устанавливаются на детекторе JUNO вместе с остальной подводной электроникой и ФЭУ.



Блок высокого напряжения и оборудование для масс-тестирования.

Защита от магнитного поля Земли

Были изготовлены и доставлены в Германию сетки, защищающие большие ФЭУ установки OSIRIS от магнитного поля Земли. Лента из аморфного сплава отечественного производства используется в качестве основы экрана от магнитного поля Земли. В детекторе будут использованы 64 экрана, изготовленные с использованием в качестве основы текстуры углеродного волокна, не содержащей калия. 12 экранов, изготовленные из более дешевого стекловолокна (допустимо некоторое количество калия), будут использоваться в мюонном вето.

Результаты опубликованы в JINST ([\[2212.02562\]](#)). Защита также может быть использована в эксперименте Serappis, предлагаемой модернизации установки OSIRIS для обнаружения солнечных пр-нейтрино (Eur.Phys.J.C 82 (2022) 9, 779, [\[2109.10782\]](#)).

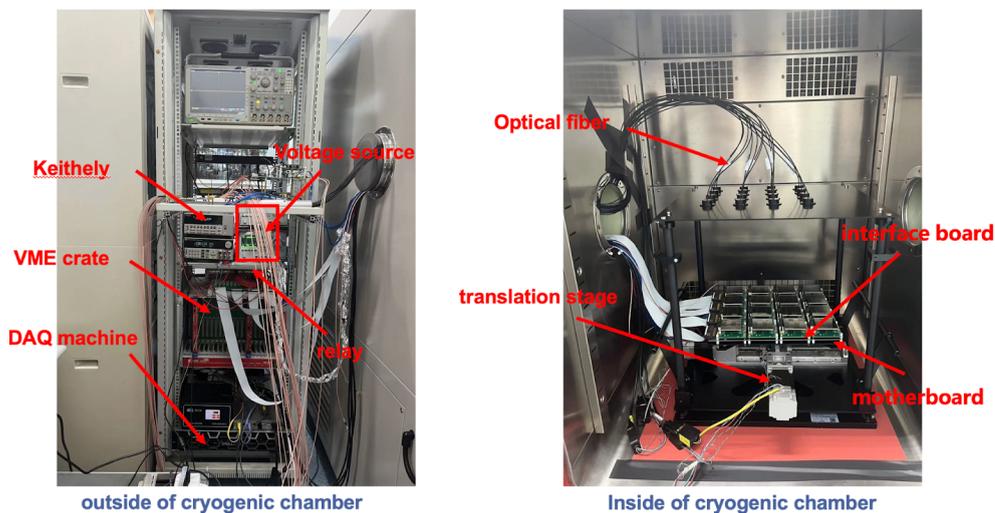
Вето: Top Tracker

Изготовлена конструкция из нержавеющей стали для Top Tracker. Разработана процедура сборки и установки Top Tracker. Основная часть программного обеспечения TT DAQ уже реализована. ПО находится на стадии интенсивного тестирования и отладки на удаленном испытательном стенде в Страсбурге. ПО будет расширено за счет добавления дополнительных функций. Интеграция с ПО набора данных JUNO начнется в июне 2023 года. К публикации подготовлена статья по описанию Top Tracker.

Массовое тестирование SiPM

Для считывания сцинтилляционного света детектор ТАО будет использовать почти 4100 32-канальных SiPM-матриц (тайлов), работающих при температуре -50°C . Были изучены потенциальные кандидаты SiPM, работающие при температурах ниже 0°C [N. Anfimov et al.

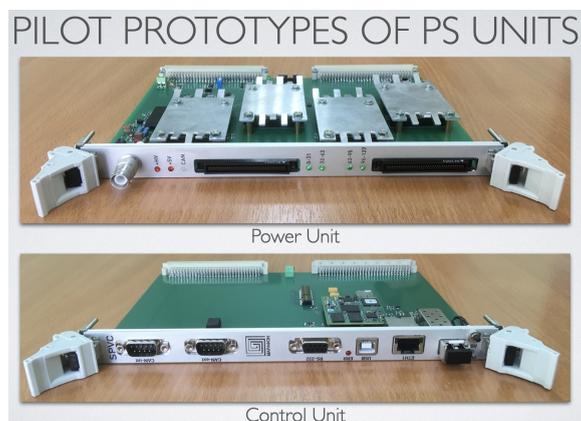
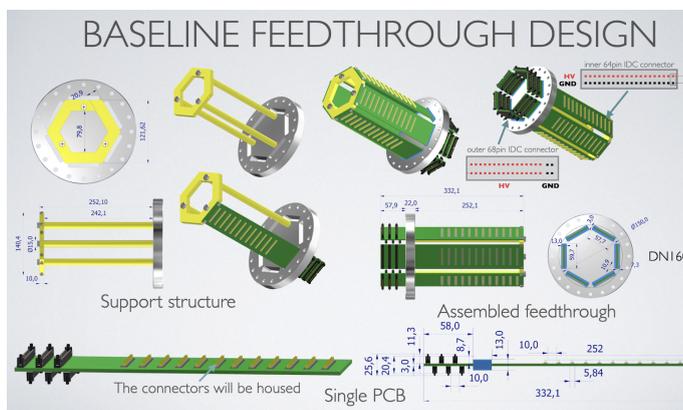
Study of silicon photomultiplier performance at different temperatures. NIMA 997:165162, 2021]. В ЛЯП ОИЯИ разработаны и испытаны методика и конструкция установки для массовых испытаний тайлов SiPM при -50°C . Методы были приняты для использования коллаборацией JUNO и успешно прошли финальное ревью (FDR). Метод, позволяющий тестировать один тайл, будет масштабирован до одновременного тестирования 16 тайлов. Для одновременного тестирования нескольких плиток разработан разветвитель оптического волокна [Rybnikov, A.V. et al. Optical Fiber Splitter for Photodetector Testing. Phys. Part. Nuclei Lett. 19, 797–802 (2022)]. Установка для массовых испытаний изготовлена и собрана в ИИЕР (г. Пекин) и сейчас находится на пуско-наладочных работах.



Массовое тестирование SiPM в ИИЕР.

Система питания SiPM

Разработан многоканальный модуль питания SiPM VME на 128 каналов. Модуль позволяет смещать детекторы от 0 до 200В с максимальной токовой нагрузкой 500 мА. Реализован мониторинг тока и короткого замыкания. Модули предназначены для питания 4100 тайлов SiPM в детекторе ТАО. Пилотные версии изготовлены, испытаны и прошли FDR. Все комплектующие для производства модулей закуплены и поставлены. Мы также разработали переходную панель разъемов для питающих кабелей внутри криостата. Были подобраны подходящие кабели для передачи до 200 В при температуре -50°C в LAB.



Переходная панель разъемов (слева). Фотография силового модуля и его блока управления (справа).

Солнечные нейтрино

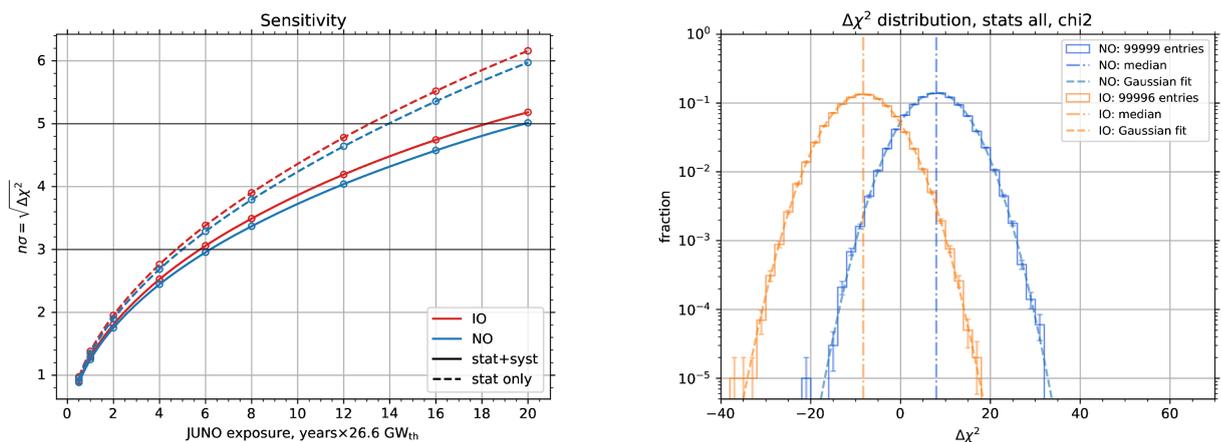
Ученые ОИЯИ приняли участие в подготовке предложения модернизации установки OSIRIS (Serappis) для регистрации потока солнечных pp-нейтрино с высокой точностью: L.Bieger, ... M.Gromov....O.Smirnov, ... "Potential for a precision measurement of solar pp neutrinos in the Serappis Experiment", arXiv:2109.10782. Рассмотрена возможность использования защиты от магнитного поля Земли в сочетании с концентратором света для детектора Serappis. Совместно с производителем мы разрабатываем процесс нанесения серебра на текстуру углеродного волокна.

Чувствительность эксперимента JUNO

Показано, что JUNO сможет измерять параметры нейтринных осцилляций Δm^2_{31} , Δm^2_{21} и $\sin^2 2\theta_{12}$ с точностью лучше 0.5% после 6-и лет набора данных (Chin.Phys.C 46 (2022) 123001 [2204.13249]). Более того, точность около 1% будет достигнута уже через 100 дней сбора данных.

Опубликована новая оценка чувствительности JUNO к упорядочиванию масс нейтрино, учитывающая данные детектора-спутника TAO, а также последних сведений о детекторе и экспериментальной установке. Чувствительность достигает 3σ через 6 лет сбора данных (см. рис. 5). Результат был получен двумя способами: на основе набора данных Азимова (без флуктуаций) и на основе МК с флуктуациями. Оба метода дают согласующиеся результаты. Черновик публикации находится на рассмотрении в коллаборации.

Две группы из ОИЯИ предоставили свой анализ для каждого из исследований, пройдя все этапы подготовки анализа, перекрестных проверок и рецензирования.



Чувствительность эксперимента JUNO в зависимости от экспозиции (слева). Распределение тестовой статистики для 6-и лет сбора данных (справа).

Реконструкция событий

Результаты исследования применения методов машинного обучения для восстановления первичной вершины и энергии в детекторе JUNO были опубликованы: Qian Z. et al. "Vertex and energy reconstruction in JUNO with machine learning methods", [physics.ins-det/2101.04839]. Группа из ОИЯИ внесла существенный вклад в реконструкцию энергии и выполнила общую координацию анализа.

Новые алгоритмы восстановления энергии позитрона для детектора JUNO были разработаны группой ОИЯИ (Eur.Phys.J.C 82 (2022) 1021). Показано, что алгоритмы могут достиг желаемого энергетического разрешения $\sigma=3\%$ при 1 МэВ.

Разработан и протестирован алгоритм реконструкции мюонных треков и электромагнитных ливней с помощью сферических функций. Мы написали процедуру разделения ближайших мюонных треков, предложили новый метод оценки качества реконструкции мюонных треков, а также разработали предварительные условия для оценки вклада изотопов Li/He с учетом качества реконструкции мюонных треков.

С помощью нашего метода мы можем реконструировать отдельный мюонный трек с точностью ~ 25 см (максимальное расстояние между истинным и реконструированным мюонным треком в центральном детекторе).

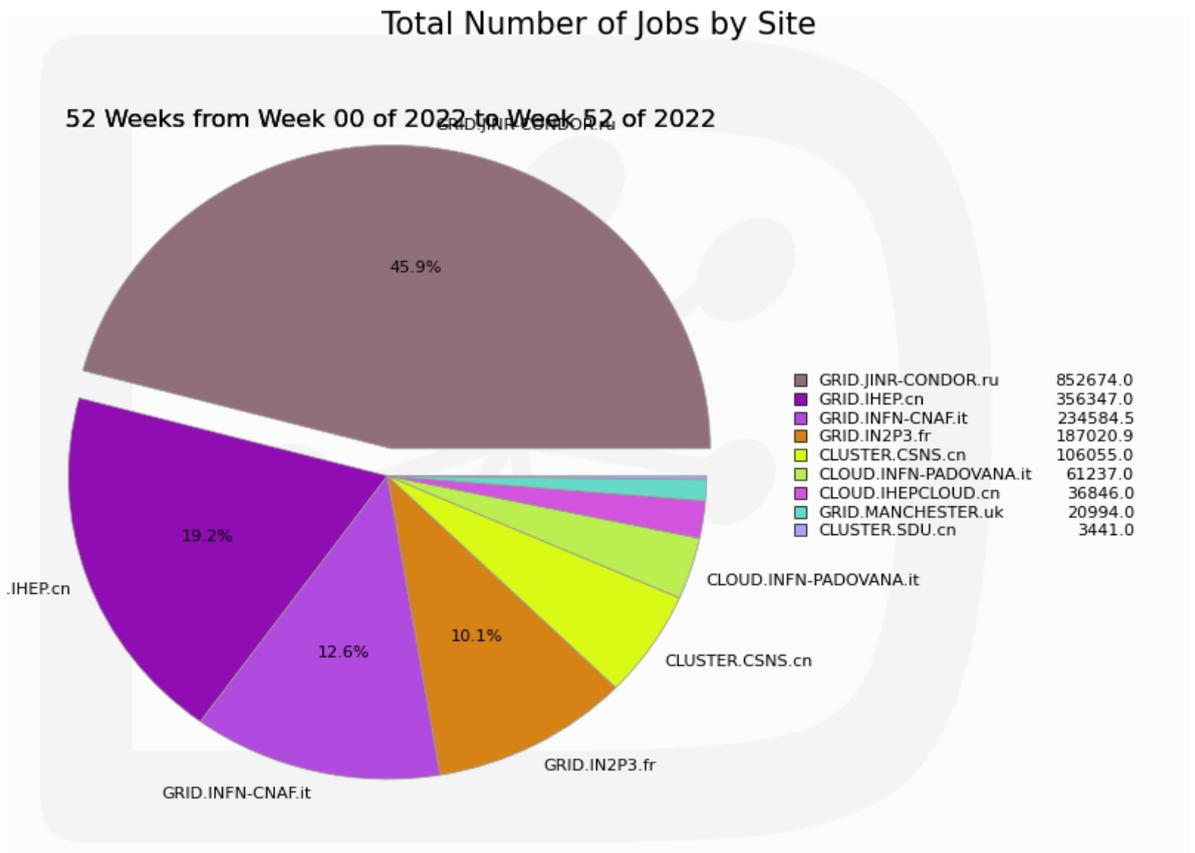
Вычислительная инфраструктура

Использование вычислительных ресурсов в 2022 году значительно возросло. Из 2.04 млн задач, выполненных в рамках РИВС JUNO, в ОИЯИ обработана большая их часть — 46% (см. рис. 6), а в 2021 г. — 31% всех счётных задач JUNO.

ОИЯИ предоставляет узлы CPU с большим объемом памяти в CPU (15 Гб), что делает ОИЯИ единственным поставщиком для моделирования, требующее памяти, например, мюоны высоких энергий. Что касается хранилища, то ОИЯИ предоставляет квоту в 1 ПБ эффективного дискового пространства (2 ПБ "сырого" дискового пространства из-за двукратной репликации) для JUNO (используется 65%) и 650 ТБ (1,3 ПБ) для Daya Bay (используется 92%).

Помимо предоставления ресурсов CPU и хранилища, в ОИЯИ были развернуты следующие копии сервисов JUNO DCI, чтобы сделать распределённую информационно-вычислительную среду эксперимента более устойчивой к различным сбоям отдельных сервисов, а также повысить её общую производительность:

- Пользовательский веб-интерфейс и службы конфигурации;
- Дополнительный сервер VOMS для JUNO VO;
- Полная копия CVMFS-репозитория первого уровня /cvmfs/juno.ihep.ac.cn и /cvmfs/dcomputing.ihep.ac.cn;
- Автономная база данных условий JUNO.



Использование общих ресурсов CPU в распределенной инфраструктуре JUNO.

NOvA/DUNE Project

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 неамериканский 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 присутствие 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 (~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.

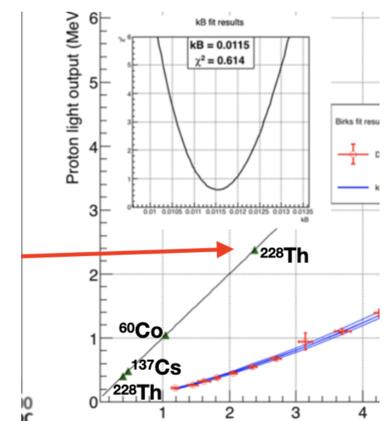
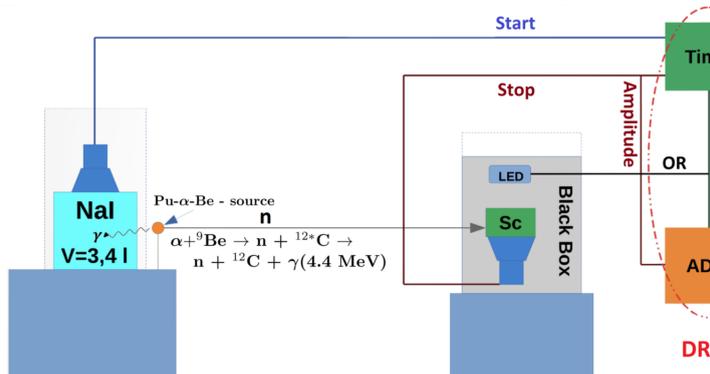


Рисунок 1. Слева: блок-схема тестового стенда, справа: кривая калибровки, линейная аппроксимация - черная сплошная линия, точки – 405 кэВ (^{228}Th), 477 кэВ (^{137}Cs), 1041 кэВ (средняя энергия двух линий ^{60}Co), 2381 кэВ (^{228}Th); отклик сцинтиллятора на протоны отдачи: красные точки – экспериментальные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

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.

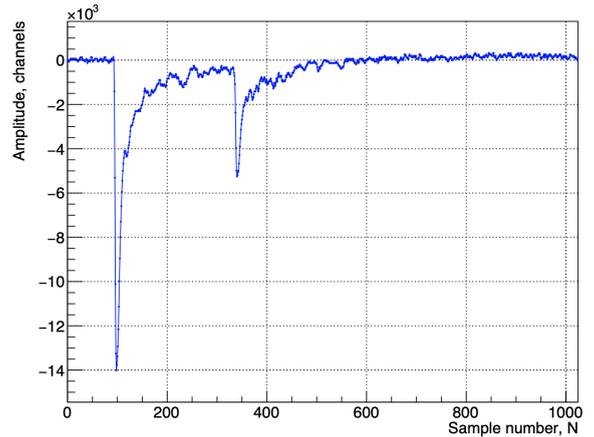
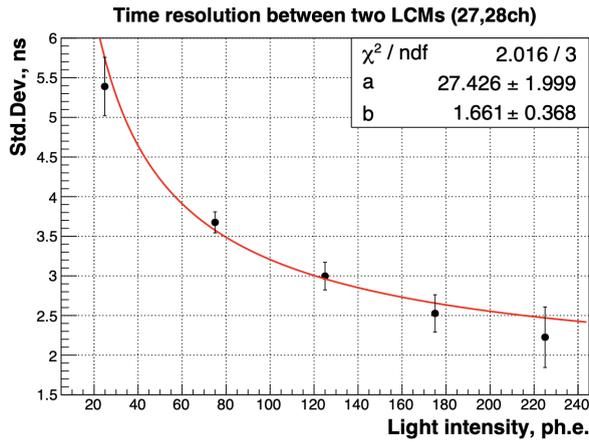


Рисунок 2. Модуль-0: Временное разрешение между двумя LCM как функция отклика сигнала (слева). Сигналы останавливающегося мюона и задержанного мишелевского электрона, обнаруженные LCM (справа).

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.

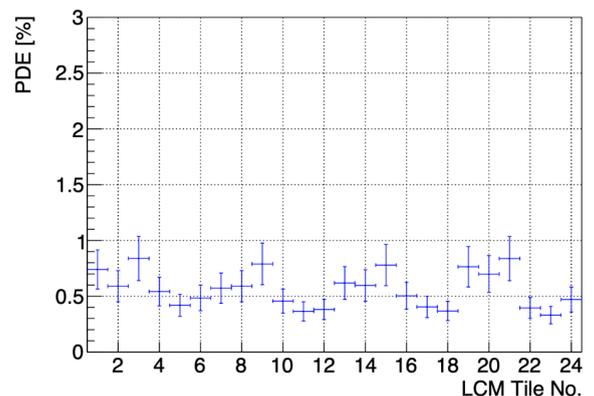
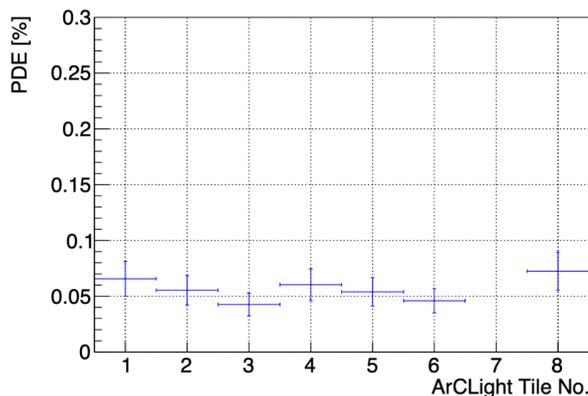


Рисунок 3. Абсолютный PDE для каждого элемента ArCLight (слева) и LCM (справа) (произвольная нумерация). Элемент 7 ArCLight был отключен во время сбора данных Модуля-0. Элементы LCM размещаются наборами по 3 штуки, чтобы покрыть ту же площадь, что и один элемент ArCLight.

Для оценки эффективности системы считывания света используется сцинтиляционный 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.

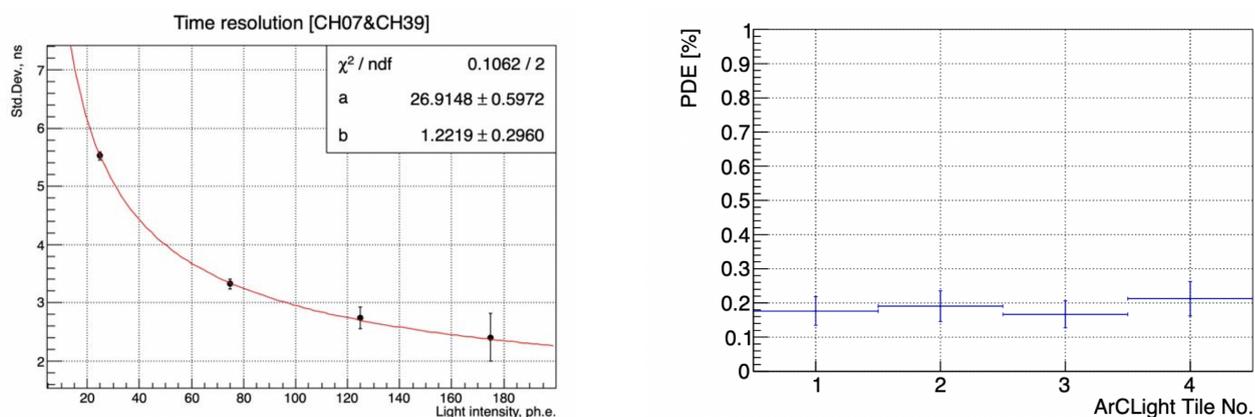


Рисунок 4. Модуль-1: временное разрешение между двумя LCM в зависимости от отклика сигнала (слева). Абсолютный PDE для каждого элемента LCM (справа) (произвольная нумерация).

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.

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.

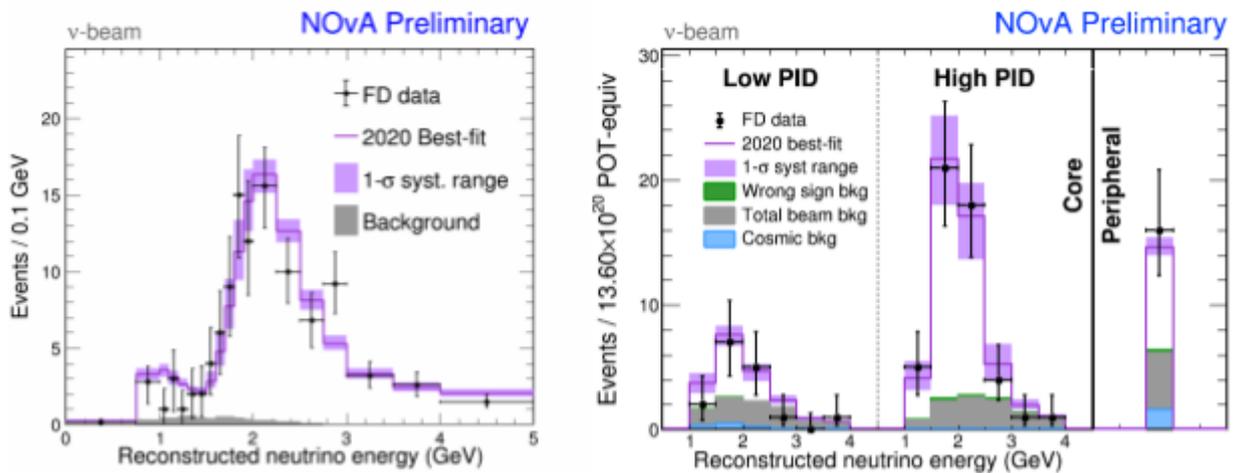


Рисунок 5. Спектры событий мюонных и электронных нейтрино, отобранных в дальнем детекторе NOvA при работе с пучком нейтрино. Эти спектры использовались для аппроксимации данных.

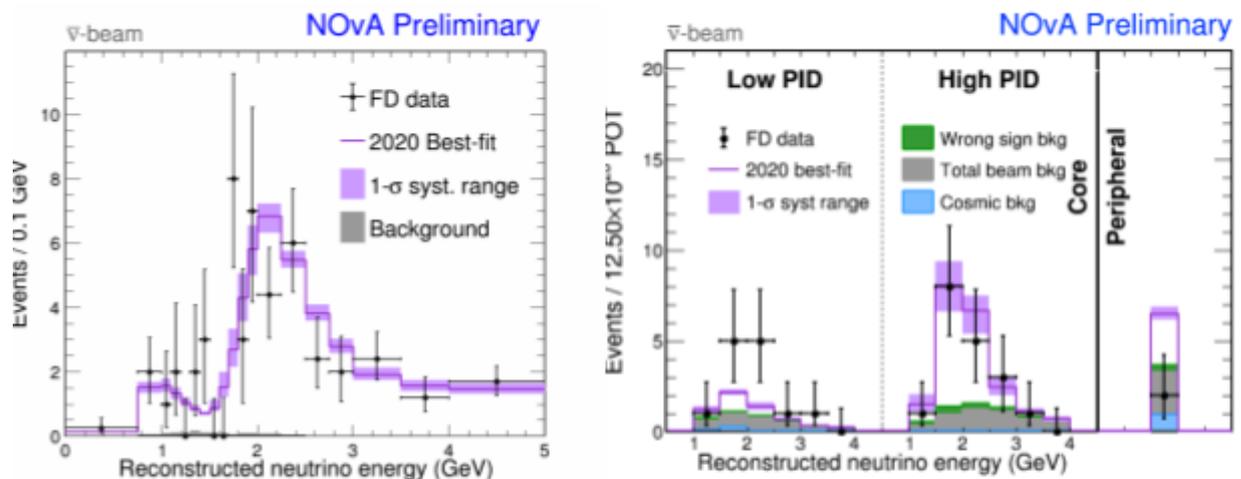


Рисунок 6. Спектры событий мюонных и электронных нейтрино, отобранных в дальнем детекторе NOvA при работе с пучком антинейтрино. Эти спектры использовались для аппроксимации данных.

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.

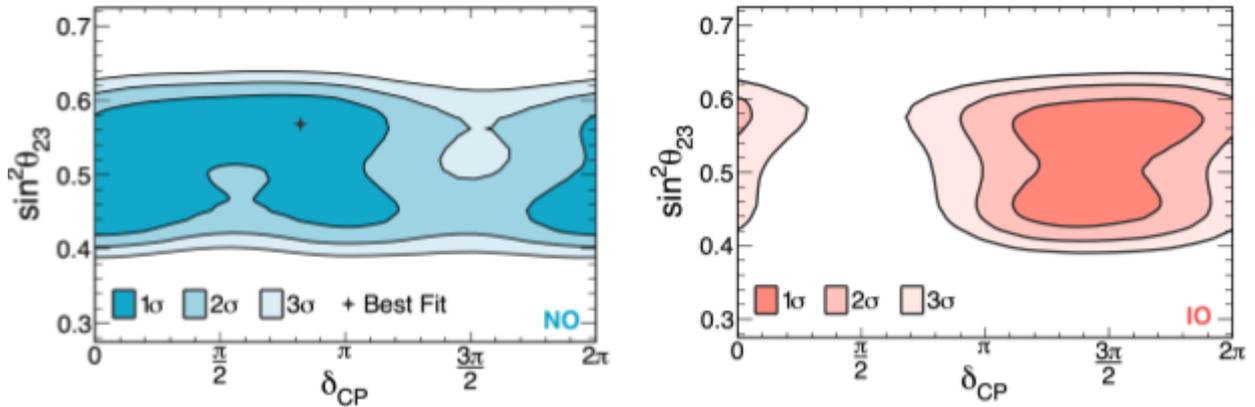


Рисунок 7. Доверительные контуры, полученные экспериментом NOvA с данными 2020 г., при гипотезе о нормальном порядке масс нейтрино (слева) и обратном порядке (справа). Использован частотный подход.

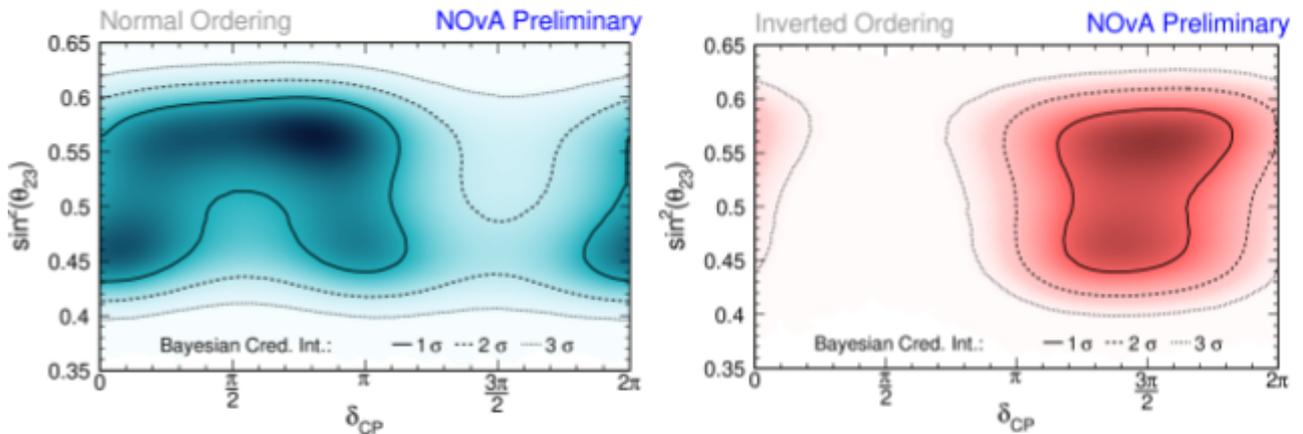


Рисунок 8. Достоверные интервалы, полученные экспериментом NOvA при повторном анализе данных 2020 г. в 2022 г. при гипотезе нормального порядка масс нейтрино (слева) и обратного порядка (справа). Использован байесовский подход.

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 задатектированных 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 и NOvA, и T2K готовят совместный анализ данных. Члены группы ОИЯИ участвуют в этом анализе со стороны эксперимента NOvA.

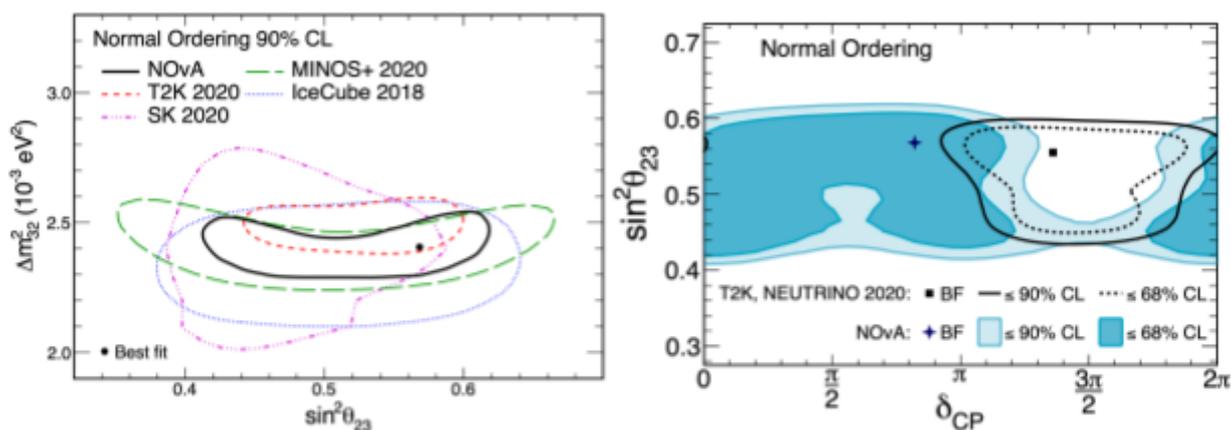


Рисунок 9. Результаты NOvA по сравнению с другими измерениями экспериментов по осцилляциям. На левом рисунке показано сравнение атмосферных параметров осцилляций нейтрино. На правом рисунке показано расхождение NOvA и T2K в измерении фазы нарушения CP.

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 5×10^8 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,

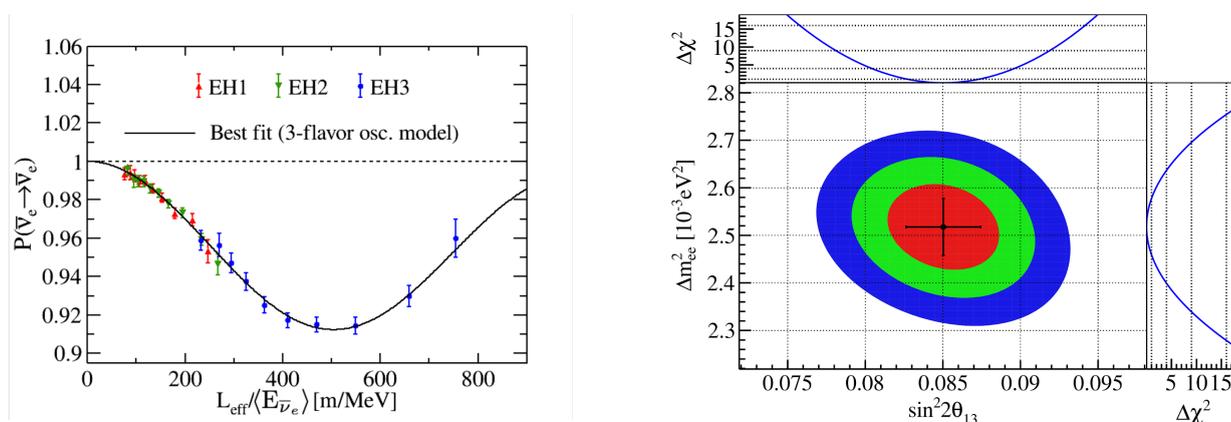
основанная на подсчете взаимодействий нейтрино в движущемся временном окне. Чувствительность таких экспериментов может быть улучшена за счет учета временного профиля ожидаемого сигнала. Члены группы ОИЯИ предложили анализ формы поступающих экспериментальных данных на основе переменной логарифмического 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, Borexino 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.

Daya Bay

Эксперимент Daya Bay завершил работу в 2020 г. В 2022 г. было завершено измерение параметров нейтринных осцилляций на основе полного набора данных. Полученный результат $\sin^2 2\theta_{13} = 0.0851 \pm 0.0024$ и $\Delta m^2_{32} = 2.466 \pm 0.060$ (-2.571 ± 0.060) эВ² для нормального (обратного) порядка масс нейтрино является наиболее точным на сегодняшний день измерением ([2211.14988], направлено в PRL). Точность измерения $\sin^2 2\theta_{13}$ в Daya Bay будет наилучшей как минимум в течение 10-15 лет. Наблюдаемая вероятность выживания электронных антинейтрино от реактора, а также полученные контуры показаны на рисунке 7.

Группа из ОИЯИ традиционно участвовала в подготовке результата, включая отбор событий обратного бета-распада, оценку фона и осцилляционный анализ.



Отношение наблюдаемых событий без фона к ожидаемому без осцилляций. Доверительный интервал для параметров нейтринных осцилляций $\sin^2 2\theta_{13}$ и Δm^2_{31} .

Borexino

Продолжается анализ данных Borexino. После анализа полного набора данных фазы III уточнен поток солнечных нейтрино, возникающий в результате термоядерных реакций CNO-цикла (Phys. Rev. Lett. 129 (2022) 25, 252701, [2205.15975]). Измеренный поток составил $6.6^{+2.0}_{-0.9} \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$, а гипотеза об отсутствии нейтринного сигнала CNO исключается на уровне около 7σ С.Л. Измеренный поток позволил впервые оценить с помощью нейтрино содержание углерода и азота на Солнце по отношению к содержанию водорода. Отношение равно $N_{\text{CN}} = 5.78^{+1.86}_{-1.00} \times 10^{-4}$. Параллельно показана принципиальная возможность определения направления на источник (в данном случае на Солнце) в большом жидкостном сцинтилляционном детекторе с использованием нейтринного излучения (Phys.Rev.Lett. 128 (2022) 9, 091803 [2112.11816] ; Phys.Rev.D 105 (2022) 5, 052002 [2109.04770]). Также завершен поиск нейтринных событий в детекторе Борексино в корреляции с наиболее интенсивными быстрыми радиовсплесками (FRB) (Eur.Phys.J.C 82 (2022) 3, 278 [2111.14500]). Статистически значимого превышения над фоном не наблюдалось. В результате самые сильные верхние пределы потоков нейтрино всех ароматов, связанных с FRB, были получены в диапазоне энергий нейтрино 0,5-50 МэВ.

Для обеспечения возможности дальнейшей работы с данными в ОИЯИ их полная копия, а также необходимое программное обеспечение размещены на серверах Института.

DarkSide

Продолжаются работы по созданию детектора DarkSide-20k. В то же время завершается анализ данных DarkSide-50. Одно из недавних исследований было посвящено возможной фотоионизации катода и примесей в мишени. Подтвержден первый процесс и обнаружены признаки наличия второго (Astropart. Phys. 140 (2022) 102704, [2107.08015]). Также ведутся поиски процесса двухнейтринного двойного электронного захвата на ^{36}Ar .

NA65/FASER

В эксперименте NA65 в 2022 году был проведен успешный физический сеанс с 17 модулями W-эмульсии и протонным пучком SPS с энергией 400 ГэВ / с. Анализ данных сеанса 2021 года продолжается. В настоящее время готовится статья о характеристиках детектора, основанная на исследованиях взаимодействия первичных протонов. Инструментарий для реконструкции вершин взаимодействия протонов разрабатывается группой ОИЯИ.

Первый сеанс FASER прошел успешно, собрав $\sim 40 \text{ fb}^{-1}$. Все показатели работы детектора и качества данных положительные, и повторная обработка данных будет проведена после того, как будут реализованы все окончательные калибровки, юстировка, магнитная карта и усовершенствования программного обеспечения.

Детектор FASERv прошел столь же успешный сеанс с экспозицией 3 наборов эмульсий, охватывающих начальную фазу сеанса ($0,5 \text{ fb}^{-1}$) и два последовательных периода высокой светимости (~ 10 и $\sim 30 \text{ fb}^{-1}$ соответственно). Первые два модуля были разработаны и проанализированы, показывая превосходное разрешение треков ($\sigma(\Delta x, y) = 0,2 \text{ мкм}$) и общую плотность треков, соответствующую моделированию. Согласно моделированию, ожидается, что в результате анализа полного набора данных будет получено около 2000 взаимодействий нейтрино LHC. Группа ОИЯИ работает над анализом данных и разработкой системы термостабилизации детектора.

2.2.2. Основные публикации (список библиографических ссылок).

1. Abuselme A.,..., Gonchar M.,..., Malyshkin Yu. et al., Sub-percent precision measurement of neutrino oscillation parameters with JUNO, e-Print: 2204.13249 [hep-ex], Published in: Chin.Phys.C 46 (2022) 12, 123001

2. JUNO Collaboration, JUNO physics and detector, e-Print: 2104.02565 [hep-ex], Published in: *Prog.Part.Nucl.Phys.* 123 (2022), 103927
3. An F.P.,..., Dolzhikov D.,..., Gonchar M.,..., Naumov D.,..., Olshevkiy A.,..., Treskov K.,..., Zavadskiy V. et al., Precision measurement of reactor antineutrino oscillation at kilometer-scale baselines by Daya Bay, e-Print: 2211.14988 [hep-ex], submitted to PRL.
4. Angel Abusleme,...., Dmitrievsky S.,..., Gornushkin Yu.,..., Korablev D. et al., The JUNO experiment Top Tracker, e-Print: 2303.05172 [hep-ex], to be submitted.
5. Arsenii Gavrikov, Yury Malyshkin, Fedor Ratnikov (Higher Sch. of Economics, Moscow and Dubna, JINR), Energy reconstruction for large liquid scintillator detectors with machine learning techniques: aggregated features approach, e-Print: 2206.09040 [physics.ins-det], Published in: *Eur.Phys.J.C* 82 (2022) 11, 1021, *Eur.Phys.J.C* 82 (2022), 1021
6. Xu H.,..., Anfimov N.,..., Gromov M.,..., Rybnikov A. et al., Calibration strategy of the JUNO-TAO experiment, e-Print: 2204.03256 [physics.ins-det], Published in: *Eur.Phys.J.C* 82 (2022) 12, 1112
7. Bieger L.,..., Gromov M.,..., Smirnov O. et al., Potential for a precision measurement of solar pp neutrinos in the Serappis experiment, e-Print: 2109.10782 [physics.ins-det], Published in: *Eur.Phys.J.C* 82 (2022) 9, 779
8. Qian Z.,..., Gavrikov A.,..., Gonchar M.,..., Malyshkin Yu.,..., Treskov K. et al., Vertex and energy reconstruction in JUNO with machine learning methods, e-Print: 2101.04839 [physics.ins-det], Published in: *Nucl.Instrum.Meth.A* 1010 (2021), 165527
9. O. Smirnov, D. Korablev, A. Sotnikov et al., Magnetic shielding for large photoelectron multipliers for the OSIRIS facility of the JUNO detector, e-Print: 2212.02562 [physics.ins-det], submitted to JINST.
10. A. Stepanova (Dubna, JINR), M. Gonchar (Dubna, JINR), L. Kolupaeva (Dubna, JINR), K. Treskov (Dubna, JINR), Deep Underground Neutrino Experiment DUNE—Calculation of Sensitivity to the Measurement of Oscillation Parameters, Published in: *Phys.Part.Nucl.Lett.* 19 (2022) 5, 505-508
11. Rybnikov, A.V., Anfimov, N.V., Fedoseev, D.V. et al. Optical Fiber Splitter for Photodetector Testing. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 19, 797–802 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1547477122060255>
12. Abusleme, A.,..., Anfimov N., et al. Mass testing and characterization of 20-inch PMTs for JUNO. *Eur. Phys. J. C* 82, 1168 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-11002-8>
13. L. Kolupaeva, O. Samoylov “Study of Neutrino Oscillations in the NOvA Experiment”, *Yad.Fiz.* 84 (2021) 1, 48-52
14. A. Sheshukov, A. Vishneva, A. Habig “Combined detection of supernova neutrino signals” *JCAP* 12 (2021) 12, 053
15. M. A. Acero et al. (NOvA Collaboration) “Search for Slow Magnetic Monopoles with the NOvA Detector on the Surface”, *Phys. Rev. D* 103, 012007
16. 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
17. 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)
18. 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)
19. 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
20. V Hewes et al (Dune Collaboration) “Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Near Detector Conceptual Design Report” *Instruments* 5 (2021) 4, 31

21. Luis Alvarez-Ruso et al (GENIE Collaboration) “Recent highlights from GENIE v3” *Eur.Phys.J.ST* 230 (2021) 24, 4449-4467
22. I.Kakorin, K.Kuzmin ”Resonance axial-vector mass from experiments on neutrino-hydrogen and neutrino-deuterium scattering” *Phys.Rev.D* 104 (2021) 9, 9
23. 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
24. 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
25. 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
26. M. Acero et al (NOvA Collaboration) “Improved measurement of neutrino oscillation parameters by the NOvA experiment” *Phys.Rev.D* 106 (2022) 3, 032004
27. 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
28. 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
29. 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
30. 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
31. 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)
32. A.Olshevskiy “Results of Neutrino Oscillations and the Search for Sterile Neutrino States” accepted to be published in *PEPAN letters* (2023)
33. A. Stepanova, L. Kolupaeva «Joint fit of long-baseline accelerator neutrino experiments in GNA software», sent to *PEPAN Letters* (2023)
34. S.Appel et al., Improved measurement of solar neutrinos from the Carbon-Nitrogen-Oxygen cycle by Borexino and its implications for the Standard Solar Model, *Phys. Rev. Lett.* 129 (2022) 25, 252701
35. M.Agostini et al., First Directional Measurement of sub-MeV Solar Neutrinos with Borexino *Phys.Rev.Lett.* 128 (2022) 9, 091803
36. M.Agostini et al., Correlated and Integrated Directionality for sub-MeV solar neutrinos in Borexino, *Phys.Rev.D* 105 (2022) 5, 052002
37. S.Appel et al., Search for Low-Energy Signals from Fast Radio Bursts with the Borexino Detector, *Eur.Phys.J.C* 82 (2022) 3, 278
38. S. Appelet et al. (BOREXINO collaboration), Independent determination of the Earth’s orbital parameters with solar neutrinos in Borexino, *Astroparticle Physics Volume 145*, March 2023, 102778
39. P.Agnes et al., A study of events with photoelectric emission in the DarkSide-50 liquid argon Time Projection Chamber, *Astropart. Phys.* 140 (2022) 102704
40. F.P.An et al, Precision measurement of reactor antineutrino oscillation at kilometer-scale baselines by Daya Bay, <https://arxiv.org/abs/2211.14988>
41. Gromov M., Westerdale S., Goncharenko I., Chepurnov A. (α, n) and $(\alpha, n\gamma)$ yield calculations with a new version of NeuCBOT for low background experiments. *Phys. At. Nucl.* **86** (2) (2023) 1-8.
42. Zykova M. et al. Hybrid Ultra-Low-Radioactive Material for Protecting Dark Matter Detector from Background Neutrons. *Materials.* **14** (13) (2021). 3757.

43. Agafonova, N. et al. (OPERA Collaboration) «OPERA tau neutrino charged current interactions», *Sci Data* 8, 218 (2021).
44. Agafonova, N. et al. «Updated constraints on sterile neutrino mixing in the OPERA experiment using a new identification method», *PTEP* 3(2023) 033C01
45. H. Abreu et al. (FASER Collaboration), «The trigger and data acquisition system of the FASER experiment», *JINST* 16 (2021) P12028
46. H. Abreu et al. (FASER Collaboration), «The tracking detector of the FASER experiment», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* 1034 (2022) 166825 [2303.14185](#)

2.2.3. Полный список публикаций по теме порядка 90 штук.

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

1. V.Sharov "Development of a multi-channel power supply for the TAO and DUNE experiments", AYSS-2021, 13.10.2021 (oral talk)
2. 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.
3. 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)
4. Y.M. Malyshkin, plenary, "Status and Physical Potential of JUNO", [NUCLEUS 2021](#), remote, September 1–11, 2021
5. Y.M. Malyshkin, parallel, "Application of machine learning techniques for event reconstruction in JUNO", [NuFact 2021](#), Cagliari/online, Italy, September 6–11, 2021.
6. Y.M. Malyshkin, parallel, "Oscillation Physics in JUNO", [NeuTel 2021](#), online, February 18-26, 2021.
7. M. Gonchar, parallel, "GNA: data flow approach for the neutrino oscillation experiments", Innovative Workflows in Astro and Particle Physics IWAPP (remote), March 8–12, 2021.
8. M. Gonchar, parallel, "Neutrino Oscillation Physics in JUNO", European Physical Society conference on high energy physics EPS-HEP 2021 (remote), July 26-30, 2021
9. M. Gonchar, plenary, "The JUNO experiment: status and prospects", Nucleus-2022, Moscow, 11–16 July, 2022
10. V. Zavadskiy, poster, "Search for Sterile Neutrinos with JUNO-TAO", Neutrino 2022, May 30–June 4, 2022 (remote).
11. D. Dolzhikov, poster, "JUNO Neutrino Mass Ordering Sensitivity with Subdetectors", 57th meeting of the PAC for Particle Physics, Dubna, 2023.
12. L. Kolupaeva, "Current status and future prospects of three flavor neutrino oscillations", AYSS-2021, 11-15 Oct, Almaty, Kazakhstan (Hybrid Event). (invited plenary talk)
13. 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)
14. 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)
15. N.V. Anfimov, "Liquid-argon TPC of the near detector of the DUNE experiment", DLNP JINR seminar, May 20, 2021
16. 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)

17. 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
18. V.Sharov "Development of a multi-channel power supply for the TAO and DUNE experiments", AYSS-2021, 13.10.2021 (oral talk)
19. S. Sokolov "Light detection system prototype for DUNE Near Detector TPC", AYSS-2021, 13.10.2021 (oral talk)
20. 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
21. 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
22. 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)
23. 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)
24. A. Sheshukov, "Neutrino signals of the next galactic supernova" 06 June 2022, JINR AYSS Conference "Alushta-2022" (oral talk)
25. A. Sheshukov, "SuperNova Early Warning System", ICPPA-2022, 29.11-02.12.2022, Moscow, Russia (poster talk)
26. 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.
27. 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
28. 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
29. 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
30. 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
31. 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
32. O. Samoylov "Study of neutrino oscillations in NOvA/DUNE accelerator experiments" DLNP Seminar March 16, 2023
33. 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
34. 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
35. 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

36. 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
37. L. Kolupaeva "JINR neutrino program", seminar at INP, Almaty, Kazakhstan, 5.01.23
38. O. Smirnov, "Unveiling the engine of the Sun: measurements of the pp-chain solar neutrinos with Borexino", Sixteenth Marcel Grossmann Meeting, MG16 Virtual Meeting - July 6, 2021
39. A. Vishneva "First detection of solar neutrinos from the CNO cycle of thermonuclear reactions" AYSS Conference «Alushta-2022» 5-12 June 2022
40. A. Vishneva "Borexino experiment and its impact to neutrino physics" 18th Rencontres du Vietnam 17-23 June 2022
41. A. Vishneva "Detection of solar neutrinos from the CNO cycle with Borexino" ICPPA-2022, 29 Nov - 2 Dec 2022
42. Lychagina O.E. Evaluation of the sensitivity of the DarkSide-50 experiment to two neutrino double K-capture on ^{36}Ar . ICPPA-2022, 29.11-02.12.2022. Moscow. (Oral presentation, parallel)
43. Lychagina O.E. Evaluation of the sensitivity of the DarkSide-50 experiment to two neutrino double K-capture on ^{36}Ar . AYSS-2022, 24-28.10.2022. Dubna. (Oral presentation)
44. Westerdale S., Gromov M., Goncharenko I., Chepurinov A. (α, n) and ($\alpha, n\gamma$) yield calculations with a new version of NeuCBOT for low background experiments. Nucleus-2022. 11-16.07.2022. Moscow. (Oral presentation, parallel session)
45. Vasina on behalf of the DsTau (NA65) Collaboration «Study of tau neutrino production with nuclear emulsion at CERN-SPS», 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2021), Valencia (online), Spain (online)
46. S. Vasina on behalf of the FASER Collaboration «Status of the FASER experiment at LHC», 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA 2022), Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia
47. Miloi M. M. on behalf of DsTau collaboration, "The DsTau experiment: measuring the tau-neutrino production cross section" (2021) 57th Karpacz Winter School of Theoretical Physics and PHAROS COST Action CA16214 Training School – "Equation of state of dense matter and multi-messenger astronomy", Karpacz-Poland, 19 June - 26 June
48. Miloi M. M. on behalf of DsTau collaboration, "The DsTau experiment: measuring the tau-neutrino production cross section" (2021), 21st JINR-ISU Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics, online, 12 July - 19 July
49. Yu. Gornushkin "Study of tau neutrino production in NA65 experiment at CERN SPS" 20th Lomonosov Conference, 19-25 August 2021, Moscow

2.2.5. Патентная деятельность (при наличии).

-

2.3. Результаты сопутствующей деятельности

2.3.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.

1. А. Ольшевский — профессор Московского государственного университета (2003 г. — наст. время) с полугодовым курсом «Современные исследования в физике элементарных частиц».
2. Д. Наумов — профессор МГУ с годовым курсом по Стандартной модели.
3. Анфимов — доцент Университета «Дубна» (2021 г. — наст. время) с полугодовыми курсами «Ядерная электроника» и «Физическая электроника».

Защищенные диссертации:

1. Н. Анфимов «Разработка и применение методов исследования фотодетекторов», защита 04.03.2021 в ОИЯИ
2. Л. Колупаева «Анализ данных эксперимента NOvA с целью измерения параметров нейтринных осцилляций», защита 06.04.2021 в МГУ

3. А. Шешуков «Анализ нейтринных взаимодействий для поиска сигналов сверхновых», готовится защита в 2023 г. в ОИЯИ

Защищенные дипломы:

1. А. Гавриков, «Методы машинного обучения для реконструкции энергии событий: эксперимент JUNO», НИУ ВШЭ, 2022, магистр.
2. А. Степанова «Подземный ускорительный нейтринный эксперимент DUNE - расчет чувствительности к измерению параметров осцилляций, МГУ, 2021, бакалавр
3. М. Стриж, «Определение направления прихода антинейтрино из реактора – модель и анализ данных эксперимента Daya Bay», МГУ, 2021, магистр.
4. А. Шайдурова «Применение разложения Магнуса для расчета вероятностей осцилляций атмосферных нейтрино», МГУ, 2021, магистр.
5. В. Завадский «Поиск стерильных нейтрино в экспериментах Daya Bay и JUNO», МФТИ, 2021, магистр.
6. Е. Ситникова «Разработка алгоритма поиска распадов короткоживущих частиц в DsTau (NA65)», МФТИ, 2021, магистр.
7. Ю. Иванеев «Исследование вклада черенковского света в нелинейность отклика жидкого сцинтиллятора», МГУ, 2022, бакалавр
8. А. Победимов «Исследование возможности регистрации атмосферных нейтринных событий в эксперименте NOvA», МГУ, 2022, бакалавр
9. Лычагина О.Е. «Оценка чувствительности эксперимента DarkSide-50 к двухнейтринному двойному К-захвату на Ar-36» МГУ, магистр, 2022
10. А. Степанова "Расчет определения точности параметров осцилляций нейтрино в ускорительных нейтринных экспериментах с длинной базой", МГУ, 2023, магистр

2.3.2. 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 г.
4. В. Шаров — грант ОМУС в 2022 году
5. М. Завадский — грант ОМУС в 2023 году
6. А. Степанова - грант ОМУС в 2022 году
7. Л. Колупаева - грант ОМУС в 2020 г., стипендия имени Бруно Понтекорво ЛЯП в 2021 г.

2.3.3. 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» - А.Шешуков, А.Ольшевский, С.Васина, Ю. Горнушкин и др.

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

Экспертная деятельность:

Д.Наумов и А.Ольшевский являются редакторами разделов PEPAN Letters и экспертами комитетов по присуждению грантов.

Н. Анфимов — рецензент в: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A — 4 статьи; Instruments, MDPI — 1 статья; 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);
5. М. Гончар - член исполнительного комитета и представитель группы ОИЯИ в совете коллаборации Daya Bay; член комитета спикеров, со-руководитель группы по онлайн классификации событий.
6. Д. Наумов - член исполнительного комитета и представитель группы ОИЯИ в совете коллаборации JUNO, член издательского комитета JUNO, руководитель рабочей группы по удаленным сменам и техническому обслуживанию.
7. А. Ольшевский - менеджер PMT Instrumentation L2 в JUNO и представитель группы ОИЯИ в советах коллабораций NOvA и DUNE.
8. О. Смирнов - руководитель группы анализа нейтрино низких энергий вorexino.

Научно-популяризационная деятельность

1. Регулярные экскурсии в “Зеленую” лабораторию — A.Selyunin, A.Antoshkin, V. Sharov, N.Anfimov
2. Фестиваль науки и технологий “Techno Environment at VDNKh” (2021), JINR stand — V. Sharov
3. Фестиваль “Наука 0+”, Lecturer at the Kurchatov School (2022) — V.Sharov
4. Лекторий УНЦ ОИЯИ, periodic lectures for students and school children - V.Sharov, N.Anfimov, L.Kolupaeva
5. Марафон “JINR visiting Dubna schools” (2021-2022) — V.Sharov, N.Anfimov
6. Лекция “Particle physics for kids” (2022) — N.Anfimov
7. Лекция для студентов МГУ (2022) - L.Kolupaeva
8. Lecture at Vinca Institute. Serbia (2022) — N.Anfimov
9. Series of lectures "Neutrino experiments" at Baikal School of Particle Physics and Astrophysics, (2022) - A.Sheshukov
10. Seminar “Information technologies in JUNO experiment”, IT School on Data Science, 2021, MLIT — M. Gonchar
11. “Neutrino Geophysics”, Popular Science Lecture, April 27, 2021 -O . Smirnov,
12. “DLNP Neutrino Program”, several lectures for schoolchildren - O. Smirnov
13. “Search for dark matter particles with dual-phase Time Projection Chambers”, seminar of the Department of Elementary Particle Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. 15.11.2022 - M. Gromov

3. Международное научно-техническое сотрудничество

Фактически участвующие страны, институты и организации.

| Организация | Страна | Город | Участники | Тип соглашения |
|-------------|---------|----------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|
| IHEP | China | Beijing | Yifang Wang + 10 | JUNO MoU |
| SYSU | China | Guangzhou | Wei Wang + 10 | JUNO MoU |
| SINP MSU | Russia | Moscow | Alexander Chepurinov, Maxim Gromov | JUNO MoU |
| INFN | Italy | Catania, Rome | Giuseppe Adronico +1 Stefano Maria Mari +1 | JUNO MoU JUNO MoU |
| FZJ-IKP | Germany | Jülich | Livia Ludhova +4 | JUNO MoU |
| EKUT | Germany | Tübingen | Tobias Lachenmaier +1 | JUNO MoU |

| | | | | |
|----------------------------------|-------------|-----------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| FNAL | USA | Batavia, IL | Alex Himmel + 3 Jennifer Raaf + 4 | JINR-FNAL agreement extension |
| University of Bern | Switzerland | Bern | Michele Weber + 2 | Consortium agreement |
| CERN | Switzerland | | Francesco Lanni, Filippo Resnati | Neutrino Platform 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 |

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------|
| INFN | Italy | Pisa | Stefano di Falco + 1 | DUNE Collaboration |
| INFN | Italy | Bologna | Gabriele Sirri | DUNE Collaboration |
| INFN | Italy | Padova | Matteo Tenti | DUNE Collaboration |
| Institute of Nuclear Physics | Kazakhstan | Almaty | Sayabek Sakhiyev + 6 | DUNE Collaboration |
| The Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences | Russia | Moscow | Anatoly Butkevich + 1 | DUNE Collaboration |
| Queen Mary University of London | UK | London | Alexander Booth | NOvA 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 |
| University of Mississippi | USA | Oxford | Gavin Davis, Jeffrey Kleykamp | NOvA 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)

| № № п/п | Категория работника | Основной персонал сумма FTE | Ассоциированный персонал сумма FTE |
|---------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| 1. | научные работники | 30 | |
| 2. | инженеры | 10 | |
| 3. | специалисты | - | 13 |
| | Итого: | 40 | 13 |

4.2. Фактическая сметная стоимость темы / КИП

| № № п/п | Наименование работ | Полная стоимость | Расходы за год, предшествующий отчетному (тыс. долл. США) |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1. | Международное сотрудничество (МНТС) | 480 | 130 |
| 2. | Материалы | 1230 | 300 |
| 3. | Оборудование и услуги сторонних организаций | 1200 | 270 |
| 4. | Пуско-наладочные работы | - | - |
| 5. | Услуги научно-исследовательских организаций | 100 | 30 |
| 6. | Приобретение программного обеспечения | 120 | 25 |
| 7. | Проектирование/строительство | 75 | 30 |
| 8. | Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту) | - | - |
| ВСЕГО: | | 3205 | 785 |

4.3. Другие ресурсы

5. Заключение

За ранее утвержденный срок задачи темы были успешно выполнены.

Строительство детектора и подготовка к сбору и анализу данных крупного жидко-сцинтилляционного детектора мега-сайенс класса JUNO идет полным ходом при значительном вкладе ОИЯИ.

Физики ОИЯИ также внесли существенный вклад в результаты, полученные в эксперименте NOvA, который продолжит сбор данных до 2026 г. и будет заменен значительно более масштабным экспериментом мега-сайенс класса DUNE, в котором команда ОИЯИ применит опыт, полученный в NOvA.

ОИЯИ планирует внести два основных вклада в конструкцию ближнего детектора эксперимента DUNE: систему сбора света модулей жидко-аргонового калориметра и строу-трекер детектора, расположенного на оси пучка. Оба вклада хорошо мотивированы знаниями и опытом ОИЯИ.

Кроме того, в рамках темы запланировано выполнение еще нескольких активностей меньшего масштаба, поддерживающих продолжение анализа данныхorexino и Dark Side и участие в эксперименте NA65/FASER(v).

6. Предлагаемые рецензенты

Проект JUNO - Евгений ЯКУШЕВ

Проект NOvA/DUNE - Владимир КАРЖАВИН

Тема 1099 - Евгений ЯКУШЕВ

Руководитель темы

_____/_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Руководитель проекта (шифр проекта)

_____/_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Руководитель проекта (шифр проекта)

(в случае нескольких проектов)

_____/_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

Экономист лаборатории

_____/_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.