

*Форма открытия (продления) Проекта /
Подпроекта КИП*

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ
ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте / подпроекте крупного инфраструктурного проекта
(далее КИП)**

1.1. Шифр темы / КИП (для продлеваемых проектов) – *шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

02-2-1099-2010/2026 “Изучение нейтринных осцилляций и астрофизические исследования”

1.2. Шифр проекта / подпроекта КИП (для продлеваемых проектов и подпроектов)

02-2-1099-2-2015/2026

1.3. Лаборатория

ЛЯП, ЛТФ, ЛИТ

1.4. Научное направление

Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика

1.5. Наименование проекта / подпроекта КИП

Изучение свойств нейтрино в ускорительных экспериментах

1.6. Руководитель(и) проекта / подпроекта КИП

Л.Д. Колупаева, А.Г. Ольшевский

**1.7. Заместитель(и) руководителя проекта / подпроекта КИП (научный руководитель
проекта/ подпроекта КИП**

Ю.А. Горнушкин, О.Б. Самойлов

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Физика нейтрино сегодня — это активно развивающаяся область физики высоких энергий с четко определенными задачами и планами исследований на предстоящие годы. Эта область получила дополнительный импульс за последние 25 лет благодаря открытию явления осцилляций нейтрино в экспериментах Super-Kamiokande и SNO. Современная нейтринная физика включает как поиски явлений за пределами Стандартной модели, так и прецизионные измерения свойств и собственных характеристик этой частицы, включая параметры осцилляций и взаимодействия нейтрино, массу и т. д.

Ускорительный нейтринный пучок — это искусственный, хорошо контролируемый источник этих частиц с хорошо изученными систематическими неопределенностями и возможностью настройки характеристик пучка для повышения чувствительности к целевым параметрам. Эти особенности ускорительных нейтрино важны как для изучения свойств частиц, так и для поиска новой физики. Специалисты из ОИЯИ имеют многолетние традиции участия в прошлых и действующих нейтринных ускорительных экспериментах и проектах.

Настоящее предложение направлено на объединение участия ОИЯИ в экспериментах с нейтрино от ускорителей в один проект. Мы планируем усилить интеллектуальный вклад ОИЯИ в эти эксперименты благодаря синергии подгрупп. Сюда входят действующие в настоящее время эксперименты NOvA, T2K, DsTau и FASER.

NOvA и T2K — это эксперименты с длинной базой и ускорительными нейтрино, направленные на изучение нейтринных осцилляций, а именно определение порядка масс нейтрино и фазы нарушения CP четности. В то же время, дополнительной целью этих проектов является повышение точности измерения уже известных параметров. Ожидается, что оба эксперимента будут набирать данные до 2027 года с последующим финальным анализом всей накопленной статистики. В случае NOvA прогнозируется, что чувствительность к порядку масс нейтрино составит до 4σ , а к нарушению CP четности — менее 2σ . В случае T2K прогнозируемая чувствительность к CP нарушению составляет до 3σ .

Группа ОИЯИ участвует в эксперименте NOvA с 2014 года, внося разносторонний вклад, включая методические исследования, компьютеринг, программное обеспечение DDT и DAQ, трехфлейворный анализ данных (аппроксимации данных, выполненные учеными ОИЯИ, стали официальными результатами NOvA по измерению параметров осцилляций в 2018-2024 годах) и другие физические анализы и поиски новой физики. Кроме того, в Дубне построен Центр удаленного управления (англ. Remote Operation Center, ROC) NOvA для набора данных, а также хранилище данных и кластер CPU для анализа. Ученые ОИЯИ участвуют в менеджменте NOvA, занимая различные позиции, такие как руководитель группы экзотической физики, руководитель группы трехфлейворного анализа данных, менеджер ROC-Dubna, специалисты по набору данных, DDT и ROC.

Группа ОИЯИ участвует в эксперименте T2K с 2020 года, внося в основном вклад в модернизацию ближнего детектора, поиск аксионоподобных частиц и систематическую оценку неопределенности на основе проверок качества данных для каждого из периодов набора данных.

Несмотря на очень высокую конкуренцию в физике осцилляций нейтрино, все текущие и планируемые эксперименты прекрасно дополняют друг друга и обеспечивают не только перекрестную проверку, но и, будучи правильно объединенными, способны привести к результатам качественно более высоким по сравнению с полученными по отдельности. В частности, работая почти в одной и той же фазе осцилляций, NOvA и T2K используют существенно разные базы, что помогает решить проблему вырождения параметров. Таким образом, NOvA и T2K признают сильные стороны друг друга и проводят полностью совместный анализ с участием ОИЯИ в настоящий момент со стороны NOvA.

Дальнейшие перспективы в этой области нейтринной физики в основном связываются с будущими мега-проектами DUNE и Hyper-Kamiokande, целью которых является окончательное

завершение измерения параметров осцилляций нейтрино. ОИЯИ имеет значительный задел в этих экспериментах, внося ключевой вклад в комплексы ближних детекторов и выполняя физические анализы в NOvA и T2K, которые могут быть естественным образом перенесены на следующее поколение экспериментов с длинной базой. Методические исследования для комплексов ближних детекторов включают НИОКР для системы сбора света в жидком аргоне и строу-трубок для ближних детекторов DUNE: NDLAG и SAND, соответственно, а также модернизацию и методические исследования SuperFGD ближнего детектора T2K, который будет использован также и в Hyper-Kamiokande.

На данный момент официальное участие ОИЯИ не подтверждено ни в проекте DUNE, ни в HyperK, поэтому настоящее предложение сосредоточено на текущем участии ОИЯИ в NOvA и T2K, что позволит отслеживать эту физику и разрабатывать методы анализа и возможный вклад в будущие проекты.

В эксперименте FASER в ЦЕРН регистрируются и изучаются нейтрино высокой энергии, рождающиеся на коллайдере LHC. В этом эксперименте можно измерить сечение взаимодействия всех типов нейтрино в диапазоне энергий от нескольких сотен ГэВ до нескольких ТэВ — это уникальные измерения, которые никогда ранее не проводились. Изучение свойств нейтрино при этих энергиях даст ценную информацию для усовершенствования Монте-Карло генераторов нейтринных взаимодействий так же как и для измерений нейтрино сверхвысоких энергий крупномасштабными черенковскими обсерваториями, такими как Baikal-GVD, IceCube и KM3NeT/ARCA. Кроме того, использование протонных коллайдеров в качестве нового источника нейтрино дает новые перспективы для изучения свойств нейтрино, КХД, астрофизики и поиска физики за пределами Стандартной модели.

Оба эксперимента, FASER и NA65 (DsTau), вносят вклад в исследования тау нейтрино. Ожидается, что благодаря FASER общее количество зарегистрированных тау нейтрино значительно возрастет, и будут проведены исследования их свойств при высоких энергиях. Эксперимент NA65 направлен на изучение процесса образования тау нейтрино во взаимодействиях p-A и на уменьшение значительной систематической ошибки в предсказании потока тау нейтрино в пучках нейтрино от ускорителей.

Группа ОИЯИ принимает участие в NA65 с начала эксперимента и внесла свой вклад на всех этапах его проведения. ОИЯИ участвует в управлении Коллаборацией DsTau (председатель Совета Коллаборации), а также в руководстве анализом данных (ответственность за моделирование данных и распределенную по нескольким вычислительным центрам обработку данных). Группа работает над созданием нового программного обеспечения для эффективной обработки данных с очень высокой плотностью треков, а также для их физического анализа.

Настоящий проект направлен на продолжение участия ОИЯИ в экспериментах с ускорительными нейтрино и поддержание и укрепление существующих видов деятельности и задач в NOvA, T2K, FASER и NA65. Эти научные цели привлекают большое внимание студентов и молодых сотрудников ОИЯИ и обеспечивают очень хороший потенциал для роста и расширения участия ОИЯИ в этой превосходной физике с хорошей видимостью.

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

Цель

Основная цель проекта — измерение свойств нейтрино в ускорительных экспериментах.

За два десятилетия с момента открытия нейтринных осцилляций были проведены обширные исследования этого явления в многочисленных уникальных экспериментах, которые обеспечили точные измерения параметров, определяющих этот процесс. Стоит отметить, что

гипотеза существования нейтринных осцилляций была впервые высказана в 1950-х годах всемирно известным ученым из ОИЯИ — Бруно Понтекорво.

В настоящее время целью такого типа экспериментов является измерение параметров осцилляций нейтрино как фундаментальных характеристик этой частицы Стандартной модели с многочисленными приложениями как в теории, так и в других экспериментах с нейтрино. Как порядок масс нейтрино, так и фаза CP нарушения могут быть измерены с помощью пучков нейтрино от ускорителей, которые обладают способностью переключаться между режимами нейтрино и антинейтрино, что является важнейшей опцией для измерения CP и снятия вырождений параметров.

В настоящее время в мире проводятся два эксперимента по исследованию нейтрино на ускорителях, направленных на изучение трехфлейворных осцилляций: NOvA¹ и T2K². Оба эксперимента используют монохроматичный пучок вне оси, пиковая энергия которого близка к первому осцилляционному максимуму. T2K использует пучок нейтрино с пиком в 0,6 ГэВ от установки J-PARC в Токае, Япония, и 50-килотонный водный черенковский детектор Super-Kamiokande, расположенный на расстоянии 295 км. Пучок NOvA с пиком в 2 ГэВ производится в Fermilab недалеко от Чикаго, США, а 14-килотонный дальний детектор в виде трекового калориметра расположен на расстоянии 810 км в северной части штата Миннесота. В обоих экспериментах наблюдается появление электронных (анти)нейтрино и исчезновение мюонных (анти)нейтрино в пучке, в котором доминируют мюонные (анти)нейтрино. Измеряя эти нейтринные осцилляции вместе с их антинейтринными аналогами, и NOvA, и T2K исследуют порядок масс нейтрино, нарушение CP четности у лептонов, параметризованное фазой δ_{CP} , большее расщепление квадратов масс нейтрино Δm_{32}^2 и угол смешивания θ_{23} . Объединение результатов с результатами других действующих и предстоящих экспериментов может дать важные сведения о значениях пока неизвестных параметров. Но окончательный ответ, скорее всего, будет получен в экспериментах следующего поколения, таких как DUNE³ и HyperK⁴.

Помимо этой основной цели, проекты NOvA и T2K имеют широкий спектр других научных задач. Они включают поиск явлений за пределами Стандартной модели и изучение источников свободных частиц, таких как нейтрино от сверхновых, атмосферные нейтрино и мюоны, а также обнаружение магнитных монополей и темных фотонов, если они существуют.

До недавнего времени в качестве ускорительных рассматривались только те нейтрино, которые были получены с помощью выведенных протонных пучков. Однако на протонных коллайдерах также рождается большое количество как нейтрино, так и антинейтрино всех видов, причем в диапазоне очень высоких энергий, где взаимодействия нейтрино еще не изучались. В частности, LHC является коллайдером протонов с самой высокой энергией на данный момент, и поэтому он также является источником нейтрино с самой высокой энергией, созданных в контролируемых условиях.

Для обнаружения и изучения нейтрино от коллайдера, а также других слабо взаимодействующих частиц, FASER (ForwArD Search ExpeRiment)⁵ — относительно небольшой и недорогой детектор — был установлен на продолжении одного из протонных пучков в 480 м от точки взаимодействия протонов в детекторе ATLAS в сервисном тоннеле T112. Одной из целей эксперимента FASER является измерение сечения взаимодействия нейтрино всех типов через заряженные токи (CC , от англ. Charged current) в диапазоне энергий от нескольких сотен ГэВ до нескольких ТэВ. Использование коллайдера в качестве нового источника нейтрино будет иметь масштабные последствия для изучения свойств нейтрино, КХД, астрофизики и поиска физики за пределами Стандартной модели⁶.

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

² Abe K et al. (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A **659**, 106 (2011).

³ Abi B et al. (DUNE Collaboration), JINST **15** (2020) 08, T08008.

⁴ Abe K et al. (Hyper-Kamiokande Collaboration), 1805.04163 [physics.ins-det].

⁵ Ariga A et al., Phys. Rev. D **99**, 095011 (2019).

⁶ J. L. Feng et al., J. Phys. G **50** (2023) no. 3, 460 030501,

Эксперимент DsTau (NA65)⁷ в ЦЕРНе был предложен для измерения инклюзивного дифференциального сечения рождения в p-A взаимодействиях D_s мезона с последующим распадом на тау-лептон и тау-нейтрино. Эта реакция является основным источником тау-нейтрино в нейтринных пучках на ускорителях. В настоящее время ее сечение плохо известно, что приводит к большой систематической ошибке в оценке потока тау-нейтрино в пучках нейтрино. Результаты эксперимента должны привести к снижению соответствующих систематических неопределенностей в других экспериментах, включая текущие ускорительные эксперименты. Детектор DsTau также основан на методе использования ядерной эмульсии, который обеспечивает превосходное пространственное разрешение необходимое для регистрации короткоживущих частиц, таких как очарованные адроны или тау-лептон.

Актуальность и научная новизна

Все свойства, которые, как ожидается, будут изучены в рамках этого проекта, являются внутренними характеристиками нейтрино как частиц Стандартной модели. Они ценны как для теории, так и в качестве входных данных для других экспериментов с нейтрино, включая те, которые направлены на поиск новой физики.

Научные предпосылки проведения исследований нейтринных осцилляций многообразны. Одна из них — значительная роль, которую порядок масс играет в моделировании потоков нейтрино во время взрывов сверхновых⁸. Кроме того, этот параметр имеет решающее значение для оценки перспектив целого класса экспериментов в физике нейтрино, направленных на поиск безнейтринного двойного бета-распада⁹, и является входным параметром для экспериментов по прямому измерению масс нейтрино¹⁰ и поиску реликтовых нейтрино¹¹. Фаза нарушения CP в лептонном секторе, δ_{CP} , также имеет одно главное применение, которое невозможно переоценить — она может быть связана с проверкой происхождения асимметрии между материей и антиматерией во Вселенной¹².

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

За последние два десятилетия был достигнут значительный прогресс в физике нейтринных осцилляций, но порядок масс нейтрино и δ_{CP} все еще остаются неизмеренными. Текущее поколение экспериментов с ускорительными нейтрино (T2K и NOvA) поставило одной из своих основных целей изучение этих параметров. До них такие измерения не проводились. Другой тип экспериментов с нейтрино, который может измерять как δ_{CP} , так и порядок масс нейтрино, — это эксперименты с атмосферными нейтрино. Они используют нейтрино и антинейтрино, произведенные естественным образом — путем столкновения космических лучей с атмосферой. В настоящее время основным игроком в этой области является действующий эксперимент Super-Kamiokande¹³. Однако измерение δ_{CP} с атмосферными

⁷ Aoki S et al., JHEP **01**, 013 (2020).

⁸ Scholberg K J J, Phys. G **45**, 014002 (2018).

⁹ Dolinski M J et al., Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **69**, 219 (2019).

¹⁰ Qian X et al., Prog. Part. Nucl. Phys. **83**, 1 (2015).

¹¹ De Salas P F et al., Front. Astron. Space Sci. **5**, 36 (2018).

¹² Pascoli S et al., Phys. Rev. D **75**, 083511 (2007); Branco G et al., Phys. Lett. B **645**, 432 (2007).

¹³ Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab) Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).

нейтрино затруднено из-за сложности разделения событий нейтрино/антинейтрино. Тем не менее, NOvA, Super-Kamiokande и T2K являются единственными действующими экспериментами по осцилляциям, осуществляющие измерения δ_{CP} и порядка масс. Несмотря на то, что T2K, Super-Kamiokande и NOvA будут работать еще несколько лет, из текущих оценок чувствительности ясно, что они не смогут провести измерения порядка масс нейтрино и δ_{CP} на уровне значимости, соответствующему открытию. Хотя есть некоторые ожидания относительно совместных анализов. Недавно было объявлено о двух таких совместных анализах. Super-Kamiokande и T2K¹⁴, а также NOvA и T2K¹⁵ представили в 2023–2024 годах свои первые объединенные результаты полноценной совместной аппроксимации данных. Это был первый такой результат в физике нейтрино. Стоит отметить, что эксперименты физики высоких энергий на коллайдерах LEP и LHC проводили аналогичные анализы в течение десятилетий.

В настоящее время готовится несколько экспериментов, целью которых является завершение измерения δ_{CP} и порядка масс: DeepCore от IceCube¹⁶, JUNO¹⁷, ORCA¹⁸. Также есть будущие эксперименты на ускорителях с длинной базой Hyper-Kamiokande и DUNE, которые имеют очень похожую постановку. Ожидается, что их первые результаты будут объявлены ближе к концу десятилетия. В более отдаленной перспективе имеются предложения нескольких будущих проектов с неясным статусом: PINGU¹⁹, ICAL@INO²⁰, ESSvSB²¹, Protvino-to-ORCA²², SuperCHOOZ²³, второй дальний детектор в Копее²⁴ для Hyper-Kamiokande. В случае их одобрения, скорее всего, они начнут получать результаты в конце 2030-х годов. Таким образом, в предстоящие годы данные NOvA и T2K продолжают предоставлять ценную информацию о параметрах осцилляций нейтрино.

Другая фундаментальная характеристика нейтрино, сечение их взаимодействия через заряженные токи нейтрино (CC), была измерена в нескольких экспериментах с энергией до ~ 300 ГэВ. С другой стороны, нейтринные телескопы, такие как Baikal-GVD²⁵, IceCube²⁶, KM3NeT²⁷, регистрируют нейтрино гораздо более высоких энергий – несколько ТэВ и выше. Более того, измерения сечения в этих экспериментах имеют относительно большие статистические ошибки и могут иметь неизвестное систематическое отклонение. Коллайдерные нейтрино имеют энергию в промежуточном диапазоне, от нескольких сотен ГэВ до нескольких ТэВ, поэтому могут использоваться для уточнения измерений с астрофизическими нейтрино. Количество таких нейтрино, образующихся в точках взаимодействия LHC, огромно. Столкновения протонов с протонами обычно приводят к образованию большого количества адронов вдоль оси столкновения пучка, которые могут наследовать долю $O(1)$ импульсов протона. Распад этих адронов приводит к мощному потоку высокоэнергетических нейтрино, сколламированных около оси протонных пучков.

В 2024 году коллаборация FASER впервые сообщила об обнаружении мюонных и электронных нейтрино от коллайдера и оценила сечение CC-взаимодействия для них в неисследованной до сих пор области энергий от нескольких сотен ГэВ до нескольких ТэВ²⁸. Эти результаты были получены после анализа относительно небольшой выборки данных,

¹⁴ Abe K et al. (T2K and Super-Kamiokande Collaborations), 2405.12488 [hep-ex].

¹⁵ Atkin E "Results from the T2K+NOvA Joint Analysis", KEK seminar, 2024; Vallari Z, "Results from a joint analysis of data from NOvA and T2K", FNAL seminar, 2024.

¹⁶ Ishihara A et al. (IceCube Collaboration), PoS ICRC2019, 1031 (2020).

¹⁷ Adam T et al. (JUNO Collaboration), 1508.07166 [physics.ins-det].

¹⁸ Adrian-Martinez S et al. (KM3Net Collaboration), J. Phys. G **43**, 084001 (2016).

¹⁹ Aartsen M et al. (IceCube Collaboration), J. Phys. G **44**, 054006 (2017).

²⁰ Ahmed S et al. (ICAL Collaboration), Pramana **88**, 79 (2017).

²¹ Blennow M et al., Eur. Phys. J. C **80**, 190 (2020).

²² Akhondinov A V et al. (P2O Proto-collaboration), Eur. Phys. J. C **79**, 758 (2019).

²³ Cabrera A, "The SuperChooz experiment: Unveiling the opportunity", CERN seminar, 2022, <https://indico.cern.ch/event/1215214/>

²⁴ Abe K et al. (Hyper-Kamiokande Collaboration), PTEP **2018** 6, 063C01 (2018).

²⁵ Avrorin A D et al., Nucl. Instrum. Meth. A **742**, 82 (2014).

²⁶ Aarsten M et al., Nature **551**, 596 (2017).

²⁷ Chiarusi T, Nucl. Instrum. Meth. A **952**, 161653 (2020).

²⁸ Abraham R M et al., Phys. Rev. Lett. **133**, 021802 (2024).

соответствующей $9,5 \text{ фб}^{-1}$ интегральной светимости, собранной с помощью специального детектора FASERv, части установки, предназначенной для физики нейтрино и основанной на методике ядерной эмульсии. LHC Run 3 продолжается, будет собрано больше данных, анализ их продолжается, и, таким образом, после завершения обработки полного набора данных Run 3 (соответствующих $\sim 250 \text{ фб}^{-1}$) можно ожидать значительное улучшение точности результата. Помимо обнаружения нескольких тысяч электронных и мюонных нейтрино, этот детектор накопит и около $20 \nu_\tau$ СС-взаимодействий. Это значительно увеличит мировую статистику реконструированных тау-нейтрино и позволит изучать их при гораздо более высоких энергиях $E_\nu \sim \text{ТэВ}$. Благодаря высокому пространственному разрешению детектор FASERv сможет определить характеристики каждого нейтринного события, включая, например, распределение множественности и импульса заряженных частиц. Эти параметры представляют ценную информацию для настройки Монте-Карло генераторов, используемых для моделирования событий нейтрино высокой энергии, таких как GENIE²⁹.

Помимо исследования нейтринных взаимодействий, регистрация нейтрино в детекторе FASERv может также быть использована для исследования процессов их рождения на коллайдере. Существующие детекторы LHC хорошо перекрывают центральную область, однако образование частиц в передней области не контролируют. Таким образом, измерение потока и спектра нейтрино в FASERv даст дополнительные ограничения на модели адронных взаимодействий, в которых образуются нейтрино, и может помочь их подтвердить или улучшить. Эти модели, в частности, используются для описания многопартонных взаимодействий и событий на LHC, а также для моделирования событий с участием космических лучей. Исследование процессов образования нейтрино также будет ключевой входной информацией для измерений астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий большими черенковскими обсерваториями, такими как Baikal-GVD, IceCube и KM3NeT/ARCA. Одной из основных целей этих экспериментов является поиск астрофизических нейтрино высоких энергий. Это зависит от атмосферного нейтринного фона, важным компонентом которого является распад тяжелых мезонов. Ожидается, что этот источник фона станет доминирующим при самых высоких энергиях, однако, он еще слабо изучен. Измерение потока нейтрино от такого распада с помощью FASERv предоставит важные данные для всех текущих и будущих телескопов нейтрино высоких энергий.

Эксперимент NA65 (DsTau) направлен на измерение рождения тау-нейтрино во взаимодействиях p-A в CERN-SPS. Точное знание потока тау-нейтрино в пучках нейтрино от ускорителей необходимо для текущих и будущих экспериментов с нейтрино, таких как FASER, SND@LHC³⁰, SHiP³¹, в которых будут изучаться взаимодействия тау-нейтрино с относительно высокой статистикой. Изучение взаимодействий тау-нейтрино является важным для поиска явлений за пределами Стандартной модели. Например, универсальность слабых взаимодействий для разных типов лептонов может быть проверена в процессах рассеяния нейтрино в качестве дополнения к измерениям в экспериментах LHCb³² и Belle II³³, где наблюдались некоторые отклонения от СМ.

Методы и подходы

Основным инструментом для всех экспериментов в этом проекте, за исключением FASER, является пучок ускорительных нейтрино, который создается путем вывода протонного пучка на неподвижную мишень. В случае экспериментов NOvA и T2K пучок нейтрино проходит сотни километров, чтобы позволить произойти осцилляциям, и регистрируется дальними

²⁹ Alvarez-Ruso L et al. (GENIE Collaboration), Eur. Phys. J. ST **230**, 4449 (2021).

³⁰ Acampora G et al., JINST **19**, 05 (2024).

³¹ Ahdida C et al., Eur. Phys. J. C **82**, 5 (2022).

³² Aaij R et al., JHEP **08**, 055 (2017).

³³ Adachi I et al., Phys. Rev. Lett. **131**, 1801 (2023).

детекторами. FASER — первый эксперимент, который использует нейтрино высокой энергии от коллайдера LHC для изучения их свойств.

NOvA

В случае NOvA ускорительный комплекс в Фермилабе, унаследованный от Тэватрона, используется для ускорения протонов до энергии 120 ГэВ, которые направляются на углеродную мишень. Направление нейтринного пучка сохранилось прежним, как и для предшественника NOvA, эксперимента MINOS. Магнитные линзы (“горны”), размещенные 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 сфокусированного пучка. Эти пионы и каоны, проходя через канал распада, порождают нейтрино. В случае нейтринного режима (режима антинейтрино) пучок имеет следующий состав — 95% ν_μ , 4% $\bar{\nu}_\mu$, 1% $\nu_e + \bar{\nu}_e$ (93% $\bar{\nu}_\mu$, 6% ν_μ , 1% $\nu_e + \bar{\nu}_e$). Фон с неправильным знаком и компонента ν_e ($\bar{\nu}_e$) в основном появляются в пучке из-за распадов мюонов.

Ускорительный комплекс в Фермилабе постоянно модернизируется для повышения интенсивности нейтринного пучка. Таким образом, проектная мощность протонного пучка для NOvA составляла 700 кВт, а несколько лет назад были установлены мишень и горны, способные работать с пучком мощностью 900 кВт. В настоящее время эксперимент работает при средней мощности пучка 850 кВт. Последний рекорд, установленный ускорителем FNAL летом 2024 года, соответствовал мощности пучка 1018 кВт. Эксперименты с нейтрино на ускорителе измеряют экспозицию в терминах числа протонов, доставленных к мишени (POT). Самый недавний анализ NOvA был выполнен с 26.61×10^{20} POT (пучок нейтрино) и 12.5×10^{20} POT (пучок антинейтрино). Ожидается, что к концу набора данных экспозиция пучка антинейтрино примерно удвоится.

Нейтрино проходят через земную кору и достигают ближнего детектора, который расположен на расстоянии 1 км после мишени для измерения начального потока нейтрино. Это важный инструмент для контроля изначального состава пучка, фонов и систематики. Дальний детектор расположен на расстоянии 810 км от мишени и измеряет поток нейтрино после осцилляций. Оба детектора NOvA расположены вне оси пучка под углом 14 мрад, что позволяет получить узкий энергетический пик при 2 ГэВ и подавить фоны от событий более высокой энергии. Детекторы NOvA представляют собой идентичные трековые калориметры, изготовленные из ячеек ПВХ, заполненных жидким органическим сцинтиллятором на основе минерального масла с 5% псевдокумола. Эти ячейки составлены в плоскости, а плоскости с горизонтальной и вертикальной ориентацией чередуются. Дальний детектор (ближний детектор) имеет размеры 15,4 м x 15,4 м x 60 м (4 м x 4 м x 16 м). Экспериментальная установка показана на Рисунке 1.

Детекторы оптимальны для измерения ν_e ($\bar{\nu}_e$) и ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) взаимодействий через заряженные токи. Благодаря идентичным детекторам систематические неопределенности, соответствующие сечениям взаимодействия нейтрино и потоку, частично сокращают друг друга. Предсказания, основанные на экстраполяции измеренных данных в ближнем детекторе, используются для аппроксимации данных дальнего детектора. NOvA разработала два метода аппроксимации, основанные на частотном и байесовском подходах, и оба показали схожую результативность.

Члены коллектива из ОИЯИ много лет работают в группе анализа трехфлейворных осцилляций в NOvA с различными задачами в зависимости от потребностей группы. Недавний анализ данных NOvA 2024 года с увеличенной статистикой и улучшенными методами анализа был выполнен с заметным вкладом физиков ОИЯИ. Вклад в этот раунд анализа включал разработку методов оценки энергии нейтрино и аппроксимацию данных, а также кумулятивный

вклад в другие области анализа за последние 8 лет (разработка критериев отбора данных, процедура экстраполяции, систематика, процедуры аппроксимации данных и т. д.).

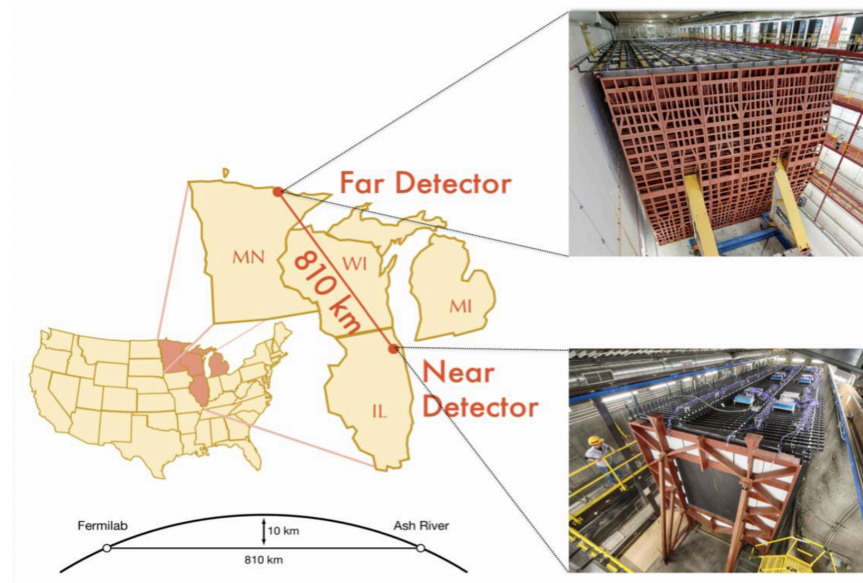


Рисунок 1. Постановка эксперимента NOvA и детекторы.

Еще одним видом деятельности, в котором участвуют физики ОИЯИ, является совместный анализ данных NOvA и T2K. Недавно были объявлены результаты первого такого анализа, и сейчас группа завершает работу над статьей. Физики ОИЯИ участвовали в разработке этого анализа, а также в аппроксимации данных. В будущем планируется окончательный совместный анализ данных NOvA и T2K. Несколько дополнительных совместных анализов рассматриваются коллаборациями. Это может включать совместные поиски стерильных нейтрино, NSI, измерения сечений и т. д. Физики ОИЯИ планируют принять участие в этих работах.

Коллаборация NOvA при участии группы ОИЯИ произвела анализ нейтринных взаимодействий, направленный на обнаружение сигналов сверхновых. Эта работа была посвящена разработке комплексной системы для обнаружения, отбора и анализа нейтринных взаимодействий в детекторах NOvA, с целью идентификации сигналов от сверхновых с коллапсом ядра. Система была успешно внедрена и развернута на детекторах NOvA, и подготовлена для интеграции в систему раннего оповещения о сверхновых (SuperNova Early Warning System, SNEWS) для комбинированного анализа наблюдений сигналов в нескольких экспериментах. По этой работе в 2024 году была защищена кандидатская диссертация. Кроме того, этот анализ был расширен для идентификации нейтринных сигналов с последних стадий эволюции звезд — нейтринных сигналов предсверхновых — что дает важную информацию о процессах, ведущих к событиям коллапса ядра.

Эксперимент NOvA добился значительных успехов в поиске медленных магнитных монополей и в понимании характеристик отклика детектора на такие частицы. Команда, включая физиков ОИЯИ, разработала высокоэффективную систему обнаружения медленных монополей на поверхности Земли с использованием высокоsegmentированного жидкостцинтилляционного дальнего детектора NOvA, оптимизированного как в режимах низкого, так и высокого усиления. Были созданы два тестовых стенда для измерения отклика электроники и сцинтиллятора NOvA, включая зарядовые и временные характеристики, коэффициент Биркса и черенковскую компоненту световыхода. Проведено моделирование с новыми параметрами для оценки отклика детектора на медленные монополи, включая оценку

фона и оптимизацию сигнала для максимальной эффективности. Анализ находится практически на завершающей стадии.

Благодаря расположению на поверхности дальнего детектора NOvA его можно использовать в качестве телескопа для наблюдения за космическими и атмосферными частицами. Эта конфигурация предоставляет прекрасную возможность для детального изучения потоков атмосферных нейтрино и мюонов, включая исследования сезонных эффектов, корреляций с солнечными и погодными событиями, геомагнитными эффектами, а также мюонами и ливнями высоких энергий и другими физическими явлениями. Группа из Дубны активно участвует в этих направлениях исследований. Кроме того, дубненская группа в рамках коллаборации NOvA активно участвует в поиске экзотических частиц, способствуя открытию новых явлений и расширению научных знаний.

Была развита компьютерная инфраструктура ОИЯИ с использованием облачных и Грид-технологий. Она эффективно используется для выполнения локальных вычислительных задач, а также является частью системы глобальной распределенной вычислительной инфраструктуры NOvA, что позволяет компенсировать пиковые нагрузки (например, перед конференциями). Специально для эксперимента NOvA были приобретены и добавлены в облако ОИЯИ 39 новых серверов, что увеличило его вычислительные ресурсы примерно на 1000 процессорных ядер и около 6 ТБ оперативной памяти. Эти серверы были использованы для размещения виртуальных машин нового кластера пакетной обработки заданий и Грид-сайта Open Science Grid (OSG). Это дало возможность обрабатывать как задачи локальной команды NOvA в ОИЯИ, так и задачи NOvA, поступающие из OSG, внося непосредственный вклад в коллаборацию NOvA. В этой системе каждый компонент Грид-сайта виртуализирован, что стало первым опытом применения технологии виртуализации Грид-ресурсов в ОИЯИ и важным шагом для дальнейшего развития вычислительных моделей в институте. По мере роста виртуального вычислительного кластера одной из приоритетных задач стала разработка локального хранилища данных, предназначенного для сохранения копий часто запрашиваемых экспериментальных данных. Создание такой системы хранения было необходимо для повышения эффективности локального анализа данных в ОИЯИ. Для реализации бэкенда хранилища было приобретено и введено в эксплуатацию 17 серверов хранения, которые стали частью облачной системы хранения Ceph. В результате было обеспечено более 3,8 ПБ дискового пространства для хранения экспериментальных данных.

Еще в 2015 году в ОИЯИ группой из Дубны был создан первый не-американский центр удаленного управления для эксперимента NOvA (ROC-Dubna). Наличие ROC-Dubna позволяет физикам из ОИЯИ, а также из ИЯИ и ФИАН (участники коллаборации NOvA) контролировать набор данных и следить за состоянием детекторов и нейтринного комплекса NuMI в Фермилабе (США). ROC-Dubna полностью оборудован аппаратным и программным обеспечением, необходимым для процедур управления и мониторинга. Подключение к системе контроля за состоянием детектора в режиме реального времени осуществляется с помощью удаленных сеансов VNC (Virtual Network Connection) через ssh (secure shell) туннели. Процессы настроены для работы в операционных системах Alma Linux, Ubuntu и OSX. Скрипты для работы ROC написаны на Python, а для обеспечения безопасности используется система аутентификации FNAL Kerberos. Веб-приложения, подключенные к базам данных, используются для мониторинга пучка, визуального контроля за состоянием детекторов (с помощью видеокамер) и проверки качества записанных данных. Для аудио- и видеосвязи используется платформа Zoom, а также международные стационарные и мобильные телефоны. В центре могут работать как дежурные операторы, так и специалисты по устранению неполадок или разработке нового программного обеспечения. Кроме того, ROC-Dubna может служить учебным центром для студентов и молодых ученых, а также демонстрационной площадкой для преподавателей, школьников и широкой общественности.

Эксперимент T2K (Рисунок 2) начал набирать данные на четыре года раньше NOvA, с 2010 года. Протонный синхротрон в J-PARC используется для формирования пучка нейтрино/антинейтрино для этого эксперимента. В 2020 году была достигнута рекордная мощность пучка 515 кВт для этого ускорителя (экспериментальная установка работает стабильно при этом значении).

Комплекс ближних детекторов T2K, расположенный на расстоянии 280 м от мишени, состоит из осевого детектора INGRID (Interactive Neutrino GRID) и установки ND280, расположенной под углом 2.5° относительно оси пучка. INGRID представляет собой сэндвич-структуру, собранную из крестообразных модулей. Модули состоят из железных плоскостей и сегментированного сцинтиллятора. Нейтринные события идентифицируются по мюонным трекам, которые задают направление и профиль пучка.

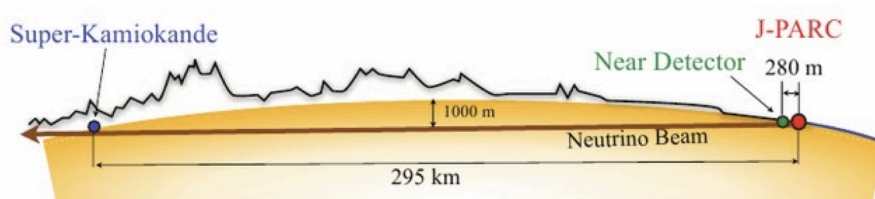


Рисунок 2. Постановка эксперимента T2K

Комплекс детекторов, необходимый для физики осцилляций, ND280, расположенный в том же экспериментальном зале, но под углом к пучку, состоит из нескольких частей (Рисунок 3):

- сцинтилляционный детектор SuperFGD с двумя горизонтальными время-проекционными камерами и время-пролетными детекторами вокруг этого нового трека;
- трековый детектор на основе время-проекционных камер;
- два высокосегментированных сцинтилляционных детектора FGD (Fine Grained Detector);
- электромагнитный калориметр ECAL, дополняющий внутренние детекторы для полной реконструкции всех событий;
- SMRD (Side Muon Range Detector) для обнаружения мюонов с большими углами вылета относительно направления пучка, который также работает как система вето для космических мюонов.

Эти устройства расположены внутри магнита бывшего эксперимента UA1.

Физики ОИЯИ принимали участие в недавней модернизации и исследованиях детектора SuperFGD. Это обновление положило начало фазе II эксперимента T2K с ожидаемым снижением общей систематической ошибки с $5\pm 6\%$ до $3\pm 4\%$. Это снижение важно для программы по физике осцилляций T2K и имеет решающее значение для будущего эксперимента Нурег-Камиоканде, который будет использовать тот же комплекс ближних детекторов.

Дальний детектор T2K — это Super-Kamiokande, расположенный на расстоянии 295 км от J-PARC. Его черенковский детектор, представляющий собой цилиндр диаметром 39 м и высотой 42 м, заполненный 50 кт чистой воды, состоит из двух частей: внутренней и внешней. События от внутреннего детектора (в котором геометрическое покрытие фотоумножителями составляет 40%) используются для физической программы. Внешний детектор обеспечивает защиту от фонов и работает как система вето для атмосферных мюонов. Super-Kamiokande может детектировать атмосферные, ускорительные и солнечные нейтрино, благодаря чему его научная программа очень насыщена.

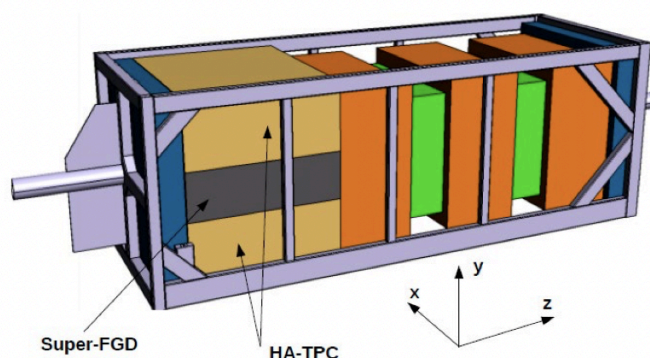


Рисунок 3. Модель модернизации детектора ND280. В верхней части находятся две ТРС (коричневые) с установленным между ними сцинтилляционным детектором Super-FGD (серым). Следующая за ними трекерная система, состоящая из трех ТРС (оранжевых) и двух FGD (зеленых), осталась неизменной с предыдущей фазы. Детекторы TOF на этом графике не показаны. Пучок нейтрино движется вдоль оси z.

Группа из ОИЯИ занимается поиском аксионоподобных частиц, используя данные ближнего детектора ND280. Аксионы и аксионоподобные частицы (ALP) были предложены в связи с объяснением многих загадок природы, таких как проблемы сильного CP и темной материи, они повсеместно распространены в теории струн. ALP в масштабах масс от МэВ до ГэВ представляют особый интерес для экспериментов с пучком и фиксированной мишенью и были изучены в контексте тяжелых аксионов, пространство параметров которых выходит за рамки традиционных моделей аксионов КХД. Группа ОИЯИ планирует искать ALP, используя данные ближнего детектора ND280, и ожидает получить новые ограничения на параметры модели ALP.

Физики ОИЯИ продолжают работать над оценкой систематической неопределенности на основе проверок качества данных для каждого периода набора данных. Эти исследования учитывают изменения, связанные с детектором, с течением времени и будут включены в предсказания Монте-Карло, и могут повлиять на точность результатов.

Новым направлением для группы из ОИЯИ является работа в группе машинного обучения ND280. Это позволит интегрировать передовые методы машинного обучения для улучшения интерпретации данных и исследовать инновационные решения для повышения точности анализа.

Теоретики из ОИЯИ планируют работать над реализацией в инструментах анализа T2K нескольких обновленных феноменологических схем для расчета электромагнитных форм-факторов нуклона, необходимых для анализа нейтринных взаимодействий в ближних детекторах T2K. Ожидается, что это улучшит оценки влияния неопределенности в некоторых из наиболее точных текущих моделей форм-факторов на предсказание нейтринных событий³⁴.

Также планируется исследовать потенциал конкурирующих феноменологических моделей квазиупругого рассеяния нейтрино-ядро для точного количественного описания взаимодействий (анти)нейтрино с мишенями детекторов INGRID и ND280. В частности, будет протестирована модель «бегущей аксиальной массы»³⁵ (иногда называемая «дубненской моделью»). Ожидаемые результаты: определение уточненных параметров модели релятивистского ферми-газа (импульсы Ферми, энергии связи, эффективные массы нуклонов в ядрах) на основе нового глобального соответствия современным данным по рассеянию электронов на ядрах.

³⁴ Kuzmin K S, Levashko N M, and Krivoruchenko M I, "Electromagnetic nucleon form factors in the extended vector meson dominance model," Submitted to Phys. Rev. D (manuscript DX13563).

³⁵ Kakorin I D, Naumov V A, and Samoylov O B JETP Lett. **119**, 813 (2024); Kakorin I D, Kuzmin K S, and Naumov V A, Eur. Phys. J. C **81**, 1142 (2021); Kakorin I D, Kuzmin K S, Naumov V A, Phys. Part. Nucl. Lett. **17**, 265 (2020).

Дальнейшие перспективы

В настоящее время есть два будущих эксперимента с ускорительными нейтрино и длинной базой с четкими сроками строительства: DUNE станет преемником NOvA в качестве следующего флагмана Фермилаба в физике нейтрино, в то время как Hyper-Kamiokande унаследует установки и физическую программу T2K. Команда ОИЯИ накопила значительный задел в этих экспериментах, внося ключевой вклад в комплексы ближних детекторов и выполнив физический анализ в NOvA и T2K, который может быть естественным образом распространен на следующее поколение экспериментов с длинной базой. Хотя DUNE и HyperK выходят за рамки этого проекта, мы хотели бы также кратко описать их.

По сравнению с NOvA, эксперимент DUNE будет иметь несколько основных отличий. Ожидается, что этот эксперимент начнет сбор данных в конце 2020-х годов. Ускорительный комплекс в Fermilab в настоящее время модернизируется для обеспечения протонного пучка ~1,2 МВт для DUNE (фаза I эксперимента), с планами по повышению мощности пучка до 2,1 МВт после нескольких лет работы путем замены некоторых частей ускорительного комплекса (фаза II). Кроме того, все компоненты нейтринного пучка (мишень, горн, канал распада) будут отличаться от NOvA, и нейтрино будут проходить 1300 км до комплекса дальних детекторов, который будет состоять из четырех модулей. Два модуля TPC с размерами 19 м x 18 м x 66 м и в общей сложности 17 кт жидкого аргона (LArTPC) каждый будут установлены во время фазы I. Два других модуля будут установлены для фазы II. Планируется, что комплекс ближних детекторов будет состоять из трех детекторов³⁶: NDLAr, который также будет жидким аргоновым TPC с 35 модулями для сходства с модулями дальних детекторов DUNE с меньшим размером, еще один детектор NDGA_g, который будет измерять заряд мюонов, покидающих NDLAr после взаимодействия нейтрино, состоящий из магнита и газообразного аргонового TPC. Эти два детектора будут размещены на подвижной платформе, что позволит им обеспечивать измерения пучка в различных положениях вне оси (концепция DUNE-PRISM). Третий детектор System for on-Axis Neutrino Detection (SAND) будет размещен на оси пучка и будет состоять из трекера из строу-трубок (STT), размещенного внутри магнита.

ОИЯИ уже внес значительный вклад в НИОКР ближних детекторов DUNE. Группа отвечала за разработку считывания света в жидком аргоне. Для подтверждения возможности работы всего детектора был построен демонстратор 2x2 для испытаний на пучке NuMI в Фермилабе. Демонстратор содержит 4 прототипа меньших модулей TPC с размерами 0,67 x 0,67 x 1,81 м³. В настоящее время этот прототип набирает данные в Фермилабе. Был построен полноразмерный модуль ближнего детектора, так называемый полномасштабный демонстратор (FSD), который также был подвергнут воздействию космических мюонов. Группа ОИЯИ участвовала в изготовлении всех этих модулей в Бернском университете в рамках двустороннего соглашения.

Исследования и разработка строу-трубок проводились как общее методическое исследование, которое может быть использовано для современных детекторов со строу-трубками (SPD, SHiP, COMET, SAND). Физики ЛФВЭ и ЛЯП провели серию испытаний в ЦЕРНе с различными прототипами и электроникой. Все это поможет в будущих проектах выбрать оптимальный вариант для детекторов.

Hyper-Kamiokande будет иметь очень похожую установку, как и эксперимент T2K. Модернизированный комплекс ближнего детектора T2K будет использоваться так же, как и для HyperK. Планируется модернизация ускорительного комплекса для получения протонного пучка мощностью 1,3 МВт. Вместо SuperK в другом месте строится более крупный дальний детектор, вмещающий 258 кт воды. Все это вместе должно обеспечить более высокую чувствительность к параметрам осцилляций, чем эксперимент T2K. Команда ОИЯИ участвовала в модернизации ближнего детектора T2K/HyperK путем методических исследований, установки и калибровки его новой внутренней части, SuperFGD.

³⁶ Abed Abud A et al. (DUNE Collab) Instruments 5 4 31 (2021)

В настоящее время ОИЯИ не является официальным участником экспериментов DUNE или НурегК, и поэтому настоящий проект сосредоточен на существующих обязательствах команды ОИЯИ в NOvA и T2K, которые одобрены для работы в Фермилаб и J-PARC соответственно до 2027 года. В это время команды ОИЯИ продолжают физические анализы и проработают возможные вклады в будущие проекты.

FASER и NA65(DsTau)

Основными задачами эксперимента FASER являются поиск легких, крайне слабо взаимодействующих частиц (аксионо-подобных, темных фотонов и т.п.) и изучение нейтрино от LHC³⁷. Детектор расположен в тоннеле T112, который соединяет кольца супер протонного синхротрона (SPS) и LHC, на продолжении одного из протонных пучков (LOS) примерно в 480 м от точки пересечения протонов в установке ATLAS (Рисунок 4). Заряженные частицы, рожденные в точке взаимодействия ATLAS и вылетающие в переднюю область, отклоняются магнитами LHC и задерживаются примерно 100 м камня и бетона. Таким образом, расположение установки FASER гарантирует попадание в нее высокоинтенсивного пучка нейтрино при сильном подавлении фона. Установка FASER состоит из пассивного детектора нейтрино на основе слоев вольфрама и ядерной эмульсии (FASERv), двух сцинтилляционных систем вето, дополнительных сцинтилляционных триггерных счетчиков, трекового магнитного спектрометра, станции предварительного анализа электромагнитных ливней (preshower) на основе кремниевых пикселей и электромагнитного калориметра (Рисунок 5).

Исследования физики нейтрино в эксперименте FASER в основном проводятся с помощью специального детектора FASERv, который состоит из 730 слоев вольфрамовых пластин толщиной 1,1 мм, перемежающихся эмульсионными пленками. При ширине 25 см и высоте 30 см он имеет общую массу 1,1 тонны. Эмульсионные пленки обеспечивают превосходное пространственное и угловое разрешение для идентификации взаимодействий нейтрино всех типов по заряженному току, хотя их обработка, сканирование и анализ требуют значительного времени.

Эксперимент NA65, как и FASERv, использует ядерный эмульсионный детектор. За последние 20 лет эта методика продемонстрировала впечатляющий прогресс. Скорость обработки исходных данных (считывание трековой информации в пленках автоматическими сканерами) возросла более чем на 3 порядка и для самого мощного такого устройства (Nucleon Track Selector³⁸ в Университете Нагоя) превышает 5000 см²/час. Это делает возможными крупномасштабные эксперименты с эмульсиями, такие как FASERv и NA65.

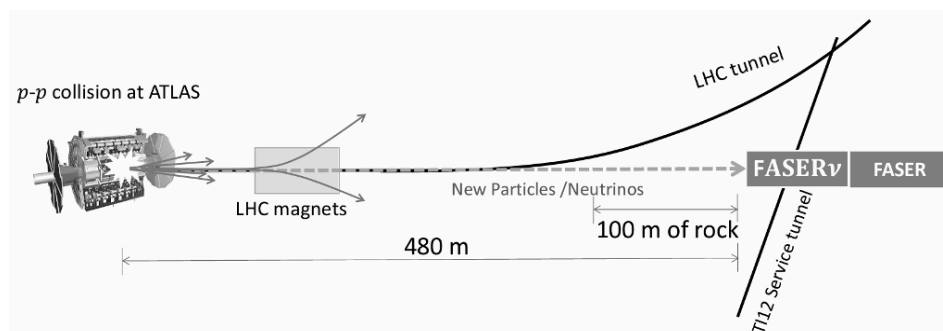


Рисунок 4. Размещение эксперимента FASER на LHC.

³⁷ Abreu H et al., JINST **19**, 05066 (2024).

³⁸ Yoshimoto M et al., PTEP **2017**, 102H01 (2017).

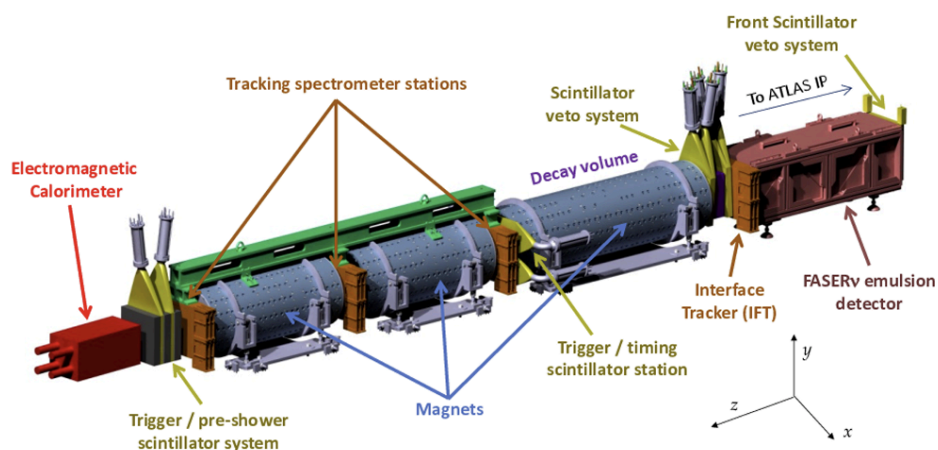


Рисунок 5. Эскиз эксперимента FASER.

Обработка первичных данных (сканирование эмульсии) выполняется в Университете Нагоя всеми группами, участвующими в проекте. Анализ оцифрованных данных (реконструкция треков, алаймент, поиск вершин взаимодействия и физический анализ) распределен по нескольким вычислительным центрам в разных странах, поскольку требуются значительные компьютерные ресурсы. Анализ, выполняемый с использованием распределенных ресурсов обработки и хранения данных, управляется группой ОИЯИ как для экспериментов FASERv, так и для NA65.

Анализ экспериментальной информации в детекторах FASERv и NA65 после оцифровки аналогичен анализу в электронных экспериментах. Однако он очень сложен из-за высокой степени наложения событий (pileup) и большой плотности треков в эмульсионных детекторах, которая превышает 10^5 на см^2 . Программы и алгоритмы, используемые для обработки данных в предыдущих эмульсионных экспериментах, таких как OPERA необходимо обновить или разработать новые инструменты. Опыт, полученный группой ОИЯИ при анализе данных эмульсии в эксперименте OPERA, поможет эффективно участвовать в этой работе, также как и в физическом анализе экспериментальных данных.

Синергия между проектами

Нейтринные эксперименты с длинной базой NOvA и T2K, решая задачу измерения неизвестных параметров осцилляций, имеют схожую постановку. Тем не менее, конструкции детекторов и методы работы с ними существенно различаются, что оставляет возможность для улучшения результатов путем совместного анализа, по сравнению с каждым по отдельности. Несмотря на запрет одновременного участия одних и тех же людей в обработке данных обоих экспериментов, наличие в ОИЯИ экспертов по элементам анализа может сыграть синергетическую роль.

Например, одной из важных систематик для измерений являются нейтрино-нуклонные сечения, для которых NOvA и T2K реализуют разный подход и используют разные Монте Карло генераторы и их настройки. В этой ситуации представляется разумным проводить взаимные проверки в каждом из экспериментов и использовать эти перекрестные проверки для лучшего понимания систематических неопределенностей. Участники проекта от ОИЯИ обладают необходимым опытом для выполнения такой работы, как на уровне теоретических вычислений, так и их внедрения в генераторы Монте Карло.

Примером уже проявившейся синергии между экспериментами является представленный в 2024 году совместный анализ. Сотрудники ОИЯИ уже участвовали в этом анализе со стороны NOvA и было бы очень продуктивно для следующих реализаций иметь, не нарушая правил экспериментов, таких же коллег из ОИЯИ со стороны T2K.

Отметим также, что оба эксперимента ведут анализ данных с целью поиска экзотических объектов и нестандартных взаимодействий. Обсуждение теоретических и методологических подходов может послужить лучшему пониманию деталей этой работы.

Синергия между экспериментами DsTau и FASER достаточно очевидна, поскольку оба эксперимента нацелены на изучение различных аспектов рождения и взаимодействия тау-лептонов с помощью методики ядерной фотоэмульсии. Эта методика, уникально развитая в эксперименте OPERA, является в настоящий момент самой прецизионной для измерения треков заряженных частиц, а участие группы ОИЯИ в работах по OPERA создало хороший задел для полноценного участия в экспериментах DsTau и FASER.

Методики

Группы ОИЯИ уже внесли ценный вклад в детекторы NOvA и T2K, и на текущем этапе экспериментов члены ОИЯИ планируют сосредоточиться на физическом анализе.

Некоторый методический вклад ожидается для эксперимента FASER. Установка FASER состоит из детектора нейтрино, системы вето, магнитного спектрометра, “прешауэра” и электромагнитного калориметра. Последний состоит из 4 запасных модулей LHCb ECAL. Это было быстрое, экономное и довольно эффективное решение для того, чтобы подготовить установку вовремя до начала Run 3. Калориметр в основном используется для обнаружения электронов и гамма-квантов высокой энергии (до ТэВ) от распада экзотических частиц — темных фотонов, аксионоподобных частиц и других. Однако в настоящее время он имеет очень плохое разрешение по поперечной координате, скромное разрешение по энергии, отсутствие продольной сегментации и толщину, не вполне достаточную для измерений в диапазоне нескольких ТэВ.

Группа ОИЯИ имеет значительный опыт в создании электромагнитных калориметров. В частности, несколько вариантов конструкции элементов калориметра типа “шашлык” и считывания сигнала от них уже были разработаны и построены для эксперимента COMPASS³⁹ и предложены для дальнейшего использования в детекторах MPD и SPD. Используя этот опыт (и даже запасные элементы детекторов), можно собрать электромагнитный калориметр с параметрами, лучше соответствующими требованиям и задачам эксперимента FASER. Проект включает НИОКР-исследования элементов нового калориметра FASER и его возможное использование в Run 3. НИОКР также может предоставить ценную информацию для выбора оптимальной конструкции калориметра для детектора FASER2⁴⁰ в Run 4 на LHC.

Ожидаемые результаты

Ожидается, что при участии группы из ОИЯИ будут получены следующие результаты.

Эксперимент NOvA:

- измерение иерархии масс нейтрино и отклонение CP-сохранения со значимостью $\leq 4\sigma$ и $\leq 2\sigma$ соответственно;
- подготовка мониторинга и анализа для обнаружения сигнала нейтрино от сверхновой;
- новые ограничения на существование магнитного монополя с данными с высоким коэффициентом усиления, более высокой статистикой и обновленным триггером и анализом;
- измерения спектров атмосферных мюонов для различных условий;

³⁹ Chirikov-Zorin I et al., Nucl. Instrum. Meth. A **936**, 141 (2019).

⁴⁰ Feng J L et al., J. Phys. G **50**, 030501 (2023).

- первый анализ осцилляций NOvA, выполненный с атмосферными нейтрино;
- работа ROC-Dubna и вычислительной системы.

Эксперимент T2K:

- лептонная CP-фаза δ_{CP} может быть определена с точностью лучше 23 градусов для всех возможных значений δ_{CP} , а нарушение CP может быть обнаружено со статистической значимостью больше 3σ (5σ) для 76% (57%) диапазона параметра δ_{CP} .

Физики ОИЯИ будут участвовать в тех совместных анализах NOvA+T2K, которые эти две коллаборации согласятся выполнить.

Эксперименты NA65 (DsTau) и FASER:

- В настоящее время в эксперименте FASER обработана только относительно небольшая часть данных, накопленных в ходе Run 3. Анализ продолжается, и статистическая погрешность измерения сечения CC взаимодействия нейтрино будет уменьшаться. Ожидается также, что первые тау-нейтрино высокой энергии от LHC будут обнаружены в процессе обработки данных Run 3.
- В NA65 в сеансах набора данных в 2021-2022 гг было зарегистрировано около 2×10^8 взаимодействий протонов в детекторе. В этой выборке данных ожидается присутствие около 10^5 событий рождения очарованных частиц и $\sim 10^3$ событий $D_s \rightarrow \tau \rightarrow X$. Анализ данных продолжается, и новые результаты ожидаются как для физики очарованных частиц, так и для процесса $D_s \rightarrow \tau$.

Риски

SWOT-анализ

	Плюсы	Минусы
Внутренние	<p>СИЛЬНЫЕ СТОРОНЫ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Уже полностью действующие эксперименты NOvA и T2K с одобрением на набор данных до 2027 года. ● Эксперимент NA65 накопил данные и выполняет анализ. ● Полностью действующий модернизированный ближний детектор ND280 и линия получения пучка для фазы T2K-II. ● Большой круг физических задач. 	<p>НЕДОСТАТКИ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Источники систематических ошибок зависят от неизвестных особенностей сечений и детектора. ● Возможное сокращение времени набора данных из-за проблем с пучком. ● Увеличение фона мюонов в тоннеле T112 может ограничить экспозицию FASERv. Время работы HTS делится между несколькими группами, доступность ограничена.
Внешние	<p>ВОЗМОЖНОСТИ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Существование новой физики ● Снижение систематических ошибок за счет новых измерений или 	<p>УГРОЗЫ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Крупная авария с детекторами или оборудованием пучка. ● Неожиданное изменение планов лабораторий,

	<p>усовершенствования теории, а в случае Т2К — за счет модернизации ближнего детектора ND280.</p> <ul style="list-style-type: none"> Разработка новых методов и технологий. 	<p>размещающих эксперименты, из-за значительного сокращения бюджета.</p> <ul style="list-style-type: none"> Серьезные изменения в мировой ситуации.
--	--	--

2.3. Предполагаемый срок выполнения

2030

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛЯП, ЛТФ, ЛИТ

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

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

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
FNAL	USA	Batavia, IL	Alex Himmel + 3	Соглашение JINR-FNAL (в процессе продления)
University of California, Irvine	USA	Irvine, CA	Jianming Bian + 4	Коллаборация NOvA
University of Minnesota	USA	Minneapolis, MN	Matt Strait	Коллаборация NOvA
University of Minnesota Duluth	USA	Duluth, MN	Alec Habig	Коллаборация NOvA
University of South Alabama	USA	Mobile, AL	Martin Frank	Коллаборация NOvA

Queen Mary University of London	UK	London	Linda Cremonesi + 3	Коллаборация NOvA
University of Florida	USA	Gainesville	Mayly Sanchez + 2	Коллаборация NOvA
Caltech	USA	Pasadena	Ryan Patterson, Zoya Vallary + 2	Коллаборация NOvA
The College of William & Mary	USA	Williamsburg	Patricia Vahle, Erika Catano-Mur	Коллаборация NOvA
University College of London	UK	London	Ryan Nichol + 3	Коллаборация NOvA
The Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences	Russia	Moscow	Anatoly Butkevich + 1 Yuri Kudenko + 8	Коллаборация NOvA Коллаборация T2K
JAEA	Japan	Tokai	Matsubara T. + 5	Коллаборация T2K
LPTHE	France	Paris	Giganti C. + 3	Коллаборация T2K
CERN	Switzerland	Geneva	Jamie Boyd + 4	Коллаборации и FASER и NA65
CERN	Switzerland	Geneva	Francesco Lanni Filippo Resnati	Соглашение о Нейтринной платформе
Nagoya University	Japan	Nagoya	Osamu Sato + 2	Коллаборации и FASER и NA65
Bern University	Switzerland	Bern	Akitaka Ariga + 2	Коллаборации и FASER и NA65
Chiba University	Japan	Chiba	Akitaka Ariga + 3	Коллаборации и FASER и NA65

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

Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL), Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), Nagoya University in Japan, European Center for Nuclear Research (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	20	1
2.	инженеры	3.7	1
3.	специалисты	-	1
4.	служащие	-	
5.	рабочие	-	
	Итого:	23.7	3

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№.	Категория персонала	ФИО	Подразделени е	Должность	Полное FTE
1.	научные сотрудники	Ольшевский Александр Григорьевич	ЛЯП	начальник отдела (руководитель проекта)	0.6
2.	научные сотрудники	Колупаева Людмила Дмитриевна	ЛЯП	заместитель начальника отдела (руководитель проекта)	1.0
3.	научные сотрудники	Самойлов Олег Борисович	ЛЯП	начальник сектора (заместитель рук. проекта)	0.7
4.	научные сотрудники	Горнушкин Юрий Алексеевич	DLNP	начальник сектора (заместитель рук. проекта)	0.7
5.	научные сотрудники	Анфимов Николай Владимирович	ЛЯП	начальник сектора	0.3
6.	научные сотрудники	Шешуков Андрей Сергеевич	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.5
7.	научные сотрудники	Чалышев Вячеслав	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.2

		Владимирович			
8.	научные сотрудники	Садовский Андрей Борисович	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.5
9.	научные сотрудники	Дмитриевский Сергей Геннадьевич	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.8
10.	научные сотрудники	Чириков-Зорин Игорь Евгеньевич	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.4
11.	научные сотрудники	Антошкин Александр Игоревич	ЛЯП	младший научный сотрудник	1.0
12.	научные сотрудники	Селюнин Александр Сергеевич	ЛЯП	научный сотрудник	0.3
13.	научные сотрудники	Рыбников Арсений Владимирович	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.2
14.	научные сотрудники	Климов Олег Леонидович	ЛЯП	научный сотрудник	1.0
15.	научные сотрудники	Большакова Анастасия Евгеньевна	ЛЯП	научный сотрудник	0.2
16.	научные сотрудники	Васина Светлана Геннадьевна	ЛЯП	научный сотрудник	1.0
17.	научные сотрудники	Кораблев Денис Евгеньевич	ЛЯП	научный сотрудник	0.3
18.	научные сотрудники	Калиткина Анастасия Игоревна	ЛЯП	младший научный сотрудник	1.0
19.	научные сотрудники	Гридина Анна Дмитриевна	ЛЯП	младший научный сотрудник	1.0
20.	научные сотрудники	Степанова Анна Вячеславовна	ЛЯП	младший научный сотрудник	1.0
21.	научные сотрудники	Шаров Владислав Игоревич	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.2
22.	научные сотрудники	Иванова Александра Денисовна	ЛЯП	стажер-исследовате ль	1.0

23.	научные сотрудники	Давыдов Юрий Иванович	ЛЯП	начальник отдела	0.3
24.	научные сотрудники	Глаголев Владимир Викторович	ЛЯП	начальник отдела	0.1
25.	научные сотрудники	Терещенко Вячеслав Васильевич	ЛЯП	начальник сектора	0.1
26.	научные сотрудники	Попов Борис Альбертович	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.5
27.	научные сотрудники	Суслов Игорь Александрович	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.6
28.	научные сотрудники	Любушкин Владимир Викторович	ЛЯП	старший научный сотрудник	0.3
29.	научные сотрудники	Баранов Владимир Юрьевич	ЛЯП	научный сотрудник	0.4
30.	научные сотрудники	Хомутов Николай Владимирович	ЛЯП	научный сотрудник	0.3
31.	научные сотрудники	Зимин Илья Юрьевич	ЛЯП	научный сотрудник	0.4
32.	научные сотрудники	Васильев Илья Игоревич	ЛЯП	научный сотрудник	0.3
33.	научные сотрудники	Кисеева Виктория Ильинична	ЛЯП	младший научный сотрудник	0.6
34.	научные сотрудники	Матвеев Виктор Анатольевич	ЛТФ	научный руководитель Института	0.1
35.	научные сотрудники	Козлов Геннадий Алексеевич	ЛТФ	ведущий научный сотрудник	0.1
36.	научные сотрудники	Наумов Вадим Александрович	ЛТФ	начальник сектора	0.5
37.	научные сотрудники	Кузьмин Константин Сергеевич	ЛТФ	старший научный сотрудник	0.5
38.	научные сотрудники	Какорин Игорь Дмитриевич	ЛТФ	научный сотрудник	0.5
39.	научные сотрудники	Шкирманов Дмитрий	BLTP	researcher, PhD	0.5

		Сергеевич			
40.	инженеры	Федосеев Дмитрий Веславович	ЛЯП	ведущий инженер-электрони к	0.2
41.	инженеры	Громов Василий Олегович	ЛЯП	ведущий инженер	0.2
42.	инженеры	Соколов Сергей Анатольевич	ЛЯП	старший инженер	0.2
43.	инженеры	Кожукалов Владимир Александрович	ЛЯП	инженер	0.2
44.	инженеры	Четвериков Алексей Викторович	ЛЯП	инженер-электрони к 2 категории	0.2
45.	инженеры	Кузнецова Ксения Игоревна	ЛЯП	инженер	0.2
46.	инженеры	Гейтота Олеся Вячеславовна	ЛЯП	инженер	1.0
47.	инженеры	Сотников Альберт Петрович	ЛЯП	инженер	0.8
48.	инженеры	Атанова Ольга Сергеевна	ЛЯП	инженер	0.2
49.	инженеры	Терещенко Светлана Владимировна	ЛЯП	инженер	0.2
50.	инженеры	Балашов Никита Александрович	ЛИТ	старший инженер	0.3
	Итого				23.7

3.2.2. JINR associated personnel

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

С проектом связаны 3 аспиранта. Их FTE уже учтен в Таблице 3.2.1.

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	Студенты	МГУ	1
2.	Студенты	МФТИ	2
	Total:		3

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта / подпроекта КИП

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

660 к\$ на три года

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

—

Руководитель проекта _____/Л.Д. Колупаева/

Руководитель проекта _____/А.Г. Ольшевский/

Дата представления проекта / подпроекта КИП в ДНОД _____

Дата решения НТС Лаборатории _____, номер документа _____

Год начала проекта / подпроекта КИП _____

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

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
Проекта / Подпроекта КИП**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам		
			1 год	2 год	3 год
	Международное сотрудничество (МНТС)	450	150	150	150
	Материалы	90	30	30	30
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	60	20	20	20
	Пуско-наладочные работы				
	Услуги научно-исследовательских организаций	30	10	10	10
	Приобретение программного обеспечения	30	10	10	10
	Проектирование/строительство				
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)				
Не об хо ди м ые ре су р сы	Н о р м о- ч ас	Ресурсы			
		–сумма FTE (Мастерские и конструкторское бюро),	150	50	50
		–ускорителя/установки,			
		–реактора,.....			

Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (<i>статьи бюджета</i>)	660	220	220	220
	Внебюджет (доп. смет а)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования				

Руководитель проекта _____ /Л.Д. Колупаева/

Руководитель проекта _____ /А.Г. Ольшевский/

Экономист Лаборатории _____ / _____ /

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА: Изучение свойств нейтрино в экспериментах на ускорителях

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА: Ускорительные нейтрино

ШИФР ПРОЕКТА: 02-2-1099-2-2015/2026

ШИФР ТЕМЫ: 02-2-1099-2010/2026

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА: Л.Д. Колупаева, А.Г. Ольшевский

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА /
ПОДПРОЕКТА КИП

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

