Приложение 3.

Форма продления Проекта

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____/_____/

“____“_____2026 г.

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

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы 02-2-1099-2010.

1.2. Шифр проекта 02-2-1099-1-2010/2031.

1.3. Лаборатория ЛЯП

1.4. Научное направление физика элементарных частиц

1.5. Наименование проекта Изучение осцилляций нейтрино в эксперименте JUNO (Участие ОИЯИ)

1.6. Руководитель(и) проекта Д.В. Наумов

1.7. Заместитель(и) руководителя проекта Н.В. Анфимов, М.О. Гончар

1.8. Научный руководитель проекта Д.В. Наумов

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Эксперимент JUNO — крупномасштабный эксперимент с реакторными электронными антинейтрино. Основные цели: определение упорядочивания масс (mass ordering, MO) нейтрино с медианной чувствительностью на уровне 3–4 стандартных отклонений и прецизионное измерение параметров смешивания лептонов с рекордным уровнем точности на уровне десятых долей процента. Богатая физическая программа включает обнаружение гео-, атмосферных и солнечных нейтрино, нейтрино от взрыва

сверхновых, поиска распада протона, поиск физики за пределами Стандартной модели.

Ближний детектор TAO измерит спектр реакторных электронных антинейтрино со статистической погрешностью порядка 1% и энергетическим разрешением σ=2% при выделенной энергии 1 МэВ. Он также будет чувствителен к стерильным (анти)нейтрино в области значений разницы квадратов масс Δm^2_{41} порядка нескольких эВ².

На данный момент эксперимент находится на стадии набора физических данных. Детектор JUNO набирает данные с августа 2025 года, а ближний детектор TAO с марта 2026 года. Показатели детекторов достигли проектных характеристик. После набора всего двух месяцев данных JUNO измерил два параметра осцилляций нейтрино $\sin^2\theta_{12}$ и Δm^2_{21} с лучшей в мире точностью. Соответственно, основные дальнейшие цели проекта — реализация физической программы.

ОИЯИ играет важнейшую роль как в подготовке эксперимента, так и обработке данных:

(i) Под контролем ОИЯИ были спроектированы и произведены модули высоковольтного питания для всех больших (20 дюймов) и малых (3 дюйма) фотоумножителей (ФЭУ) JUNO;

(ii) ОИЯИ участвовал в создании детектора мюонов Top Tracker (TT), разработав систему механической поддержки, аппаратное и программное обеспечение для мониторинга сцинтилляторов Top Tracker, реконструкции треков и систему сбора данных (DAQ);

(iii) Массовые испытания и ввод в эксплуатацию крупных ФЭУ при помощи разработанных и изготовленных в ОИЯИ сканирующих станций;

(iv) ОИЯИ участвовал в проектировании и строительстве ближнего детектора JUNO — TAO: закупка половины из 4100 плиток (130 тыс. ячеек) кремниевых фотоумножителей (SiPM), массовые испытания SiPM, производство и эксплуатация системы питания SiPM (4100 каналов);

(v) ОИЯИ ввел в эксплуатацию центр обработки данных, предназначенный для моделирования, хранения и обработки данных для эксперимента JUNO. Центр в ОИЯИ — один из трех европейских центров обработки данных, обеспечивающий потребности JUNO;

(vi) ОИЯИ вносит вклад в разработку программного обеспечения: разработка ПО Global Neutrino Analysis (GNA) и dag-modelling для осцилляционного статистического анализа данных; разработка алгоритмов реконструкции и анализа данных; разработка сервиса для проверки качества данных.

(vii) ОИЯИ непосредственно участвует в обработке и анализе данных, от контроля качества данных, до отбора и статистического анализа.

ОИЯИ вложил в проект JUNO около 10 миллионов долларов. Благодаря этим инвестициям были не только созданы необходимые элементы детектора JUNO, но и существенно развита инфраструктура Лаборатории и Института для методических работ с фотоэлектронными умножителями, SiPM, электроникой, компьютерными ресурсами и многим другим. В настоящее время детектор находится на стадии набора данных.

В течение следующего пятилетнего периода проект будет сосредоточен на реализации основной физической программы экспериментов JUNO и TAO, включая прецизионное измерение параметров осцилляций и спектра реакторных антинейтрино, уточнение энергетической шкалы и модели отклика детектора с учетом собственного разрешения сцинтиллятора, развитие методов калибровки, мониторинга и валидации качества данных, совершенствование реконструкции мюонных событий и вето-системы, а также развитие вычислительной и программной инфраструктуры анализа. Существенная часть работ будет связана с совместным анализом данных JUNO, TAO и Daya Bay, исследованием атмосферных нейтрино, повышением чувствительности к определению упорядоченности масс нейтрино и поиском эффектов за пределами Стандартной модели, включая стерильные нейтрино, нестандартные взаимодействия и возможный распад

нейтрино.

2.2. Научное обоснование

Цели

Эксперимент JUNO нацелен на определение упорядочивания масс нейтрино с медианной чувствительностью на уровне 3–4 стандартных отклонений, а также прецизионное измерение параметров смешивания лептонов с рекордным уровнем точности порядка десятых долей процента. Богатая физическая программа также включает поиск распада протона, поиск нейтрино от взрыва сверхновых, обнаружение гео-нейтрино, атмосферных и солнечных нейтрино, поиск физики за пределами Стандартной Модели.

Актуальность и научная новизна

Порядок масс нейтрино

Термин «упорядочивание масс нейтрино» (neutrino mass ordering, MO) относится к установлению соответствующего порядка массовых состояний нейтрино $m_3 > m_1$ или $m_1 > m_3$. Простого и дешевого способа измерить MO не существует. MO можно определить, используя следующие наблюдаемые.

(i) Вероятность **осцилляций нейтрино** чувствительна к MO как в канале появления, так и в канале исчезновения нейтрино. Канал исчезновения нейтрино нечувствителен к фазе CP-нарушения, которая в настоящее время неизвестна. Канал появления, наоборот, страдает вырождением из-за неизвестной фазы, нарушающей CP, которая ухудшает определение MO для энергии нейтрино порядка ГэВ и базы 700 км. На большей базе вырождение ослабевает из-за возрастающего влияния вещества.

JUNO[1] использует канал исчезновения, наблюдая реакторные электронные антинейтрино. После семи лет набора данных JUNO сможет определить упорядочивание масс на уровне не менее 3-х стандартных отклонений без внешних ограничений на значение Δm^2_{31}.

Эксперименты с ускорительными нейтрино NOvA[2] и T2K[3] продолжают набор данных. В настоящее время оба эксперимента предпочитают нормальное упорядочивание масс ($m_3 > m_1$) на уровнях значимости 1.4−1.6 стандартных отклонений соответственно. В результате совместного Байесовского анализа данных NOvA и T2K предпочтительнее оказывается обратное упорядочивание, обеспечивающее лучшее согласие между измеренными осцилляционными параметрами. Предпочтение, однако, не является статистически значимым.

DUNE[4], ускорительный нейтринный эксперимент, должен начать набор данных в 2030. Эксперимент DUNE будет в состоянии определять MO на уровне 5-и стандартных отклонений примерно через два года после начала набора данных.

Два эксперимента с атмосферными нейтрино чувствительны к MO. IceCube сможет достичь чувствительности в диапазоне от 1.5 до 3.5 стандартных отклонений через 6 лет после начала набора данных, к 2031 году. ORCA, часть детектора KM3NeT с более плотным расположением ФЭУ, может достичь чувствительности от 3 до 5.5 стандартных отклонений в 2032 году при условии, что набор данных начнется в 2027.

Детектор JUNO также будет чувствителен к осцилляциям атмосферных нейтрино, что может дать дополнительную чувствительность к MO при комбинации с данными

---

[1] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/43/3/030401

[2] https://novaexperiment.fnal.gov

[3] https://t2k-experiment.org

[4] https://www.dunescience.org

реакторных антинейтрино. Тем не менее, актуальный вклад в чувствительность к определению МО требует детальной оценки.

Проект HyperK, преемник экспериментов SuperK и T2K, также может использовать оба источника нейтрино: и ускорительные и атмосферные, для определения МО. Чувствительность HyperK к МО оценивается от 3 до 4.5 стандартных отклонений после 6-и лет набора данных, который, как ожидается, начнется в 2027 году.

Сравнение экспериментальных чувствительностей в зависимости от времени показано на рисунке 1.

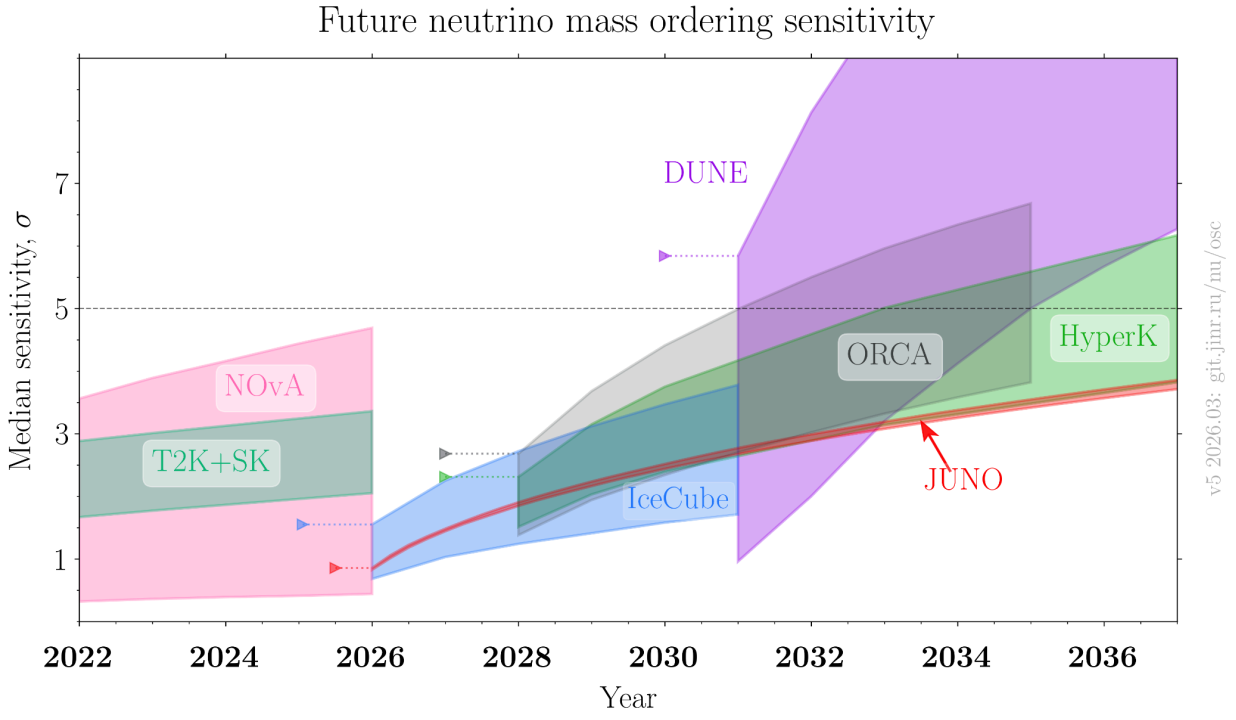

Рисунок 1. Чувствительность будущих реакторных, ускорительных и атмосферных осцилляционных экспериментов к упорядочиванию масс нейтрино. Проекции чувствительности других экспериментов могут быть не финальными, тем не менее рисунок даёт представление об общей картине.

(ii) Вероятность **безнейтринного двойного бета-распада** чувствительна к МО. Если распад будет обнаружен, эффективная масса нейтрино $m_{\beta\beta}$ будет порядка 2.6×10^{-2} эВ для обратного упорядочивания масс и 2.6×10^{-3} эВ для нормального упорядочивания масс. Современные эксперименты не обеспечивают конкурентных ограничений на МО.

(iii) **Космология** дает ограничения на сумму масс нейтрино Σm_ν. Ожидается, что $\Sigma m_\nu \geq 0.06$ эВ для обратного МО и $\Sigma m_\nu \geq 0.1$ эВ для нормального МО. Современные ограничения на Σm_ν еще не позволяют определить МО, в то время как дальнейшее повышение точности определения Σm_ν может оказаться существенным. Ключевыми игроками здесь являются эксперименты CMB-S4[5] и CORE[6]. Сроки начала набора данных нам не известны.

(iv) Эксперименты, наблюдающие **бета-распад** также чувствительны к МО,

[5] https://arxiv.org/pdf/1610.02743.pdf

[6] https://arxiv.org/abs/1706.04516

поскольку каждое собственное массовое состояние нейтрино вызывает излом в энергетическом спектре. Соответствующие измерения являются чрезвычайно сложной задачей, поскольку для измерения таких искажений в энергетическом спектре требуется рекордное энергетическое разрешение. Современный эксперимент KATRIN не сможет получить конкурентного измерения МО. Планируемый эксперимент Project-8[7], в котором будет использоваться циклотронная радиационно-эмиссионная спектроскопия для определения массы электронного антинейтрино будет обладать чувствительностью к МО. Мы воздерживаемся от обсуждения временной шкалы.

Заметим также, что хотя чувствительность отдельных экспериментов может быть ниже значимости открытия 5σ, совместный анализ их данных может улучшить общую чувствительность к МО более значительно, чем прямая сумма. Основной причиной этого является значительное уменьшение вырождения в определении параметров при объединении данных из разных категорий (i)-(iv).

Это соображение было одним из мотивов, побудивших нас разработать систему глобального анализа (GNA) ОИЯИ. Сегодня глобальные подгонки нейтрино благоприятствуют нормальному порядку на уровне 2.4 стандартных отклонений. Более подробную информацию можно найти в сноске[8].

Точность определения параметров смешивания лептонов

Современная точность измерения параметров смешивания лептонов Δm^2_{31}, Δm^2_{21} и $\sin^2 2\theta_{12}$ представлены на рисунках 2−4[9]. Рисунки также включают первое измерение Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$ в JUNO и ожидаемую чувствительность после шести лет набора данных, которая улучшит измерения до долей процента и обеспечит ведущую точность. JUNO также чувствителен к значению $\sin^2 2\theta_{13}$ с точностью 11.7%. Лучшее измерение $\sin^2 2\theta_{13}$ с точностью 2.8% обеспечивает эксперимент Daya Bay. Как видно из рисунков 2−4, JUNO обеспечит доминирующую точность, которая сохранится на десятилетия.

Следует отметить, что высокая суб-процентная точность измерения осцилляционных параметров в JUNO, в частности, измерение разницы квадратов масс Δm^2_{31} с точностью на уровне 0.2% является необходимой информацией для осцилляционных экспериментов с длинной базой, как ускорительных так и атмосферных, которая позволит в значительной степени повысить точность определения МО[10].

Таким образом задача прецизионного измерения параметров осцилляций нейтрино в JUNO является не менее важной, чем определение МО.

---

[7] https://arxiv.org/abs/1309.7093

[8] http://www.nu-fit.org/?q=node/309

[9] See https://git.jinr.ru/nu/osc for references.

[10] https://arxiv.org/abs/2404.08733

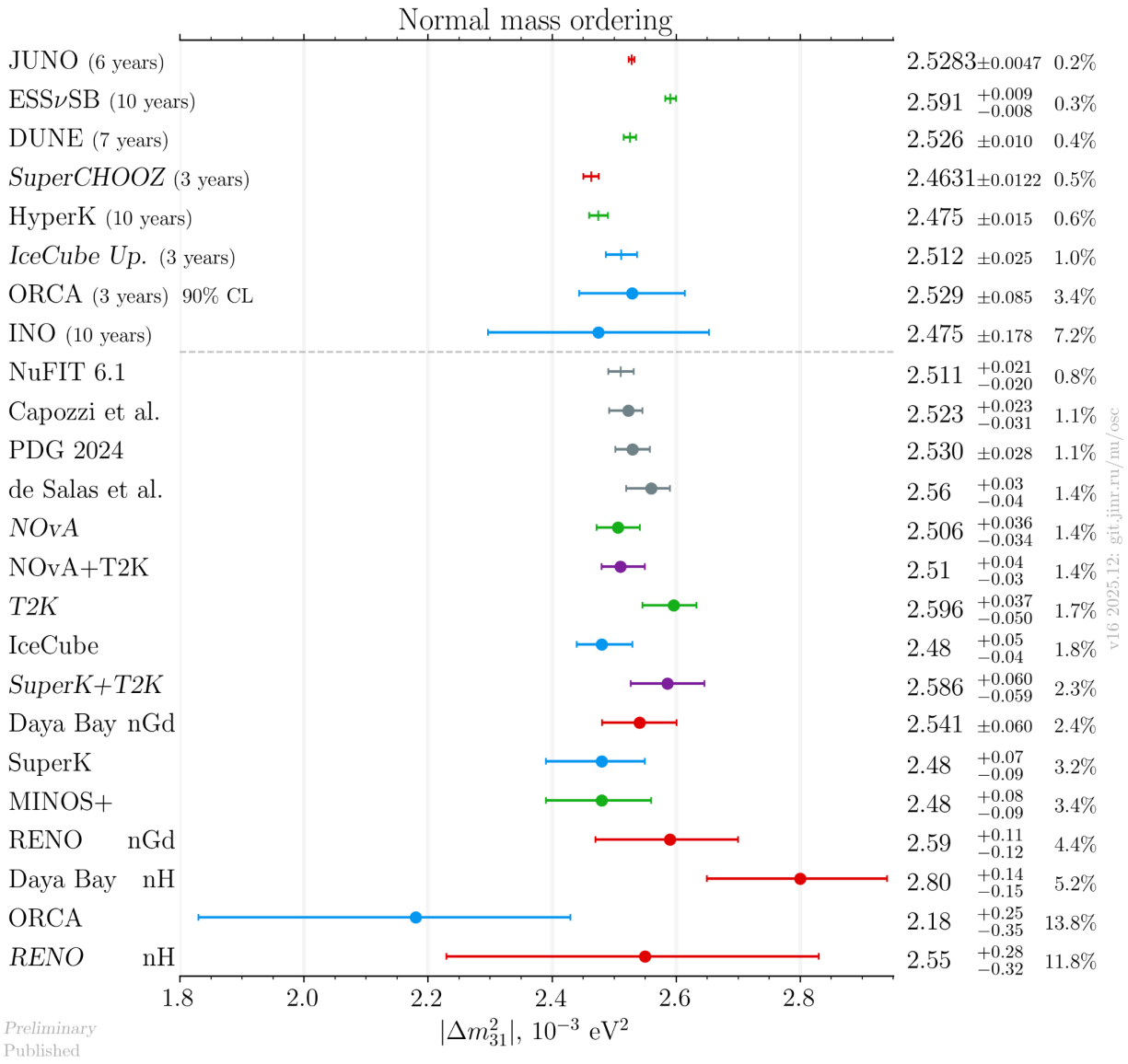

Рисунок 2. Точность измерения параметра осцилляций нейтрино Δm^2_{31} в предположении нормальной упорядоченности масс нейтрино.

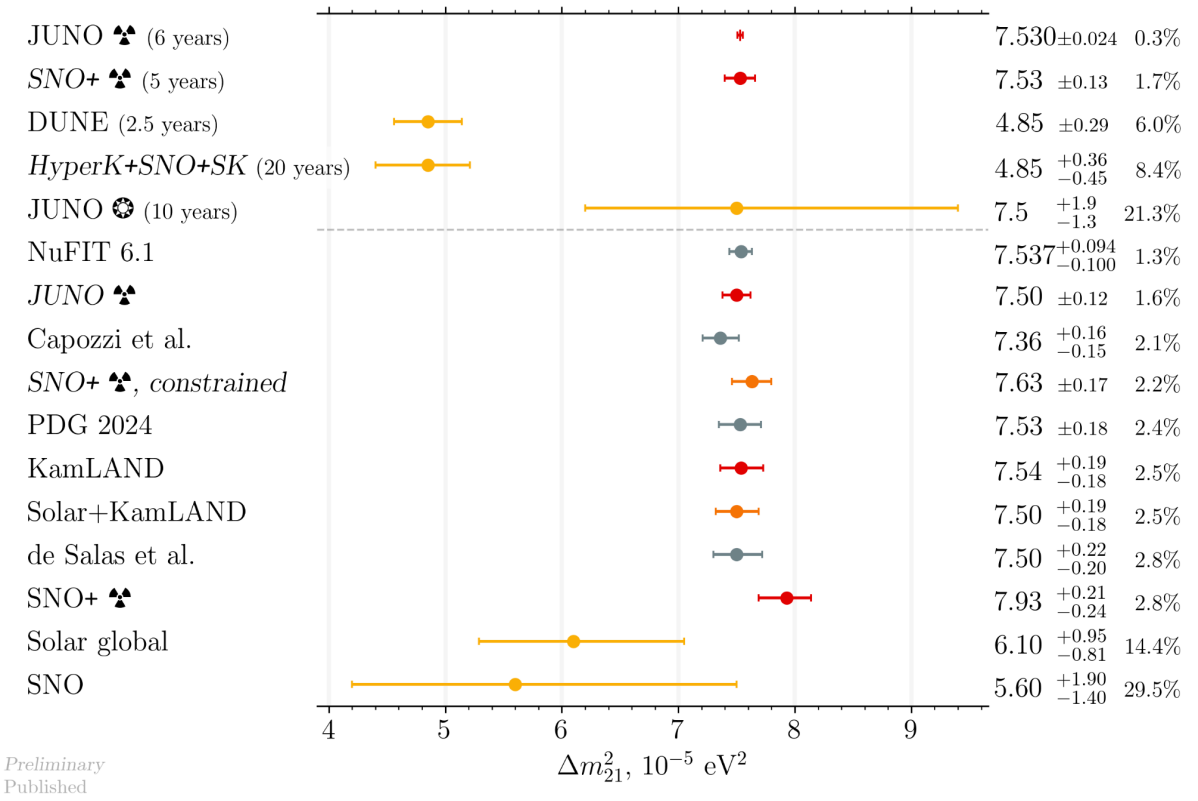

Рисунок 3. Точность измерения параметра осцилляций нейтрино Δm^2_{21}.

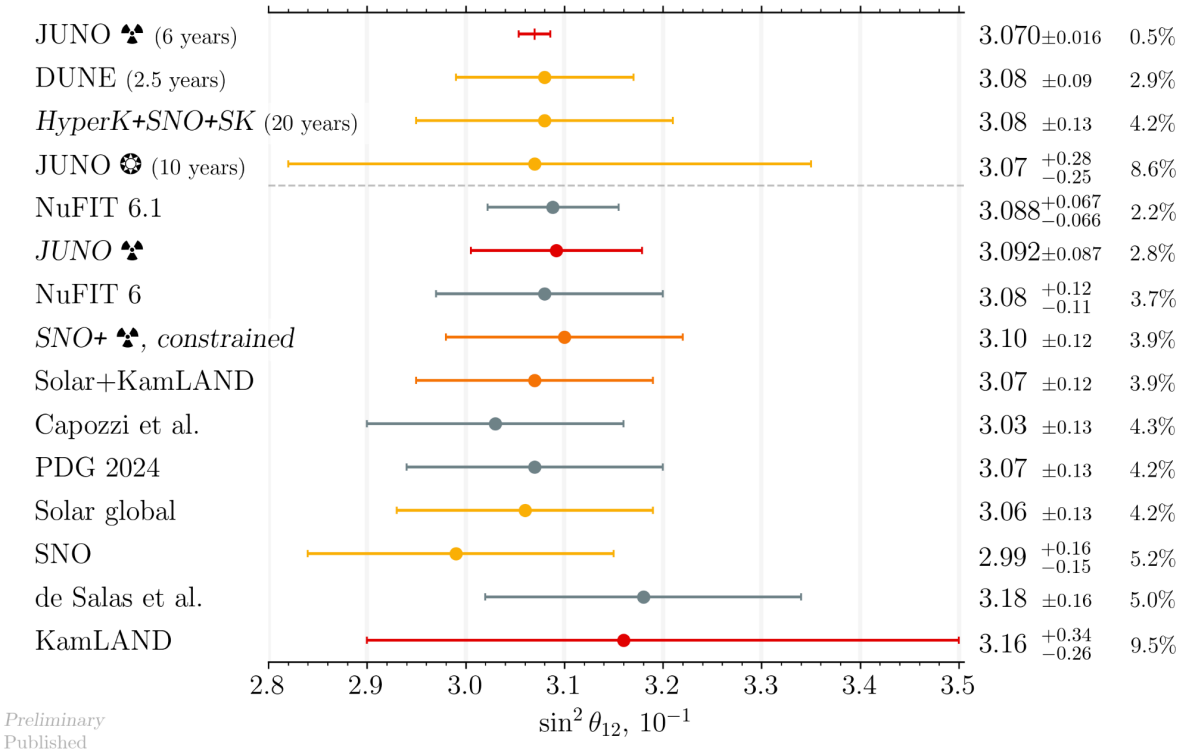

Рисунок 4. Точность измерения параметра осцилляции нейтрино $\sin^2\theta_{12}$.

Распад протона

Нарушение барионного числа является одним из необходимых условий для объяснения наблюдаемой асимметрии вещества и антивещества во Вселенной. В тоже время на сегодняшний день нет никаких экспериментальных доказательств нарушения барионного числа.

Канал распада протона $p \rightarrow K^+\nu$ предсказывается рядом теорий великого объединения в рамках суперсимметрии (SUSY GUT). Как правило предсказывается, что время жизни протона будет меньше нескольких 10^{34} лет. Поиск этого распада в большом водном черенковском детекторе затруднен из-за кинематики. Импульс K^+ в этом двухчастичном распаде составляет 339 МэВ/с (кинетическая энергия 105 МэВ), что ниже черенковского порога в воде. Наилучший на сегодняшний день предел составляет $\tau(p \rightarrow K^+\nu) > 5.9\times10^{33}$ лет при 90% У.Д. по результатам эксперимента Super-Kamiokande[11].

Детектор с жидким сцинтиллятором (ЖС) способен наблюдать этот канал, используя уникальную тройную временную сигнатуру распада. В целом эффективность ЖС значительно выше, чем у черенковского детектора. Благодаря высокой эффективности измерения этого режима чувствительность JUNO превзойдет Super-Kamiokande всего через 3 года с момента начала набора данных. Через 10 лет JUNO достигнет чувствительности $8.34\cdot10^{33}$ лет при 90% У.Д.

Нейтрино от вспышек сверхновых (SN)

На данный момент нейтрино от единственной вспышки сверхновой SN1987A были обнаружены в 1987 г. в экспериментах Kamiokande II (12 событий), IMB (8 событий) и Баксан (5 событий). Всего зарегистрировано 25 взаимодействий нейтрино.

Наблюдение нейтринного сигнала от вспышек сверхновых потенциально является богатым источником информации о механизмах коллапса звезд, сильных эффектах вещества на осцилляции нейтрино и могут быть использованы для независимого определения МО. Новое поколение больших детекторов, способных обнаруживать сотни или тысячи нейтрино от сверхновых будет решающим для нашего понимания процессов внутри сверхновых.

Детектор JUNO массой 20 кт сможет зарегистрировать около 10 тысяч нейтрино в разных каналах в 10-секундном временном окне после взрыва сверхновой, находящейся на расстоянии 10 кпк. Для вспышек сверхновых в пределах 1 кпк JUNO будет также чувствителен к нейтрино, испущенным до коллапса.

За десять лет набора данных JUNO будет иметь чувствительность на уровне 5-и стандартных отклонений к диффузному фону сверхновых (DSNB). В течение 3 лет JUNO достигнет чувствительности 3σ.

Гео-, атмосферные и солнечные нейтрино

Геонейтрино это электронное антинейтрино, образующееся при распадах долгоживущих радионуклидов в недрах Земли. Геонейтрино были обнаружены

[11] E. Kearns, talk presented at the ISOUP Symposium (2013).

экспериментами KamLAND[12] и BOREXINO[13]. Последние исследования выявили 169 и 53 события, связанные с геонейтрино в данных KamLAND и BOREXINO соответственно.

Новая развивающаяся область науки, **нейтринная геофизика**, требует гораздо большей статистики (см. недавний обзор[14] для получения более подробной информации). JUNO будет наблюдать около 400 геонейтрино в год (40 TNU/год). За шесть лет набора данных JUNO сможет измерить поток геонейтрино с точностью 11% (14%) при присутствии (отсутствии) внешнего ограничения на отношение Th/U, собрав самую большую выборку взаимодействий геонейтрино[15].

JUNO будет первым экспериментом с жидким сцинтиллятором, чувствительным к атмосферным нейтрино. Обнаружение атмосферных нейтрино повысит чувствительность JUNO к определению MO и октанта θ_{23}. Эксперименты PINGU и ORCA, нацеленные непосредственно на измерение атмосферных нейтрино, будут определяющими в данной области исследований. JUNO внесет скромный вклад в определение MO на уровне около 1σ за счет регистрации атмосферных нейтрино. Ожидается, что совместный анализ атмосферных нейтрино и реакторных антинейтрино обладает большей чувствительностью к определению MO.

На сегодняшний день известно, что дефицит потока солнечных нейтрино связан с осцилляциями нейтрино в веществе Солнца. Не исследованные на сегодняшний день вопросы включают: (i) металличность Солнца и (ii) отсутствие данных в интервале энергий нейтрино, соответствующему переходу от вакуумных осцилляций к режиму осцилляций в веществе.

JUNO будет ежедневно наблюдать 1000 событий от ^{7}Be и 10 событий от солнечных реакций с ^{8}B. Это прольет новый свет на вопросы металличности солнца и переходного режима осцилляций.

Спектр реакторных антинейтрино

Известно, что энергетический спектр реакторных электронных антинейтрино, измеренный в современных экспериментах, имеет отклонение от предсказаний широко используемой модели Хубера-Мюллера[16]. Особенность проявляется на энергиях нейтрино 4−6 МэВ, называется «бамп» (bump) и в настоящее время не имеет надлежащего объяснения. Таким образом, точное измерение спектра реакторных электронных антинейтрино необходимо в качестве вводной информации для экспериментов с реакторными антинейтрино, а также для определения причин наблюдаемого отклонения. Детектор-спутник TAO будет иметь беспрецедентное энергетическое разрешение σ=2% на 1 МэВ и обеспечит наилучшее измерение спектра со статистической погрешностью на уровне 1%.

За пределами Стандартной модели

Существует множество различных исследований, связанных с поиском физики за

---

[12] H. Watanabe, talk at Neutrino Geoscience 2019, Prague, “Geoneutrino measurement with KamLAND”, https://indico.cern.ch/event/825708/contributions/3552210/attachments/1930535/3197332/HirokoWatanabe_NGS2019.pdf

[13] M. Agostini et al., Borexino collaboration, “Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino”, Phys. Rev. D 101, 012009 (2020) DOI: 10.1103/PhysRevD.101.012009

[14] O.Smirnov, "Experimental aspects of geoneutrino detection: Status and perspectives", Progress in Particle and Nuclear Physics 109 (2019) 103712. https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2019.103712

[15] http://arxiv.org/abs/2511.07227

[16] https://arxiv.org/abs/1106.0687, https://arxiv.org/abs/1101.2663

пределами Стандартной модели (BSM), в том числе существование 4-го (стерильного) состояния нейтрино, нестандартных взаимодействий (NSI), распадов нейтрино и др. Детектор-спутник TAO, обладающий беспрецедентными характеристиками с собранной статистикой взаимодействий реакторных электронных антинейтрино, позволит получить новые более точные ограничения на соответствующие параметры.

Методы и подходы

Эксперимент JUNO

Основными задачами эксперимента JUNO являются: (i) определение упорядочения масс нейтрино; (ii) измерение Δm^2_{31}, Δm^2_{21} и $\sin^2 2\theta_{12}$ с подпроцентной точностью; (iii) поиск распада протона; (iv) поиск нейтрино SN и диффузного фона нейтрино от SN (DSNB); (v) обнаружение гео-, атмосферных и солнечных нейтрино; (vi) поиски физики за пределами Стандартной модели.

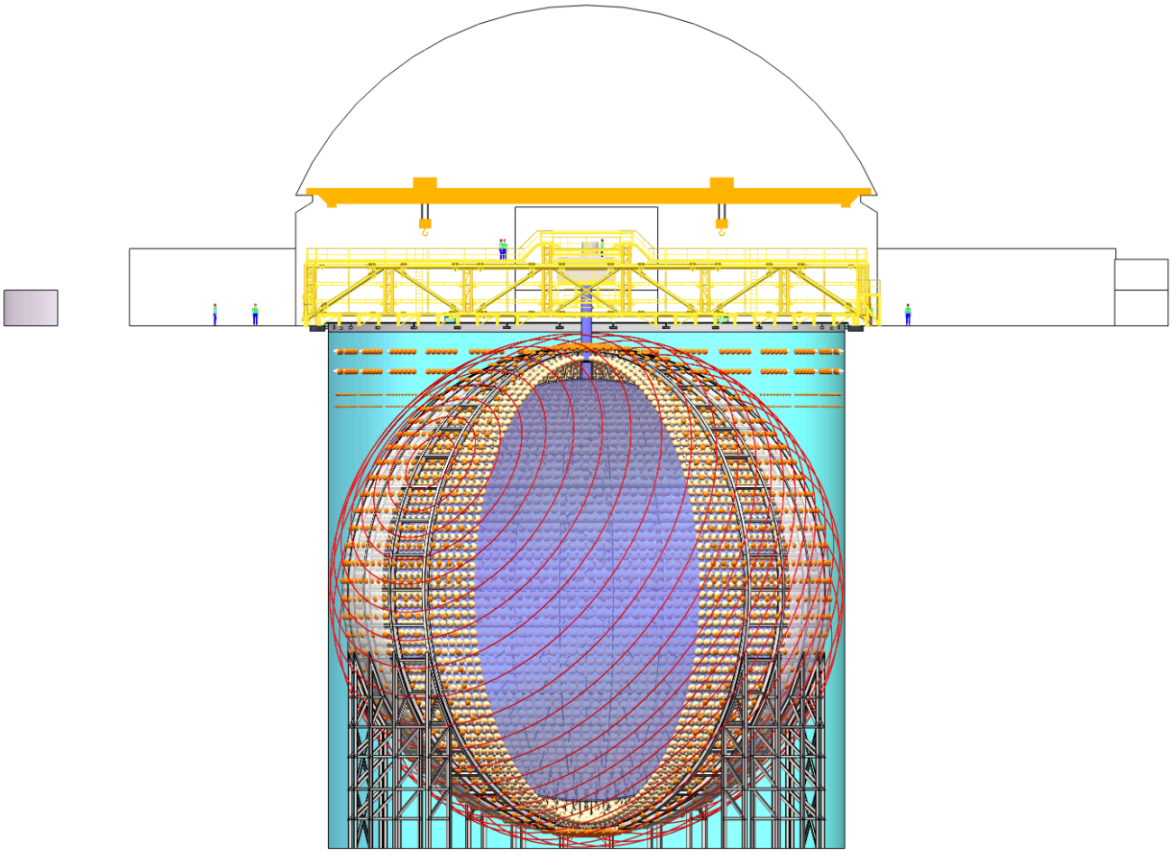

Рисунок 5. Центральный детектор JUNO и Top Tracker. Диаметр акриловой сферы составляет около 35 метров. Детектор окружен набором катушек Гельмгольца для компенсации магнитного поля Земли (EMF).

Центральный детектор (central detector, CD) JUNO, показанный на рисунке 5, представляет собой сферический акриловый резервуар диаметром 35 м, заполненный 20 кт жидкого сцинтиллятора (ЖС). Сцинтилляционный свет регистрируется примерно 18-ю тысячами 20-дюймовых ФЭУ (LPMT) и примерно 26-ю тысячами 3-дюймовых ФЭУ (sPMT), что обеспечивает около 78% покрытия поверхности. Детектор располагается на среднем расстоянии 52.5 км от реакторов Янцзяньской и Тайшаньской АЭС общей

мощностью 26.6 ГВт.

За семь лет набора данных JUNO зарегистрирует около 100 тыс. событий обратного бета-распада (inverse beta-decay, IBD) и определит их энергию с точностью на уровне σ=3%[17] для энергии 1 МэВ. Точное измерение энергетического спектра IBD позволяет определить упорядочивание масс нейтрино по его форме, как показано на рисунках 6 и 7. Стоит отметить, что необходимо не просто отличить одну гистограмму для нормальной МО от одной гистограммы для обратной МО, а произвести полноценный статистический анализ с учётом всех источников систематических неопределённостей в предположении каждой из МО.

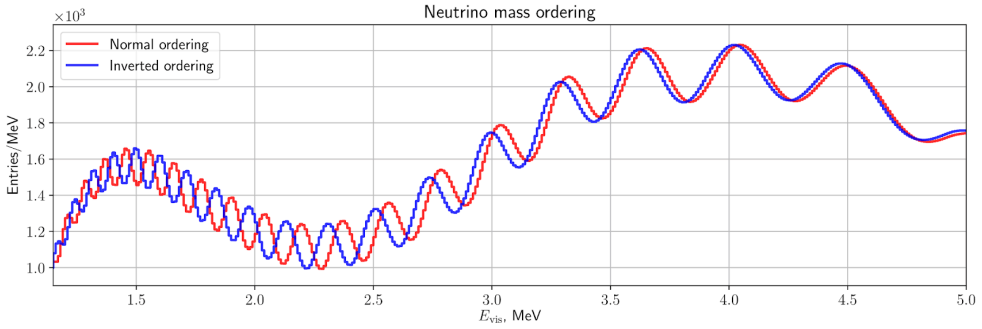

Рисунок 6. Ожидаемый энергетический спектр в JUNO за восемь лет набора данных для двух вариантов упорядочивания масс нейтрино. Приведена истинная энергия без учета эффектов детектора.

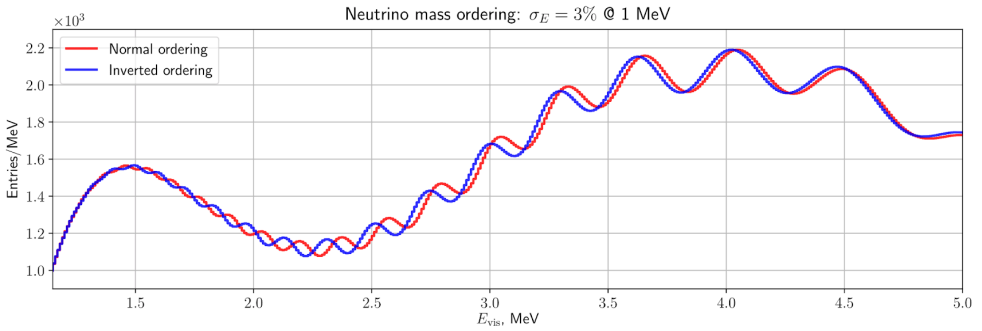

Рисунок 7. Ожидаемый энергетический спектр в JUNO за восемь лет набора данных для двух вариантов упорядочивания масс нейтрино. График соответствует реконструированной энергии с разрешением σ=3% для 1 МэВ.

Чувствительность JUNO не имеет вырождения, связанного с неизвестными значениями фазы CP-нарушения и $\sin^2\theta_{23}$. Основным ограничением метода является энергетическое разрешение, которое должно быть на уровне 3% при 1 МэВ наблюдаемой энергии.

Другой сложностью является возможное существования “тонкой структуры” в энергетическом спектре реакторных антинейтрино. Если она присутствует, структура потенциально может исказить определение массового упорядочивания и/или ухудшить чувствительность эксперимента. Для устранения зависимости от моделей спектра антинейтрино и возможного наличия тонкой структуры создан детектор-спутник TAO, который измерит энергетический спектр реакторных антинейтрино с точностью не хуже, чем JUNO.

---

[17] это проектная оценка. Более подробно см. раздел “Собственное разрешение сцинтиллятора и отклик детектора”.

Ближний детектор TAO

Детектор TAO представляет собой сферический резервуар диаметром 1.8 метра (см. рисунок 8), заполненный 2.8 тоннами жидкого сцинтиллятора, легированного гадолинием. Чтобы достичь разрешения лучше, чем в центральном детекторе JUNO, в TAO используется кремниевые фотоумножители (SiPM) с более высокой эффективностью регистрации фотонов PDE (50%) по сравнению с традиционными вакуумными фотоумножителями (ФЭУ). Одной из сложностей данного подхода 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 работает при низкой температуре −50°C.

Поверхность детектора покрытая SiPM составляет около 11 м². Всего использовано около 130 тысяч кристаллов SiPM 12x6 мм², упакованных в 4100 матриц (или т.н. тайлов) размером 5x5 см² по 32 элемента. Это огромное количество SiPM считывается с помощью 4100 32-канальных схем ASIC или 4100 каналов дискретных АЦП, каждый из которых считывают матрицу как единый элемент. ОИЯИ обеспечил источниками питания все матрицы с регулируемым напряжением в диапазоне до 120В. Все матрицы SiPM были детально изучены. В процессе подготовки массовых тестов SiPM ОИЯИ сыграл ключевую роль.

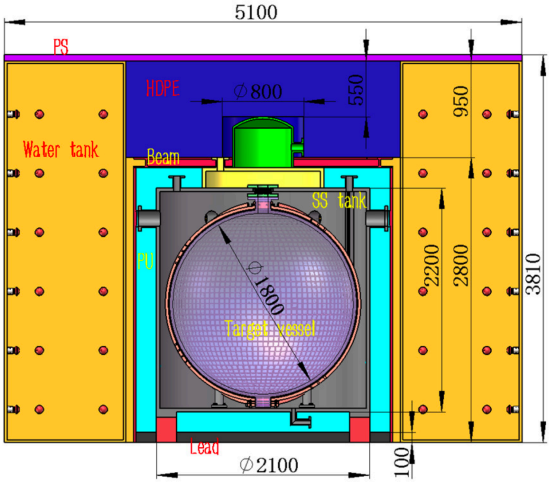

Рисунок 8. Схематическое изображение детектора TAO.

Чтобы гарантировать, что вся энергия гамма квантов от аннигиляции позитронов реакции обратного бета-распада конвертировалась в сцинтилляционный свет, доверительный объём по радиусу меньше полного размера на 25 см и содержит 1 тонну ЖС. Счет событий IBD в доверительном объеме составит 1000 (2000) событий в сутки с учетом (без учета) эффективности регистрации, что позволит зарегистрировать более 2 млн событий за семь лет набора данных. TAO обеспечит измерение спектра электронных антинейтрино реактора со статистической погрешностью порядка 1% и энергетическим разрешением σ=2%[18] на 1 МэВ выделенной энергии.

[18] это проектная оценка. Более подробно см. раздел “Собственное разрешение сцинтиллятора и отклик детектора”.

Реакторные электронные антинейтрино на короткой базе (детектор ТАО)

Антинейтрино в детекторе ТАО регистрируется с помощью реакции обратного бета-распада (ОБР). Полезный сигнал находится путём выделения запаздывающих совпадений двух импульсов в мишени (вспышек сцинтиллятора). Первый или мгновенный возникает от аннигиляции позитрона. Энергия этого события пропорциональна энергии нейтрино. Второй импульс или запаздывающий появляется от серии гамма-квантов с общей энергией около 8 МэВ, испускаемых после захвата нейтрона на гадолинии. Время жизни нейтрона до захвата составляет 22 мкс. Такая сигнатура реакции позволяет уменьшить уровни фонов в значительной степени. После отбора событий ОБР остаточные фоны представлены случайными совпадениями, долгоживущими космогенными изотопами ^{9}Li/^{8}He (β-n распад), быстрыми нейтронами и антинейтрино от отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в бассейне выдержки. Также небольшой вклад в сигнал вносит антинейтрино от второго (дальнего) энергоблока АЭС. Измерения проводятся в двух режимах: при включённом и выключенном ближнем реакторе. В результате становится возможным аккуратное измерение фона и его вычитание из полного спектра при работающем энергоблоке. Получается весьма чистый спектр реакторных антинейтрино. Он нужен для основных исследований на детекторе JUNO. При этом интересно исследование особенностей спектра и тестирование разных моделей, призванных его описывать. Для этого выполняется подгонка формы спектра. Одновременно полезным оказывается динамика изменения скорости счёта антинейтрино, что позволяет проводить мониторинг работы ядерного реактора. Группой из ОИЯИ совместно с российскими и европейскими коллегами реализуется независимый отбор событий ОБР, оценка его эффективности, определение уровней фонов, исследование спектра реакторных антинейтрино и наблюдение за режимами работы ближнего энергоблока.

В 2027–2031 годах планируется:

- прецизионное измерение спектра реакторных электронных антинейтрино;
- учёт вкладов в антинейтринный сигнал от второго энергоблока и от бассейна с отработавшим ядерным топливом, учёт вклада от горячего топлива в реакторе при его остановке;
- исследование особенностей измеренного антинейтринного спектра, включая изучение дополнительного пика в области 4-6 МэВ (бампа), высокоэнергетичной части спектра (>8 МэВ) и возможности описания спектра разными моделями (модель Хубера-Мюллера, модель Курчатовского института, модель суммарного спектра антинейтрино);
- получение временной зависимости скорости счёта антинейтрино в детекторе и сопоставление особенностей этой зависимости с различными изменениями в работе ядерного реактора;
- построение временных зависимостей уровней разных фонов и выявление их связей или корреляций с изменениями в работе ядерного реактора или детектора ТАО;
- определение чувствительности детектора ТАО к изменению режима работы энергоблока или к его остановке по наблюдаемому счёту антинейтрино;
- оценка тепловой мощности реактора с точностью 1.5-2.0% по наблюдаемому нейтринному излучению; график изменения тепловой мощности энергоблока со временем;

- оценка компонентного состава топлива ядерного реактора по наблюдаемым скорости счёта и спектру антинейтрино.

Система питания SiPM TAO

Система питания SiPM детектора TAO представляет собой распределённую многоканальную систему, обеспечивающую стабильное и индивидуально настраиваемое высокое напряжение для более 4000 матриц SiPM. Система включает VME-модули питания, управляющую электронику, CAN-интерфейс и программное обеспечение, интегрированное в систему управления детектором (DCS). В условиях длительной эксплуатации и ограниченной доступности оборудования ключевыми требованиями являются высокая надёжность, стабильность параметров и полнофункциональная интеграция в инфраструктуру мониторинга и управления.

В период 2027–2031 годов планируется выполнение следующих работ:

- изготовление дополнительных запасных компонентов в случаях отказа.
- регулярный мониторинг параметров системы питания (напряжение, ток, шумы) и анализ их долговременной стабильности;
- выявление деградации компонентов (ЦАП, источников питания, кабельной инфраструктуры), анализ отказов каналов, их устранение или компенсация;
- обслуживание аппаратной инфраструктуры (VME-крейты, кабельная система, переходные пластины, заземление);
- развитие интерфейсов взаимодействия системы питания с DCS и поддержка API;
- обеспечение стабильной синхронизации параметров с центральной базой данных и хранение истории изменений;
- разработка и внедрение системы тревог (alarms) при отклонении параметров;
- развитие пользовательских интерфейсов (web-GUI) для мониторинга и управления;
- визуализация состояния каналов (карты, тренды, временные зависимости);
- автоматизация операций управления (запуск, остановка, применение калибровочных поправок);
- разработка инструкций восстановления системы после сбоев для сменщиков.

Калибровки SiPM TAO

Калибровка SiPM является ключевым элементом обеспечения стабильного энергетического отклика детектора TAO. На основе ранее разработанных методов (включая анализ однофотоэлектронных (SPE) спектров и определение параметров SiPM при массовом тестировании) требуется регулярное обновление калибровочных коэффициентов и контроль однородности характеристик фотодетекторов в условиях длительной эксплуатации. Несмотря на то, что кремнивые фотоумноители в детекторе TAO были предварительно хорошо изучены часто требуется уточнение некоторых характеристик для правильной калибровки детектора. Часть измерений с матрицами SiPM планируется проводить в ЛЯП ОИЯИ.

В 2027–2031 годах планируется:

- использование как радиоактивных источников, так и светодиодной системы для выполнения комплексных калибровок;
- проведение регулярных калибровок усиления на уровне отдельных каналов;
- мониторинг изменения усиления и напряжения пробоя во времени;

- корректировка рабочих напряжений (перенапряжений) с учётом температурных и временных эффектов;
- анализ шумовых характеристик (темнового счёта, перекрёстных наводок, послеимпульсов) и их стабильности;
- оптимизация рабочих параметров с целью достижения наилучшего энергетического разрешения;
- модернизация стендов для исследования SiPM и других фотодетекторов в ЛЯП ОИЯИ;
- развитие методов обработки калибровочных данных, включая аппроксимацию SPE-спектров;
- автоматизация калибровочных процедур и интеграция результатов в систему контроля качества данных (DQM).

Система контроля качества данных TAO (TAO DQM, Data Quality Monitoring)

С успешным запуском детектора TAO на ОИЯИ возложена ответственность по организации контроля качества собираемых данных. Фактически необходимо обеспечить решение двух задач.

Первой задачей является общий долговременный контроль за разумностью и стабильностью значений измеряемых величин, таких как скорость счёта одиночных событий, скорость счёта мюонов и других фонов, а также контроль за параметрами функционирования отдельных каналов системы сбора данных, включая их состояния, коэффициенты усиления, темновой шум, временные привязки и смещения, разрешения однофотоэлектронных спектров, уровни триггера и загрузки по скорости счёта. Собираемые данные планируется размещать на специальном сайте для облегчения их мониторинга.

Вторая задача состоит в валидации (проверке) измерений (ранов). После каждого измерения будет запускаться цепочка процессов первичной обработки данных, позволяющая восстановить наблюдаемые физические величины, например, энергию и координаты событий в детекторе. Качество, стабильность и неразрывность данных являются предметами проверки. Она будет осуществляется путём запуска отдельной программы и анализа выводимых чисел, графиков и рекомендаций. По итогам проверки будет приниматься решение, можно ли использовать данные в текущем виде в физическом анализе или требуется повторная обработка.

В 2027–2031 годах планируется:

- развитие сайта системы контроля качества данных;
- формирование и обновление списков штатно функционирующих каналов системы сбора данных (“хороших” каналов), а также списков каналов, в которых наблюдаются какие-либо технические проблемы (“плохих” каналов);
- учёт подготовленных списков каналов при преобразовании данных в итоговый формат esd, используемый в физических исследованиях;
- разработка и внедрение программы полноценной валидации измерений;
- формирование и обновление списков измерений (ранов) для использования в разных физических анализах.

Система вето JUNO

Детектор TT обеспечивает более точное измерение траектории космических мюонов по сравнению с детекторами CD и WP veto, хотя его эффективность ниже. Однако с помощью данных, полученных от TT, алгоритмы измерений мюонов в CD и WP могут быть скорректированы и улучшены. Также точные измерения траекторий мюонов в CD и реконструкция “IBD-подобных” событий вблизи следа мюона позволят изучить фоновые процессы космогенного образования Li9 и He8 и могут помочь в их подавлении.

В течение следующего периода выполнения эксперимента созданное в ОИЯИ программное обеспечение сбора данных TT будет совершенствоваться так же, как и программы технического контроля работы детектора (“slow control”) и графический интерфейс представления реконструируемых мюонов (“event display”).

Эффективность восстановления треков мюонов в TT-детекторе зависит от свойств самого детектора и алгоритмов анализа данных. Основным источником TT-сигналов является естественная радиоактивность в экспериментальном зале JUNO, которая приводит к регистрации комптоновских электронов в TT. Триггер первого уровня L1 не полностью подавляет этот фон, что приводит к комбинаторному фону при реконструкции мюонов. Планируется использовать современные подходы, основанные на машинном обучении, которые могут помочь повысить эффективность и чистоту реконструкции мюонов, более полно используя всю доступную информацию о сигналах в TT, а также данные из WP и CD. Разработка таких алгоритмов и их использование в анализе данных является одной из приоритетных задач.

Собственное разрешение сцинтиллятора и отклик детектора

Анализ калибровочных данных JUNO указывает на целесообразность дальнейшего уточнения модели энергетического отклика детектора, в том числе более детального описания вклада собственного разрешения жидкого сцинтиллятора. Предварительные исследования указывают на возможность соответствующего вклада на уровне 1.5%.

В рамках разрабатываемой нами модели отклика детектора, проверенной на лабораторных данных из ряда работ в диапазоне энергий от 10 кэВ до 4 МэВ, соответствующий вклад учитывается явно.

В дополнение к основному методу анализа данных предлагается разработка физически мотивированного подхода, основанного на аналитическом описании формы отклика с использованием физических параметров детектора: относительного разброса чувствительностей ФЭУ, вклада собственного разрешения, средней относительной вариации одноэлектронного отклика ФЭУ, части одноэлектронного спектра под порогом срабатывания, среднего заряда, остающегося под порогом регистрации, калибровочной поправки для ФЭУ, относительной вариации средней эффективности регистрации фотонов по ФЭУ, дополнительной относительной вариации сигнала для гамма-квантов, возникающей из нелинейности отклика сцинтиллятора.

В этом подходе используются наблюдаемые величины: полный заряд и количество сработавших ФЭУ, для которых функции отклика имеют точное статистическое описание, вид которого отличается от нормального распределения. Ширина сцинтилляционной линии, выраженная в единицах соответствующего эстиматора, описывается набором вышеперечисленных параметров. В зависимости от реконструированного положения производится коррекция эстиматора на его пространственное положение.

Дополнительным преимуществом использования такого подхода является простота учёта темновых срабатываний ФЭУ: после конвертации ожидаемого энергетического спектра в один из эстиматоров достаточно произвести свертку полученного спектра со случайной выборкой. Ожидается, что для энергий до ~5 МэВ лучшее энергетическое разрешение обеспечит энергетический эстиматор на основе числа сработавших ФЭУ, выше 5 МэВ — полный собранный заряд.

Для анализа предполагается использовать совместную многомерную подгонку для обоих типов энергетических эстиматоров. Наличие перекрывающегося энергетического интервала для обоих эстиматоров позволит дополнительно контролировать параметры модели и уточнять энергетическую шкалу.

Вычислительные мощности и ресурсы хранения

ОИЯИ является одним из сайтов распределённой информационно-вычислительной среды (РИВС) эксперимента JUNO, предназначенной для хранения, обработки и анализа данных эксперимента. В рамках РИВС ОИЯИ выполняет функции центра необработанных данных, регионального центра хранения и центра моделирования данных.

Центры ***необработанных*** данных обеспечивают хранение резервных копий необработанных и реконструированных данных, участвуют в их последующей обработке и предоставляют вычислительные ресурсы, интегрированные в РИВС. Региональные центры хранения обеспечивают размещение частичных копий реконструированных данных на дисковых ресурсах и предоставляют доступ к ним для задач анализа и моделирования. Центры моделирования данных предоставляют вычислительные ресурсы для выполнения задач моделирования и пользовательского анализа и могут привлекаться к повторной обработке данных без необходимости их долговременного хранения.

Вычислительная инфраструктура ОИЯИ реализуется на базе облачной инфраструктуры Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ЛИТ ОИЯИ и интегрируется в РИВС через систему пакетной обработки заданий (HTCondor). Такой подход позволяет формировать динамически конфигурируемые вычислительные кластеры и эффективно перераспределять ресурсы между различными типами задач.

Система хранения данных строится как двухуровневая и включает дисковый и ленточный уровни. Дисковое хранилище реализовано на базе системы dCache и используется для размещения данных, участвующих в текущей обработке и анализе, обеспечивая эффективный доступ к ним в рамках грид-инфраструктуры. Долговременное хранение и архивирование данных осуществляется с использованием ленточной системы на базе EOS-CTA. В соответствии с принятой моделью хранения активные данные за последние два года размещаются на дисковых ресурсах, тогда как более ранние данные переводятся в ленточный архив.

Интеграция инфраструктуры ОИЯИ в РИВС JUNO осуществляется через стандартные грид-сервисы, обеспечивающие выполнение заданий и доступ к данным в распределённой среде. Такой подход обеспечивает прозрачное использование вычислительных и дисковых ресурсов и масштабируемость инфраструктуры по мере роста объёмов данных эксперимента.

Валидация данных JUNO

Определение качества данных эксперимента является одной из важнейших задач. На этой базе основана вся дальнейшая обработка физических данных. Валидация данных

делится на две подзадачи: первая — определение технических характеристик фотоумножителей в процессе их работы (счет темнового шума, напряжение, занятость фотоумножителей, временная синхронизация) и уточнение критериев их отбора, вторая — валидация физических данных эксперимента. В условиях длительной эксплуатации детектора критерии отбора требуют уточнения. Каждый набор данных может иметь свои особенности, которые нужно учесть. В 2025-2026 годах была разработана система мониторинга валидации сеансов для эксперимента JUNO с графическим веб-интерфейсом, а также были валидированы данные, набранные за первые полгода набора данных.

В 2027–2031 годах планируется:

- участие в разработке системы оффлайн-мониторинга данных (ODM);
- интеграция подсистем Run Validation и Channel Quality в систему оффлайн-мониторинга данных (ODM);
- расширение подсистемы Channel Quality за счет добавления дополнительных наборов тегов для всех детекторов;
- интеграция с распределённой информационно-вычислительной средой (РИВС) JUNO;
- проверка характеристик и уточнение критериев отбора качества работы больших и маленьких фотоумножителей для каждого набора физических данных;
- участие в работе по валидации физических данных в течение всего набора данных эксперимента;
- участие в работе по исследованию специфических технических особенностей фотоумножителей (flashers);

Реконструкция мюонных событий

Мы разработали новый метод реконструкции мюонных треков с использованием разложения по сферическим гармоникам. В этом подходе мы можем описать сигнал от мюонного трека, прошедшего через детектор ограниченным числом параметров, значительно меньшим, чем число ФЭУ, тем самым ускорив процедуру реконструкции. Процедура реконструкции, использующая алгоритм поиска по библиотеке образов, включает следующие шаги:

- моделирование эталонных мюонов: вертикальные мюоны с шагом 0.5 м по оси Ox;
- построение зависимости образа отклика детектора на мюонные треки от расстояния;
- создание образа отклика детектора для трека мюона, который необходимо восстановить;
- вращение образов отклика эталонных мюонов до совпадения с образом отклика исследуемого трека;
- найденные углы поворота — направление входящего трека мюона.

С помощью этого метода можно реконструировать как одиночные, так и множественные мюонные треки по сумме сферических функций от разных эталонных мюонных треков. Параметры трека мюона во время вращения определяются с помощью функционала хи-квадрат.

Процедура реконструкции мюонных треков с помощью сферических функций имеет следующие преимущества:

- сбор информации от ФЭУ осуществляется в течение 300 нс (в других методах только первое попадание), что снижает влияние шумов и неэффективности ФЭУ,

так как шумовой сигнал распределяется по сфере равномерно и компенсируется калибровочным коэффициентом при подгонке;
- наличие другого сигнала не оказывает большого влияния на качество реконструкции;
- этот метод позволяет использовать различные комбинации мюонных треков для одного события для реконструкции нескольких мюонных треков;
- с помощью этого метода мы можем реконструировать события, содержащие электромагнитный ливень, вызванный взаимодействием мюона со сцинтиллятором.

Отбор событий и статистический осцилляционный анализ

Обратный бета-распад регистрируется по совпадению двух сигналов (вспышек сцинтиллятора), первичного от позитрона, энергия которого пропорциональна энергии нейтрино и вторичного от гамма-частицы фиксированной энергии 2.2 МэВ после захвата нейтрона на водороде, служащей меткой и позволяющей в значительной степени подавить вклад фона. К фонам относятся случайные совпадения событий радиоактивности, долгоживущие изотопы ^{9}Li/^{8}He (β-n распад), гео-нейтрино, нейтрино от мировых АЭС и др. Особенностью JUNO по сравнению с предыдущими детекторами является масштаб: радиус доверительного объёма 17.2 м. Соответственно, все этапы анализа событий усложняются необходимостью учитывать размеры и неоднородность детектора. Группой из ОИЯИ реализован независимый отбор событий IBD, оценка эффективности и фона случайных совпадений.

Группа из ОИЯИ является одной из ключевых групп в JUNO, обеспечивающей статистический анализ реакторных антинейтринных данных. Нами были разработаны два фреймворка для построения моделей и статистического анализа GNA[19] (Global Neutrino Analysis, C++/Python) и dag-modelling[20] (Python/numba), являющиеся базой для осцилляционного анализа данных реакторных антинейтрино в экспериментах JUNO и Daya Bay группой из ОИЯИ. Проект GNA был расширен для поддержки экспериментов с ускорительными[21] нейтрино и атмосферными нейтрино. В частности, GNA использовался в параллельных анализах данных для получения окончательного результата эксперимента Daya Bay[22], определения чувствительности эксперимента JUNO[23] в конфигурации с ближним детектором TAO, а также первом результате JUNO[24]. С использованием dag-modelling была создана открытая модель эксперимента Daya Bay[25], которая полностью повторяет статистический осцилляционный анализ на полном открытом наборе данных Daya Bay[26], также подготовленном нашей группой.

Оба фреймворка содержат вычислительно-эффективные реализации моделей экспериментов JUNO и Daya Bay, а также инструменты для минимизации и статистической оценки. Проект dag-modelling является развитием проекта GNA и в будущем анализ будет полностью переведён на него, а разработка GNA будет остановлена.

---

[19] https://git.jinr.ru/gna/gna, https://arxiv.org/abs/1903.05567

[20] https://github.com/dagflow-team/dag-modelling

[21] Physics of Particles and Nuclei Letters volume 19

[22] https://arxiv.org/abs/2211.14988

[23] https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad7f3e

[24] https://arxiv.org/abs/2511.14593

[25] https://github.com/dagflow-team/dayabay-model

[26] https://zenodo.org/records/17587229

Дальнейшая работа включает в себя развитие методов статистического анализа и развитие и поддержка программных решений и включает следующие задачи:

- Поддержка и развитие анализа:
  - Поддержка актуальных данных о показателях работы детекторов JUNO и TAO, вкладе фонов.
  - Проведение совместного статистического анализа данных детекторов JUNO, TAO и эксперимента Daya Bay. Одновременный анализ данных нескольких периодов набора данных в JUNO, в том числе одновременный анализ данных с разных оболочек JUNO (учёт неоднородности). Одновременный анализ из разных виртуальных поддетекторов TAO (учёт осцилляционных эффектов на разных базах).
  - Оценка погрешностей измерение параметра осцилляций Δm^2_{31} методом Фельдмана-Казинса.
  - Исследование сигналов от “новой физики”: нестандартные взаимодействия, распады нейтрино и др.
  - Долгосрочная поддержка модели Daya Bay.
- Проведение физических измерений:
  - Измерение параметров нейтринных осцилляций Δm^2_{31}, Δm^2_{21} и $\sin^2 2\theta_{12}$ в JUNO.
  - Определение упорядоченности масс нейтрино в JUNO.
  - Измерение спектра реакторных антинейтрино в TAO.
  - Первый поиск осцилляций стерильных нейтрино в данных детектора TAO.
  - Поиск новой физики в данных TAO.
- Поддержка высокопроизводительных вычислений в dag-modelling:
  - реализация поддержки вычислений на GPU;
  - автоматное дифференцирование;
  - оптимизация существующих алгоритмов.

Анализ данных атмосферных нейтрино

Несмотря на то, что JUNO — сцинтилляционный детектор, тем не менее у него есть чувствительность к направлению высокоэнергетичных мюонов и электронов с ошибкой порядка 10° для энергий от 2.5 ГэВ. Это в частности позволит отобрать поток высокоэнергетичных частиц, идущих снизу, то есть связанный с мюонными и электронными нейтрино, проходящими через Землю. Наличие эффекта вещества по-разному искажает вероятность осцилляций для нейтрино энергий около 5 ГэВ, проходящих через ядро Земли ($\cos\theta<-0.8$). Искажение наиболее выражено для мюонных и электронных нейтрино в случае нормальной упорядоченности масс и для мюонных и электронных антинейтрино в случае обратной иерархии. Таким образом, у JUNO есть возможность определить МО нейтрино при помощи атмосферных нейтрино.

Более того, из-за того, что упорядоченность масс нейтрино проявляется по разному в спектрах атмосферных и реакторных нейтрино, при совместной подгонке данных возникнет дополнительное усиление чувствительности по сравнению с прямой статистической суммой.

У группы ОИЯИ есть наработки по статистическому анализу и оценке чувствительности эксперимента для атмосферных нейтрино и готовая инфраструктура для проведения совместного анализа. Дальнейшая работа предполагает участие в анализе атмосферных данных, в том числе:

- разработку алгоритмов идентификации частиц (ν_μ, $\bar{\nu}_\mu$, ν_e, $\bar{\nu}_e$).
- реконструкция направления нейтрино, в том числе с использованием методик для реконструкции мюонных треков.
- проведение статистического анализа данных для измерения параметров осцилляций нейтрино и определения иерархии масс.
- оценка совместной чувствительности JUNO к упорядоченности масс с помощью реакторных и атмосферных нейтрино.
- проведение совместного статистического анализа данных для определения иерархии масс нейтрино с помощью реакторных и атмосферных нейтрино.

Другие физические исследования

В настоящее время работа и планы группы сосредоточена в первую очередь на обработке реакторных нейтринных данных и, во вторую, на обработке атмосферных нейтринных данных. Тем не менее при притоке новых студентов и аспирантов, особенно во второй половине проекта, дополнительные задачи могут быть рассмотрены.

Ожидаемые результаты (2027-2031)

1. Энергетическая шкала детектора, собственное разрешение
    a. получение необходимых параметров из калибровочных данных и из моделирования методом МК;
    b. настройка стандартного кода моделирования с учётом собственного разрешения и калибровочных данных;
    c. включение аналитического метода в стандартный код подгонки данных.
2. Реконструкция мюонных треков:
    a. проверка качества реконструкции мюонных треков с помощью мюонной вето-системы;
    b. использование водного вето для лучшего задания начальных условий подгонки мюонного трека;
    c. совместное использование центрального детектора, водного вето и мюонного вето для реконструкции мюонов;
    d. оптимизация скорости реконструкции трека мюона.
    e. включение нового метода реконструкции в основную программу реконструкции событий;
3. Осцилляции реакторных электронных антинейтрино на длинной базе в JUNO:
    a. Определение упорядоченности масс нейтрино.
    b. Прецизионное измерение параметров осцилляций нейтрино $\sin^2\theta_{12}$, Δm^2_{21} и Δm^2_{31}.
4. Измерение потока гео-нейтрино от ^{238}U и ^{232}Th.
5. Реакторные электронные антинейтрино на короткой базе, TAO:
    a. Ограничения на параметры осцилляций стерильных нейтрино $\sin^2 2\theta_{14}$ и Δm^2_{41}.
    b. Феноменологические исследования. Поиск и установка ограничений на параметры:
        i. Распада нейтрино.
        ii. Нестандартных взаимодействий (NSI).

6. Атмосферные нейтрино в JUNO:
    a. Измерение потока и спектра атмосферных нейтрино в JUNO.
    b. Первое наблюдение осцилляций атмосферных нейтрино в жидкосцинтилляционном детекторе.
    c. Определение упорядоченности масс нейтрино с использованием атмосферных нейтрино.
7. Совместный анализ данных:
    a. Определение упорядоченности масс нейтрино по данным реакторных и атмосферных (анти)нейтрино в детекторе JUNO.
    b. Определение упорядоченности масс нейтрино в совместном анализе данных JUNO и длиннобазовых ускорительных и атмосферных экспериментов.

Обоснование материальных запросов

Для проведения научно-методических работ по фотодетекторам и для обновления научно-технической базы лаборатории будут закупаться контрольно-измерительные приборы стоимостью 50 тыс. долларов в год. Кроме того планируется обновление DAQ серверов для Top Tracker, за которые отвечает ОИЯИ, стоимостью 25 тыс. долларов.

Для поддержания работы детектора TAO каждый год потребуется 20 тыс. долларов для закупки компонент и производства запасных частей и модулей питания, необходимых в случае выхода из строя модулей питания SiPM. В рамках этих средств также будут закуплены и изготовлены калибровочные световые источники для TAO.

Планируется покупка вычислительных серверов. Согласно MoU за время проекта ОИЯИ должны докупить около вычислительные сервера с 4000 ядрами CPU. В проект мы закладываем покупку серверов с 200 ядер стоимостью около 200 тыс. долларов каждый год. Закупка серверов сверх этого количества будет проводится в рамках “Нейтринной вычислительной платформы”, в том числе после уточнения необходимого количества по мере набора данных. Развитие кластера JUNO является значимой частью развития “Нейтринной вычислительной платформы” ОИЯИ, так как вычислительные ресурсы, не занятые в задачах эксперимента JUNO доступны для использования всеми участниками платформы.

В МНТС на регулярной основе входят: эксплуатационный взнос, поездки на смены, собрания коллаборации и конференции. Эксплуатационный взнос на эксперимент JUNO, составляющий 120 тыс. долларов в год. Для ОИЯИ требуется суммарное участие в 4-х месяцах смен[27], затраты на которые оцениваются в 45 тыс. долларов в год. Поездки на собрания коллаборации (2 раза в год) и конференции оцениваются в 40 и 70 тыс. долларов соответственно. Суммарно перечисленные затраты составляют 275 тыс. долларов в год.

[27] одна из 3-х смен в день.

SWOT-анализ

	Положительное влияние	Отрицательное влияние
Внутренние	**Сильные стороны** ● Определение упорядочивания массы нейтрино методом, отличным от других экспериментов. ● Прецизионное измерение параметров осцилляций нейтрино. ● Измерение геонейтрино. ● Другая нейтринная физика (солнечная, атмосферная и др.) ● ОИЯИ несет ответственность за две основные подсистемы: электроэнергию высокого напряжения с ФЭУ и систему электроснабжения Si-ФЭУ. Обеспечение массового тестирования ФЭУ и SiPM. Вклад в систему ВЕТО. ● ОИЯИ играет ведущую роль в анализе.	**Слабые стороны** ● Недостаточная целостность детектора/структуры. ● Недостаточная надежность электроники/питания.
Внешние	**Возможности** ● Существование физики за пределами Стандартной Модели. ● Взрыв сверхновой. ● Диффузный фон сверхновых. ● Снижение систематических ошибок за счет новых измерений или усовершенствования теории. ● Разработка новых методов и технологий. ● Сотрудничество с китайскими институтами, совместное финансирование.	**Угрозы** ● Крупная авария. ● Невозможность договориться с другими коллаборациями о проведении совместного анализа данных.

Эксперимент JUNO, запущенный в конце 2025 года, стал огромным шагом вперед по масштабу и точности как среди реакторных нейтринных экспериментов, так и экспериментов с жидкими сцинтилляторами. Детектор JUNO в 20 раз больше, чем самый большой в настоящее время детектор реакторных антинейтрино KamLAND. Требования к эксперименту включают максимальное геометрическое покрытие ФЭУ и разрешение по энергии около σ=3% при 1 МэВ выделенной энергии. Поэтому конструкция детектора создаёт ряд технических сложностей, создающие высокие требования к надежности и безопасности. Потенциальные риски сведены к минимуму за счет тщательного тестирования подсистем и предъявления высоких требований к надежности компонентов детектора и электроники.

Проведение совместного анализа с другими экспериментами это длительный процесс, требующий также тщательного согласования на уровне коллабораций, который, естественно, на момент подготовки данного проекта ещё не произошёл. Авторы проекта считают, что риск неблагоприятного развития событий минимален, так как все стороны заинтересованы в совместном анализе и существует предыдущий положительный опыт подобных исследований как с нашей стороны (Daya Bay/MINOS/Bugey; чувствительность JUNO/KM3NET/ORCA), так и со стороны ускорительных экспериментов (NOvA/T2K).

2.3. Предполагаемый срок выполнения

Завершение проекта в 2045 году.

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	**Распределение по годам**				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты	10380	16640	22900	29170	35430
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)					
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU					
Облака (CPU ядер)	6300	6300	6300	6300	6300

Дополнительно к приведённым в таблице оценкам используется выделенное дисковое хранилище на базе системы dCache. В соответствии с принятой моделью хранения активные данные за последние два года размещаются на дисковых ресурсах, тогда как более ранние данные переводятся в ленточный архив. Начиная с 2027 года, по текущим оценкам, требуемый объем дисковых ресурсов составляет порядка 6.5 ПБ и далее останется приблизительно на этом уровне.

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	**Страна**	**Город**	**Участники**	**Тип соглашения**

IHEP	Китай	Пекин	Ифан Ван +10	MoU
SJTU	Китай	Шанхай	Цзянлай Лю +10	MoU
SYSU	Китай	Гуанчьжоу	Вей Ван +10	MoU
INFN	Италия	Катания, Рим, Падуя	Джузеппе Андронико +1 Стефано Мария Мари +1 Альберто Гарфаньини +5	MoU MoU MoU
GSI	Германия	Дармштадт	Ливия Лудова +10	MoU
EKUT	Германия	Тюбинген	Тобиас Лахенмайер +1	MoU

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)*

IHEP, SYSU, ОИЯИ.

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

(общее количество участников)

№№ п/п	**Категория работника**	**Основной персонал Сумма FTE**	**Ассоциированный персонал Сумма FTE**
1.	научные работники	10.9	1.5
2.	инженеры	7.1	1
3.	специалисты	—	—
4.	служащие	—	—
5.	рабочие	—	—
Итого:		**18**	**2.5**

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	ЛЯП	младший научный сотрудник, стажёр-исследователь	3.4
			научный сотрудник	4.4
			ведущий/старший научный сотрудник, начальник сектора	2.8

		ЛВЭ	старший научный сотрудник	0.3
2.	инженеры	ЛЯП	инженер-электроник, инженер, ведущий инженер, ведущий инженер-электроник, старший инженер	4.1
		ЛИТ	инженер-программист, ведущий программист, стажёр-исследователь, лаборант.	3
3.	специалисты	—	—	—
4.	рабочие	—	—	—
Итого:				**18**

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ (общее количество участников)

№№ п/п	**Категория работников**	**Организация-партнер**	**Сумма FTE**
1.	научные работники	МГУ	1.3
		ИЯИ	0.5
2.	инженеры	МГУ	0.6
		ИЯИ	0.5
3.	специалисты	—	—
4.	рабочие	—	—
Итого:			**2.9**

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта

2750 тыс. долларов.

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Отсутствуют.

Руководитель проекта _____/_____/

Дата представления проекта в ДНОД _____

Дата решения НТС Лаборатории _____, номер документа _____

Год начала проекта _____

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

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
				1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
		Международное сотрудничество (МНТС)	1375	275	275	275	275	275
		Материалы	100	20	20	20	20	20
		Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	1250	250	250	250	250	250
		Пуско-наладочные работы	—	—	—	—	—	—
		Услуги научно-исследовательских организаций	—	—	—	—	—	—
		Приобретение программного обеспечения	—	—	—	—	—	—
		Проектирование/строительство	—	—	—	—	—	—
		Сервисные расходы	—	—	—	—	—	—
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы						
		− сумма FTE,	90	18	18	18	18	18
		− ускорителя/установки,	—	—	—	—	—	—
		− реактора,…..	—	—	—	—	—	—
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*	2725	545	545	545	545	545
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей	—	—	—	—	—	—
		Средства по договорам с заказчиками	—	—	—	—	—	—
		Другие источники финансирования	—	—	—	—	—	—

Руководитель проекта _____/_____/

Экономист Лаборатории _____/_____/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА: Изучение осцилляций нейтрино в эксперименте JUNO (Участие ОИЯИ)

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА: JUNO

ШИФР ПРОЕКТА: 02-2-1099-1-2010/2031

ШИФР ТЕМЫ: 02-2-1099-2010

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА: Наумов Дмитрий Вадимович

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	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА

Приложение 4.

Форма отчета по Проекту

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории

_____/_____/

“_____“_____ 2026 г.

ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ

ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения по проекту

1.1. Научное направление физика элементарных частиц

1.2. Наименование проекта Изучение осцилляций нейтрино в эксперименте JUNO (Участие ОИЯИ)

1.3. Шифр проекта 02-2-1099-2010/2026

1.4. Шифр темы 02-2-1099-2010

1.5. Фактический срок реализации проекта 2026

1.6. Руководитель(ли) проекта Д.В. Наумов

2. Научный отчет

2.1. Аннотация

Период 2023−2026 годов был поворотным в подготовке эксперимента JUNO. На него пришлись основные этапы сборки и ввода эксплуатацию детектора JUNO и ближнего детектора TAO, набор первых физических данных и публикация первого физического результата — измерения двух параметров осцилляций нейтрино Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$ с наилучшей в мире точностью.

Группа ОИЯИ вносит значительный вклад на всех этапах подготовки эксперимента, его эксплуатации и анализа данных, в том числе в отчётный период:

(i) Были установлены модули высоковольтного питания для всех больших (20

дюймов) и малых (3 дюйма) фотоумножителей (ФЭУ) JUNO, спроектированные и произведенные под контролем ОИЯИ;

(ii) ОИЯИ участвовал сборке самого детектора JUNO.

(iii) ОИЯИ участвовал в создании детектора мюонов Top Tracker (TT), разработав систему механической поддержки, аппаратное и программное обеспечение для мониторинга сцинтилляторов Top Tracker, реконструкции треков и систему сбора данных (DAQ);

(iv) Массовые испытания и ввод в эксплуатацию крупных ФЭУ;

(v) ОИЯИ участвовал в проектировании и строительстве ближнего детектора JUNO — TAO: массовые испытания SiPM, производство и эксплуатация системы питания SiPM (4100 каналов);

(vi) ОИЯИ поддерживает центр обработки данных, предназначенный для моделирования, хранения и обработки данных для эксперимента JUNO. Центр в ОИЯИ — один из трех европейских центров обработки данных, обеспечивающий потребности JUNO;

(vii) ОИЯИ вносит вклад в разработку программного обеспечения: разработка ПО Global Neutrino Analysis (GNA) и dag-modelling для осцилляционного статистического анализа данных; разработка алгоритмов реконструкции и анализа данных; разработка сервиса для проверки качества данных.

(viii) ОИЯИ непосредственно участвует в обработке и анализе данных, от контроля качества данных, до отбора и статистического анализа.

2.2. Развернутый научный отчет

2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.

Реконструкция треков мюонов

Написана программа вычисления времени синхронизации мюонных триггеров между тремя детекторами: центральным, водным вето и мюонным вето. Найденные значения: Tcd − Twp ∼ −75 ± 250 нс, Tcd − Ttt ∼ 285 ± 250 нс (см. рисунок 1).

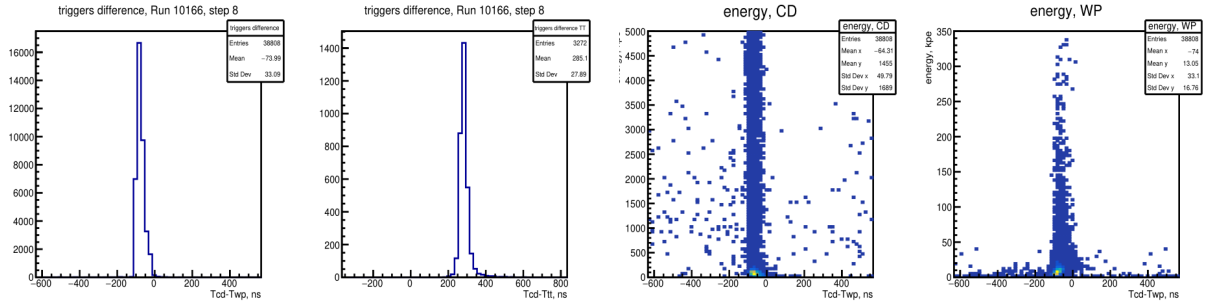

Рисунок 1. Время между триггерами для Tcd − Twp и Tcd − Ttt.

Получено следующее разрешение при реконструкции мюонных треков: расстояние между моделированным и реконструированным мюонными треками − 32 см, угол − 1,16 градуса. Средний объём, теряемый при вырезании мюонного трека (без учёта рождения изотопов Li9/He8) составляет 0,045% (см. рисунок 2).

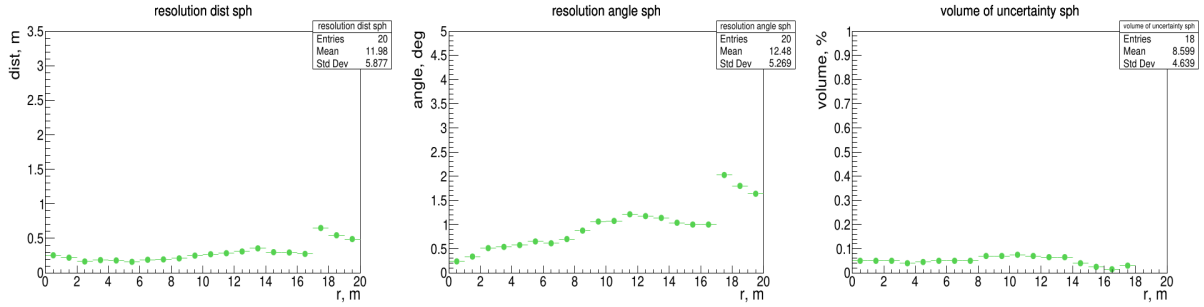

Рисунок 2. Расстояние и угол между моделированным и реконструированным мюонными треками. Средний объём, теряемый при вырезании мюонного трека.

Эффективность классификации мюонных событий по количеству одновременно пролетающих мюонных треков составляет 95,3%. Если расстояние между мюонными треками меньше 8 метров, то вероятность идентификации события как двух трекового составляет 50% (см. рисунок 3).

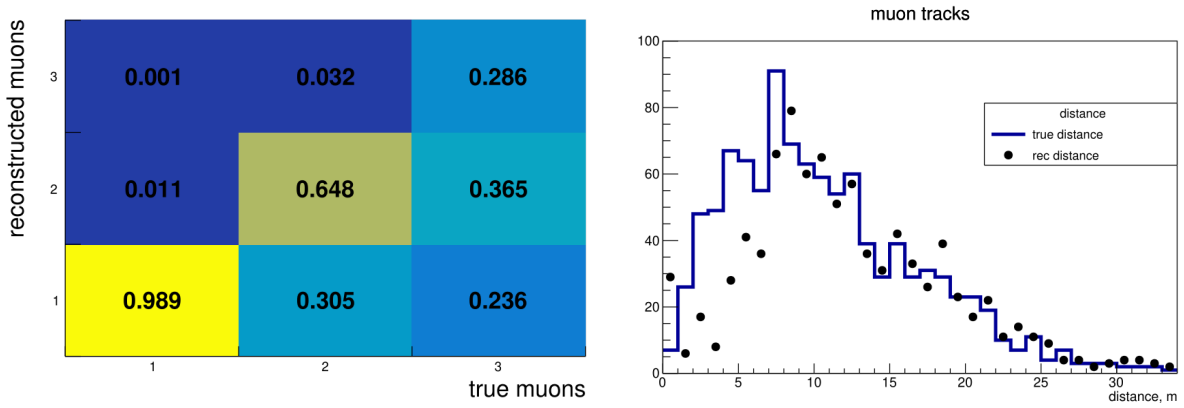

Рисунок 3. Эффективность классификации мюонных событий и расстояние между моделированными и реконструированными.

Крупные ФЭУ и ВВ ячейки (2024 г.)

Центральный детектор (Central Detector, CD) эксперимента JUNO представляет собой сферический акриловый резервуар диаметром 35 м, заполненный 20 кт жидкого сцинтиллятора. Регистрация сцинтилляционного света осуществляется с использованием порядка 20 000 20-дюймовых фотоумножителей (PMT), включая 17 612 PMT центрального детектора и 2 748 PMT системы VETO, а также около 26 000 3-дюймовых фотоумножителей. Это обеспечивает покрытие поверхности на уровне ~78%.

Установка 20-дюймовых фотоумножителей проводилась в течение более чем двух лет — с октября 2022 года по декабрь 2024 года. Всего было успешно установлено 20 343 PMT. В процессе установки было проведено семь кампаний тестирования фотоумножителей, охвативших в сумме около 19 800 устройств; оставшиеся PMT были установлены и проверены на завершающем этапе работ.

В рамках подготовки детектора было произведено более 25 000 модулей питания высокого напряжения (HVU, High-Voltage Unit), предназначенных для обеспечения работы фотоумножителей. Данные модули были установлены в детекторе JUNO совместно с

подводной электроникой и подключены к ФЭУ. Около 1600 каналов HVU использовались для питания 3-дюймовых фотоумножителей.

Была выполнена доработка прошивки HVU, а также разработано программное обеспечение для проверки работоспособности ФЭУ в процессе их установки. Все фотоумножители прошли предварительное тестирование на площадке Pan-Asia, после чего были транспортированы на площадку эксперимента JUNO. Перед установкой в детектор каждый ФЭУ подключался к источнику высокого напряжения, и в темновых условиях проводилось измерение уровня шумов. По результатам измерений было отмечено некоторое снижение уровня шумов, что связано с релаксацией ФЭУ после длительного пребывания в условиях отсутствия освещения.

В процессе установки ФЭУ в детектор также требовалась оперативная проверка корректности электрических соединений. В программном обеспечении HVU был реализован алгоритм, позволяющий проводить проверку при пониженном напряжении в условиях небольшой освещенности. Метод основан на регистрации фототока на фоне собственного холостого тока HVU, что позволяет надёжно определить наличие контакта и работоспособность канала.

Для проведения основных тестов требовалось обеспечение полностью тёмных условий. С этой целью отключались все источники видимого света в экспериментальном зале, на несущих конструкциях, а также в прилегающих помещениях и туннелях. Контроль уровня засветки осуществлялся с помощью отдельного мониторного фотоумножителя: при достижении допустимого уровня темнового счёта начиналась процедура тестирования.

Подача высокого напряжения на ФЭУ осуществлялась поэтапно (0 В → 800 В → 1200 В → 1600 В → рабочее напряжение) с выдержкой на каждом уровне и измерением темнового тока. Такой подход позволял минимизировать риск повреждения фотоумножителей, связанный с возможной остаточной засветкой, нестабильностью при первом включении или дефектами установки. На финальном этапе напряжение устанавливалось в соответствии с калибровкой на коэффициент усиления 10^7, и измерения проводились в течение нескольких часов на шумах. Помимо темнового счёта регистрировались формы сигналов шумовых импульсов.

Сигналы ФЭУ оцифровывались с помощью АЦП, а предварительная обработка данных выполнялась в FPGA, встроенных в модули GCU (Global Control Unit). Система питания HVU управлялась через систему медленного контроля (DCS), а сбор данных осуществлялся с использованием backend-электроники. Вся система обеспечивала непрерывный мониторинг параметров ФЭУ в процессе тестирования.

Из-за сложных условий установки и необходимости обеспечения максимальной темноты тесты проводились преимущественно в ночное время. Подготовка к каждому тесту занимала несколько часов и включала дополнительную проверку отсутствия засветки, что ограничивало частоту проведения измерений.

Сотрудники ОИЯИ принимали участие в разработке программного обеспечения и тестировании системы HVU, а также в работе консорциума PMT instrumentation при проведении указанных работ.

Заполнение и запуск JUNO (конец 2024 — начало 2025).

Сборка центрального детектора, в том числе установка и подключение фотодекторов, строительство акриловой сферы, установка катушки для защиты от магнитного поля Земли происходили 2024 году. Конструкционные работы, проводимые при непосредственном участии сотрудников ЛЯП ОИЯИ были завершены в декабре, после

чего началось заполнение и ввод в эксплуатацию детектора. Два месяца заняло заполнение бассейна и центрального детектора ультра-чистой водой. С февраля 2025 года вода в центральном детекторе вытеснялась жидким сцинтиллятором. С этого же момента было подано высоковольтное питание и начался непрерывный набор данных. Также с этого момента начались полноценные смены на детекторе. Заполнение детектора ЖС заняло почти 7 месяцев и закончилось в августе. Далее данные, набранные после недельной калибровочной кампании были непосредственно использованы для физического анализа [1].

В общей сложности 20 348 двадцати-дюймовых фотоумножителей были установлены и введены в эксплуатацию в JUNO на этапе заполнения жидким сцинтиллятором для изучения их характеристик и начала пусконаладочных работ детектора JUNO. Было установлено, что на сегодняшний день 19 872 из них работают нормально, 454 периодически дают вспышки, затрудняющие работу и 22 не работают совсем. Таким образом, процент отказов на сегодняшний суммарно по причинам, связанным с фотоумножителями и их высоковольтным питанием, составляет ~ 0.11%, что соответствует целевым параметрам, заложенным при проектировании JUNO.

Отклик детектора был изучен и было показано [2], что ключевые показатели хорошо согласуются с ожидаемыми. По измерению альфа-распадов ^{214}Po реконструкция энергии является пространственно однородной в пределах 1% в сфере радиуса 16.5 м (эффективный объём). Нелинейность энергетической шкалы измерена с точностью лучше 1% (см. рисунок 4) при помощи гамма-излучающих калибровочных источников. По данным тех же калибровочных источников достигнутое энергетическое разрешение σ=3.4% для энергии 1 МэВ (см. рисунок 5) в центре детектора (что пока хуже проектных ~3%).

Превышение ширины разрешения над проектным значением согласуется с ожидаемым вкладом внутреннего разрешения сцинтиллятора 1.5% (квадратично) [15, 22], который не был заложен при проектировании.

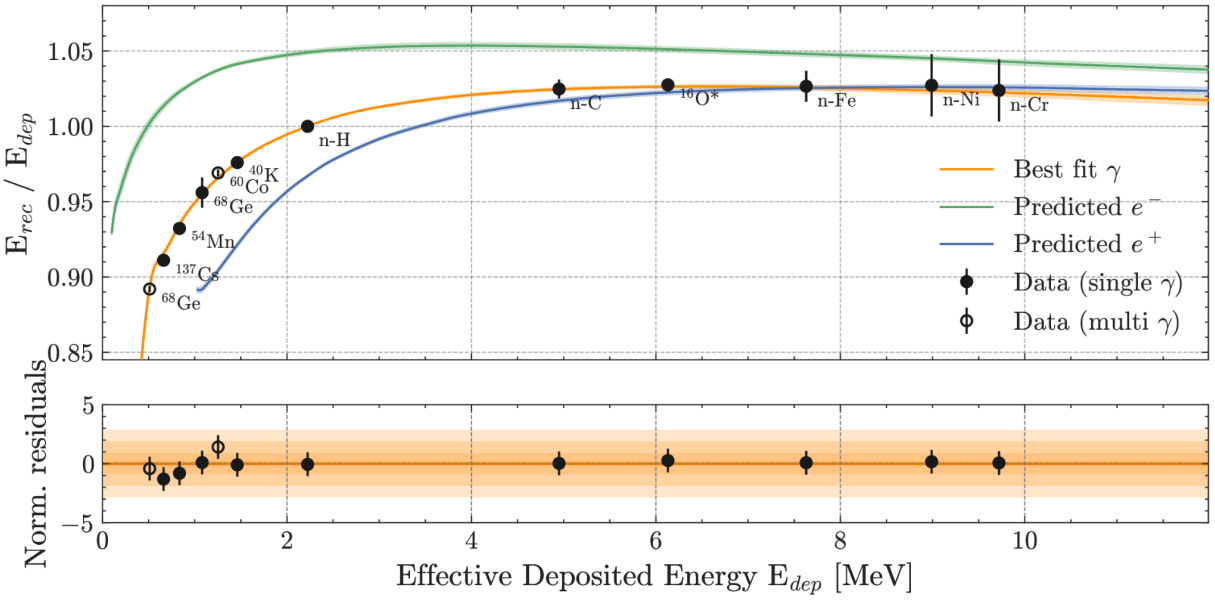

Рисунок 4. Нелинейность отклика детектора JUNO, измеренное с помощью γ-источников в центре детектора.

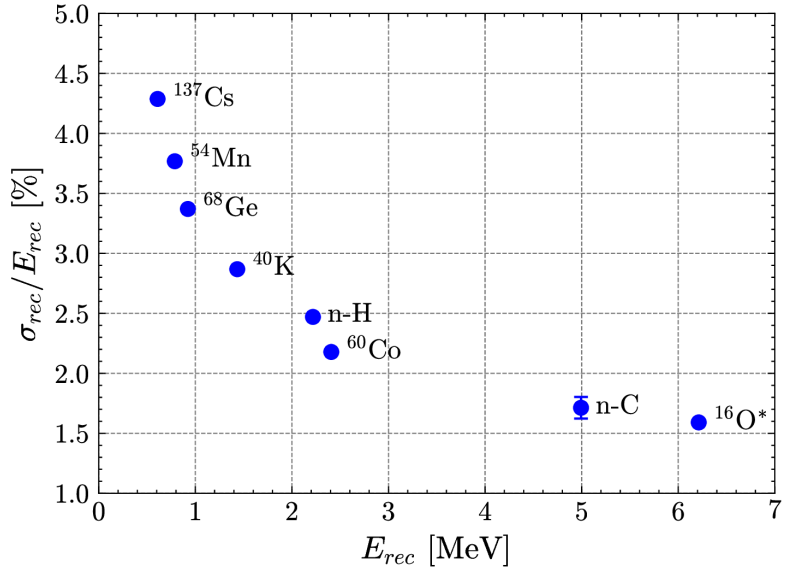

Рисунок 5. Энергетическое разрешение JUNO в зависимости от энергии, измеренное с помощью γ-источников в центре детектора.

ВЕТО ТТ

Top Tracker (TT) детектор, являющийся частью Вето системы JUNO, имеет три слоя координатных стриповых детекторов, установлен над центральным детектором (ЦД) и покрывает около 1000м2. Основной задачей ТТ является уточнение траектории мюонов, попадающих в ЦД, для исключения фоновых событий, порождаемых ими и имитирующих IBD сигнал,

ТТ создавался из сцинтилляционных модулей детектора OPERA, разобранного в 2015 году и перевезенного в Китай в 2017 г. Учитывая возраст пластического сцинтиллятора (основная партия была произведена в 2004-2005 гг), сложную логистику его доставки в Китай и условия его последующего хранения, была создана система мониторирования состояния модулей ТТ в контейнерах. Мобильная система сбора данных для части модулей позволяла регистрировать космические мюоны и контролировать сигналы в ТТ от них. Система позволила оценить изменение характеристик сцинтиллятора перед его сборкой в JUNO, падение световыхода с момента изготовления составляет около 30%.

Сборка ТТ детектора проводилась с января по июнь 2025 года, после завершения сборки и запуска всех других систем JUNO. В ОИЯИ была разработана механическая система поддержки ТТ детектора (общий вес составляет ~100 т), заказ на изготовление которой был размещен в Китае. Бригада ОИЯИ участвовала во всех этапах сборки ТТ: монтаже механической поддержки, прокладке кабелей, сборке и установке самих детектирующих элементов ТТ. Общий вид ТТ после сборки приведен на рисунке 6. Наблюдаемые распределения направления мюонов приведены на рисунке 7.

В ОИЯИ было разработано программное обеспечение сбора данных ТТ детектора и включения его в поток данных от других детекторов JUNO. В настоящее время новая

электроника ТТ еще не до конца запущена, в частности отсутствует триггер второго уровня, поэтому система сбора данных адаптирована под этот режим и данные ТТ сохраняются для полноценного анализа в режиме офф-лайн. Для использования данных ТТ в он-лайн анализе вместе с данными от других систем JUNO требуется их сшивка по времени. С этой целью поток данных упорядочивается по времени в каждой порции передачи. На текущем этапе приоритетной задачей является эффективное сохранение и передача информации от ТТ. В дальнейшем ожидается оптимизация потока данных и уменьшение его объема.

Учитывая старение сцинтиллятора и ограниченное количество слоев детекторов в ТТ, для эффективной регистрации мюонов нужен совместный анализ данных от ЦД, ВЧД и ТТ.

В настоящее время проводятся работы по сборке дополнительных детекторов на базе технологии RPC для расширения площади ТТ и более эффективной регистрации мюонов, попадающих в ЦД. Алгоритмы объединенной реконструкции мюонных треков в JUNO в настоящее время находятся в стадии разработки.

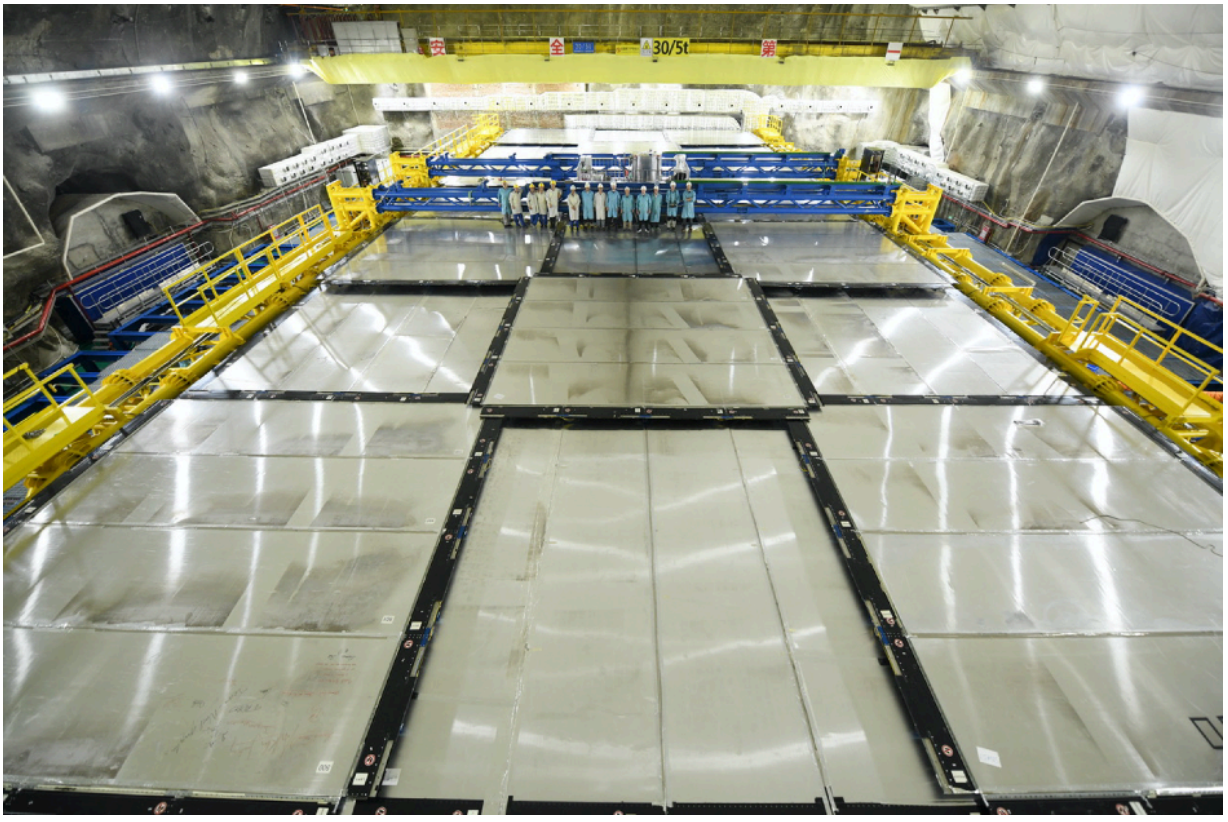

Рисунок 6. Общий вид детектора ТТ после завершения его сборки и установки в экспериментальном зале JUNO.

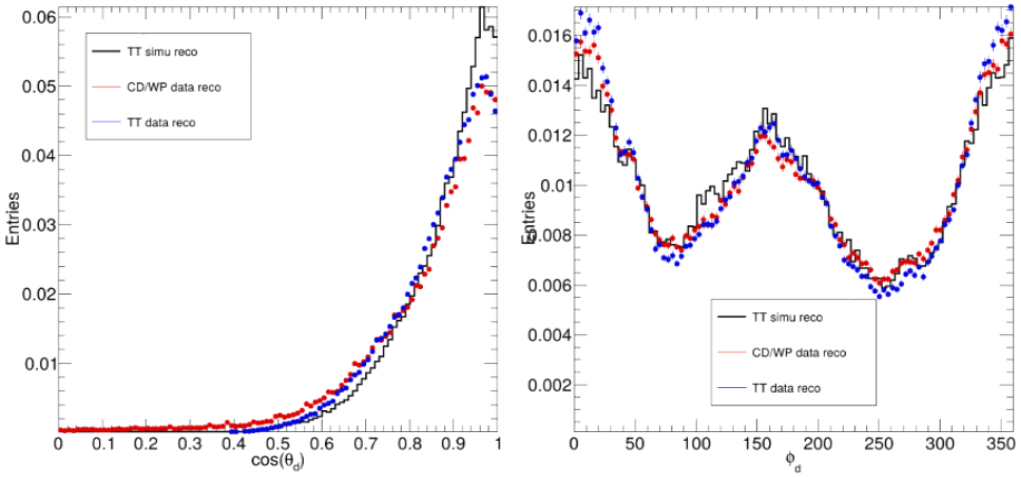

Рисунок 7. Сравнение реконструируемого углового распределения потока космических мюонов в TT, центральном детекторе, черенковском детекторе и моделирования.

TAO

Массовое тестирование SiPM для эксперимента TAO

Массовое тестирование SiPM для эксперимента TAO проводилось в 2024–2025 годах. Были охарактеризованы около 4100 матриц (тайлов), что в сумме составляет порядка 130 000 SiPM, работающих при температуре −50 °C. Основной задачей являлось обеспечение контроля качества и однородности параметров фотодетекторов, включая эффективность регистрации фотонов (PDE), усиление, перекрёстные наводки и темновой счёт (шумы, DCR).

На первом этапе был выполнен визуальный контроль тайлов с целью выявления дефектов эпоксидного покрытия. Далее была разработана и введена в эксплуатацию установка массового тестирования, обеспечивающая одновременное измерение 16 тайлов (по одному каналу SiPM на матрице) [19]. SiPM объединялись попарно в один канал в соответствии с конфигурацией, предусмотренной в установке TAO, что привело к необходимости измерения порядка 65 000 каналов. Для каждого канала было реализовано индивидуальное питание, что позволило осуществлять точный контроль напряжения и измерение токов. С использованием мультиплексоров выполнялось последовательное переключение каналов, обеспечившее измерение всех SiPM на 16 матрицах. Полный цикл измерений занимал около 1.5 часов, а с учётом охлаждения и нагрева — до 4 часов.

Для обеспечения равномерного освещения использовался стабилизированный светодиодный источник в сочетании с оптоволоконным делителем. Свет подавался на каждый тайл через волокна с рассеивателями, при этом референсные SiPM, расположенные рядом с тайлами, применялись для мониторинга интенсивности и калибровки светового поля. Сканирование распределения света выполнялось с использованием подвижной платформы с шаговыми двигателями. Для каждого положения набиралось до ~3×10^{4} событий на канал, что обеспечивало статистическую точность измерений на уровне <1%. Измерения светового поля проводились дважды в день — до и после основных измерений.

Была разработана и внедрена система сбора данных и управления установкой, основанная на клиент-серверной архитектуре. Это позволило автоматизировать процесс измерений, реализовать онлайн-мониторинг параметров и обеспечить интеграцию всех компонентов установки. Обработка данных выполнялась на вычислительном кластере с последующим извлечением параметров SiPM из зарядовых спектров и анализа форм сигналов.

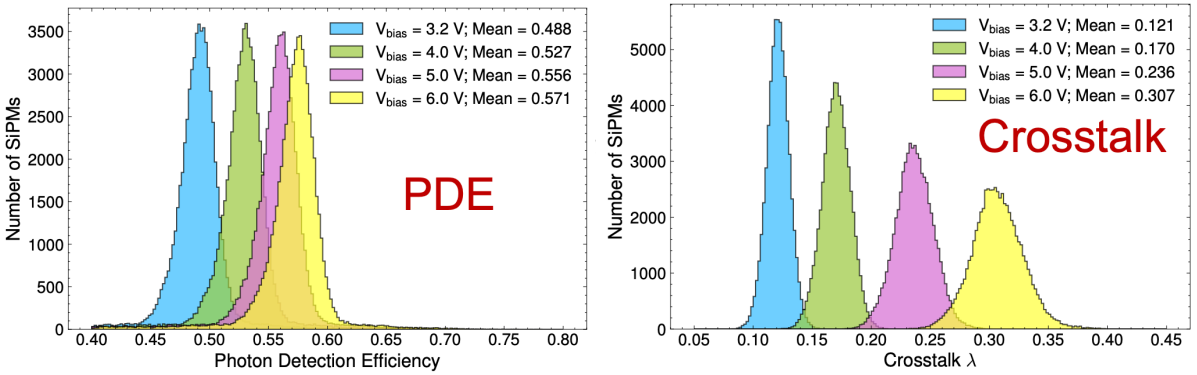

Рисунок 8. Распределения PDE (слева) и перекрестных наводок (справа) и их зависимость от перенапряжения на SiPM.

В ходе эксплуатации установки было показано, что стабильность светового потока в процессе измерений составляет лучше 1%. Проведённые измерения позволили определить основные характеристики SiPM, включая усиление, PDE, перекрёстные наводки, темновой ток и частоту темновых импульсов (DCR). Полученные значения параметров находятся в ожидаемом диапазоне: PDE на уровне ~60%, перекрёстные наводки порядка 25% [18], а также низкие значения DCR при рабочей температуре −50 °C. По зависимости усиления от напряжения было выполнено определение напряжения пробоя для каждого SiPM.

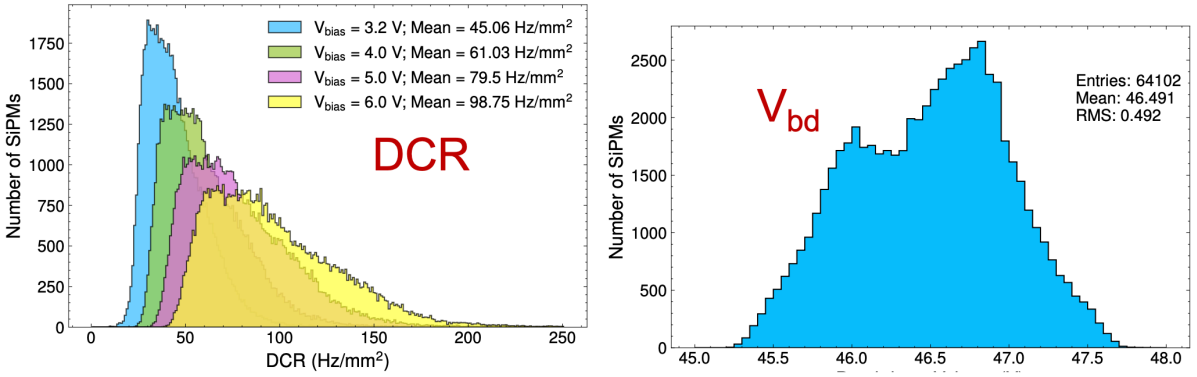

Рисунок 9. Распределения DCR и их зависимость от перенапряжения на SiPM (слева) и распределение напряжения пробоя (справа).

Дополнительно была исследована температурная зависимость шумов SiPM, на основе которой была определена энергия активации. Это позволило выполнить оценку

процессов старения SiPM при рабочих условиях −50 °C. Для ускоренного тестирования деградации была проведена выдержка SiPM под напряжением в течение двух недель при комнатной температуре, что позволило экстраполировать поведение детекторов на длительные сроки эксплуатации [17].

На рис. 8 и 9 приведены распределения PDE, перекрёстных наводок и темнового счёта (DCR) по всем измеренным каналам SiPM, а также их зависимость от перенапряжения. Показано, что с увеличением перенапряжения возрастает PDE, что приводит к увеличению светосбора. Однако одновременно наблюдается рост перекрёстных наводок и шумов, что ухудшает энергетическое разрешение. Таким образом, существует оптимальное значение перенапряжения, обеспечивающее баланс между эффективностью регистрации и уровнем шума.

Из полученных результатов было оценено энергетическое разрешение детектора (см. Рис. 10) с учётом вклада сцинтиллятора и фотодетекторов, а также его зависимость от перенапряжения SiPM. Показано наличие оптимума в области 3 В, и данное значение было выбрано в качестве рабочей точки для эксплуатации SiPM.

На основании полученных распределений параметров была продемонстрирована возможность отбора и группировки тайлов с близкими характеристиками, а также оптимизации рабочих напряжений для обеспечения однородности отклика детектора.

Таким образом, было выполнено массовое тестирование SiPM для эксперимента TAO, подтверждена работоспособность разработанной установки и продемонстрирована её эффективность для характеризации большого количества фотодетекторов.

По результатам этой работы было опубликовано три статьи [17],[18],[19].

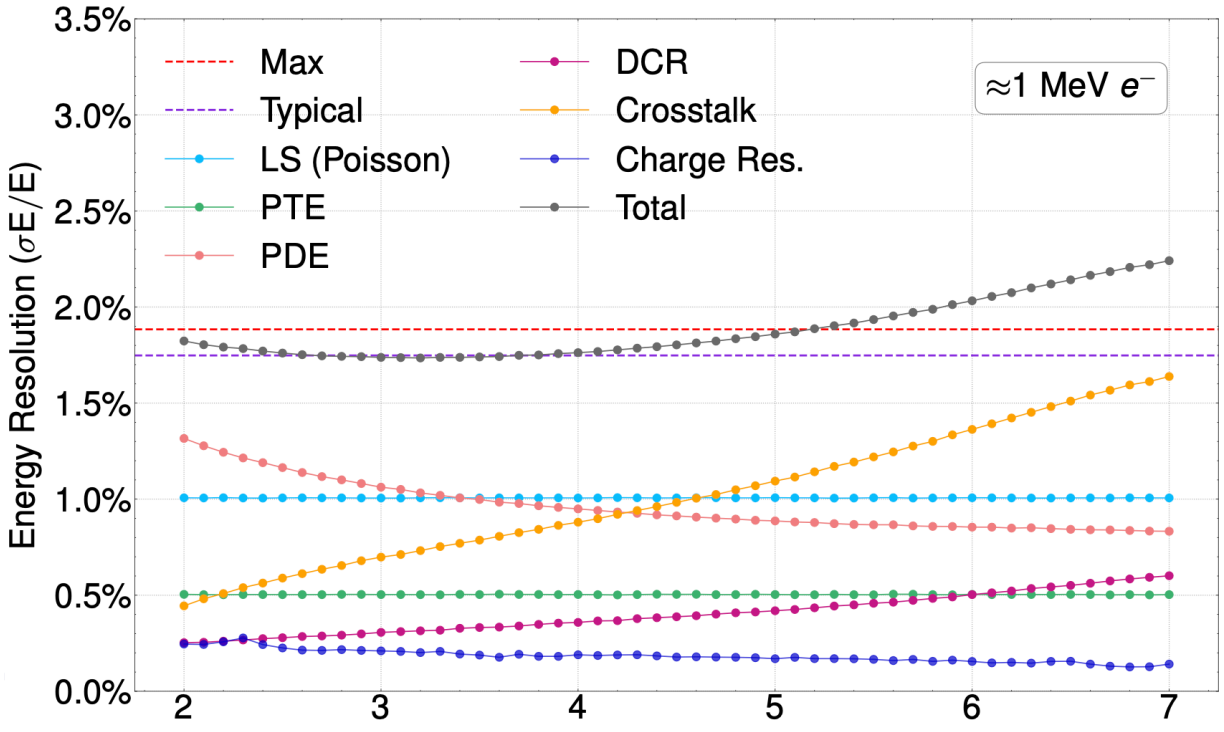

Рисунок 10. Оценка энергетического разрешения детектора TAO от различных компонент и их зависимость от перенапряжения на SiPM.

Система питания SiPM

В рамках разработки принадлежащей ОИЯИ системы питания SiPM для детектора ТАО группой из ОИЯИ, начиная с конца 2023 года, совместно с компанией «Марафон» была осуществлена закупка всех необходимых компонентов для производства источников питания кремниевых фотоумножителей (SiPM). Параллельно на производственной площадке в Китае было налажено изготовление ключевых комплектующих — материнских плат и мезонинов с установленными высоковольтными ЦАП.

Из произведенных компонентов было собрано 40 источников питания. Для каждого из них выполнена загрузка прошивки управляющего контроллера, проведена проверка работоспособности и калибровка шкалы напряжения с целью компенсации интегральной нелинейности ЦАП. В соответствии с проектным решением все источники питания были компактно размещены в двух VME-крейтах, оснащённых модулем управления на базе микрокомпьютера PhyCore и модулем расширения CAN–USB, обеспечивающим объединение крейтов в единую CAN-сеть. Также была изучена температурная зависимость ЦАП [30].

В период с января по июнь 2024 года в ИФВЭ (Пекин) была проведена комплексная проверка надёжности и стабильности работы всех источников питания при максимальной нагрузке (200 В, 0,5 мА на канал). Испытания проводились в конфигурации, соответствующей их финальному размещению в детекторе ТАО. Все источники успешно прошли тестирование. В течение 2024 года часть модулей также подтвердила свою работоспособность при эксплуатации в составе прототипа детектора ТАО, обеспечивая питание 100 тайлов кремниевых ФЭУ. В рамках этих испытаний был проверен прототип переходной пластины, предназначенной для подачи напряжения и соединения внутренних и внешних кабелей, устойчивых к шумовым помехам и агрессивной среде сцинтиллятора.

В начале 2025 года все источники питания были доставлены на площадку атомной станции в Тайшане. На месте была выполнена предварительная сборка системы питания, что позволило провести дополнительную проверку работоспособности кремниевых ФЭУ в «горячем» варианте прототипа ТАО при комнатной температуре. Были изготовлены две переходные пластины (Рис. 11 (справа)), обеспечившие питание всех матриц кремниевых ФЭУ и позволившие провести финальную проверку сигналов фотодетекторов.

После завершения сборки детектора ТАО и его установки в рабочее положение относительно реактора (конец 2025 года) система питания была размещена в термостабильном шкафу и дооснащена кабелями питания и заземления в соответствии с окончательным проектом (Рис. 11 (слева)). В процессе равномерной укладки внутренних кабелей выяснилось, что требуется задействовать большее количество разъёмов на переходной пластине, что привело к необходимости использования на три модуля питания больше, чем планировалось изначально. С учётом того, что часть модулей была также задействована в верхнем вето-трекере, было принято решение о производстве дополнительных 10 модулей. С этой целью в период с декабря 2025 по январь 2026 года в ИФВЭ (Пекин) были выполнены сборка и калибровка резервных источников питания.

На протяжении всего проекта велась разработка и совершенствование программного обеспечения для управления системой питания. На основе протокола CANopen был реализован программный интерфейс, обеспечивающий полный функционал взаимодействия с аппаратной частью. Связь с модулями осуществляется через управляющий модуль, на котором развернут сервер данного интерфейса. Для удобства

работы был разработан web-клиент, предоставляющий гибкие средства управления и мониторинга параметров источников питания (Рис. 12 (слева)).

Кроме того, в конце 2025 года система питания была интегрирована в систему управления детектором TAO (DCS) на базе ранее разработанного программного интерфейса. Это позволило в режиме реального времени отслеживать состояние системы, применять калибровочные поправки по напряжению и сохранять все параметры в базе данных JUNO-TAO. Вид контрольной панели управления сервисами синхронизации данных с DCS представлен на Рис. 12 справа.

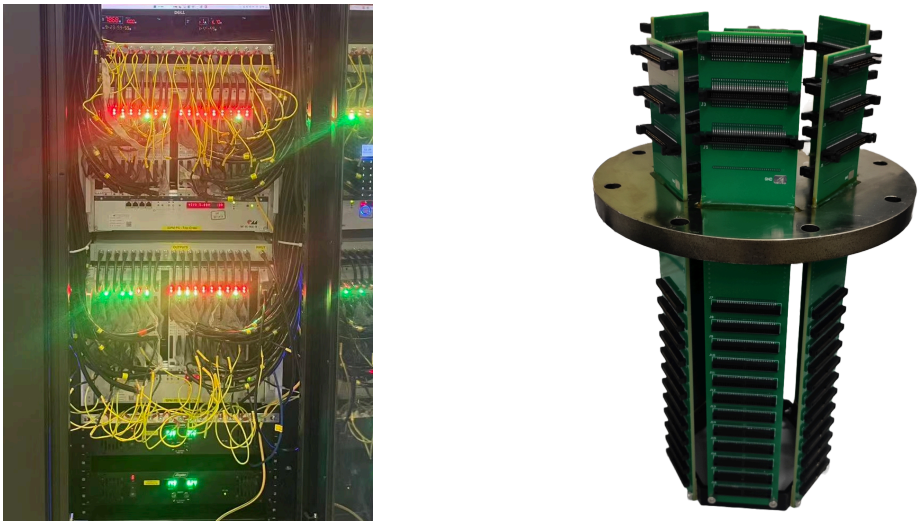

Рисунок 11. Вид системы питания в собранном виде на площадке АЭС в Китае (слева) и переходной пластины (справа).

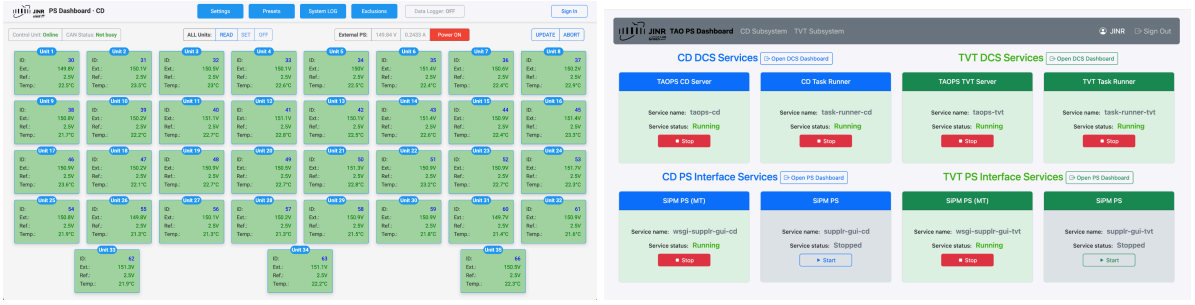

Рисунок 12. Вид графического интерфейса для управления системой питания (слева) и вид контрольной панели системы синхронизации данных между источниками питания с БД DCS (справа).

Монтаж и пуско-наладка ТАО

В рамках ввода детектора ТАО в эксплуатацию группой ОИЯИ был выполнен следующий комплекс работ:

- Ноябрь 2024 года. В условиях чистой комнаты осуществлена установка 4024 матриц кремниевых фотоумножителей (SiPM) на две полусферы медного каркаса: с внутренней стороны размещены матрицы, с внешней — фронт-энд электроника. Для каждой матрицы проведена полная проверка цепочки считывания сигнала, включая контроль линий низковольтного и высоковольтного питания. Это позволило на раннем этапе выявить и исключить неисправные кабельные линии и отдельные матрицы.
- Декабрь 2024 года. После завершения оснащения каркаса обе полусферы были совмещены и размещены в светоизолированной комнате (см. Рис. 13 (справа)). Выполнено подключение внутренних сигнальных, низковольтных и высоковольтных кабелей.
- Конец декабря 2024 года. Полностью собранный медный каркас был установлен в криостат. Смонтированы фланцы с переходными пластинами для вывода кабелей питания и сигналов. Проведено тестовое подключение внешних кабелей по всем линиям.
- Март–апрель 2025 года. Выполнена повторная комплексная проверка работоспособности всех каналов детектора. Выявленные неисправности оперативно устранены.
- Октябрь–ноябрь 2025 года. После перемещения криостата с установленной медной сферой в рабочее положение (на расстояние 44 м от активной зоны реактора) выполнено окончательное подключение внешних кабелей питания и сигналов, включая линии заземления. Оборудование питания и считывания матриц SiPM размещено в термостабилизированных шкафах и настроено в соответствии с проектной конфигурацией (см. Рис. 13 (слева)). На данном этапе проведено одновременное включение и комплексная проверка всех подсистем детектора, выполнена сетевая настройка оборудования и отладка программного обеспечения, а также интеграция в систему управления детектором (DCS).

После охлаждения детектора до температуры −50 °C и подтверждения работоспособности всех каналов проведены пробные наборы данных для оценки усиления матриц по каждому каналу. Дополнительно выполнена идентификация и исключение каналов с повышенным уровнем шума.

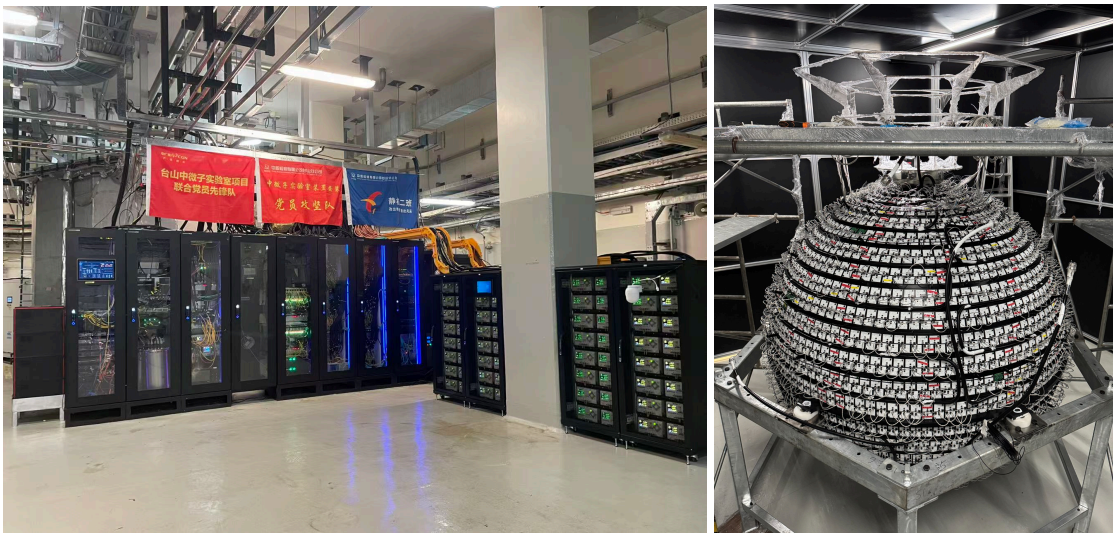

Рисунок 13. Окончательный вид всей электроники используемой в детекторе TAO на площадке атомной станции в Китае (слева) и вид медного каркаса оборудованного матрицами изнутри и электроникой снаружи (справа).

Вычислительная и сетевая инфраструктура

В отчетный период после начала набора данных вычислительная инфраструктура ОИЯИ, задействованная в рамках распределённой информационно-вычислительной среды (РИВС) эксперимента JUNO, функционирует в соответствии с исходными ожиданиями. В то же время реальные параметры потока данных потребовали корректировки решений по хранению данных.

Одним из основных изменений стало создание и ввод в эксплуатацию выделенного хранилища на базе системы dCache для эксперимента. Ранее для нужд эксперимента использовалось общее хранилище МИВК (EOS), разделяемое между различными проектами. Переход к выделенной системе хранения был обусловлен ростом объемов данных и необходимостью повышения надежности системы хранения.

К настоящему моменту в системе dCache введено в эксплуатацию около 3.6 ПБ эффективного дискового пространства, из которых уже занято 2.8 ПБ. Дополнительно закуплены дисковые серверы, которые после ввода в эксплуатацию обеспечат около 2.15 ПБ дополнительного объема.

По счётным ресурсам значительных изменений в отчетный период не произошло. Вычислительный центр ОИЯИ был подключен к системе учёта использования ресурсов EGI (EGI accounting), что обеспечило централизованный сбор и анализ информации о загрузке вычислительных ресурсов.

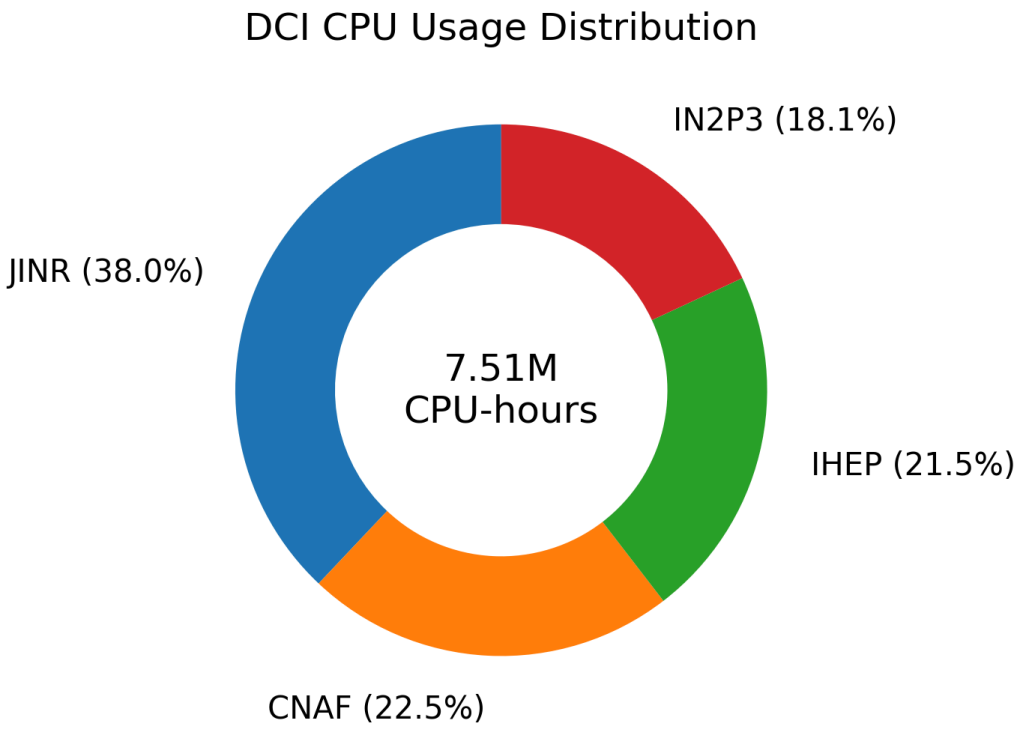

Рисунок 14. Распределение используемых вычислительных ресурсов в рамках РИВС JUNO с января 2024 по март 2026 года.

В рассматриваемый период на ресурсы ОИЯИ приходится около 38% общего объема выполненных задач в рамках РИВС JUNO (см. рисунок 14).

Также начаты работы по восстановлению и развитию системы запуска задач jsub, изначально предназначенной для пользовательского анализа и задач моделирования в распределённой инфраструктуре JUNO. К моменту начала эксплуатации эксперимента поддержка и развитие данного инструмента были прекращены в связи с ограниченными кадровыми ресурсами. Начиная с 2025 года работы по развитию jsub были возобновлены силами двух аспирантов из ОИЯИ, включая адаптацию к текущей инфраструктуре и расширение функциональности. Параллельно начата разработка средств мониторинга пользовательских задач.

Для улучшения сетевой связности между ОИЯИ и IHEP было организовано логическое соединение L2VPN по маршруту IHEP–CERN–CERNLight-JINR. Ранее взаимодействие осуществлялось через публичные сети передачи данных, что не обеспечивало требуемой и предсказуемой пропускной способности.

Валидация данных эксперимента JUNO

В отчетном периоде была разработана система мониторинга валидации сеансов для эксперимента JUNO, включающая две подсистемы: Run Validation и Channel Quality. Для удобства эксплуатации системы был реализован графический веб-интерфейс.

Подсистема Run Validation обеспечивает визуализацию данных в виде интерактивных графиков, позволяющих оценивать качество данных для отдельных

сеансов, а также анализировать глобальные тренды за весь период набора данных. Пример страницы Run Validation представлен на рисунке 15.

Подсистема Channel Quality содержит информацию о состоянии каналов детектора для каждого сеанса и позволяет выявлять нестабильности в работе детектора, а также диагностировать потенциальные проблемы на уровне отдельных каналов. Таким образом система хранит историю всех каналов детектора на протяжении всей их работы.

Разработка системы мониторинга проводится во взаимодействии с группой Data Quality эксперимента JUNO. Начиная с набора физических данных группа занимается проверкой характеристик и уточнением критериев отбора качества работы больших и маленьких фотоумножителей эксперимента. На данный момент валидированы данные, набранные за период с 30 августа 2025 года до конца февраля 2026 года. Мы проверили характеристики работы 17634 больших фотоумножителей в течение этого периода в каждом наборе данных (более 3000 наборов). Валидация маленьких фотоумножителей проводится, но пока не закончена из-за технических особенностей. Информация о характеристиках используется для составления списков плохих каналов для исключения их из анализа физических данных. Критерии для отбора каналов уточняются по мере изучения работы детектора и понимания его особенностей. Группа также участвует в работе по отбору и проверке данных эксперимента, используя в работе подсистему Run Validation.

Диагностические графики формируются автоматически и доступны для анализа дежурными операторами, которые используют их для контроля параметров сеансов и оценки их стабильности во времени. По результатам анализа выявляются потенциальные отклонения, информация о которых передается экспертам для детального рассмотрения и принятия решений.

Разработанная система интегрирована в рабочий процесс контроля качества данных и обеспечивает эффективное взаимодействие между операторами и экспертами, а также своевременное выявление проблем в работе детектора.



Рисунок 15. Вид пользовательского интерфейса для анализа диагностических графиков. Эффект размытия добавлен намеренно в связи с тем, что представлены чувствительные данные.

Собственное разрешение жидкого сцинтиллятора и энергетический отклик детектора.

Мы оценили вклад собственного разрешения в полную ширину сцинтилляционной линии для детектора JUNO по калибровочным данным, следуя формализму, изложенному в работах нашей группы [15] и [22].

Определения

Относительная дисперсия зарядового сигнала для гамма-квантов определяется выражением [22]:

(1) $v(Q_\gamma) \equiv \sigma^2(Q_\gamma) / Q_\gamma^2 = (1 + v_1^{Det}) / Q_\gamma + (Q_1 / Q_\gamma) \cdot v_1^{int} + v_\gamma(Q_\gamma)$,

где:

- $v(Q_\gamma)$ - относительная вариация полного зарядового сигнала для гамма-кванта со средним энерговыделением, соответствующем среднему регистрируемому заряду Q_γ;
- v_1^{Det} - относительная вариация одноэлектронного спектра ФЭУ, усреднённая по всем ФЭУ детектора;
- Q_1 - средний собранный заряд для электронов с энергией 1 МэВ (световыход);
- v_1^{int} - универсальный параметр, описывающий вклад собственного разрешения в полное энергетическое разрешение для электрона с энергией 1 МэВ.

В отличие от гамма-квантов, отклик ЖС детектора для α-частиц не содержит вклада от собственного разрешения, а также последнего члена $v_\gamma(Q)$, характерного для гамма-излучения:

(2) $v(Q_a) \equiv \sigma^2(Q_a) / Q_a^2 + v^{Det}(p) = (1 + v_1^{det}) / Q_a + v^{Det}(p)$,

где $v^{Det}(p)$ - вклад в полное энергетическое разрешение, связанный с неоднородностью светосбора (если компенсация светосбора в зависимости от положения источника отсутствует).

Примечание. В первом случае (для γ-квантов) предполагается, что источник является точечным, и член, связанный с неоднородностью детектора по отношению к светосбору, отсутствует. В случае α-частиц член для неоднородности всё ещё может присутствовать, поскольку источник неточечный, однако для наших целей мы можем использовать квазиточечный источник, расположенный «близко к центру», пренебрегая неоднородностью светосбора. Тем не менее, для общности мы сохраним член $v^{Det}(p)$.

Оценка параметров по данным для α-частиц (^{214}Po)

Средний отклик моноэнергетических α-частиц от распада ^{214}Po соответствует энерговыделению электронов с энергией 0,93 МэВ. Соответствующее энергетическое

разрешение составляет (2,8 ± 0,1) % (для оценки неопределённости использовались данных с рисунка из работы [2]).

Можно записать:

(3) $v(Q_a) = (0{,}028)^2 = (1 + v_1^{Det}) / (0{,}93 \cdot LY) + v^{Det}(p)$

Следовательно:

(4) $(1 + v_1^{Det}) / LY = 0{,}93 \cdot (0{,}028)^2 - 0{,}93 \cdot v^{Det}(p) = (7{,}3 \pm 0{,}6) \cdot 10^{-4} - 0{,}93 \cdot v^{Det}(p)$

Оценка параметров по данным для гамма-квантов (511 кэВ)

Зарядовый отклик двух гамма-квантов с энергией 511 кэВ имеет видимую энергию 0,89 МэВ для электрона с полным энергетическим разрешением 3,4 %.

Соответствующее выражение для одного γ-кванта с энергией 511 кэВ выглядит следующим образом:

(5) $v(Q_\gamma) = 2 \cdot v(2 \cdot Q_\gamma) = 2 \cdot (0{,}034)^2 = (1 + v_1^{Det}) / (0{,}89 \cdot 0{,}511 \cdot LY) + (LY) / (0{,}93 \cdot 0{,}511 \cdot LY) \cdot v_1^{int} + v_\gamma(Q)$

Подставляя $(1 + v_1^{Det}) / LY = 7{,}3 \cdot 10^{-4} - 0{,}93 \cdot v^{Det}(p)$ из (4), получаем:

(6) $2 \cdot (0{,}034)^2 = (23{,}1 \pm 1{,}4) \cdot 10^{-4} = [7{,}3 \cdot 10^{-4} - 0{,}93 \cdot v^{Det}(p)] / (0{,}89 \cdot 0{,}511) + [1 / (0{,}93 \cdot 0{,}511)] \cdot v_1^{int} + v_\gamma(Q) = (16{,}1 \pm 1{,}2) \cdot 10^{-4} + 2{,}1 \cdot (v_1^{int} - 0{,}93 \cdot v^{Det}(p)) + v_\gamma(Q)$

Отсюда находим для v_1^{int}:

(7) $v_1^{int} = [(7{,}1 \pm 1{,}8) \cdot 10^{-4} - v_\gamma(Q)] / 2{,}1 + 0{,}93 \cdot v^{Det}(p) = (3{,}4 \pm 0{,}9) \cdot 10^{-4} - v_\gamma(Q)/2{,}1 + 0{,}93 \cdot v^{Det}(p)$

Значение $v_\gamma(Q)$ было оценено методом Монте-Карло в работе [10]; оно находится на уровне $(1{,}1\ \%)^2 = 1{,}3 \cdot 10^{-4}$. В результате получаем:

(8) $v_1^{int} \approx (2{,}8 \pm 0{,}9) \cdot 10^{-4}$

что соответствует энергетическому разрешению (1,7 ± 0,25) % при энерговыделении 1 МэВ для электронов.

Полученный результат статистически совместим с предыдущими измерениями для жидких органических сцинтилляторов из работ [15] и [22].

Оценка световыхода LY

Кроме того, можно оценить значение LY (в фотоэлектронах на МэВ), используя уравнение (2):

(9) $LY = (1 + v_1^{Det}) / [0{,}93 \cdot v(Q_a)] = (1 + v_1^{Det}) / [0{,}93 \cdot (7{,}3 \pm 0{,}6) \cdot 10^{-4}] = 1473 \cdot (1 + v_1^{Det})$

При $(1 + v_1^{Det}) = 0{,}48$ получаем:

(10) LY = 2180 ± 180 фотоэлектронов/МэВ

Если использовать значение LY ≃1600 фотоэлектронов/МэВ, это приводит к нереалистично малому значению $v_1^{Det} = 0{,}09$.

Таким образом, простой анализ калибровочных данных JUNO приводит к заключению о необходимости включения вклада собственного разрешения в анализ данных JUNO.

Отбор событий и осцилляционный анализ (2026 г.)

В 2025 году было опубликовано [3] детальное исследование чувствительности эксперимента JUNO к упорядоченности масс нейтрино, учитывающее наиболее актуальную проектную информацию о характеристиках детекторов JUNO и TAO и фоновых условиях. Было показано, что JUNO сможет достичь медиальной чувствительности к упорядоченности масс нейтрино на уровне 3-х стандартных отклонений через 7.1 лет набора данных (см. рис. 16).

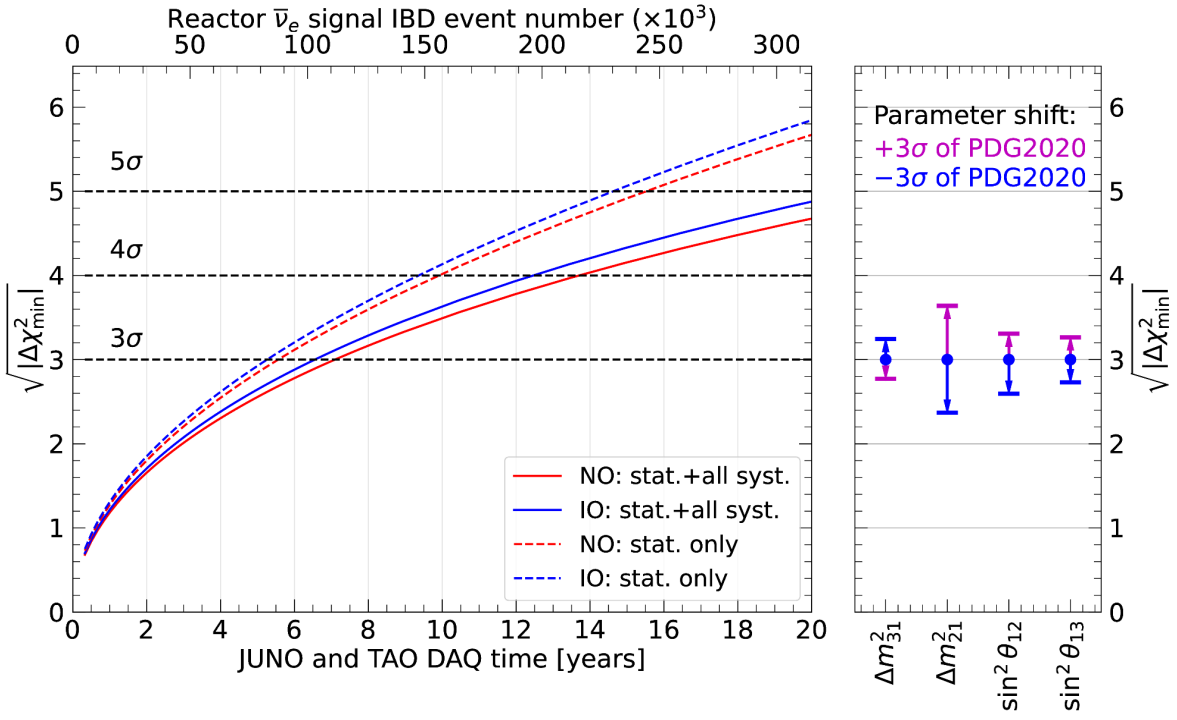

Рисунок 16. Чувствительность к определению МО ($\Delta\chi^2_{min}$) в зависимости от времени набора данных. Слева: Результаты для нормального (NO, красные кривые) и обратного (IO, синие кривые) упорядочивания масс. Сплошные линии учитывают все систематические погрешности, штриховые — только статистические. С учетом предположения, что реакторы будут работать 11/12 месяцев в году, чувствительность на уровне 3σ достигается за 7.1 года для NO (и 3.1σ для IO). Справа: Влияние истинных значений параметров осцилляций на чувствительность для NO при экспозиции 7.1 года.

Ближний детектор TAO был запущен не по графику. Физический набор данных был начат в феврале 2026 года. На настоящий момент задача: набор нескольких месяцев данных для предоставления ограничения на форму спектра реакторных электронных антинейтрино, необходимого для измерения параметров осцилляций и определения упорядоченности масс нейтрино в JUNO. Соответственно, первые ограничения из данных TAO на параметры стерильных нейтрино будут получены не раньше окончания 2026-го года.

В детекторе JUNO в период с 26 августа по 2 ноября 2025 года (59.1 дней) была набрана [1] статистика 2379 кандидатов (рис. 17) в события обратного бета распада (взаимодействия антинейтрино, ОБР). При оценочном вкладе фоновых событий 34% в JUNO взаимодействует 47.9 реакторных электронных антинейтрино в день, что в 3 раза ниже, чем ожидается без осцилляций. Осцилляционный анализ производится совместно для данных JUNO и данных с ближних детекторов эксперимента Daya Bay (см. следующий раздел), обеспечивающих ограничение формы спектра реакторных электронных антинейтрино. Кроме того были использованы ограничения на параметры осцилляций $\sin^2\theta_{13}$ и Δm^2_{31}, также полученные из Daya Bay. В результате анализа получены наиболее точные измерения двух параметров осцилляций нейтрино (рис. 18-20):

- $\sin^2\theta_{12} = 0.3092 \pm 0.0087$,
- $\Delta m^2_{21} = (7.50 \pm 0.12) \times 10^{-5}$ эВ^2.

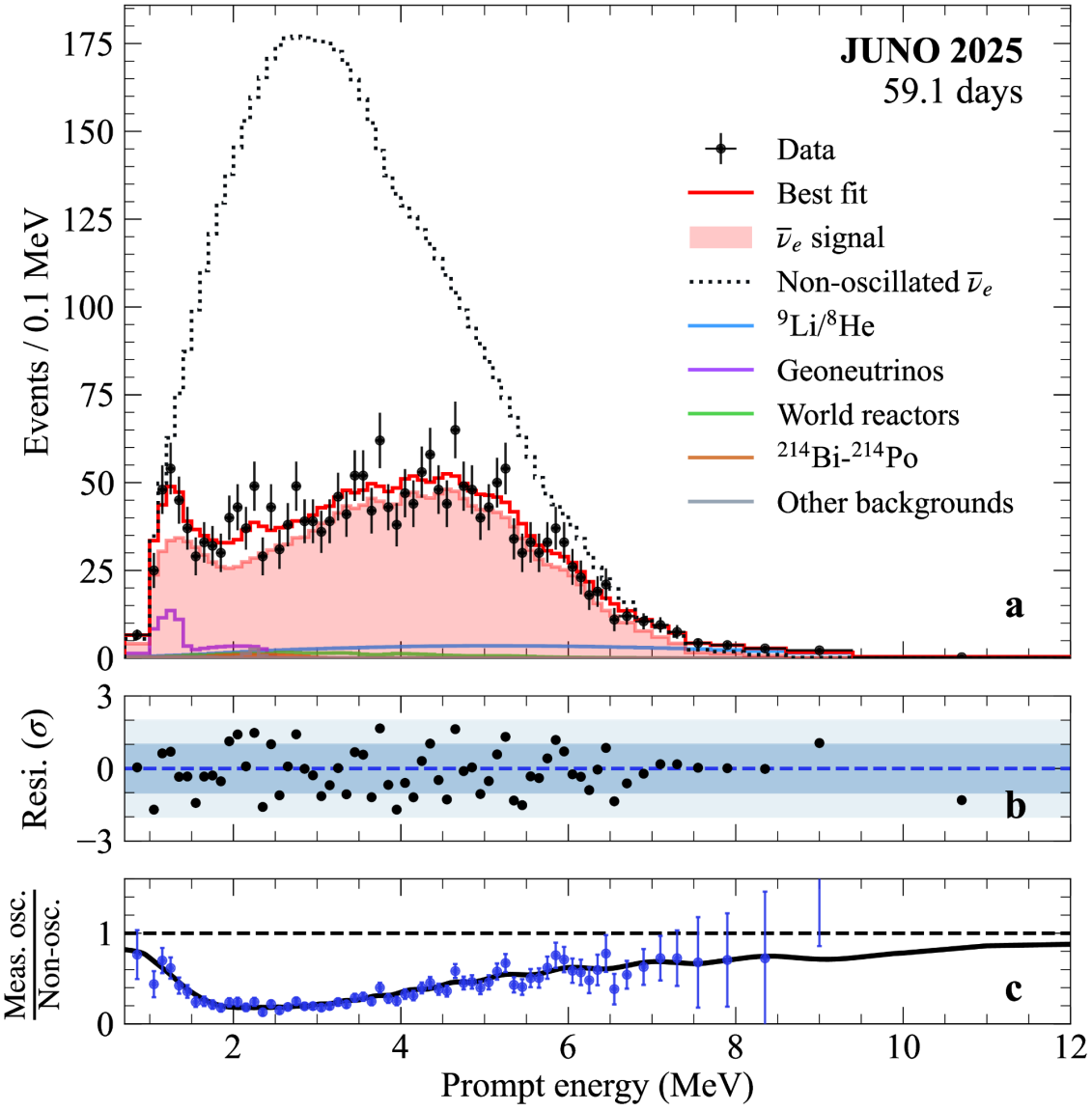

Рисунок 17. Измеренный энергетический спектр мгновенных сигналов кандидатов в события ОБР. a) Черные точки отображают экспериментальные данные со статистическими погрешностями, красная кривая соответствует осцилляционной модели наилучшего согласия (best-fit). Заштрихованная красная область представляет ожидаемый антинейтринный сигнал. Сплошная черная линия демонстрирует ожидаемый спектр реакторных нейтрино без учета осцилляций, а заштрихованная полоса отражает спектральную систематическую неопределенность. Вклад фонов показан сплошными цветными линиями. b) Остатки (residuals), количественно характеризующие статистическое согласие между данными и полной моделью. c) Отношение измеренного спектра к теоретическому предсказанию без осцилляций.

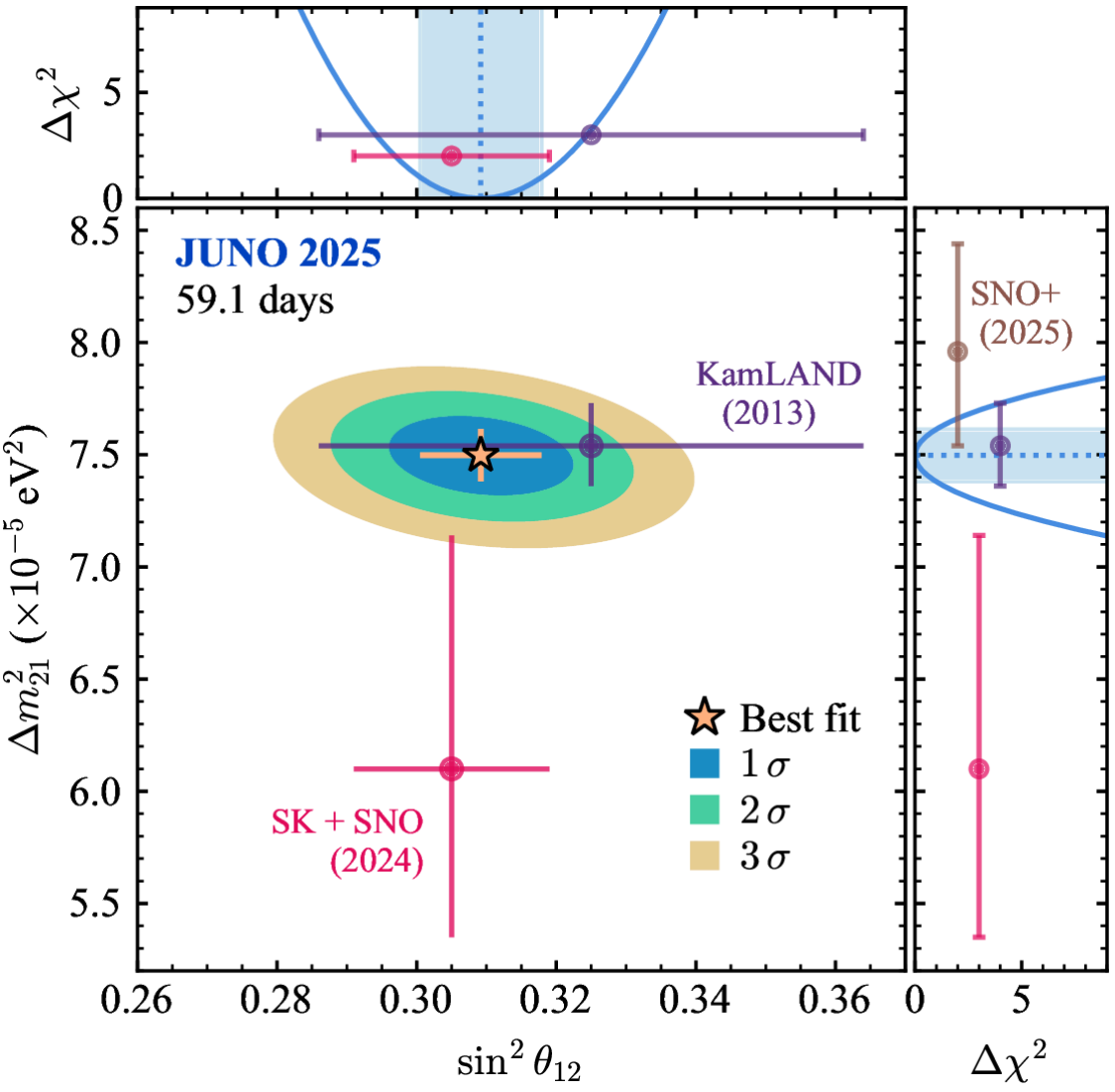

Рисунок 18. Результаты измерения «солнечных» параметров осцилляций. Доверительные области (1σ, 2σ и 3σ) для $\sin^2\theta_{12}$ и Δm^2_{21}, полученные по результатам подгонки спектра мгновенных сигналов. На верхней и правой панелях показаны одномерные профили χ^2 для $\sin^2\theta_{12}$ и Δm^2_{21} соответственно, с выделенными интервалами 1σ. Звездочкой отмечена точка наилучшего согласия (best-fit) для JUNO.

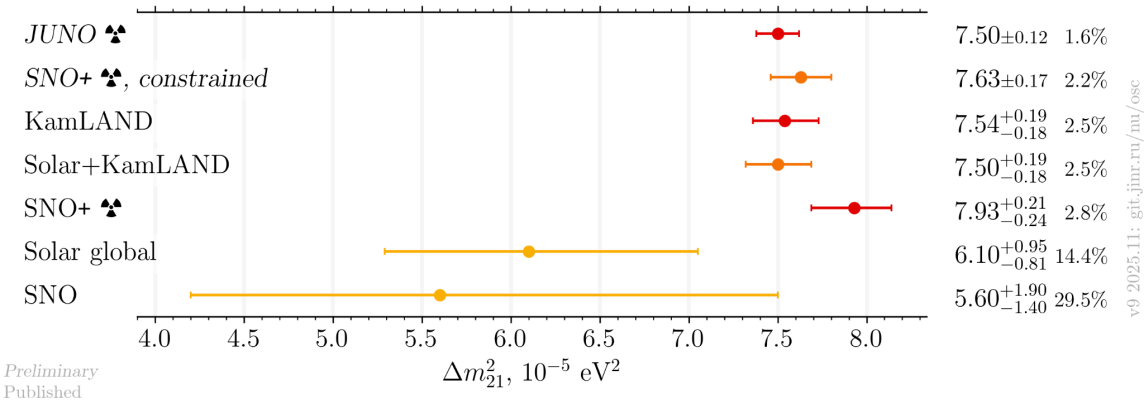

Рисунок 19. Сравнение измерения угла смешивания Δm^2_{21} JUNO с результатами других мировых осцилляционных экспериментов.

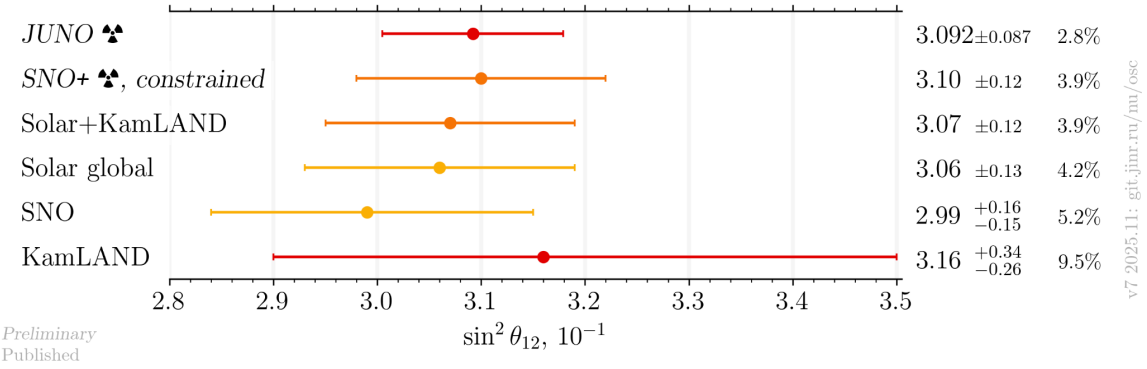

Рисунок 20. Сравнение измерения угла смешивания $\sin^2\theta_{12}$ JUNO с результатами других мировых осцилляционных экспериментов.

Как чувствительность так и результаты анализа данных были получены при непосредственном участии учёных из ЛЯП ОИЯИ. В рамках группы анализа данных реакторных нейтрино действует 3 независимых группы исследователей. Команда из Дубны работает над анализом совместно с коллегами из университетов Шанхая, Шандона, Цинхуа и др. В область ответственности учёных из Дубны входят следующие задачи: проведение совместного статистического осцилляционного анализа данных детекторов JUNO, Daya Bay, и, в скором времени, TAO; отбор событий ОБР в детекторе JUNO и оценка эффективности регистрации; оценка формы спектра и вклада фоновых событий (случайные совпадения, ^{9}Li/^{8}He, быстрые и двойные нейтроны, реакция α-n); реконструкция мюонных треков. Сотрудники также участвуют в базовых активностях, включая смены по набору данных на детекторе JUNO, контроль качества данных (data quality), смены по обработке данных (data production).

Непосредственно осцилляционный анализ нашей группы реализован в фреймворке GNA, развиваемом и поддерживаемом сотрудниками ЛЯП ОИЯИ.

Размещение данных эксперимента Daya Bay в открытом доступе и ограничение формы спектра реакторных антинейтрино

За десять лет работы эксперимент Daya Bay набрал рекордную статистику взаимодействий реакторных электронных антинейтрино и обеспечил наиболее точное измерение параметра смешивания нейтрино $\sin^2 2\theta_{13}$. Полученная точность — 2,6% — остается определяющей и сохранит значение на десятилетия вперёд. Полный архив данных эксперимента Daya Bay, включающий 5,55 миллиона событий, в декабре 2025 года был размещен в открытом доступе в репозитории Zenodo (https://zenodo.org/records/17587229).

Особое внимание уделено воспроизводимости результатов. Разработан и открыт программный пакет dayabay-model-official (https://pypi.org/project/dayabay-model/) , воспроизводящий процедуру предсказания спектров антинейтрино и позволяющий выполнить осцилляционный анализ на открытых данных. ПО поддерживает все четыре формата открытых данных. Кроме того облегчённая версия данных также была размещена Python Package Index (https://pypi.org/project/dayabay-data-official/), что делает весь необходимый код и данные для анализа доступными пользователям. Для доставки достаточно выполнение одной команды.

Подготовка данных и программного обеспечения выполнялась сотрудниками ОИЯИ в течение трех лет.

Данная разработка, несмотря на то, что относится к завершённому проекту Daya Bay имеет первостепенную важность для анализа данных JUNO в связи с временным отсутствием данных ближнего детектора TAO. Разработанная модель и открытые данные ближних детекторов были использованы для ограничения спектра реакторных электронных антинейтрино группами из ОИЯИ и Шанхая. Анализ был реализован как одновременная подгонка суммы χ^2 данных JUNO и данных ближних детекторов Daya Bay, где χ^2 эксперимента Daya Bay для каждого набора значений параметров минимизации был получен при помощи ПО dayabay-model-official.

Стоит отметить, что в идеале спектр реакторных электронных антинейтрино должен быть ограничен детектором, с разрешением не хуже, чему у JUNO (3.4%). Разрешение детекторов Daya Bay составляет σ=8.6% для энергии 1 МэВ, что не позволяет полностью ограничить все степени свободы, доступные JUNO и обеспечить модельно-независимое измерение Δm^2_{31}. Однако, при внешнем ограничении Δm^2_{31} для измерения “солнечных” параметров осцилляций Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{12}$ точности Daya Bay достаточно. При помощи монте-карло было показано, что даже самые экстремальные флуктуации формы спектра антинейтрино, как связанные с вариацией вкладов веток распада продуктов деления изотопов урана и плутония, так и синтетические (направленные на искажение параметров осцилляций), не приводят к смещению значений измеренных параметров осцилляций.

Разработка dag-modelling нового фреймворка для статистического анализа

Специально для открытия данных эксперимента Daya Bay был разработан новый фреймворк для статистического анализа dag-modelling[28]

[28] В начале разработки и в предыдущей заявке на продление проект назывался dagflow.

(https://pypi.org/project/dag-modelling/). Фреймворк продолжает идеи, развитые в предыдущем ПО GNA и позволяет создавать модели анализа в виде ациклических графов с узлами, оперирующих массивами данных и вычисляемых ленивым образом (по запросу). Фреймворк реализован на языке Python и доступен через соответствующий менеджер пакетов (pip). Использование just-in-time компиляции, операций над массивами и ленивых вычислений позволяют в значительной степени снизить оверхед Python. Реализованная в dag-modelling открытая модель эксперимента Daya Bay и соответствующий анализ (https://git.jinr.ru/dagflow-team/dayabay-analysis) продемонстрировали высокую эффективность подхода, с оверхедом самого фреймворка на уровне 25%.

Портирование модели эксперимента JUNO из GNA в dag-modelling (https://git.jinr.ru/dagflow-team/dgm-juno-dev), происходящее время, завершено на 90%. Использование dag-modelling для будущего анализа обеспечит:

- использование общих хорошо протестированных инструментов для статистического осцилляционного анализа данных (JUNO+TAO, Daya Bay, и др). Проведение совместных измерений.
- простую доставку данных и инструментов как исследователям из коллаборации, так и сторонним пользователям.
- возможность создания открытых моделей, аналогично Daya Bay.
- возможность создания учебных материалов.

Кроме того оптимизация и развитие фреймворка обеспечит повышение эффективности расчётов для всех моделей. В планах: поддержка GPU, автоматного дифференцирование (ускорение расчёта производных для минимизации), более эффективные версии базовых операций.

Чувствительность к осцилляциям атмосферных нейтрино

Не смотря на то, что JUNO — сцинтилляционный детектор, тем не менее у него есть чувствительность к направлению высокоэнергетичных мюонов и электронов с ошибкой порядка 10° для энергий от 2.5 ГэВ. Это в частности позволит отобрать поток высокоэнергетичных частиц, идущих снизу, то есть связанный с мюонными и электронными нейтрино, проходящими через Землю. Наличие эффекта вещества по-разному искажает вероятность осцилляций для нейтрино энергий около 5 ГэВ, проходящих через ядро Земли ($\cos\theta<-0.8$). Искажение наиболее выражено для мюонных и электронных нейтрино в случае нормальной упорядоченности масс и для мюонных и электронных антинейтрино в случае обратной иерархии. Таким образом у JUNO есть возможность определить МО нейтрино при помощи атмосферных нейтрино.

В группе ОИЯИ в ПО GNA была реализована модель, предсказывающая ожидаемое распределение событий атмосферных нейтрино по 2-м переменным: энергии и направлению. Учитываются два аромата (e, μ), два типа (частицы, античастицы), взаимодействие с веществом Земли в зависимости от направления, два канала взаимодействия (CC, NC), размытие по энергии и размытие по направлению (зависящее от энергии), запутывание при реконструкции типа частиц, а также систематические неопределённости (сечения, потока и спектра антинейтрино, идентификации типа частиц и др).

Получена[29] чувствительность к упорядоченности масс нейтрино для атмосферных нейтрино, а также ожидаемые ошибки на параметры осцилляций. Показано, что за 10 лет JUNO достигнет 2.1σ (1.4σ) в случае прямой (обратной) упорядоченности масс (см. рис. 21). JUNO достигнет точности 2% и 1.8% к параметрам осцилляций Δm^2_{21} и $\sin^2\theta_{23}$ по взаимодействиям атмосферных нейтрино.

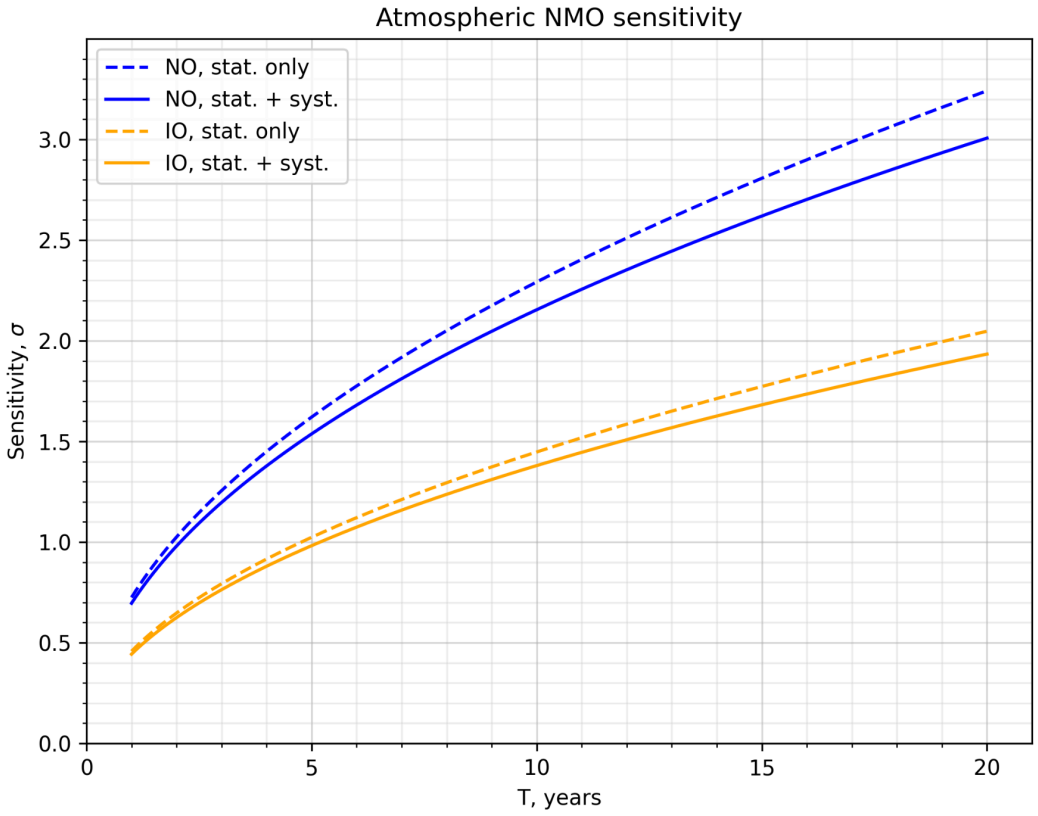

Рисунок 21. Чувствительность эксперимента JUNO к упорядоченности масс нейтрино по атмосферным нейтрино.

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

[1] JUNO collaboration. “First measurement of reactor neutrino oscillations at JUNO”. In: (Nov. 2025). arXiv: 2511.14593 [hep-ex].

[2] JUNO collaboration. “Initial performance results of the JUNO detector”. In: (Nov. 2025). arXiv: 2511.14590 [hep-ex].

[3] JUNO collaboration. “Potential to identify neutrino mass ordering with reactor antineutrinos at JUNO”. In: Chin. Phys. C 49.3 (2025), p. 033104. doi: 10.1088/1674-1137/ad7f3e. arXiv: 2405.18008 [hep-ex].

[4] JUNO collaboration. “The JUNO experiment Top Tracker”. In: Nucl. Instrum. Meth. A 1057 (2023), p. 168680. doi: 10.1016/j.nima.2023. 168680. arXiv: 2303.05172 [hep-ex].

[29] Никита Бессонов, диплом магистра, “Оценка чувствительности эксперимента JUNO к параметрам нейтринных осцилляций с помощью атмосферных нейтрино”, МГУ, 2024.

[5] JUNO collaboration. “Sub-percent precision measurement of neutrino oscillation parameters with JUNO”. In: Chin. Phys. C 46.12 (2022), p. 123001. doi: 10.1088/1674-1137/ac8bc9. arXiv: 2204.13249 [hep-ex].

[6] Daya Bay collaboration. “Precision Measurement of Reactor Antineutrino Oscillation at Kilometer-Scale Baselines by Daya Bay”. In: Phys. Rev. Lett. 130.16 (2023), p. 161802. doi: 10.1103/PhysRevLett.130.161802. arXiv: 2211.14988 [hep-ex].

[7] JUNO collaboration. “JUNO physics and detector”. In: Prog. Part. Nucl. Phys. 123 (2022), p. 103927. doi: 10.1016/j.ppnp.2021.103927. arXiv: 2104.02565 [hep-ex].

[8] A. Gavrikov, D. Dolzhikov, M. Gonchar et al. “Simulation-based inference for precision neutrino physics through neural Monte Carlo tuning”. In: Commun. Phys. 9.1 (2026), p. 63. doi: 10.1038/s42005-026-02499-6. arXiv: 2507.23297 [physics.data-an].

[9] Y. Ren, N. Anfimov et al. “Development of a comprehensive PMT optical model for the JUNO experiment”. In: (Jan. 2026). arXiv: 2601.19081 [hep-ex].

[10] JUNO collaboration. “Prediction of Energy Resolution in the JUNO Experiment”. In: Chin. Phys. C 49.1 (2025), p. 013003. doi: 10.1088/ 1674-1137/ad83aa. arXiv: 2405.17860 [hep-ex].

[11] JUNO collaboration. “Simulation of the background from 13C(α, n)16O reaction in the JUNO scintillator”. In: Eur. Phys. J. C 85.9 (2025), p. 1080. doi: 10.1140/epjc/s10052-025-14333-4. arXiv: 2503.00968 [physics.ins-det].

[12] D. Dolzhikov. “JUNO’s Sensitivity to Neutrino Mass Ordering (on behalf of the JUNO Collaboration)”. In: Phys. Part. Nucl. Lett. 22.5 (2025), pp. 1125–1128. doi: 10.1134/S1547477125701274.

[13] Min Li, N. Anfimov, D. Korablev, A. Olshevskiy et al. “Dark count rate stability of JUNO 20-inch PMTs in mass testing”. In: JINST 20.09 (2025), P09007. doi: 10.1088/1748-0221/20/ 09/P09007. arXiv: 2506.15164 [physics.ins-det].

[14] Caimei Liu, N. Anfimov, D. Korablev, A. Olshevskiy et al. “JUNO 20-inch PMT and electronics system characterization using large pulses of PMT dark counts at the Pan-Asia testing platform”. In: JINST 20.12 (2025), P12013. doi: 10.1088/1748-0221/20/12/P12013. arXiv: 2506.21179 [physics.ins-det].

[15] O. Smirnov. “Intrinsic energy resolution of organic scintillators”. In: Eur. Phys. J. Plus 140.11 (2025), p. 1114. doi: 10.1140/epjp/s13360-025-07055-9. arXiv: 2506.03208 [physics.ins-det].

[16] JUNO collaboration. “The design and technology development of the JUNO central detector”. In: Eur. Phys. J. Plus 139.12 (2024), p. 1128. doi: 10.1140/epjp/s13360-024-05830-8. arXiv: 2311.17314 [physics.ins-det].

[17] X. Chen, N. Anfimov, A. Rybnikov et al. “Burn-in test and thermal performance evaluation of Silicon Photomultipliers for the JUNO-TAO experiment”. In: JINST 19.07 (2024), P07028. doi: 10.1088/1748-0221/19/07/P07028. arXiv: 2406.12912 [physics.ins-det].

[18] Y. Guan, N. Anfimov, D. Fedoseev, K. Kuznetsova, A. Rybnikov, A. Selyunin, A. Sotnikov et al. “Study of Silicon Photomultiplier external cross-talk”. In: JINST 19.06 (2024), P06024. doi: 10.1088/1748-0221/19/06/P06024. arXiv: 2312.12901 [physics.ins-det].

[19] A. Rybnikov et al. “Performance of the mass testing setup for arrays of silicon photomultipliers in the TAO experiment.” In: JINST 19.05 (2024), P05035. doi: 10.1088/1748-0221/19/05/P05035. arXiv: 2402.05487 [physics.ins-det].

[20] L.D. Kolupaeva, M.O. Gonchar, A.G. Olshevskiy, O.B. Samoylov, “Neutrino oscillations: status and prospects for the determination of neutrino mass ordering and the leptonic

CP-violation phase". In: Phys. Usp. vol.8 (2023), pp. 753–774. doi: 10.3367/UFNr. 2022.05.039191.

[21] Caimei Liu, N. Anfimov, D. Korablev, A. Olshevskiy et al. "Check on the features of potted 20-inch PMTs with 1F3 electronics prototype at Pan-Asia". In: JINST 18.02 (2023), P02003. doi: 10.1088/1748-0221/18/02/P02003. arXiv: 2208.08264 [physics.ins-det].

[22] O. Smirnov. "Note on intrinsic resolution in liquid organic scintillators". In: JINST 18.10 (2023), P10026. doi: 10.1088/1748-0221/18/10/P10026. arXiv: 2309.09806 [physics.ins-det].

[23] O. Smirnov et al. "Magnetic shielding for large photoelectron multipliers for the OSIRIS facility of the JUNO detector". In: JINST 18.04 (2023), P04015. doi: 10.1088/1748-0221/18/04/P04015. arXiv: 2212.02562 [physics.ins-det].

[24] Rong Zhao, N. Anfimov, D. Korablev, A. Olshevskiy, A. Rybnikov et al. "Afterpulse measurement of JUNO 20-inch PMTs". In: Nucl. Sci. Tech. 34.1 (2023), p. 12. doi: 10.1007/s41365-022-01162-3. arXiv: 2207.04995 [physics.ins-det].

[25] JUNO collaboration. "Mass testing and characterization of 20-inch PMTs for JUNO". In: Eur. Phys. J. C 82.12 (2022), p. 1168. doi: 10.1140/epjc/ s10052-022-11002-8. arXiv: 2205.08629 [physics.ins-det].

[26] Lukas Bieger, M. Gromov, O. Smirnov et al. "Potential for a precision measurement of solar pp neutrinos in the Serappis experiment". In: Eur. Phys. J. C 82.9 (2022), p. 779. doi: 10.1140/epjc/s10052-022-10725-y. arXiv: 2109.10782 [physics.ins-det].

[27] N. Anfimov et al. "Study of Silicon Photomultiplier Performance at Different Temperatures". In: Nucl. Instrum. Meth. A 997 (2021), p. 165162. doi: 10.1016/j.nima.2021.165162. arXiv: 2005.10665 [physics.ins-det].

[28] Zhen Qian, A. Gavrikov, M. Gonchar, Yu. Malyshkin, K. Treskov et al. "Vertex and energy reconstruction in JUNO with machine learning methods". In: Nucl. Instrum. Meth. A 1010 (2021), p. 165527. doi: 10.1016/j.nima.2021.165527. arXiv: 2101.04839 [physics.ins-det].

[29] Björn Wonsak, N. Anfimov, A. Olshevskiy et al. "A container-based facility for testing 20'000 20-inch PMTs for JUNO". In: JINST 16.08 (2021), T08001. doi: 10.1088/1748-0221/16/08/T08001. arXiv: 2103.10193 [physics.ins-det].

[30] Selyunin, A.S., Anfimov, N.V., Rybnikov, A.V. *et al.* Study of the Temperature Stability of the High-Voltage DAC AD5535 for Powering Silicon Photomultipiers. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 20, 1419–1424 (2023). https://doi.org/10.1134/S154747712306033X

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) (общее количество участников)

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал Сумма FTE	Ассоциированный персонал Сумма FTE
1.	научные работники	10.9	0
2.	инженеры	7.1	0
3.	специалисты	—	—
Итого:		**18**	**0**

Руководитель темы

_____/_____/

“_____“_____2026 г.

Руководитель проекта

_____/_____/

“_____“_____2026 г.

Экономист Лаборатории

_____/_____/

“_____“_____2026 г.