

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

“ \_\_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 2023 г.

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

**1. Общие сведения о проекте****1.1. Шифр темы 02-2-1099-2010/2026.****1.2. Лаборатория ЛЯП****1.3. Научное направление физика элементарных частиц****1.4. Наименование проекта** Изучение осцилляций нейтрино в эксперименте JUNO (Участие ОИЯИ)**1.5. Руководитель(и) проекта** Д.В. Наумов**1.6. Заместитель(и) руководителя проекта** Н.В. Анфимов, М.О. Гончар**2. Научное обоснование и организационная структура****2.1. Аннотация**

Эксперимент JUNO с реакторными электронными антинейтрино в настоящее время находится на стадии сборки детектора в Китае. Основные цели: 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-, атмосферных и солнечных нейтрино, поиск физики за пределами Стандартной Модели.

Детектор-спутник ТАО измерит спектр реакторных электронных антинейтрино со статистической погрешностью порядка 1% и энергетическим разрешением  $\sigma=2\%$  при энергии 1 МэВ. Его чувствительность к амплитуде смешивания стерильных нейтрино  $\sin^2 2\theta_{14}$  в диапазоне  $2 \cdot 10^{-2} \leq \Delta m^2_{41} \leq 8 \text{ эВ}^2$  будет сравнима с ведущими мировыми экспериментами.

ОИЯИ играет существенную роль в подготовке эксперимента:

- (i) ОИЯИ отвечает за проектирование и производство модулей высоковольтного питания для больших (20 дюймов) и малых (3 дюйма) фотоумножителей (ФЭУ) JUNO;
- (ii) ОИЯИ участвует в создании детектора мюонов Top Tracker (ТТ), 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 — ТАО: закупка половины из 4100 плиток (130 тыс. ячеек) кремниевых фотоумножителей (SiPM), массовые испытания SiPM, производство и эксплуатация системы питания SiPM (4100 каналов);

(v) ОИЯИ вносит вклад в разработку программного обеспечения: разработка ПО Global Neutrino Analysis (GNA) для осцилляционного анализа данных, разрабатывает алгоритмы моделирования, реконструкции и анализа данных;

(vi) ОИЯИ ввел в эксплуатацию центр обработки данных, предназначенный для моделирования, хранения и обработки данных для эксперимента JUNO. Центр в ОИЯИ станет одним из трех европейских центров обработки данных, управляющих данными JUNO;

ОИЯИ вложил в проект JUNO около 6 миллионов долларов. Мы запрашиваем еще 1.3 млн. долларов на три года продления проекта с 2024 по 2026 год для успешного участия в экспериментах JUNO и ТАО. Детализация запроса представлена в проекте.

## 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-, атмосферных и солнечных нейтрино, поиск физики за пределами Стандартной Модели.

### Актуальность и научная новизна

#### *Упорядочивание масс нейтрино*

Термин «упорядочивание масс нейтрино» (neutrino mass ordering, MO) относится к установлению соответствующего порядка массовых состояний нейтрино  $m_3 > m_1$  or  $m_1 > m_3$ . 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 порядка ГэВ и базы 700 км. На большей базе вырождение ослабевает из-за возрастающего влияния вещества.

JUNO<sup>1</sup> использует канал исчезновения, наблюдая реакторные электронные антинейтрино. После шести лет набора данных JUNO в одиночку сможет определить упорядочивание масс на уровне не менее 3-х стандартных отклонений, то есть без внешних ограничений на значение  $\Delta m^2_{31}$ .

Эксперименты с ускорительными нейтрино NOvA<sup>2</sup> и T2K<sup>3</sup> набирают данные. В настоящее время оба эксперимента предпочитают нормальное упорядочивание масс ( $m_3 > m_1$ ) на уровнях значимости 1-го и 1.6-и стандартных отклонений соответственно. К 2025 г. NOvA

<sup>1</sup> <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/43/3/030401>

<sup>2</sup> <https://novaexperiment.fnal.gov>

<sup>3</sup> <https://t2k-experiment.org>

ожидает определения МО в диапазоне от 0.5 до 5 стандартных отклонений. Ширина интервала связана с вырождением из-за неизвестной фазы нарушения CP инвариантности.

DUNE<sup>4</sup>, ускорительный нейтринный эксперимент, должен начать набор данных в 2027 году на 50% мощности пучка и с 50% общей массы детектора. Окончание сборки детектора ожидается в 2030 году. DUNE должна быть в состоянии определять МО на уровне 5-и стандартных отклонениях примерно в 2029 году.

Сравнение экспериментальных чувствительности показано на рисунке 1.

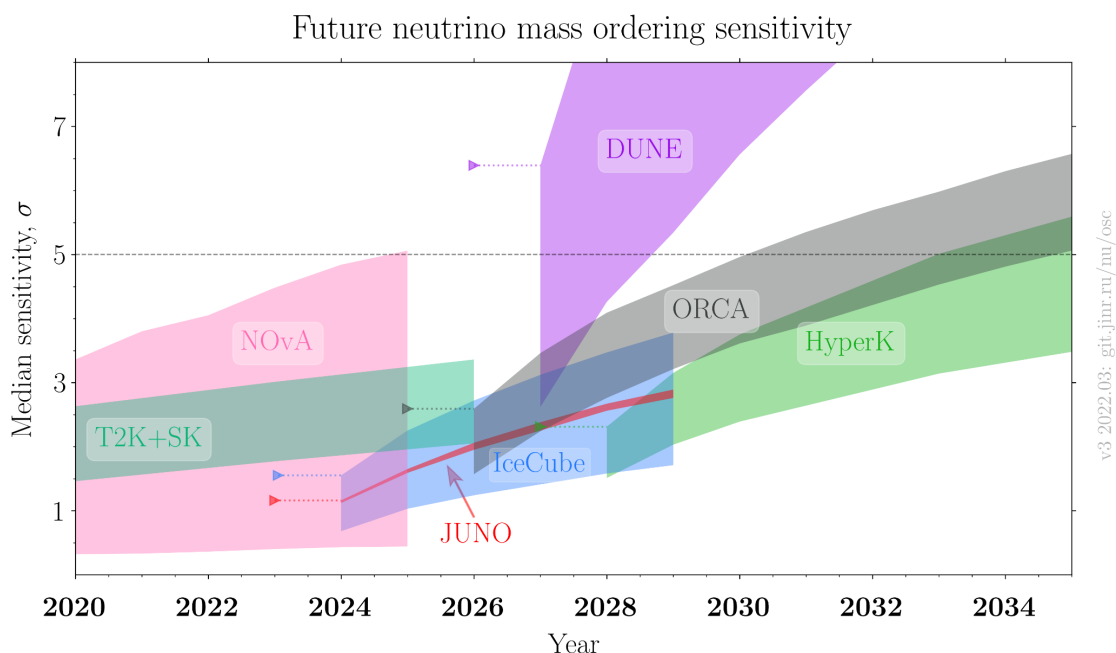


Рисунок 1. чувствительность будущих реакторных, ускорительных и атмосферных осцилляционных экспериментов к упорядочиванию масс нейтрино..

(ii) Вероятность **безнейтринного двойного бета-распада** чувствительна к МО. Если распад будет обнаружен эффективная масса нейтрино  $m_{\square}$  будет порядка  $(2,6) \cdot 10^{-2}$  эВ для обратного упорядочивания масс и  $(2,6) \cdot 10^{-3}$  эВ для нормального упорядочивания масс. Современные эксперименты не обеспечивают конкурентных ограничений на МО.

(iii) **Космология** дает ограничения на сумму масс нейтрино  $\Sigma m_{\nu}$ . 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  $\Sigma m_{\nu}$  еще не позволяют определить МО, в то время как дальнейшее повышение точности определения  $\Sigma m_{\nu}$  может оказаться существенным. Ключевыми игроками здесь являются эксперименты CMB-S4<sup>5</sup> и CORE<sup>6</sup>. Сроки начала набора данных нам не известны.

более существенной, чем обычное статистическое усреднение данных. 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  $3,4\sigma$ . Более подробную информацию можно найти в Ref.

(iv) Эксперименты, наблюдающие **бета-распад** также чувствительны к МО, поскольку каждое собственное массовое состояние нейтрино вызывает излом в энергетическом спектре.

<sup>4</sup> <https://www.dunescience.org>

<sup>5</sup> <https://arxiv.org/pdf/1610.02743.pdf>

<sup>6</sup> <https://arxiv.org/abs/1706.04516>

Соответствующие измерения являются чрезвычайно сложной задачей, поскольку для измерения этих перегибов требуется рекордное энергетическое разрешение. Современный эксперимент KATRIN не может получить конкурентного измерения МО. Планируемый эксперимент Project-8<sup>7</sup>, 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  $5\sigma$ , 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 3.4 стандартных отклонений<sup>8</sup>. Более подробную информацию можно найти в сноске<sup>9</sup>.

### Точность определения параметров смешивания лептонов

Современная точность измерения параметров смешивания лептонов  $\Delta m^2_{31}$ ,  $\Delta m^2_{21}$  и  $\sin^2 2\theta_{12}$ , а также ожидаемая чувствительность JUNO представлены на рисунках 2–4<sup>10</sup>. JUNO улучшит измерения до долей процента и обеспечит ведущую точность. JUNO также чувствительна к значению  $\sin^2 2\theta_{13}$  с точностью 11.7%. Опережающее измерение  $\sin^2 2\theta_{13}$  с точностью 2.8% обеспечивает эксперимент Daya Bay.

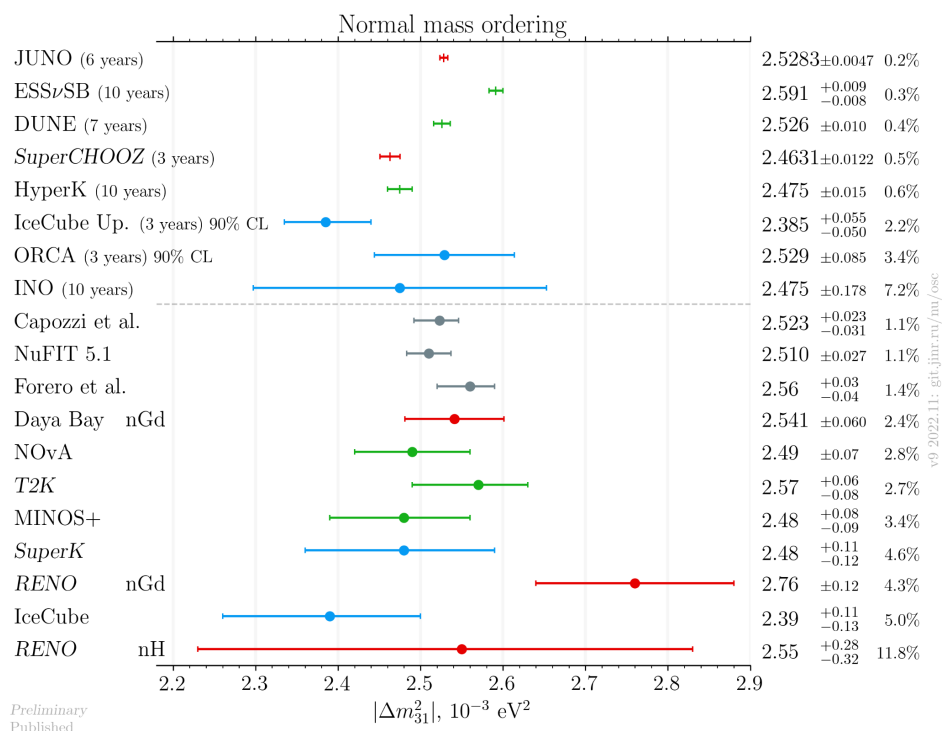


Рисунок 2. Точность измерения параметра осцилляций нейтрино  $\Delta m^2_{31}$ .

<sup>7</sup> <https://arxiv.org/abs/1309.7093>

<sup>8</sup> <https://globalfit.astroparticles.es/2018/07/03/neutrino-mass-ordering/>

<sup>9</sup> <https://arxiv.org/pdf/1806.11051.pdf>

<sup>10</sup> See <https://git.jinr.ru/nu/osc> for references.



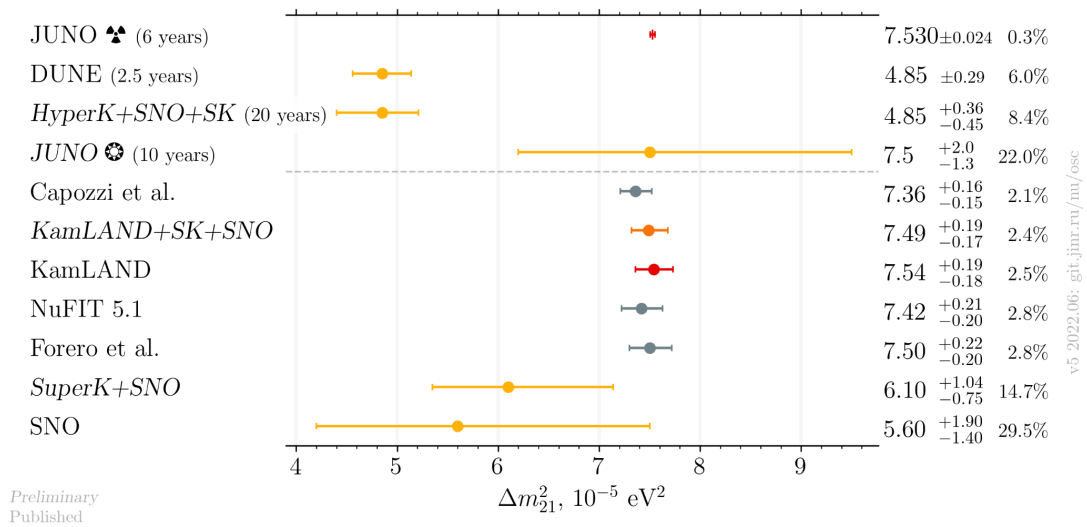


Рисунок 3. Точность измерения параметра осцилляций нейтрино  $\Delta m^2_{21}$ .

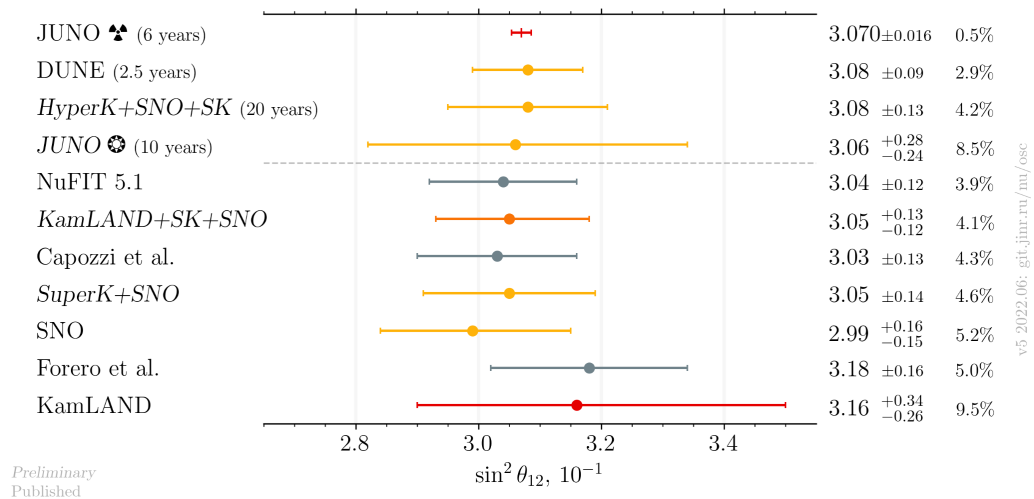


Рисунок 4. Точность измерения параметра осцилляции нейтрино  $\sin^2 2\theta_{12}$ .

### 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  $\tau(p \rightarrow K^+ \nu) > 5.9 \times 10^{33}$  лет при 90% У.Д. по результатам эксперимента Super-Kamiokande<sup>11</sup>.

Детектор с жидким сцинтиллятором (ЖС) способен наблюдать этот канал, используя

<sup>11</sup> E. Kearns, talk presented at the ISOUP Symposium (2013).

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  $8.34 \cdot 10^{33}$  лет при 90% У.Д.

### ***Нейтрино от вспышек сверхновых (SN)***

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

Наблюдение нейтринного сигнала от вспышек сверхновых потенциально является богатым источником информации о механизмах коллапса звезд, сильных эффектах вещества на нейтринные осцилляции 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  $3\sigma$ .

### ***Гео-, атмосферные и солнечные нейтрино***

Геонейтрино это электронное антинейтрино, образующееся при распадах долгоживущих радионуклидов в недрах Земли. Геонейтрино были обнаружены экспериментами KamLAND<sup>12</sup> и BOREXINO<sup>13</sup>. 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<sup>14</sup> для получения более подробной информации). JUNO будет наблюдать около 400 геонейтрино в год (40 TNU/год). За десять лет набора данных JUNO сможет измерить поток геонейтрино с 5-процентной точностью, собрав самую большую выборку взаимодействий геонейтрино.

Обнаружение атмосферных нейтрино повысит чувствительность JUNO к определению МО и октанта  $\theta_{23}$ . Эксперименты PINGU и ORCA, нацеленные непосредственно на измерение атмосферных нейтрино, будут определяющими в данной области исследований. JUNO внесет скромный вклад в определение МО на уровне около  $1\sigma$  за счет регистрации атмосферных нейтрино. Ожидается, что в сочетании с измерением реакторных антинейтрино повышение чувствительности будет больше, чем при прямой сумме, из-за задеирования другой физики.

На сегодняшний день известно, что недостаток потока солнечных нейтрино связан с осцилляциями нейтрино в веществе солнца. Не исследованные на сегодняшний день вопросы

---

<sup>12</sup> H. Watanabe, talk at Neutrino Geoscience 2019, Prague, "Geoneutrino measurement with KamLAND", [https://indico.cern.ch/event/825708/contributions/3552210/attachments/1930535/3197332/HirokoWatanabe\\_NG\\_S2019.pdf](https://indico.cern.ch/event/825708/contributions/3552210/attachments/1930535/3197332/HirokoWatanabe_NG_S2019.pdf)

<sup>13</sup> M. Agostini et al., Borexino collaboration, "Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino", Phys. Rev. D 101, 012009 (2020) DOI: [10.1103/PhysRevD.101.012009](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.012009)

<sup>14</sup> 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.pnpnp.2019.103712>

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  ${}^7\text{Be}$  и 10 событий от солнечных реакций с  ${}^8\text{B}$ . Это прольет новый свет на вопросы металличности солнца и переходного режима осцилляций.

### ***За пределами стандартной модели***

Существует множество различных исследований, связанных с поиском физики за пределами Стандартной Модели (BSM). Учитывая краткий формат документа упоминать их все здесь нецелесообразно. Отметим только поиск легких стерильных нейтрино. Коллаборация MiniBooNE заявила, что в 2018<sup>15</sup> году наблюдался указание на существование стерильных нейтрино. Эксперименты с реакторным антинейтрино наблюдают дефицит примерно в 5% по сравнению с ожиданиями современных моделей. Если интерпретировать дефицит как указание на стерильное нейтрино, масса четвертого состояния нейтрино должна иметь масштаб порядка эВ. Недавно коллаборация Neutrino-4 заявила<sup>16</sup> об обнаружении стерильных нейтрино с параметрами смешивания  $\sin^2\theta_{14}=0.35$  и  $\Delta m^2_{41}=7.5$  эВ<sup>2</sup>.

Прямые поиски осцилляций в стерильное состояние в экспериментах Daya Bay, MINOS<sup>17</sup>, DANSS<sup>18</sup>, Prospect<sup>19</sup>, STEREO<sup>20</sup> и других не согласуются с существованием стерильных нейтрино, за исключением малой части пространства параметров. Большой угол смешивания, заявленный Neutrino-4, исключается экспериментом Daya Bay. Детектор-спутник TAO<sup>21</sup> будет чувствителен к амплитуде стерильных нейтрино  $\sin^2 2\theta_{14}$  для диапазона разниц квадратов масс  $2 \cdot 10^{-2} \leq \Delta m^2_{41} \leq 8$  эВ<sup>2</sup> и сможет проверить указание Нейтрино-4.

### ***Спектр реакторных антинейтрино***

Известно, что энергетический спектр реакторных электронных антинейтрино, измеренный в современных экспериментах, имеет отклонение от предсказаний широко используемой модели Хубера-Мюллера<sup>22</sup>. 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  $\sigma=2\%$  на 1 МэВ и обеспечит наилучшее измерение спектра со статистической погрешностью на уровне 1%.

## **Методы и подходы**

### ***Эксперимент JUNO***

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

---

<sup>15</sup> Aguilar-Arevalo, A.A.; Brown, B.C.; Bugel, L.; Cheng, G.; Conrad, J.M.; et al. (2018). "Observation of a significant excess of electron-like events in the MiniBooNE short-baseline neutrino experiment". *Physical Review Letters*. **121** (22): 221801. arXiv:1805.12028. doi:10.1103/PhysRevLett.121.221801. PMID 30547637

<sup>16</sup> <https://arxiv.org/abs/1809.10561>

<sup>17</sup> <https://arxiv.org/abs/2002.00301>

<sup>18</sup> <https://arxiv.org/abs/1911.10140>

<sup>19</sup> <https://arxiv.org/abs/2006.11210>

<sup>20</sup> <https://arxiv.org/abs/2210.07664>

<sup>21</sup> TAO CDR: <https://arxiv.org/abs/2005.08745>

<sup>22</sup> <https://arxiv.org/abs/1106.0687>, <https://arxiv.org/abs/1101.2663>

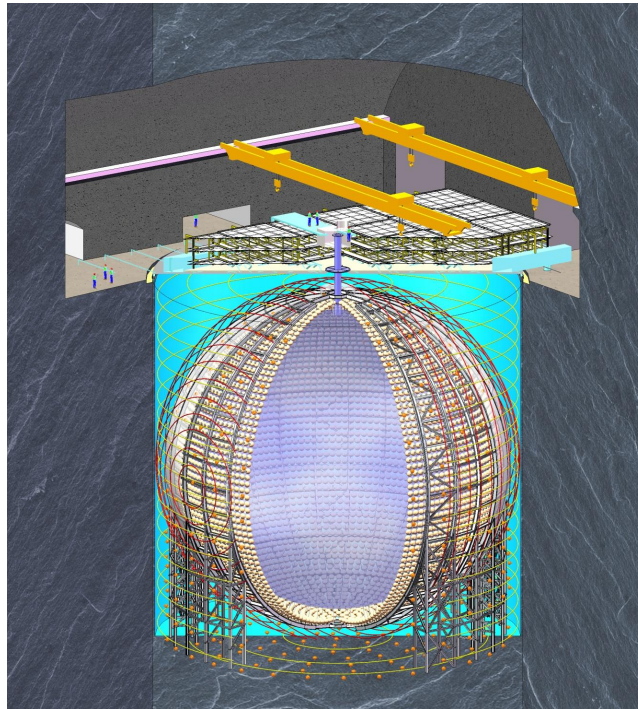


Рисунок 5. Центральный детектор JUNO и Top Tracker. Диаметр акриловой сферы составляет около 35 метров. Детектор окружен набором катушек Гельмгольца для компенсации магнитного поля Земли (EMF).

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 реактора Янцзяньской и Тайшаньской АЭС общей мощностью 26.6 ГВт.

За шесть лет набора данных JUNO зарегистрирует около 100 тыс. событий обратного бета-распада (inverse beta-decay, IBD) и определит их энергию с точностью лучше  $\sigma=3\%$  для энергии 1 МэВ. Точное измерение энергетического спектра IBD позволяет определить упорядочивание масс нейтрино по его форме, как показано на рисунках 6 и 7.

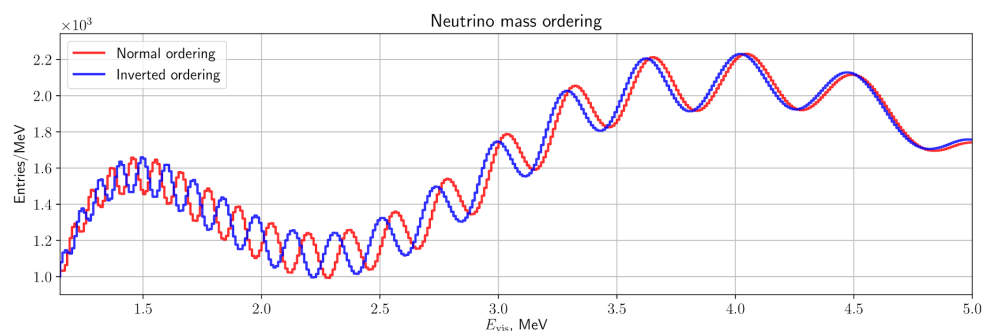


Рисунок 6. Ожидаемый энергетический спектр в JUNO за восемь лет набора данных для двух вариантов упорядочивания масс нейтрино. Приведена истинная энергия без учета эффектов детектора..

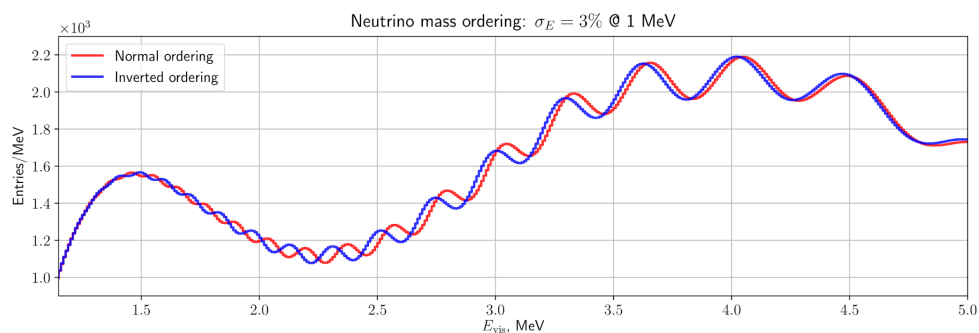


Рисунок 7. Ожидаемый энергетический спектр в JUNO за восемь лет набора данных для двух вариантов упорядочивания масс нейтрино. График соответствует реконструированной энергии с разрешением  $\sigma = 3\%$  для 1 МэВ.

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 не хуже 3% при 1 МэВ наблюдаемой энергии.

Другой сложностью является возможное существование “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 будет установлен детектор-спутник TAO, который измерит энергетический спектр реакторных антинейтрино с точностью не хуже, чем JUNO.

Детектор TAO представляет собой сферический резервуар диаметром 1.8 метра (см. рисунок 8), заполненную 2.8 тоннами жидкого сцинтиллятора, легированного гадолинием. Чтобы достичь разрешения лучше, чем в центральном детекторе JUNO, TAO будет использовать 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 будет работать при низкой температуре  $-50^\circ\text{C}$ .

Технический вызов представляет большая поверхность детектора (около  $11 \text{ м}^2$ ) по отношению к размеру SiPM (десятки  $\text{мм}^2$ ). Всего будет использовано около 130 тысяч кристаллов SiPM  $12 \times 6 \text{ мм}^2$ , упакованных в 4100 матриц (или т.н. тайлов) размером  $5 \times 5 \text{ см}^2$  по 32 элемента. Это огромное количество SiPM будет считываться с помощью 4100 32-канальных схем ASIC или 4100 каналов дискретных АЦП, которые считывают матрицу как единый элемент. В обязанности ОИЯИ входит обеспечение питанием 4100 тайлов с регулируемым напряжением в диапазоне до 120В. Все матрицы SiPM будут детально изучены. В процессе подготовки массовых тестов SiPM ОИЯИ играет ключевую роль.



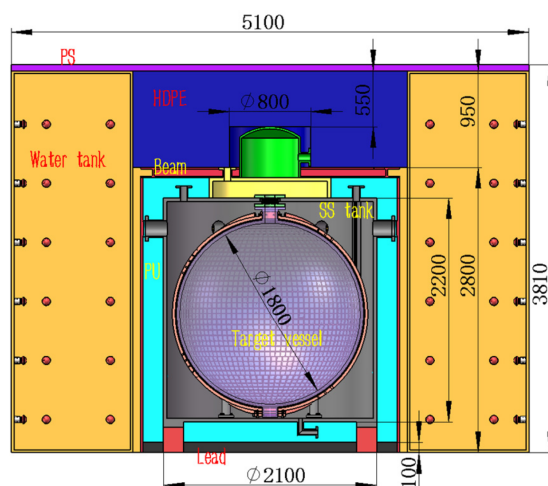


Рисунок 8. Схематическое изображение детектора ТАО.

Чтобы гарантировать, что вся энергия гамма квантов от аннигиляции позитронов реакции обратного бета-распада конвертировалась в сцинтилляционный свет, доверительный объем будет меньше на 25 см и будет содержать будет 1 тонну ЖС. Счет событий IBD в доверительном объеме составит 2000 (4000) событий в сутки с учетом (без учета) эффективности обнаружения, что позволит зарегистрировать более 4 млн событий за 6 лет набора данных. ТАО обеспечит измерение спектра электронных антинейтрино реактора со статистической погрешностью порядка 1% и энергетическим разрешением  $\sigma=2\%$  на 1 МэВ выделенной энергии.

### **Система вето**

Система мюонного вето детектора JUNO будет состоять из водяного черенковского детектора и детектора Top Tracker (ТТ). ТТ состоит из 3 слоев пластикового сцинтиллятора и будет построен из модулей, ранее использовавшихся в эксперименте OPERA в качестве детектора Target Tracker. ОИЯИ принимал активное участие в создании детектора Target Tracker для эксперимента OPERA и анализе данных в ходе эксперимента. Сейчас ОИЯИ участвует в создании детектора Top Tracker в JUNO. Поставка бывшего детектора OPERA учитывается как неденежный вклад ОИЯИ в JUNO. Группа ОИЯИ:

- отвечает за проектирование, изготовление и строительство механической опоры детектора ТТ;
- отвечает за контроль работоспособности модулей ТТ в период их хранения;
- принимает участие в разработке программного обеспечения системы сбора данных;
- принимает участие в разработке автономного программного обеспечения для анализа данных ТТ.

Сборка, установка и ввод в эксплуатацию детектора Top Tracker на площадке JUNO начнется в 2023 году и займет 5-6 месяцев. На этот период требуется участие 4-5 специалистов из ОИЯИ.

ТТ будет установлен на вершине детектора JUNO, над бассейном с водой. Он имеет три слоя, состоящих из 21 элемента каждый. Каждый элемент состоит из 8 модулей, 4 ориентированы в одном направлении и 4 ориентированы в перпендикулярном направлении. Элементы имеют вес около 1 т и размер 7 на 7 м, поэтому площадь одного слоя составляет около 1000 м<sup>2</sup>. Слои детектора ТТ будут поддерживаться механической конструкцией (см. рис. 9). Конструкция разработана в ОИЯИ и апробирована на опытном образце, изготовленном в Дубне. Процедура сборки стены, а также необходимые вспомогательные инструменты также были разработаны и апробированы в ОИЯИ и получили одобрение специального комитета

JUNO. Несущая конструкция будет изготовлена китайской промышленной компанией в течение 2023 года. Сборка ТТ должна начаться в сентябре 2023 года и завершиться в феврале 2024 года.

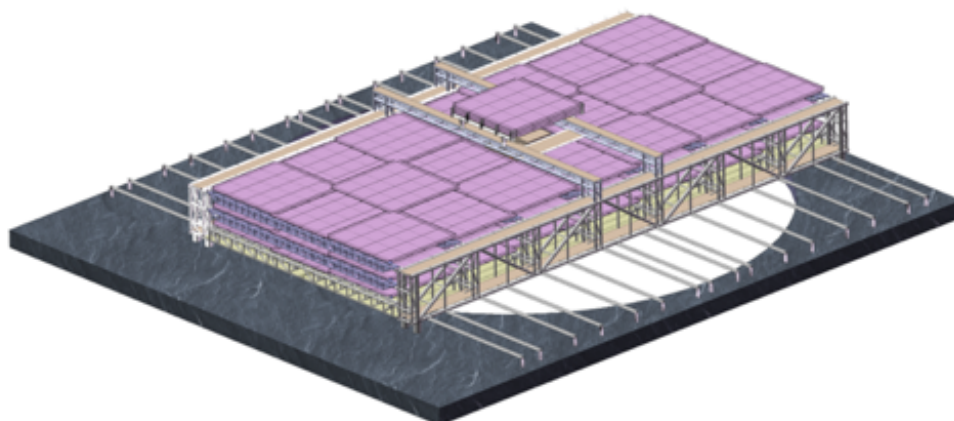


Рис. 9. Общий вид детектора ТТ.

В ТТ ожидается скорость счета более 50 кГц на одном ФЭУ. Чтобы справиться с ней, детектор ТТ будет оснащен новой электроникой сбора данных (рис. 10): платами Front End (FE) на базе чипа MAROC3 (разработанном в LAL, Франция), разработанными в IPHC в Страсбурге; считывающей платой (RB), разработанной в CAEN (Италия); а также дополнительными устройствами для подавления фона на аппаратном уровне - платой концентратора (CB) и платой триггера (TB) (обе разработаны в IPHC). ОИЯИ отвечает за разработку программного обеспечения для сбора данных. Испытательный стенд с полной цепочкой электроники сбора данных установлен в IPHC в Страсбурге и доступен для удаленного подключения. Этот испытательный стенд используется для разработки и тестирования программного обеспечения для сбора данных.

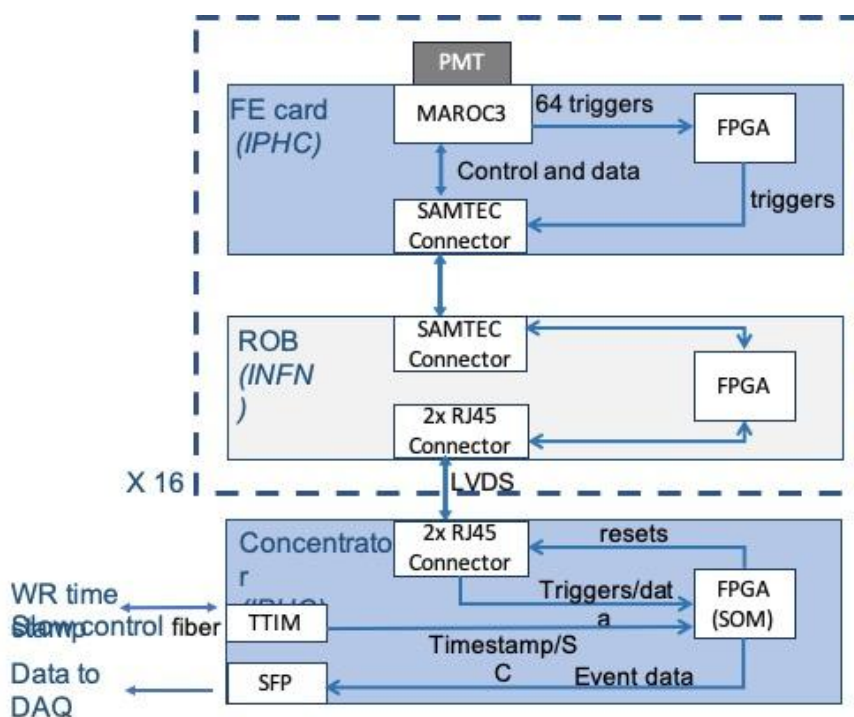


Рис 10. Схема электроники сбора данных ТТ.

Программное обеспечение для сбора данных и контроля детектора ТТ написано на языке программирования Go. Оно состоит из двух независимых частей - серверов сбора данных и, соответственно, контроля детектора. Сервер сбора данных ТТ получает состояние процесса сбора данных («Готов к набору», «Набор данных», «Набор остановлен» и т. д.) от центрального сервера сбора данных Juno по протоколу HTTP и передает его исполнителям, платам концентраторов (СВ). Он также объединяет сегменты данных, собранных СВ, в одно событие и отправляет порцию событий, упорядоченную по времени, в глобальную систему сбора данных Juno по протоколу ZeroMQ. Связь между сервером сбора данных ТТ и СВ осуществляется по TCP протоколу.

Связь сервера контроля ТТ с платами СВ осуществляется по протоколу UDP. Сервер контроля отвечает за сбор и хранение информации о состоянии СВ, а также посылает на СВ команды, необходимые для их правильной настройки.

В качестве графического пользовательского интерфейса для системы сбора данных и контроля ТТ выступает веб-клиент. Предполагается, что он станет основным интерфейсом для работы с ТТ в эксперименте Juno.

Детектор ТТ, обеспечивая восстановления положения мюонных треков в центральном детекторе, может помочь в изучении производства космогенных изотопов, таких как  $^9\text{Li}$  /  $^8\text{He}$ , от взаимодействия космических мюонов с веществом сцинтиллятора центрального детектора. Однако довольно простая компоновка детектора ТТ (всего лишь 3 слоя) и наличие случайных шумов от естественной радиоактивности делают эту задачу непростой.

Алгоритм реконструкции мюонных треков для ТТ разрабатывается в ОИЯИ. В настоящее время используется моделирование детектора методом Монте-Карло (ОИЯИ, совместно с ИФВЭ). После оснащения прототипа ТТ, размещенного в ОИЯИ, полным набором электроники для сбора данных алгоритмы могут быть проверены и отлажены на наборе данных, очень похожем на реальные данные эксперимента JUNO. Использование данных детектора ТТ в комбинации с информацией, получаемой от водного черенковского детектора, подавит шум от естественной радиоактивности в ТТ и поможет повысить эффективность реконструкции мюонов во всем детекторе. Разработка соответствующих алгоритмов также ведется в ОИЯИ.

### **Осцилляционный анализ**

Группа из ОИЯИ является одной из ключевых групп в JUNO, обеспечивающей статистический анализ реакторных антинейтринных данных и оценку чувствительности. Нами было разработано специальное программное обеспечение GNA<sup>23</sup> (Global Neutrino Analysis, C++), являющееся базой для осцилляционного анализа данных реакторных антинейтрино в экспериментах Daya Bay и JUNO. Проект GNA был расширен для поддержки экспериментов с ускорительными<sup>24</sup> нейтрино и атмосферными нейтрино. В частности, GNA использовался в параллельном анализе данных для получения окончательного результата эксперимента Daya Bay<sup>25</sup> и определения чувствительности эксперимента JUNO<sup>26</sup> в конфигурации с детектором-спутником TAO.

GNA содержит вычислительно-эффективные реализации моделей экспериментов JUNO и Daya Bay, а также инструменты для минимизации и статистической оценки. Проект будет развит дальше, чтобы включить наиболее актуальные данные о работе детекторов JUNO и TAO (эффективность, энергетические характеристики и т. д.), а также данные о потоке антинейтрино от китайских и мировых атомных электростанций.

---

<sup>23</sup> <https://git.jinr.ru/gna/gna>, <https://arxiv.org/abs/1903.05567>

<sup>24</sup> [Physics of Particles and Nuclei Letters volume 19](#)

<sup>25</sup> <https://arxiv.org/abs/2211.14988>

<sup>26</sup> [Talk Neutrino 2022, to be published soon](#)



Недавно был запущен связанный проект под названием dagflow<sup>27</sup>. Его цель — предоставить инструменты, аналогичные GNA в Python: экспериментальная также модель строится как ориентированный ациклический граф, вычисляемый лениво, по запросу. Цель состоит в том, чтобы опубликовать полный код осцилляционного анализа данных эксперимента Daya Bay в рамках инициативы по долгосрочному сохранению данных.

Мы планируем провести следующие исследования:

- Детальная оценка чувствительности эксперимента JUNO с детектором-спутником ТАО к параметрам нейтринных осцилляций в течение первых 100 дней набора данных.
- Первое измерение параметров нейтринных осцилляций  $\Delta m^2_{31}$ ,  $\Delta m^2_{21}$  и  $\sin^2 2\theta_{12}$  в JUNO.
- Оценка чувствительности детектора ТАО к параметрам стерильных нейтрино  $\Delta m^2_{41}$  и  $\sin^2 2\theta_{14}$ .
- Первый поиск осцилляций стерильных нейтрино в данных детектора ТАО.

### ***Реконструкция событий***

Мы разработаем реконструкцию мюонных треков, использующую разложение на сферические функции. 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 O<sub>x</sub>;
- 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.

### ***Вычислительные мощности и ресурсы хранения***

ОИЯИ является одним из сайтов распределенной информационно-вычислительной среды (РИВС) эксперимента JUNO, которая предназначена для хранения, обработки и анализа огромного объема данных эксперимента. Ожидается, что наряду с двумя другими европейскими дата-центрами ОИЯИ будет играть три роли в рамках РИВС: а) центр необработанных данных, б) региональный центр хранения данных и в) центр моделирования данных.

Центры необработанных данных предназначены для хранения резервных копий необработанных и реконструированных данных, обеспечивая таким образом распределенное

---

<sup>27</sup> <https://git.jinr.ru/dag-computing/dag-flow>

постоянное многократное их резервирование, постоянное хранение и управление данными, необходимыми для анализа. Кроме того, такие центры предоставляют для обработки данных вычислительные ресурсы, интегрированные в РИВС. Они также участвуют в последующей реконструкции необработанных данных.

Региональные центры обработки данных предоставляют дисковое хранилище, поддерживающее протоколы для работы в грид-инфраструктурах подобных РИВС JUNO, для размещения частичной копии реконструированных данных, а также для моделирования и задач анализа от конечных пользователей, включая высокопроизводительный распределенный анализ.

Центры моделирования данных предоставляют ресурсы для выполнения моделирования и задач анализа от конечных пользователей. В случае необходимости повторной обработки необработанных данных эти центры также могут быть задействованы, однако без необходимости долгосрочно размещать у себя копию необработанных данных. Последние будут взяты с ближайшего доступного центра необработанных данных.

Центр данных ОИЯИ для РИВС JUNO создан на базе ресурсов Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ЛИТ ОИЯИ им. М.Г. Мещерякова. Между ОИЯИ и ИФВЭ (г. Пекин, Китай) был подписан специальный Меморандум о взаимопонимании, в котором прописаны обязательства о ежегодном приросте вычислительных мощностей и ресурсов хранения (дисковые и ленточные накопители).

## **Методология**

### ***Высоковольтное питание ФЭУ***

Одним из основных вкладов ОИЯИ в создание эксперимента JUNO является разработка и производство высоковольтной электроники для всех ФЭУ JUNO: ~20000 LPMT и ~27000 sPMT в центральном детекторе и ~2000 LPMT в водно-черенковском вето. В предыдущие годы проекта ОИЯИ завершил проектирование, прототипирование и обширные испытания модулей высоковольтного питания (HVU), которые будут использоваться в эксперименте JUNO.

Разработанный HVU представляет собой программируемый модуль, который подает напряжение питания на делитель напряжения, специфичный для типа ФЭУ (НАМАМАТСУ, MCP или HZC), используемого в JUNO. Высокое напряжение генерируется специальным модулем, который преобразует постоянное напряжение 24 В в высокое постоянное напряжение с помощью каскада умножителей Кокрофта-Уолтона. Для такой системы не нужны высоковольтные кабели или разъемы. Модуль оснащен встроенным микроконтроллером. Он контролирует все операции и обеспечивает полудуплексный интерфейс RS485 для электронного блока управления (global control unit, GCU). Общее количество модулей, изготовленных для JUNO, составляет ~20000 для LPMT, 3500 для sPMT (1 HVU на 8 sPMT) и некоторый резерв.

Поскольку HVU является частью электроники, находящейся под водой вблизи ФЭУ и не подлежит ремонту или замене, особое внимание уделялось надежности конструкции, комплектующих и производственных процессов. Это включает в себя прототипирование, выбор компонентов, разработку протоколов заводских испытаний и испытания на старение. Кроме того, материалы, используемые в HVU, были проверены на радиоактивность.

На текущий момент все производство завершено (25000 шт.) и сейчас модули HVU устанавливаются в детектор JUNO вместе с остальной подводной электроникой и ФЭУ. Мы также продолжим работу над прошивкой HVU и общей разработкой программного обеспечения для мониторинга и управления. Запрашиваемые ресурсы предназначены для возможного изменения контракта и дополнительного испытательного оборудования. Они соответствуют ~10% ресурсов, ранее запрошенных для производства.

### ***Тестирование и установка ФЭУ***

Центральный детектор JUNO содержит около 20000 больших 20-дюймовых ФЭУ. Пять

тысяч ФЭУ были произведены компанией Hamamatsu и 15 тысяч трубок компанией NNVT (Китай). В трубках NNVT используются микроканальные пластины для усиления фотоэлектронов, а в Hamamatsu используется стандартная диодная система. Все ФЭУ прошли испытания в складском хранилище ФЭУ, где размещены 4 контейнерных тестовых системы и 2 системы сканирования.

Контейнер представляет собой инструмент, в котором тестируют ФЭУ с помощью равномерного импульсной засветки от светодиода или пикосекундного лазера. Установка была разработана немецкими сотрудниками и представляет собой стандартный 20-футовый светонепроницаемый контейнер с магнитной защитой, в котором можно одновременно тестировать 36 ФЭУ. Он измеряет, так называемые, интегральные характеристики ФЭУ, такие как: эффективность регистрации фотонов (PDE), коэффициент усиления, разброс времени отклика (TTS), однофотоэлектронное разрешение (SPE) и уровень темнового шума при рабочем напряжении. Один из контейнеров оборудован для испытаний на долговременную стабильность ФЭУ, где 36 ФЭУ разных типов прошли ускоренное старение, чтобы исследовать и гарантировать их работоспособность в течение всего 20-летнего периода эксплуатации JUNO.

Система сканирования представляет собой гораздо более сложный инструмент, разработанный в ОИЯИ. Она может определять те же параметры проводя измерения в 168 точках на поверхности ФЭУ. Сканирование дает лучшее представление о производительности ФЭУ, но выполняется существенно медленнее по сравнению с массовым тестированием в контейнерах. Очень важным параметром при использовании ФЭУ является его работа в присутствии магнитного поля. Инструмент помещается в темную комнату, окруженную катушками Гельмгольца для изменения или компенсации магнитного поля Земли. Все ФЭУ прошли испытания в контейнерах и около 4000 ФЭУ прошли квалификацию при помощи сканирования за три года в 2020-2022 гг.

В настоящее время ФЭУ перемещены в хранилище рядом с площадкой JUNO в Кайпине. После отгрузки все ФЭУ должны быть проверены на работоспособность посредством измерения темнового шума. Это позволит сопоставить измерения с теми, что были произведены на складе. ФЭУ тестируются в темной комнате и ориентируются в таком положении, при котором магнитное поле Земли не будет приводить к пропаданию сигнала. Затем ФЭУ перемещаются в детекторную шахту и отправляются на установку. После установки ФЭУ подключается к подводному модулю, оснащенный электроникой питания и считывания. Один подводный модуль обеспечивает группу из 3 ФЭУ. Следующим шагом является проверка целостности подключения всех кабелей. Тест будет проходить в условиях защитной подсветки. Подается минимальное напряжение, обеспечивающее увеличение тока ФЭУ, заметное для контроллера.

Группа будет принимать участие в установке и тестировании ФЭУ в течение 2024 года.

### ***Система питания SiPM***

Одной из основных обязанностей ОИЯИ в подготовке детектора ТАО является разработка и обеспечение питанием ~4100 тайлов (матриц) SiPM. При участии компании ООО “Марафон” мы разработали и изготовили блок питания SiPM VME, обеспечивающий питанием 128 тайлов SiPM с максимальным током 500 мкА (см. рисунок 11). Каждая матрица потребляет не более 1 мкА при  $-50^{\circ}\text{C}$ , а максимальный ток обеспечивает тестирование при комнатной температуре, где потребляемое питание достигает сотен мкА. Размер блока питания позволяет установить до 20 модулей в один VME крейт. Таким образом, всего нам нужно два крейта, заполненных 32 модулями (~4100 каналов). Вся система включает в себя линии распределения электроэнергии, которые представляют собой экранированные кабели 3М с 68 жилами. Всего нам нужно 900 метров на внешнюю часть и 300 метров на распределение внутри криостата. План производства и закупок включает 40 VME модулей питания, 1200 метров кабеля, 3 крейта VME и десяток переходных плат. Мы планируем построить систему в течение 2023-2024 годов и ввести ее в эксплуатацию в 2024 году.

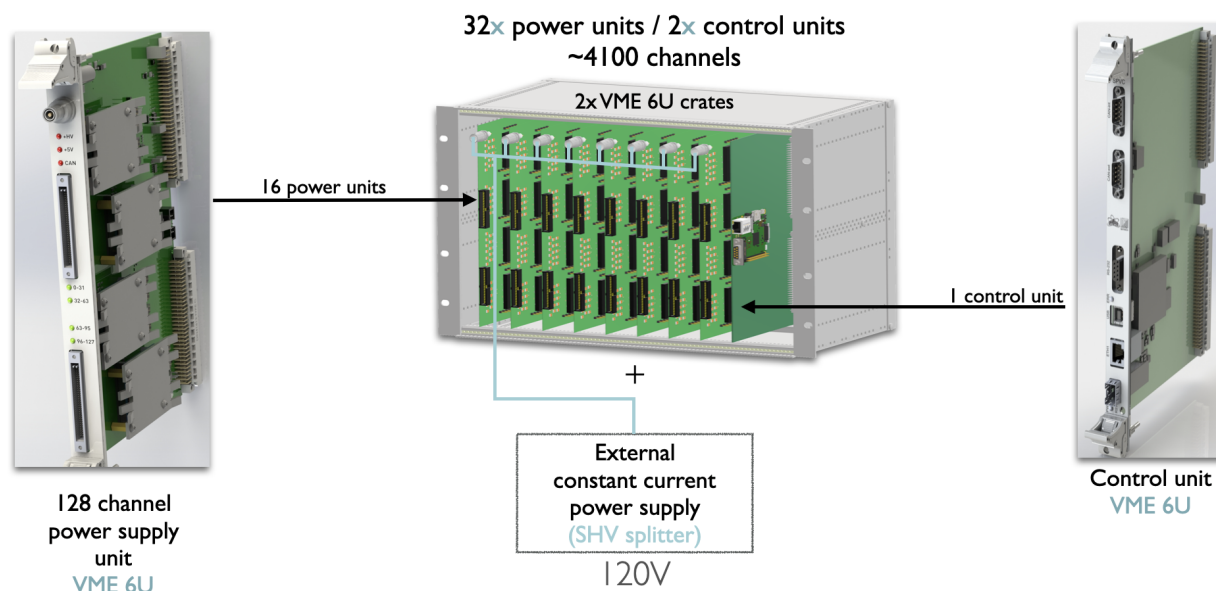


Рисунок 11. Система питания SiPM.

### ***Массовое тестирование SiPM***

Всего нам предстоит протестировать около 4100 тайлов SiPM и проверить их работоспособность при  $-50^{\circ}\text{C}$ . Первый шаг — это визуальная проверка качества поверхности эпоксидной смолы на вкрапления и пузырьки. Вторым этапом является одновременное тестирование 16 матриц, которые размещены на большой тестовой плате (см. рис. 12). Каждый тайл питается от отдельного источника напряжения, что позволяет точно контролировать ток каждой матрицы. В темновых условиях, используя 16 самостабилизирующихся светодиодов (или волоконный разветвитель), мы можем организовать сканирование 16 матриц одновременно, используя 16-канальный АЦП. Каждый светодиод откалиброван с использованием референсного SiPM, расположенного рядом с каждой матрицей. Светодиоды расположены над массивами и освещают площадь  $5 \times 5$  см. Большая печатная плата перемещается шаговыми двигателями, обеспечивающими точное позиционирование референсного SiPM для сканирования светового поля. Чтобы протестировать все SiPM на 16 тайлах, мы должны предоставить 32 сканирования для матриц SiPM  $8 \times 4$ . Для каждого сканирования требуется набрать  $\sim 10^4$  событий для каждого SiPM, что потребует около 30 минут для полного сканирования 16 массивов. Включая охлаждение и измерения тока, каждая партия тестируется в течение 3 часов. Для тестирования всех матриц нам нужно 4-6 месяцев. Этот метод позволяет охарактеризовать SiPM: PDE, усиление, перекрестные помехи, послеимпульсы, SPE и BAX. Установка будет введена в эксплуатацию в 2023 году. Завершить испытания мы планируем в течение 2023-2024 годов.

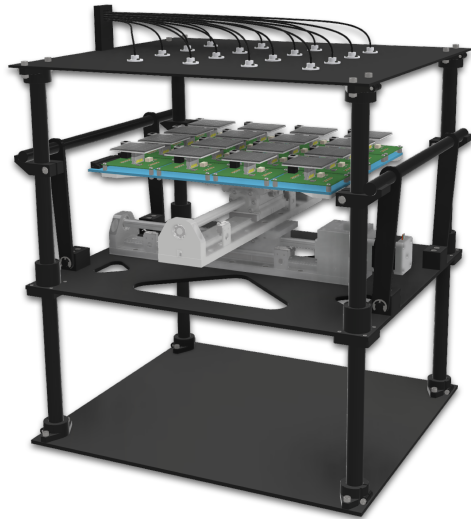


Рисунок 12. Общий вид внутренней части сканирующей системы SiPM: слева — конструкция, справа — реальное устройство.

### **Монтаж и пуско-наладка ТАО**

Детектор ТАО будет работать внутри криостата при низкой температуре. После тестирования SiPM и электроники будет проведена сборка детектора. Процедура сборки следующая:

- Установка тайлов SiPM на медный каркас и установка внутрь криостата.
- Внутренняя проводка.
- Подключение и установка.
- Наружная проводка и подключение.
- Установка DAQ и стойки питания.

В пуско-наладку входит:

- Включение всех SiPM и электроники.
- Установка и тестирование программного обеспечения.
- Тестовый запуск установки.
- Калибровка.

В 2024 году мы планируем провести сборку и запуск детектора ТАО, а в конце 2024 года ввести его в эксплуатацию.

### **Ожидаемые результаты (2024-2026)**

1. Реконструкция (2024 г.):
  - a. Реконструкция треков мюонов и электромагнитных ливней с учётом моделирования электроники.
  - b. Реконструкция мюонов с короткими треками в центральном детекторе.
  - c. Определение эффективности и качества восстановленных мюонных треков.
  - d. Адаптация процедуры реконструкции мюонных треков к реальным данным.
2. ВЕТО ТТ
  - a. Завершение сборки и ввода в эксплуатацию детектора Top Tracker установки JUNO.
  - b. Будут получены первые физические результаты по измерению потока космических мюонов с помощью Target Tracker.
3. Крупные ФЭУ (2024 г.):

- a. Тестирование ФЭУ с модулями HV.
- b. Установка ФЭУ на центральный детектор JUNO.
- 4. Заполнение и запуск JUNO конец 2024 — начало 2025.
- 5. ТАО:
  - a. Все SiPM для ТАО протестированы и установлены на детектор.
  - b. Изготовление и ввод в эксплуатацию системы питания SiPM ТАО 2024-2025 гг.
  - c. Заполнение и запуск ТАО: конец 2024 — начало 2025 года.
- 6. Осцилляционный анализ (2026 г.):
  - a. Первое измерение параметров нейтринных осцилляций  $\Delta m^2_{31}$ ,  $\Delta m^2_{21}$  и  $\sin^2 2\theta_{12}$  в эксперименте JUNO.
  - b. Первые ограничения на параметры осцилляции стерильных нейтрино  $\sin^2 2\theta_{14}$  и  $\Delta m^2_{41}$  по данным детектора ТАО.

### SWOT-анализ

	Положительное влияние	Отрицательное влияние
Внутренние	<p><b>Сильные стороны</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Определение упорядочивания массы нейтрино методом, отличным от других экспериментов.</li> <li>● Прецизионное измерение параметров осцилляций нейтрино.</li> <li>● Измерение геонейтрино.</li> <li>● Другая нейтринная физика (солнечная, атмосферная и др.)</li> <li>● Все ФЭУ протестированы и готовы к установке.</li> <li>● 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.</li> <li>● ОИЯИ играет ведущую роль в анализе.</li> </ul>	<p><b>Слабые стороны</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Недостижение достаточного энергетического разрешения на одном из детекторов.</li> <li>● Недостаточная целостность детектора/структуры.</li> <li>● Недостаточная надежность электроники/питания.</li> <li>● Задержка сборки детектора.</li> </ul>
Внешние	<p><b>Возможности</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Существование физики за пределами Стандартной Модели.</li> <li>● Взрыв сверхновой.</li> <li>● Диффузный фон сверхновых.</li> <li>● Снижение систематических ошибок за счет новых измерений или усовершенствования теории.</li> <li>● Разработка новых методов и технологий.</li> </ul>	<p><b>Угрозы</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Крупная авария.</li> <li>● Ограничения на экспорт/импорт/поездки в РФ и Китае.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Сотрудничество с китайскими институтами, совместное финансирование.</li> </ul>	
--	---	--

Ожидается, что эксперимент JUNO станет огромным шагом вперед по масштабу и точности как среди реакторных нейтринных экспериментов, так и экспериментов с жидкими сцинтилляторами. Детектор JUNO будет 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  $\sigma=3\%$  при 1 МэВ выделенной энергии. Поэтому конструкция детектора создаёт ряд технических сложностей:

- Создание акриловой сферы для хранения 20 кт жидкого сцинтиллятора, который легко воспламеняется.
- Защита ФЭУ от ударной волны.
- Заливка и подключение ФЭУ и электроники под водой на глубине до 35 метров.
- Срок работы не менее 20 лет (ожидается 30 лет).

Все эти пункты указывают на 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.

### **2.3. Предполагаемый срок выполнения**

Завершение проекта в 2045 году

### **2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ**

**ЛЯЦ, ЛИТ, ЛТФ, ЛФВЭ**

#### 2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам		
	1 год	2 год	3 год
Хранение данных (ТБ)			
- EOS	5000	10000	15000
- Ленты	5000	10000	15000
Tier 1 (ядро-час)			
Tier 2 (ядро-час)			
СК «Говорун» (ядро-час)			
- CPU			
- GPU			
Облака (доступных CPU ядер)	3500	5000	6300

Запрошенные числа, необходимые для обработки и хранения данных JUNO, были одобрены сторонами в рамках «Меморандума о взаимопонимании по сотрудничеству в области развертывания и эксплуатации вычислительной сети JUNO», подписанного между ИФВЭ (г. Пекин) и ОИЯИ 1 сентября 2022 г.

#### 2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
ИHEP	Китай	Пекин	Ифан Ван+ 10	MoU
SYSU	Китай	Гуанчжоу	Вей Ван + 10	MoU
SINP MSU	Россия	Москва	Александр Чепурнов, Максим Громов	MoU
INFN	Италия	Катания,	Джузеппе Андронико+1	MoU
		Рим	Стефано Мария Мари +1	MoU
FZJ-ИКР	Германия	Юлих	Ливия Лудхова +4	MoU
EKUT	Германия	Тюбинген	Тобиас Лакенмайер +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)

**Institute for High Energy Physics, Пекин, Китай**



### 3. Кадровое обеспечение

#### 3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

<b>№ № п/п</b>	<b>Категория работника</b>	<b>Основной персонал, сумма FTE</b>	<b>Ассоциированный персонал, сумма FTE</b>
1.	научные работники	10	-
2.	инженеры	5	-
5.	студенты	-	5
	<b>Итого:</b>	<b>15</b>	<b>5</b>

### 3.2. Доступные кадровые ресурсы

#### 3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№ № п/п	Категория работников	ФИО	Подразде ление	Должность	Сумм а FTE
1.	научные работники	Дмитрий Наумов	ЛЯП	Заместитель директора ЛЯП, руководитель проекта	0.5
2.	научные работники	Максим Гончар	ЛЯП	Начальник сектора	1.0
3.	научные работники	Александр Ольшевский	ЛЯП	начальник отдела	0.3
4.	научные работники	Николай Анфимов	ЛЯП	Начальник сектора	0.4
5.	научные работники	Александр Селюнин	ЛЯП	научный сотрудник	0.2
6.	научные работники	Арсений Рыбников	ЛЯП	научный сотрудник	0.7
7.	научные работники	Анастасия Большакова	ЛЯП	научный сотрудник, к.ф.-м.н	0.5
8.	научные работники	Вячеслав Чалышев	ЛЯП	старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	0.4
9.	научные работники	Владислав Шаров	ЛЯП	научный сотрудник	0.6
10.	научные работники	Игорь Немченко	ЛЯП	руководитель группы	0.2
11.	научные работники	Светлана Биктемерова	ЛЯП	научный сотрудник	0.4
12.	научные работники	Артем Чуканов	ЛЯП	старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	0.5
13.	научные работники	Елена Наумова	ЛЯП	научный сотрудник	1
14.	научные работники	Денис Кораблев	ЛЯП	научный сотрудник	0.8
15.	научные работники	Олег Смирнов	ЛЯП	старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	0.3

16.	научные работники	Максим Громов	ЛЯП	научный сотрудник, кандидат наук	0.5
17.	научные работники	Сергей Дмитриевский	ЛЯП	старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	0.5
18.	научные работники	Виталий Завадский	ЛЯП	аспирант	0.5
19.	научные работники	Андрей Садовский	ЛЯП	старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	0.5
20.	научные работники	Юрий Горнушкин	ЛЯП	начальник сектора	0.5
21.	научные работники	Алексей Красноперов	ЛЯП	старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	0.1
22.	научные работники	Виталий Шутов	ЛФВЭ	старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.	0.1
23	научные работники	Никита Цегельник	ЛТФ	стажер-исследователь	0.2
24.	инженер	Сергей Соколов	ЛЯП	старший инженер	0.4
25.	инженер	Василий Громов	ЛЯП	ведущий инженер	0.5
26.	инженер	Дмитрий Федосеев	ЛЯП	инженер-электроник (1 разряд)	0.5
27.	инженер	Алексей Четвериков	ЛЯП	инженер-электроник (2 разряд)	0.5
28.	инженер	Ксения Кузнецова	ЛЯП	инженер	0.5
29.	инженер	Альберт Сотников	ЛЯП	инженер-электроник (1 разряд)	0.4
30.	инженер	Татьяна Антошкина	ЛЯП	инженер	1.0
31.	инженер	Дмитрий Должиков	ЛЯП	инженер	1.0
32.	инженер	Никита Балашов	ЛИТ	инженер-программист 1 категории	0.2
33.	инженер	Николай Кутовский	ЛИТ	старший научный сотрудник	0.2
	<b>Total:</b>				<b>15.9</b>

### 3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№ № п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники	-	-
2.	инженеры	-	-
3.	специалисты	-	-
4.	рабочие	-	-
	<b>Итого:</b>	-	-

#### 4. Финансовое обеспечение

##### 4.1. Полная сметная стоимость проекта

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

**1300 k\$**

##### 4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

Руководитель проекта \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

Дата представления проекта в ДНОД \_\_\_\_\_

Дата решения НТС Лаборатории \_\_\_\_\_, номер документа \_\_\_\_\_

Год начала проекта \_\_\_\_\_

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту \_\_\_\_\_

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления  
Проекта**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам			
			1 год	2 год	3 год	
	Международное сотрудничество (МНТС)	750	250	250	250	
	Материалы	280	100	100	80	
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	150	50	50	50	
	Пуско-наладочные работы					
	Услуги научно-исследовательских организаций	60	20	20	20	
	Приобретение программного обеспечения	60	20	20	20	
	Проектирование/строительство					
	Сервисные расходы <i>(планируются в случае прямой принадлежности к проекту)</i>					
<b>Не об хо ди м ые ре су р сы</b>	<b>Н о р м о ч ас</b>	Ресурсы				
		–мастерские и КО,	150	50	50	50
		–ускорителя/установки,				
		–реактора,.....				
<b>Исто чни ки фин анси рова ния</b>	<b>Б ю д ж ет н ы е ср ед ст в а</b>	Бюджет ОИЯИ <i>(статьи бюджета)</i>	1300	440	440	420

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

Руководитель проекта \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Экономист Лаборатории \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

# ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

Изучение осцилляций нейтрино в эксперименте JUNO (Участие ОИЯИ)

Проект JUNO

Продление проекта на период 2024–2026 гг

Шифр темы: 02-2-1099-2010/2026

Руководитель: 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

## 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** JUNO

1.4. **Шифр темы** 02-2-1099-2010/2026

1.5. **Фактический срок реализации проекта**

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

## 2. Научный отчет

### 2.1. Аннотация

Эксперимент JUNO с реакторными электронными антинейтрино в настоящее время находится на стадии сборки детектора в Китае. Основные цели: 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-, атмосферных и солнечных нейтрино, поиск физики за пределами Стандартной Модели.

Детектор-спутник ТАО измерит спектр реакторных электронных антинейтрино со статистической погрешностью порядка 1% и энергетическим разрешением  $\sigma=2\%$  при энергии 1 МэВ. Его чувствительность к амплитуде смешивания стерильных нейтрино  $\sin^2 2\theta_{14}$  в диапазоне  $2 \cdot 10^{-2} \leq \Delta m^2_{41} \leq 8 \text{ эВ}^2$  будет сравнима с ведущими мировыми экспериментами.

В период 2021-2023 гг. группа ОИЯИ внесла свой вклад в создание детектора и общую подготовку эксперимента:

(i) В ОИЯИ разработано и изготовлено 25000 шт. источников высоковольтного питания для больших (20 дюймов) и малых (3 дюйма) фотоумножителей (ФЭУ) JUNO.

(ii) ОИЯИ разработал и изготовил конструкцию из нержавеющей стали для мюонного детектора (Top Tracker), спроектировал систему сбора данных и разработал специальное программное обеспечение.

(iii) ОИЯИ спроектировал и изготовил экраны для подавления магнитного поля для больших ФЭУ детектора OSIRIS.

(iv) Массовые испытания и ввод в эксплуатацию крупных ФЭУ: в ОИЯИ были спроектированы и изготовлены две сканирующие станции, ОИЯИ обеспечил сканирование почти 4000 ФЭУ и испытания на долговременную стабильность ФЭУ.

(v) ОИЯИ участвовал в проектировании и строительстве детектора-спутника JUNO — ТАО: закупка половины из 4100 тайлов SiPM (130 тыс. ячеек) и методов массового тестирования, изготовление и испытания пилотной версии модулей питания SiPM, проектирование системы питания.



(vi) ОИЯИ вносит вклад в программное обеспечение и анализ. Две группы из ОИЯИ провели анализ чувствительности JUNO к а) определению порядка масс нейтрино и б) параметрам осцилляций нейтрино  $\Delta m^2_{31}$ ,  $\Delta m^2_{21}$ ,  $\sin^2 2\theta_{12}$ .

(vii) Компьютерная инфраструктура ОИЯИ подключена к распределенной компьютерной инфраструктурой JUNO. В период 2021-2022 гг. доля всех вычислительных задач JUNO, обрабатываемых в ОИЯИ, увеличилась с 30% до 50%.

Daya Bay — это реакторный антинейтринный эксперимент со средней базой в Китае, который завершил набор данных в конце 2020 года. В 2022 году был завершён анализ полного набора данных и были получены наиболее точные значения параметров смешивания нейтрино  $\sin^2 2\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$ . Группа из ОИЯИ принимала участие в анализе как независимая группа.

## **2.2. Развернутый научный отчет**

2.2.1. Описание режима работы и функционирования основных систем и оборудования (для подпроекта КИП).

-

2.2.2. Описание проведенных экспериментов (для экспериментальных проектов).

-

2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.

### **Сборка JUNO**

В 2022 г. в Китае начата сборка крупнейшего детектора с жидким сцинтиллятором JUNO. Для детектора в ОИЯИ была разработана система высоковольтного питания ФЭУ. Все модули системы (>25 000) изготовлены, протестированы и готовы к установке. Команда ОИЯИ также провела НИОКР по источнику питания для кремниевых фотоумножителей (SiPM) детектора TAO. Модули питания были спроектированы и подготовлены к производству в Китае. Также был разработан проект станции для массового тестирования SiPM.

### **Массовое тестирование ФЭУ**

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

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

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

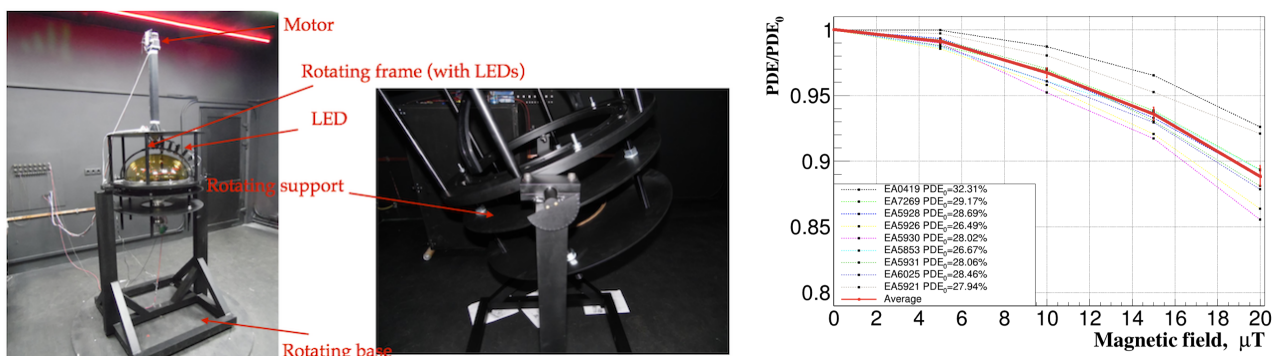


Рисунок 1: Системы сканирования (слева). Эффективность регистрации фотонов трубками Hamamatsu R12860 в зависимости от магнитного поля (справа).

## Высоковольтное питание ФЭУ

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

Поскольку HVU являются частью электроники, находящейся под водой вблизи ФЭУ, возможность ремонта или замены отсутствует. Соответственно особое внимание уделялось надежности конструкции, узлов и производственных процессов, в том числе: прототипирование, выбор компонентов, разработка протоколов заводских испытаний и испытания на ускоренное старение при повышенной температуре. Кроме того, материалы, используемые в HVU, были проверены на радиоактивность.

Все тесты были пройдены успешно. HVU были признаны соответствующими требованиям JUNO. Конструкция HVU была одобрена Коллаборацией в ходе ряда ревью, в ходе которых проверялось соответствие требуемым параметрам, в первую очередь надежности. Наконец, после проверки готовности к производству был подписан контракт с заводом по производству электроники в Шэньчжэне (см. рис. 2). Полное производство было завершено к концу 2021 года (25000 штук). В настоящее время блоки HV устанавливаются на детекторе JUNO вместе с остальной подводной электроникой и ФЭУ.

## Защита от магнитного поля Земли

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

Результаты опубликованы в JINST ([\[2212.02562\]](https://arxiv.org/abs/2212.02562)). Защита также может быть использован в эксперименте Serappis, предлагаемой модернизации установки OSIRIS для обнаружения солнечных  $p\bar{p}$ -нейтрино (Eur.Phys.J.C 82 (2022) 9, 779, [\[2109.10782\]](https://arxiv.org/abs/2109.10782)).

## Veto: Top Tracker

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

## Массовое тестирование SiPM

Для считывания сцинтилляционного света детектор ТАО будет использовать почти 4100 32-канальных SiPM-матриц (тайлов), работающих при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$ . Были изучены потенциальные кандидаты SiPM, работающие при температурах ниже  $0^{\circ}\text{C}$  [[NIMA 997:165162, 2021](#)]. В ЛЯП ОИЯИ разработаны и испытаны методика и конструкция установки для массовых испытаний тайлов SiPM при  $-50^{\circ}\text{C}$ . Методы были приняты для использования коллаборацией JUNO и успешно прошли финальное ревью (FDR). Метод, позволяющий тестировать один тайл, будет масштабирован до одновременного тестирования 16 тайлов. Для одновременного тестирования нескольких плиток разработан разветвитель оптического волокна (см. рисунок 3) [Phys. Part. Nuclei Lett. 19, 797–802]. Установка для массовых испытаний изготовлена и собрана в ИНЕР (г. Пекин) и сейчас находится на пуско-наладочных работах (см. рис. 3).

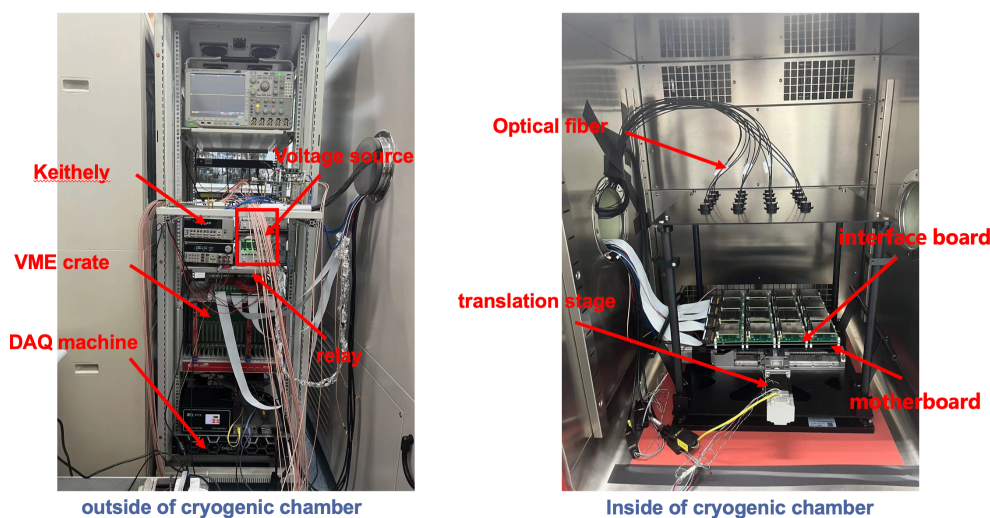


Рисунок 3. Установка для массового тестирования SiPM в ИНЕР.

## Система питания SiPM

Разработан многоканальный модуль питания SiPM VME на 128 каналов. Модуль позволяет смещать детекторы от 0 до 200В с максимальной токовой нагрузкой 500 мА. Реализован мониторинг тока и короткого замыкания. Модули предназначены для питания 4100 тайлов SiPM в детекторе ТАО. Пилотные версии (см. рисунок 4) изготовлены, испытаны и прошли FDR. Все комплектующие для производства модулей закуплены и поставлены. Мы также разработали переходную панель разъемов для питающих кабелей внутри криостата (см. рис. 4). Были подобраны подходящие кабели для передачи до 200 В при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$  в лабораторных условиях.

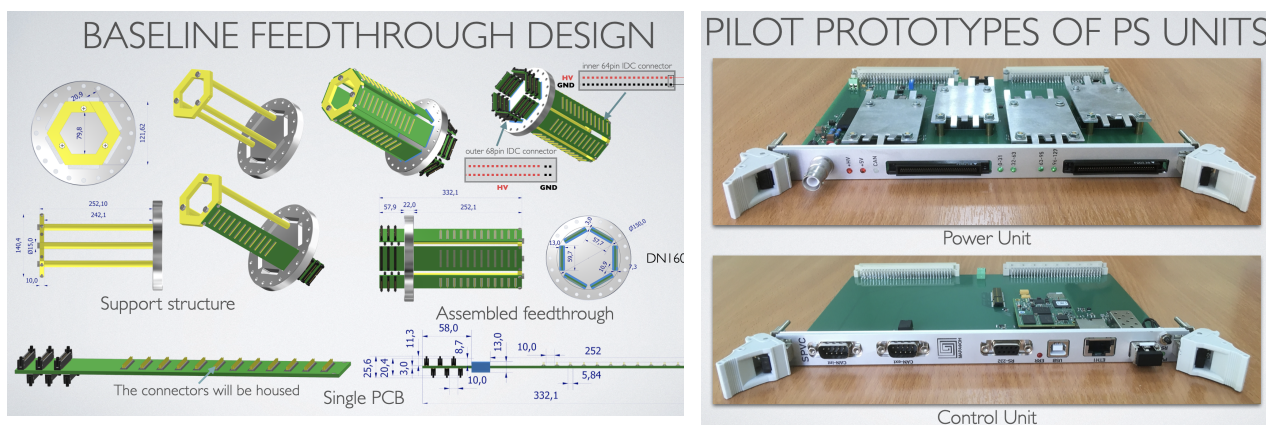


Рисунок 4. Переходная панель разъемов (слева). Фотография модуля питания и блока управления (справа).

### Солнечные нейтрино

Ученые ОИЯИ приняли участие в подготовке предложения модернизации установки OSIRIS (Serappis) для регистрации потока солнечных рр-нейтрино с высокой точностью ([EPJC 82, 2109.10782](#)). Рассмотрена возможность использования защиты от магнитного поля Земли в сочетании с концентратором света для детектора Serappis. Совместно с производителем мы разрабатываем процесс нанесения серебра на текстуру углеродного волокна.

### Чувствительность эксперимента JUNO

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

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

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

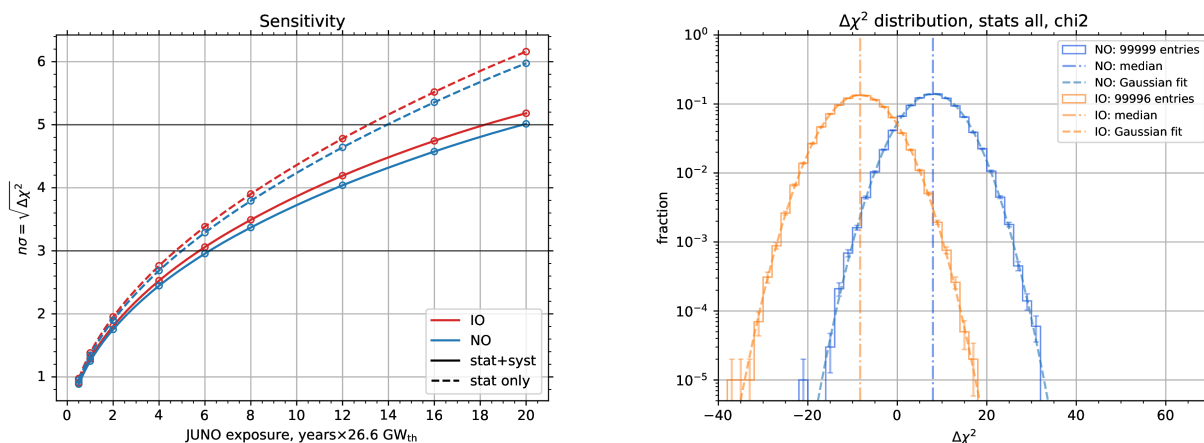


Рисунок 5. Чувствительность эксперимента JUNO в зависимости от экспозиции (слева). Распределение тестовой статистики для 6-и лет сбора данных (справа).

### Реконструкция событий

Результаты исследования применения методов машинного обучения для восстановления первичной вершины и энергии в детекторе JUNO были опубликованы ([NIMA1010, \[2101.04839\]](#)). Группа из ОИЯИ внесла существенный вклад в реконструкцию энергии и выполнила общую координацию анализа.

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

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

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

### **Вычислительная инфраструктура**

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

Одной из отличительных черт вычислительных ресурсов ОИЯИ является то, что счётные узлы имеют большой объем оперативной памяти (ОЗУ), приходящейся на одно вычислительное ядро ЦПУ (15 ГБ), что делает ОИЯИ единственным поставщиком ресурсов для задач с повышенными требованиями к объёму ОЗУ, например, мюоны высоких энергий. Помимо вычислительных ресурсов, ОИЯИ предоставляет квоту в 1 ПБ эффективного дискового пространства (что соответствует 2 ПБ "сырого" дискового пространства из-за двукратной репликации) для JUNO (на момент написания отчёта используется 65%) и 650 ТБ (1,3 ПБ) для Daya Bay (используется 92%).



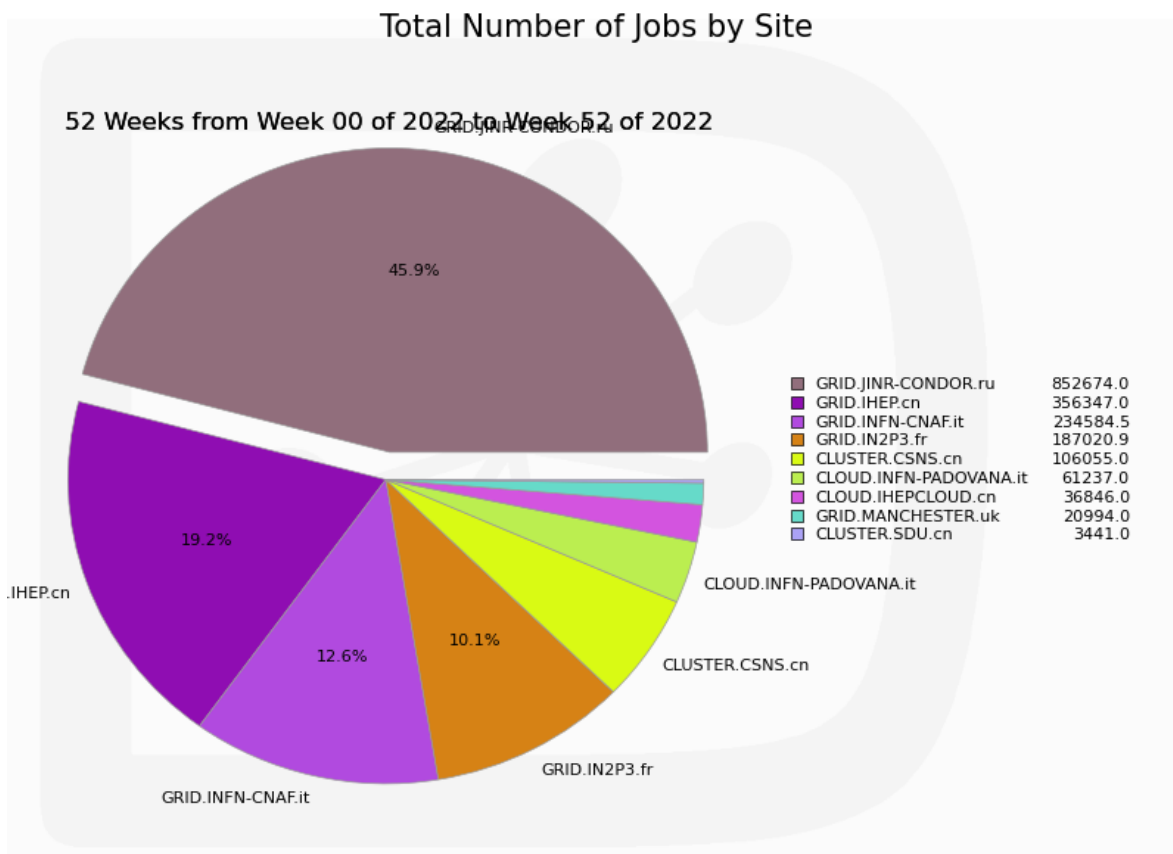


Рис. 6. Распределение используемых вычислительных ресурсов в рамках РИВС JUNO.

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

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

### The final result of the Daya Bay experiment

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

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

выбрана коллаборацией для разработки кода для долговременного сохранения данных и основного анализа.

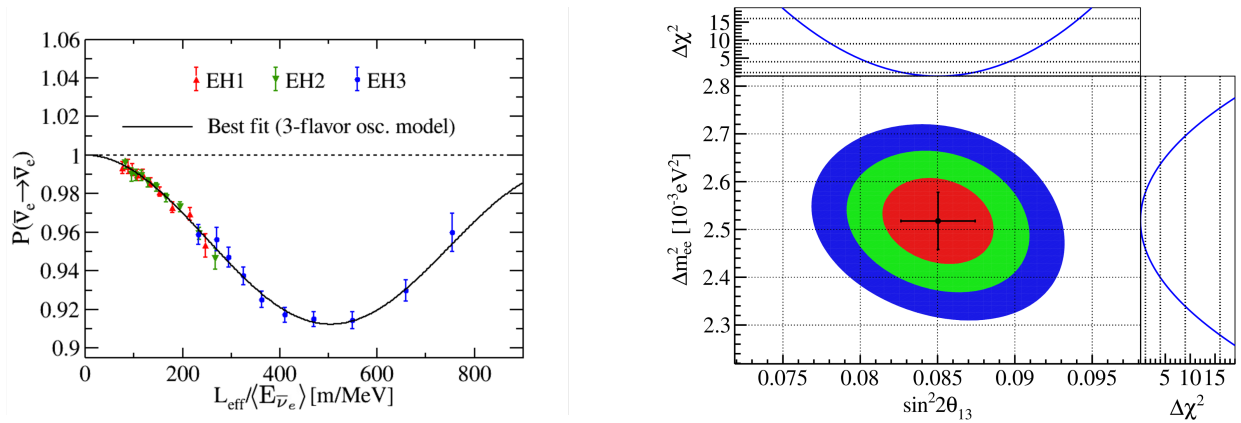


Рис. 7. Отношение наблюдаемых событий без фона к ожидаемому без осцилляций (слева). Доверительный интервал для параметров нейтринных осцилляций  $\sin^2 2\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{31}$  (справа).

Значение  $\sin^2 2\theta_{13}$  от Daya Bay будет ведущим в мире измерением с погрешностью 2/8% в течение десятилетий. Единственный известный запланированный проект, который может обеспечить лучшую точность 0/5% — это SuperCHOOZ, если он будет одобрен. Подробное сравнение представлено на рисунке 8.

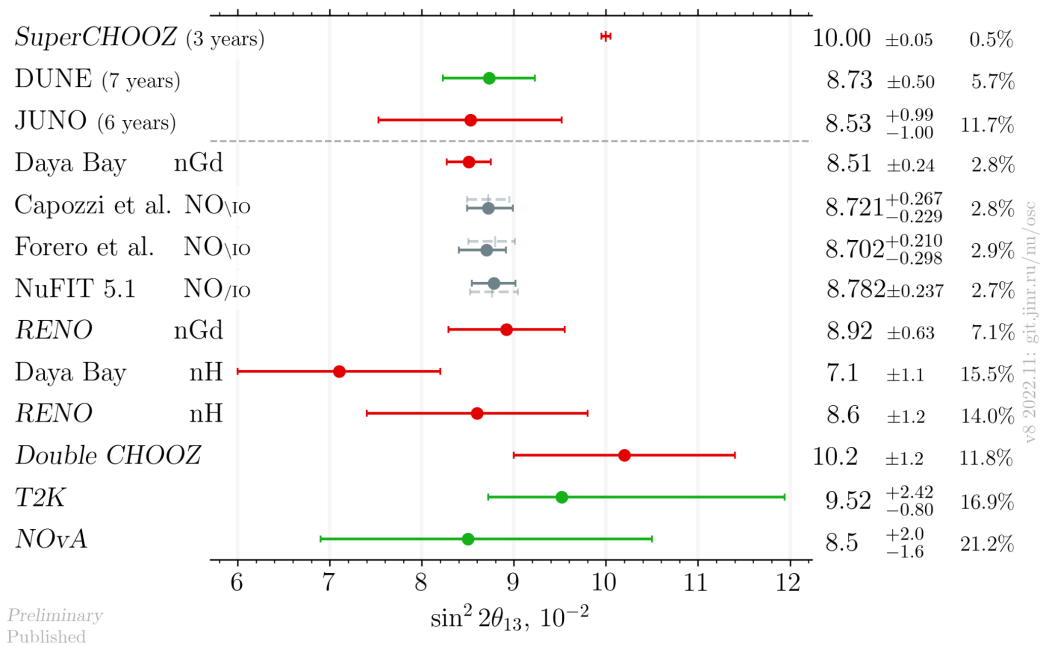


Рисунок 8. Сравнение измерений  $\sin^2 2\theta_{13}$ .

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

1. Abuselme A.,..., Gonchar M.,..., Malyshev Yu. et al., Sub-percent precision measurement of neutrino oscillation parameters with JUNO, e-Print: 2204.13249 [hep-ex], Published in: Chin.Phys.C 46 (2022) 12, 123001
2. JUNO Collaboration, JUNO physics and detector, e-Print: 2104.02565 [hep-ex], Published in: Prog.Part.Nucl.Phys. 123 (2022), 103927
3. An F.P.,..., Dolzhikov D.,..., Gonchar M.,..., Naumov D.,..., Olshevkiy A.,..., Treskov K.,..., Zavadskiy V. et al., Precision measurement of reactor antineutrino oscillation at kilometer-scale baselines by Daya Bay, e-Print: 2211.14988 [hep-ex], submitted to PRL.
4. Angel Abusleme, ..., Dmitrievsky S.,..., Gornushkin Yu.,..., Korablev D. et al., The JUNO experiment Top Tracker, e-Print: 2303.05172 [hep-ex], to be submitted.
5. Arsenii Gavrikov, Yury Malyshev, Fedor Ratnikov (Higher Sch. of Economics, Moscow and Dubna, JINR), Energy reconstruction for large liquid scintillator detectors with machine learning techniques: aggregated features approach, e-Print: 2206.09040 [physics.ins-det], Published in: Eur.Phys.J.C 82 (2022) 11, 1021, Eur.Phys.J.C 82 (2022), 1021
6. Xu H.,..., Anfimov N.,..., Gromov M.,..., Rybnikov A. et al., Calibration strategy of the JUNO-TAO experiment, e-Print: 2204.03256 [physics.ins-det], Published in: Eur.Phys.J.C 82 (2022) 12, 1112
7. Bieger L.,..., Gromov M.,..., Smirnov O. et al., Potential for a precision measurement of solar pp neutrinos in the Serappis experiment, e-Print: 2109.10782 [physics.ins-det], Published in: Eur.Phys.J.C 82 (2022) 9, 779
8. Qian Z.,..., Gavrikov A.,..., Gonchar M.,..., Malyshev Yu.,..., Treskov K. et al., Vertex and energy reconstruction in JUNO with machine learning methods, e-Print: 2101.04839 [physics.ins-det], Published in: Nucl.Instrum.Meth.A 1010 (2021), 165527
9. O. Smirnov, D. Korablev, A. Sotnikov et al., Magnetic shielding for large photoelectron multipliers for the OSIRIS facility of the JUNO detector, e-Print: 2212.02562 [physics.ins-det], submitted to JINST.
10. A. Stepanova (Dubna, JINR), M. Gonchar (Dubna, JINR), L. Kolupaeva (Dubna, JINR), K. Treskov (Dubna, JINR), Deep Underground Neutrino Experiment DUNE—Calculation of Sensitivity to the Measurement of Oscillation Parameters, Published in: Phys.Part.Nucl.Lett. 19 (2022) 5, 505-508
11. Rybnikov, A.V., Anfimov, N.V., Fedoseev, D.V. et al. Optical Fiber Splitter for Photodetector Testing. Phys. Part. Nuclei Lett. 19, 797–802 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1547477122060255>
12. Abusleme, A.,..., Anfimov N., et al. Mass testing and characterization of 20-inch PMTs for JUNO. Eur. Phys. J. C 82, 1168 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-11002-8>

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

1. Daya Bay Collaboration, Search for electron-antineutrinos associated with gravitational-wave events GW150914, GW151012, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814, and



- GW170817 at Daya Bay, e-Print: 2006.15386 [astro-ph.HE], Published in: Chin.Phys.C 45 (2021) 5, 055001
2. JUNO Collaboration, Feasibility and physics potential of detecting  $^8\text{B}$  solar neutrinos at JUNO, e-Print: 2006.11760 [hep-ex], Published in: Chin.Phys.C 45 (2021) 2, 023004
  3. Daya Bay Collaboration, Antineutrino energy spectrum unfolding based on the Daya Bay measurement and its applications, e-Print: 2102.04614 [hep-ex], Published in: Chin.Phys.C 45 (2021) 7, 073001, Chinese Physics C, Volume 45, Number 7, 2021
  4. Abuselme A.,..., Gonchar M.,..., Malyskin Yu. et al., Sub-percent precision measurement of neutrino oscillation parameters with JUNO, e-Print: 2204.13249 [hep-ex], Published in: Chin.Phys.C 46 (2022) 12, 123001
  5. JUNO Collaboration, Prospects for detecting the diffuse supernova neutrino background with JUNO, e-Print: 2205.08830 [hep-ex], Published in: JCAP 10 (2022), 033
  6. JUNO Collaboration, Damping signatures at JUNO, a medium-baseline reactor neutrino oscillation experiment, e-Print: 2112.14450 [hep-ex], Published in: JHEP 06 (2022), 062
  7. Daya Bay Collaboration, First Measurement of High-Energy Reactor Antineutrinos at Daya Bay e-Print: 2203.06686 [hep-ex], Published in: Phys.Rev.Lett. 129 (2022) 4, 041801
  8. JUNO Collaboration, JUNO physics and detector, e-Print: 2104.02565 [hep-ex], Published in: Prog.Part.Nucl.Phys. 123 (2022), 103927
  9. An F.P.,..., Dolzhikov D.,..., Gonchar M.,..., Naumov D.,..., Olshevkiy A.,..., Treskov K.,..., Zavadskiy V. et al., Precision measurement of reactor antineutrino oscillation at kilometer-scale baselines by Daya Bay, e-Print: 2211.14988 [hep-ex], submitted to PRL.
  10. Angel Abusleme, ..., Dmitrievsky S.,..., Gornushkin Yu.,..., Korablev D. et al., The JUNO experiment Top Tracker, e-Print: 2303.05172 [hep-ex], to be submitted.
  11. Daya Bay and PROSPECT Collaborations, Joint Determination of Reactor Antineutrino Spectra from U235 and Pu239 Fission by Daya Bay and PROSPECT, e-Print: 2106.12251 [nucl-ex], Published in: Phys.Rev.Lett. 128 (2022) 8, 081801
  12. JUNO Collaboration, The design and sensitivity of JUNO's scintillator radiopurity pre-detector OSIRIS, e-Print: 2103.16900 [physics.ins-det], Published in: Eur.Phys.J.C 81 (2021) 11, 973
  13. Arsenii Gavrikov, Yury Malyskin, Fedor Ratnikov (Higher Sch. of Economics, Moscow and Dubna, JINR), Energy reconstruction for large liquid scintillator detectors with machine learning techniques: aggregated features approach, e-Print: 2206.09040 [physics.ins-det], Published in: Eur.Phys.J.C 82 (2022) 11, 1021, Eur.Phys.J.C 82 (2022), 1021
  14. Xu H.,..., Anfimov N.,..., Gromov M.,..., Rybnikov A. et al., Calibration strategy of the JUNO-TAO experiment, e-Print: 2204.03256 [physics.ins-det], Published in: Eur.Phys.J.C 82 (2022) 12, 1112
  15. Bieger L.,..., Gromov M.,..., Smirnov O. et al., Potential for a precision measurement of solar pp neutrinos in the Serappis experiment, e-Print: 2109.10782 [physics.ins-det], Published in: Eur.Phys.J.C 82 (2022) 9, 779
  16. JUNO Collaboration, Calibration Strategy of the JUNO Experiment, e-Print: 2011.06405 [physics.ins-det], Published in: JHEP 03 (2021), 004
  17. JUNO Collaboration, Radioactivity control strategy for the JUNO detector, e-Print: 2107.03669 [physics.ins-det], Published in: JHEP 11 (2021), 102
  18. Qian Z.,..., Gavrikov A.,..., Gonchar M.,..., Malyskin Yu.,..., Treskov K. et al., Vertex and energy reconstruction in JUNO with machine learning methods, e-Print: 2101.04839 [physics.ins-det], Published in: Nucl.Instrum.Meth.A 1010 (2021), 165527
  19. Qian Z.,..., Gavrikov A.,..., Gonchar M.,..., Malyskin Yu.,..., Treskov K. et al., Vertex and energy reconstruction in JUNO with machine learning methods, e-Print: 2101.04839 [physics.ins-det], Published in: Nucl.Instrum.Meth.A 1010 (2021), 165527
  20. N. Anfimov, D. Fedoseev, A. Rybnikov, A. Selyunin, S. Sokolov, A. Sotnikov, Study of silicon photomultiplier performance at different temperatures, Nuclear Instruments and Methods in

Physics Research Section A, Volume 997, 2021, 165162, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165162>.

21. JUNO and Daya Bay Collaborations, Optimization of the JUNO liquid scintillator composition using a Daya Bay antineutrino detector, e-Print: 2007.00314 [physics.ins-det], Published in: Nucl.Instrum.Meth.A 988 (2021), 164823, Nucl.Instrum.Meth.A 988 (2021), 164823
  22. O. Smirnov, D. Korablev, A. Sotnikov et al., Magnetic shielding for large photoelectron multipliers for the OSIRIS facility of the JUNO detector, e-Print: 2212.02562 [physics.ins-det], submitted to JINST.
  23. A. Stepanova (Dubna, JINR), M. Gonchar (Dubna, JINR), L. Kolupaeva (Dubna, JINR), K. Treskov (Dubna, JINR), Deep Underground Neutrino Experiment DUNE—Calculation of Sensitivity to the Measurement of Oscillation Parameters, Published in: Phys.Part.Nucl.Lett. 19 (2022) 5, 505-508
  24. Rybnikov, A.V., Anfimov, N.V., Fedoseev, D.V. et al. Optical Fiber Splitter for Photodetector Testing. Phys. Part. Nuclei Lett. 19, 797–802 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1547477122060255>
  25. Abusleme, A.,..., Anfimov N., et al. Mass testing and characterization of 20-inch PMTs for JUNO. Eur. Phys. J. C 82, 1168 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-11002-8>
- 2.2.6. Список докладов на международных конференциях и совещаниях (приложение в электронном виде).
1. V.Sharov "Development of a multi-channel power supply for the TAO and DUNE experiments", AYSS-2021, 13.10.2021 (oral talk)
  2. N. Anfimov. "Methodical activities at DLNP JINR for international neutrino experiments JUNO and DUNE" Conference "Kruger 2022: Discovery Physics at the LHC", South Africa, December 4-9, 2022.
  3. A.G. Olshevsky "Results of neutrino oscillations and the search for sterile states of neutrinos", International Conference on Quantum Field Theory, High-Energy Physics, and Cosmology, 18-21 July 2022, Dubna (invited plenary talk)
  4. Y.M. Malyshkin, plenary, "Status and Physical Potential of JUNO", [NUCLEUS 2021](#), remote, September 1–11, 2021
  5. Y.M. Malyshkin, parallel, "Application of machine learning techniques for event reconstruction in JUNO", [NuFact 2021](#), Cagliari/online, Italy, September 6–11, 2021.
  6. Y.M. Malyshkin, parallel, "Oscillation Physics in JUNO", [NeuTel 2021](#), online, February 18-26, 2021.
  7. M. Gonchar, parallel, "GNA: data flow approach for the neutrino oscillation experiments", Innovative Workflows in Astro and Particle Physics IWAPP (remote), March 8–12, 2021.
  8. M. Gonchar, parallel, "Neutrino Oscillation Physics in JUNO", European Physical Society conference on high energy physics EPS-HEP 2021 (remote), July 26-30, 2021
  9. M. Gonchar, plenary, "The JUNO experiment: status and prospects", Nucleus-2022, Moscow, 11–16 July, 2022
  10. V. Zavadskiy, poster, "Search for Sterile Neutrinos with JUNO-TAO", Neutrino 2022, May 30–June 4, 2022 (remote).
  11. D. Dolzhikov, poster, "JUNO Neutrino Mass Ordering Sensitivity with Subdetectors", 57th meeting of the PAC for Particle Physics, Dubna, 2023.

#### 2.2.7. Патентная деятельность (при наличии)

-

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

1. Массовое тестирование SiPM— FDR
2. Система питания SiPM — FDR

## **2.4. Результаты сопутствующей деятельности**

### **2.4.1. Научно-образовательная деятельность.**

1. А. Ольшевский — профессор Московского государственного университета (2003 г. — наст. время) по специальности «Современные исследования в физике элементарных частиц». полугодовые курсы.
2. Д. Наумов — профессор МГУ, годовой курс по Стандартной модели.
3. Н. Анфимов — доцент Университета «Дубна» (2021 — наст. время), полугодовые курсы «Ядерная электроника» и «Электроника в физике».

### **Список защищенных диссертаций.**

1. Н. Анфимов «Разработка и применение методов исследования фотоприемников», защита 04.03.2021 в ОИЯИ

### **Список защищенных дипломов.**

1. Гавриков А. А., «Реконструкция энергии событий в эксперименте JUNO с использованием методов машинного обучения», НИУ ВШЭ, 2022, магистр.
2. М. Стриж, «Определение направления прилета антинейтрино от реактора – модель и анализ данных эксперимента», МГУ, 2021, магистр.
3. А. Шайдурова «Применение разложения Магнуса для расчета вероятностей осцилляций атмосферных нейтрино», МГУ, 2021, магистр.
4. В. Завадский «Поиск стерильных нейтрино в экспериментах Daya Bay и JUNO», МФТИ, 2021, магистр.

### **2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.**

1. Н. Балашов — Гранты ОМУС в 2020, 2021, 2023 гг.
2. Д. Федосеев — Гранты ОМУС в 2021, 2022 гг.
3. А. Четвериков — Грант ОМУС в 2023 г.
4. В. Шаров — Грант ОМУС в 2022 г.
5. М. Завадский — Грант ОМУС в 2023 г.

### **2.4.3. Награды и премии.**

1. Первая премия ОИЯИ 2021 в номинации "Научно-исследовательские экспериментальные работы": "Исследования нейтрино в эксперименте OPERA" — А. Ольшевский, Ю. Горнушкин, С. Дмитриевский, Д. Наумов, А. Чуканов, А. Красноперов.

### **2.4.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризаторская деятельность).**

#### **Экспертная активность**

Н.Анфимов рецензент в:

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A — 4 assignments
- Instruments, MDPI — 1 assignment
- PEPAN Letters — 4 assignments

А. Селюнин рецензент в:

- PEPAN Letters — 2 assignments

Д. Наумов рецензент в:

- EJPС
- Phys.Rev.
- IOP
- PEPAN Letters

### Научно-организационная активность

1. Регулярные экскурсии в “Зеленую лабораторию” — А.Селюнин, А.Антошкин, В.Шаров, Н.Анфимов.
2. Фестиваль науки и технологий «Техносреда на ВДНХ» (2021), стенд ОИЯИ — В. Шаров.
3. Всероссийский фестиваль науки «Наука 0+», лектор Курчатовской школы (2022 г.) — В. Шаров.
4. Марафон «ОИЯИ в гостях у школ Дубны» (2021-2022 гг.) — В. Шаров, Н. Анфимов.
5. Лекция «Физика элементарных частиц для детей» (2022) — Н.Анфимов.
6. Лекция в институте “Винча”. Сербия (2022) — Н.Анфимов.
7. Семинар «Информационные технологии в эксперименте JUNO», IT-школа по науке о данных, 2021, МЛИТ — М. Гончар.
8. Байкальская школа, Баксанская школа — Д.Наумов.
9. М.Гончар — член Executive Board и представитель Institutional Board в эксперименте Daya Bay; член Speaker’s Committee, соруководитель группы Online event Classification..
10. Наумов Д. — член Executive Board и представитель Institutional Board в JUNO, член Publication Committee JUNO, руководитель рабочей группы по удаленным сменам и техническому обслуживанию.
11. А. Ольшевский — L2 менеджер по PMT Instrumentation в JUNO.

### 3. Международное научно-техническое сотрудничество.

Фактически участвующие страны, институты и организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
INEP	Китай	Пекин	Ифан Ван+ 10	MoU
SYSU	Китай	Гуанчжоу	Вей Ван + 10	MoU
SINP MSU	Россия	Москва	Александр Чепурнов, Максим Громов	MoU
INFN	Италия	Катания,	Джузеппе Андронико+1	MoU
		Рим	Стефано Мария Мари +1	MoU
FZJ-IKP	Германия	Юлих	Ливия Лудхова +4	MoU
EKUT	Германия	Тюбинген	Тобиас Лахенмайер +1	MoU

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

#### 4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета)

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
--------	---------------------	------------------------------	-------------------------------------

1.	научные работники	10.9	
2.	инженеры	5.2	
	<b>Итого:</b>	<b>16.1</b>	

#### 4.2. Фактическая сметная стоимость проекта

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

#### 4.3. Другие ресурсы

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам		
	2021	2022	2023
Хранение данных (ТБ) - EOS	500	1000	1300
Облака (CPU ядер, постоянно)	100	200	290
Облака (CPU ядро-час, по запросу)	1 073 000	1 960 000	690 000

### 5. Заключение

Эксперимент JUNO с реакторными электронными антинейтрино с длинной базой, расположенный в Китае, нацелен на определение упорядочивания масс нейтрино и прецизионное измерение параметров смешивания лептонов с рекордной подпроцентной точностью.

ОИЯИ внес вклад в создание детектора и общую подготовку эксперимента. В частности, ОИЯИ спроектировал и изготовил высоковольтные модули для питания фотоумножителей, разработал и изготовил несущую конструкцию из нержавеющей стали для мюонного трекера, спроектировал систему сбора данных для него, спроектировал и изготовил защиту от магнитного поля Земли для больших ФЭУ детектора OSIRIS@JUNO, спроектировал и изготовил две станции для сканирования больших ФЭУ, просканировал почти 4000 ФЭУ и провел испытания долговременной стабильности ФЭУ, а также внес вклад в проектирование и строительство детектора-спутника TAO.

ОИЯИ является крупнейшим центром обработки данных в распределенной вычислительной инфраструктуре JUNO. Группа из ОИЯИ внесла вклад в анализ чувствительности JUNO к определению упорядочивания масс нейтрино и параметров осцилляций нейтрино. Кроме того, группа из ОИЯИ приняла участие в анализе полного набора данных эксперимента Daya Bay, в результате которого были получены наиболее точные значения параметров смешивания нейтрино  $\sin^2 2\theta_{13}$  и  $\Delta m^2_{32}$ .

В целом, ОИЯИ занимает ведущую позицию среди участников JUNO за пределами Китая. ОИЯИ выполнил все взятые на себя обязательства. Предстоящий период с 2024 по 2026 год имеет решающее значение для успеха эксперимента, поскольку он включает ввод в эксплуатацию детектора и начало набора данных.

### 6. Предлагаемые рецензенты

Якушев Евгений Александрович, ОИЯИ

**Руководитель темы**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 г.

**Руководитель проекта (шифр проекта)**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 г.

**Экономист Лаборатории**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 г.