

Предложение о продлении проекта

DANSS

Детектор реакторных антинейтрино на основе пластмассового сцинтиллятора

Тема: **03-2-1100-2010/2024** (неускорительная нейтринная физика и астрофизика)

Лаборатория ядерных проблем (ЛЯП ОИЯИ), Дубна

В.В.Белов, В.Б.Бруданин, В.П. Вольных, И.В.Житников, С.В.Казарцев, С.П. Киянов, А.С.Кузнецов, Ф. Мамедов, И.В.Мачихильян, Д.В.Медведев, Д.С. Пушков, И.Е.Розова, А.В. Саламатин, Д.В. Философов, М.В.Фомина, Е.А.Шевчик, Ю.А.Шитов.

Институт теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), Москва

И.Г.Алексеев, А.Ершова, А.С.Кобякин, В.М. Нестеров, К.А.Перминов, В.Ю. Русинов, Э.И. Самигуллин, Д.Н.Свирида, Н.А.Скробова, А.С.Старостин, Е.И. Тарковский, А.Е.Яковлева.

Институт экспериментальной и прикладной физики Чешского технического университета (ÚTEF ČVUT), Прага

M.Špavorová, L.Fajt, R.Hodák, Z.Hons, P.Přidal, E.Rukhadze, I.Štekl.

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва

М.В.Данилов

Руководитель проекта Ю.А. Шитов (shitov@jinr.ru)

Заместитель руководителя проекта В.Б. Бруданин.

Краткая аннотация проекта

В рамках данного проекта разработан и создан относительно компактный и безопасный нейтринный спектрометр **DANSS** на основе пластмассовых сцинтилляторов (ПС) с чувствительным объемом 1 м^3 , способный работать вблизи мощных промышленных реакторов. Спектрометр смонтирован на четвертом энергоблоке Калининской АЭС под реактором ВВЭР1000 ($P^{\text{ТЕПЛ}}=3.1 \text{ ГВт}$), обеспечивающим защиту от космики на уровне ~ 50 м.в.э. Высокая степень сегментации ПС, использование комбинированной активной и пассивной защит обеспечивают подавление фона до нескольких процентов при регистрации ~ 5000 соб./сут. Подъемный механизм позволяет в режиме on-line перемещать спектрометр на 2 метра по вертикали, обеспечивая диапазон измерений 10-12 м от реактора. По итогам проведенных в 2016-2020 гг. измерений осцилляции в стерильное нейтрино не были обнаружены, что позволило исключить рекордную область фазового пространства возможных осцилляций в стерильное нейтрино (модель «3+1»). Кроме этого, детектор DANSS продемонстрировал возможность долгосрочного прецизионного мониторинга мощности реактора и чувствительность к составу ядерного топлива.

Вместе с тем, в 2018 году было объявлено об обнаружении осцилляций в стерильное нейтрино в эксперименте НЕЙТРИНО-4 (ПИЯФ, Гатчина) с параметрами $\sin^2(2\theta_{14})\sim 0.25$, $\Delta m_{14}^2\sim 7 \text{ эВ}^2$ (arXiv:2005.05301), находящимися вне области чувствительности DANSS в его текущей конфигурации. Поэтому в настоящий момент актуальной является проверка этого результата. Для продвижения в область эффекта NEUTRINO-4 нами разработан модернизированный спектрометр DANSS-2, создание которого планируется в течении 2021-22 гг. Главная цель – существенное повышение энергетического разрешения установки до 15% @ МэВ с нынешних 34% @ МэВ. Для этого будет использован новый детектирующий элемент (пластины из лучшего ПС и большего количества фибр для лучшего сбора света), обновленная электроника. При этом DANSS-2 будет использовать ту же защиту и подвижную платформу, что и DANSS, что позволит существенно снизить затраты на модернизацию.

Совместно с чешскими коллегами планируется завершить разработку и создание нейтринного детектора S^3 (S-куб) (~ 64 л с улучшенными детектирующими элементами). Такой детектор будет регистрировать ~ 300 -400 нейтрино в сутки и, совместно с DANSS-2, поможет лучше изучить систематику используемого метода измерений.

Введение

Целью проекта, начатого в 2008 году, является поиск осцилляций в стерильное нейтрино в измерениях реакторных антинейтрино. Большинство результатов в области нейтринной физики хорошо описываются теорией легкого трехкомпонентного нейтрино (PMNS-матрица). Однако, ряд существующих аномалий – реакторная, галлиевая и противоречивые результаты LSND и MiniBoone – могут объясняться существованием легкого стерильного нейтрино с параметрами осцилляций $\Delta m^2 \sim 2 \text{ эВ}^2$, $\sin^2(2\theta) \sim 0.1$, определенными из глобального фита этих данных. Обнаружение стерильного нейтрино, если такое случится, станет фундаментальным прорывом и открытием Новой Физики. Поэтому экспериментальные проверки этой гипотезы осуществляются различными методами в разных направлениях физических исследований. Актуальность данной тематики не вызывает сомнений.

За время реализации настоящего проекта нами был разработан, создан и запущен уникальный нейтринный спектрометр DANSS (DOI: 10.1088/1748-0221/11/01/P01011), обладающий рядом преимуществ по сравнению с конкурентами. Высокая степень сегментации обеспечивает эффективное подавление и измерение всех фонов установки. Использование твердого пластмассового сцинтиллятора (ПС) гарантирует безопасность применения возле реактора. Рекордно высокий нейтринный поток – $5 \times 10^{13} \text{ 1/см}^2/\text{с}$ на расстоянии в 10 м от реактора. Расположение под реактором обеспечивает значительную защиту от космики (~50 м.в.э.). Подвижная платформа позволяет проводить относительные измерения спектров антинейтрино в 10-12 м от реактора, не чувствительные к целому ряду систематических погрешностей.

За 4 года измерений 2016-2020 DANSS зарегистрировал 4 млн. реакторных антинейтрино, получил лучшие в мире ограничения на существование стерильного нейтрино среди реакторных экспериментов, продемонстрировал долгосрочный мониторинг мощности реактора и чувствительность к составу ядерного топлива.

Для полной реализации поставленных целей предлагается продлить проект на период 2022-2024 гг. и за это время следующие задачи:

1. Закончить набор данных первой фазы эксперимента DANSS, провести окончательный анализ данных (с учетом всех улучшений и усовершенствований) и опубликовать финальные результаты.
2. В течении 2021-2022 годов создать модернизированный спектрометр DANSS-2 с улучшенным энергетическим разрешением (до 15% @ МэВ с нынешних 34% @ МэВ). Для этого в качестве детектирующего элемента будут использованы новые пластины из более качественного ПС, оснащенные большим количеством фибр и двухсторонним сбором света на SiPM. Будет обновлена электроника, но останется та же защита и подвижная платформа, что позволит существенно снизить затраты.
3. В 2023-2024 гг. будет вестись набор данных спектрометром DANSS-2, анализ которых позволит расширить область тестируемого фазового пространства осцилляций в стерильное нейтрино и, самое главное, достичь области сигнала в эксперименте НЕЙТРИНО-4 ($\Delta m^2 \sim 7 \text{ эВ}^2$, $\sin^2(2\theta) \sim 0.25$). Проверка этого заявленного позитивного сигнала является наиболее актуальной задачей в данной области исследований.
4. Закончить создание уменьшенного и упрощенного нейтринного детектора S^3 для дополнительного мониторинга реактора и проверки систематики измерений.

Затраты на реализацию проекта оцениваются на уровне \$200,000 долларов в год.

Состояние исследований

Поиск осцилляций в легкое (0.1-10 эВ) стерильное нейтрино является одним из актуальных и горячих трендов фундаментальной нейтринной физики. Существование стерильного нейтрино могло бы объяснить ряд наблюдаемых противоречивых результатов, прежде всего, реакторную и галиевую (анти)нейтринные аномалии (RAA) [1] и одновременно стать революционным открытием Новой Физики. Поэтому не удивительно, что RAA [1] вызвала широкий резонанс в научном сообществе (более 1600 цитирований на данный момент) и породила большую экспериментальную активность в самых разных направлениях нейтринной физики, нацеленных на проверку данной гипотезы. Реакторные эксперименты на короткой базе (<30 м) имеют ряд конкурентных преимуществ в этом направлении исследований, при этом спектрометр DANSS, разработанный в рамках настоящего проекта, является одним из лидеров.

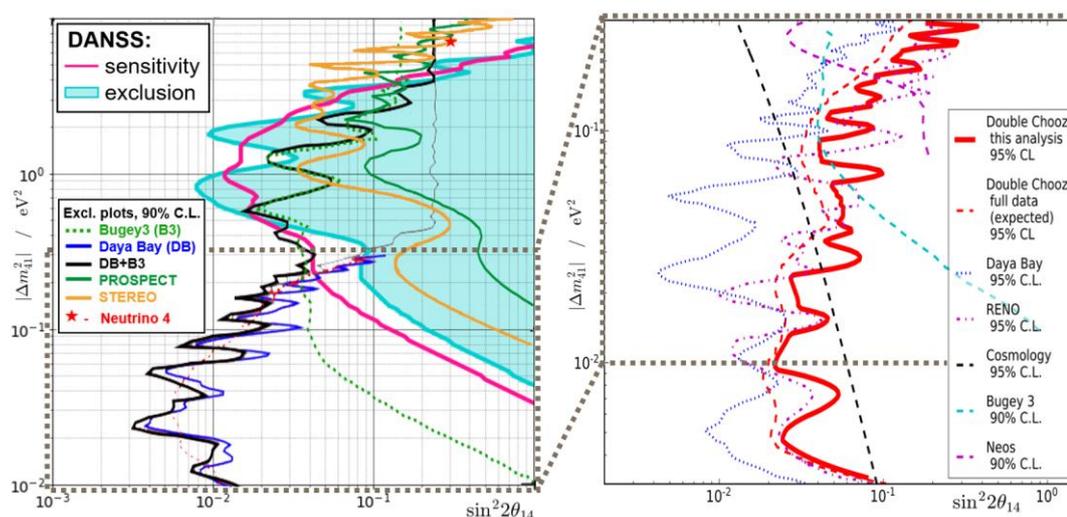


Рисунок 1. Слева – исключенные области осцилляций в стерильное нейтрино в ведущих реакторных экспериментах на короткой базе (<15 м); справа – результаты (контуры исключения) космологии и нейтринных осцилляционных экспериментов на большей базе (>100 м) [2].

Текущая ситуация с поиском осцилляций в стерильное нейтрино показана на Рис.1. Большинство ведущих проектов, а именно, PROSPECT [3], STEREO [4], NEOS [5], BUGEY-3 [6], и DANSS пока не наблюдают значимого сигнала нейтринных осцилляций (Рис.1 слева). Космология и нейтринные эксперименты по измерению θ_{13} Daya Bay, RENO и Double Chooz также выдают только ограничения, но из-за большой базы (> 100 м) эти реакторные эксперименты актуальны в области сверхмалых масс стерильного нейтрино [0.001-0.1] эВ² и не чувствительны к области RAA (Рис.2 справа) [2].

Интригу в ситуацию внес эксперимент НЕЙТРИНО-4 (ПИЯФ, Гатчина, лидер - А.П. Серебров), в 2018 году объявивший об открытии осцилляций в стерильное нейтрино с параметрами $\sin(2\theta_{14}) \sim 0.2-0.3$, $\Delta m_{14}^2 \sim 6-7$ эВ² (см. Рис.2) [7]. Результаты этого эксперимента широко обсуждаются научной общественностью [8-9]. Поскольку результаты этого эксперимента имеют фундаментальное значение, его независимая проверка – актуальная и важная задача на ближайшее время.

К сожалению, в своей нынешней конфигурации DANSS не чувствителен к фазовой точке заявленного эффекта в НЕЙТРИНО-4. Для продвижения в область эффекта NEUTRINO-4, необходим апгрейд спектрометра DANSS, план которого уже подготовлен. Главная цель – существенное повышение разрешения до 15% @ МэВ с нынешних 34% @ МэВ. Для этого будет собран новый спектрометр на новых стрипах (2 x 5 x 120 см³, 8 фибр по 2 SiPM на каждый). из лучшего пластика. При этом обновленный DANSS будет использовать ту же защиту и подвижную платформу, что позволит существенно снизить затраты на его модернизацию, которую планируется провести в течении двух лет.

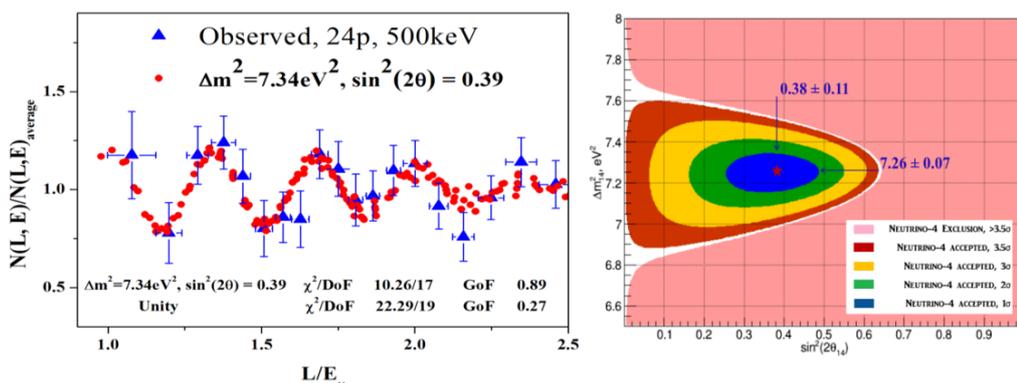


Рисунок 2. Слева – осцилляционная картина, наблюдаемая в НЕЙТРИНО-4 в координатах L/E и соответствующая ей точка фазового пространства осцилляций в стерильное нейтрино по модели 3+1 [7].

К сожалению, в своей нынешней конфигурации DANSS не чувствителен к фазовой точке заявленного эффекта в НЕЙТРИНО-4. Для продвижения в область эффекта NEUTRINO-4, необходим апгрейд спектрометра DANSS, план которого уже подготовлен. Главная цель – существенное повышение разрешения до 15% @ МэВ с нынешних 34% @ МэВ. Для этого будет собран новый спектрометр на новых стрипах (2 x 5 x 120 см³, 8 фибр по 2 SiPM на каждый). из лучшего пластика. При этом обновленный DANSS будет использовать ту же защиту и подвижную платформу, что позволит существенно снизить затраты на его модернизацию, которую планируется провести в течении двух лет.

Модернизированный DANSS-2 будет обладать большей чувствительностью и сможет достичь точки интереса. Обладая другой методикой, иными источниками систематической погрешности, он внесет свой существенный вклад в проверку гипотезы существования стерильного нейтрино в области фазового пространства, указанной НЕЙТРИНО-4.

Если говорить о конкурентах, но наибольшие шансы имеет проект PROSPECT, если им удастся решить проблему стабильности работы с жидким сцинтиллятором с добавкой ⁶Li (это стало причиной проблем и вынудило остановить измерения через полгода после начала работы) и перезапустить детектор. Проект STEREO завершается в этом году и не имеет перспектив существенного улучшения результата из-за низкой мощности реактора в сочетании с большим фоном. Фоновые проблемы от радиоактивных примесей тория и урана в неорганическом нейтронном сцинтилляторе имеет и детектор SOLID [10], заканчивающий набор данных в этом году и вряд ли способный получить рекордные результаты. Не реализованы и практически закрыты по политическим причинам (протесты «зеленых») проекты SOX [11] и CeLAND [12], предлагавшие измерить мощные источники нейтрино в больших нейтринных

детекторах BOREXINO и KAMLAND соответственно. В этом году ожидается результат BEST [13], который, возможно, даст новую интересную информацию.

Таким образом, настоящий проект, являясь лидером по текущим результатам, останется таковым и в следующие 5 лет. Помимо основной задачи он продолжит решать прикладные вопросы диагностики реактора, важные для МАГАТЭ [14].

Список литературы

1. G. Mention, et al. Reactor antineutrino anomaly Phys. Rev. D 83, 073006.
2. T. Abrahão(Rio de Janeiro, CBPF and APC, Paris) et al. Search for Signatures of Sterile Neutrinos with Double Chooz e-Print: 2009.05515 [hep-ex].
3. M. Andriamirado et al. Improved Short-Baseline Neutrino Oscillation Search and Energy Spectrum Measurement with the PROSPECT Experiment at HFIR. e-Print: 2006.11210 [hep-ex].
4. Ilham El Atmani for the STEREO collaboration. Search for eV neutrino sterile: Status of STEREO experiment. e-Print: 2002.12701 [hep-ex].
5. Youngju Ko et al. Sterile neutrino search at the NEOS experiment. PoS NuFact2017 (2017) 042.
6. P. Adamson et al. Improved Constraints on Sterile Neutrino Mixing from Disappearance Searches in the MINOS, MINOS+, Daya Bay, and Bugey-3 Experiments. Phys.Rev.Lett. 125 (2020) 7, 071801, e-Print: 2002.00301 [hep-ex].
7. A.P. Serebrov et al. Preparation of the Neutrino-4 experiment on search for sterile neutrino and the obtained results of measurements. e-Print: 2005.05301 [hep-ex].
8. M. Andriamirado et al. Note on arXiv:2005.05301, 'Preparation of the Neutrino-4 experiment on search for sterile neutrino and the obtained results of measurements'. e-Print: 2006.13147 [hep-ex].
9. A.P. Serebrov, R. M. Samoilov on behalf of Neutrino-4 collaboration. A Comment on the note arXiv:2006.13147 on arXiv:2005.05301, "Preparation of the Neutrino-4 experiment on search for sterile neutrino and the obtained results of measurements". arXiv:2006.13639 [hep-ex].
10. Y. Abreu et al. SoLid: A short baseline reactor neutrino experiment. e-Print: 2002.05914 [physics.ins-det].
11. "SOX: Short distance neutrino Oscillations with BoreXino", <https://arxiv.org/pdf/1304.7721.pdf> [physics.ins-det]; M Vivier et al., "SOX: search for short baseline neutrino oscillations with Borexino", J. Phys.: Conf. Ser. **718** (2016) 062066.
12. "CeLAND: search for a 4th light neutrino state with a 3 PBq ^{144}Ce - ^{144}Pr ν_e -generator in KamLAND", <https://arxiv.org/pdf/1312.0896.pdf> [physics.ins-det].
13. V. Barinov et al. BEST potential in testing the eV-scale sterile neutrino explanation of reactor antineutrino anomalies Phys.Rev.D 99 (2019) 11, 111702; e-Print: 1905.07437 [hep-ph].
14. M. Fallot, B. Littlejohn, P. Dimitriou IAEA Vienna, Austria Antineutrino spectra and their applications Summary of the Technical Meeting IAEA Headquarters, Vienna, Austria 23-26 April 2019. <https://nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0786.pdf>

Описание предлагаемого исследования

Объектом исследования являются реакторные антинейтрино. **Предмет исследования** – поиск осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное нейтрино. **Гипотеза** существования четвертого стерильного нейтрино в дополнение к трем известным активным возникла как вариант решения ряда проблем, возникших в нейтринной физике в связи с интерпретацией ряда противоречивых результатов. Прежде всего, речь идет о **реакторной антинейтринной аномалии RAA**, обнаруженной в работе [1], в которой выяснилось, что результаты измерений потока электронных антинейтрино в 20 предыдущих реакторных эксперимента в среднем на $7 \pm 2 \%$ меньше расчетных величин, определенных с учетом всех наших современных знаний о природе процесса (3σ эффект). Далее, калибровочные измерения с антинейтринным источником Sr-51 в галиевых экспериментах по регистрации солнечных нейтрино SAGE, GALLEX также показали дефицит экспериментального потока нейтрино по сравнению с теоретическими ожиданиями на уровне $14 \pm 6 \%$ - **галиевая антинейтринная аномалия**. Решение проблемы может иметь несколько вариантов: неизвестный систематический эффект, неверные расчеты. Но наиболее интересной для физиков, конечно, является сценарий существования четвертого стерильного нейтрино, которое взаимодействует с тремя активными нейтрино Белой Материи только через осцилляции (отсюда и термин «стерильное»). В этом варианте часть электронных антинейтрино, рождающихся в реакторе, превращаются в стерильные нейтрино, не регистрируемые в детекторе, определяя, тем самым, наблюдаемые эффекты. Очевидно, что обнаружение стерильного нейтрино – частицы Темной Материи – если таковое состоится, станет фундаментальным прорывом и открытием Новой Физики. Поэтому не удивительно, что проверка этой гипотезы породила большую экспериментальную активность в самых разных направлениях физики.

Проводимый настоящий проект DANSS занимает лидирующее положение среди реакторных экспериментов, осуществляющих поиск осцилляций в стерильное нейтрино на короткой базе (<25 м). всех вышеперечисленных. За время его реализации с 2008 года нами был разработан, создан и запущен уникальный нейтринный спектрометр **DANSS** [2], свободный от многих недостатков, присущих другим подобным установкам.

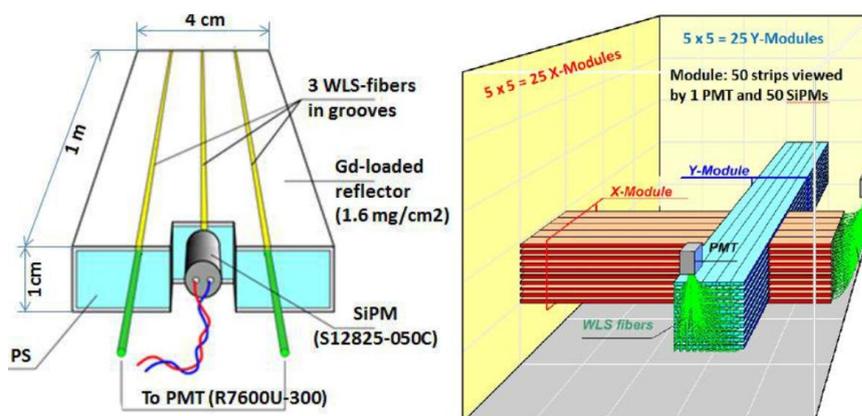


Рисунок 3. Слева – базовая ячейка (strip) детектора DANSS, справа – принцип организации модульного светосбора на ФЭУ.

В основе DANSS лежит **методика** измерения реакторных антинейтрино при помощи пластмассового сцинтиллятора, покрытого тонким Gd-содержащим слоем, выполняющим функции рефлектора и захватчика нейтронов (см. Рис.3,

слева). Отметим, что этот инновационный метод был впервые предложен именно коллаборацией DANSS, хотя патент на технологию не был оформлен. Сбор света осуществляется через три спектросмещающие (WLS) фибры, одна из которых заведена на мультипиксельный лавинный фотодиод (SiPM, 2500 каналов), и две подсоединяются к ФЭУ (50 каналов). Стрипы уложены в слои, при этом соседние слои расположены ортогонально друг другу для фиксации XY-координаты частиц, вызвавших срабатывание двух соседних слоев. ФЭУ собирают свет с 100 стрипов (2 x 5 x 10), модулями 20 x 20 см² (см. Рис.3, справа) В такой смешанной системе светосбора сигналы с ФЭУ используются как триггеры событий и для определения энергосигнала, в то время как SiPM позволяют определять пространственные паттерны событий с точностью до единичных сработавших стрипов.

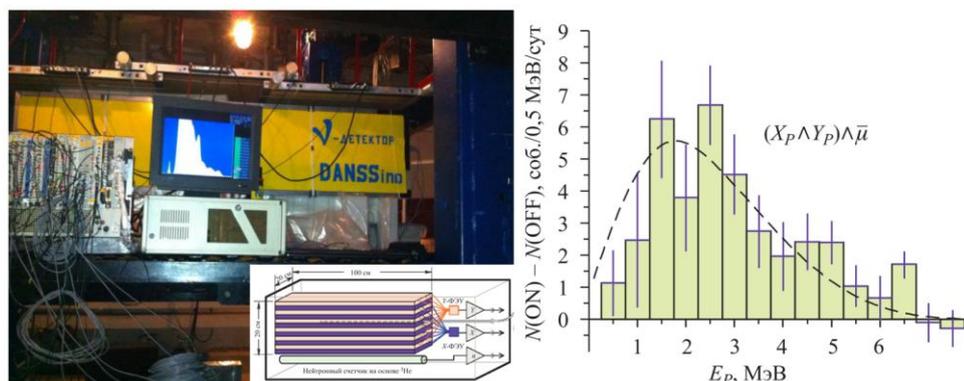


Рисунок 4. Набор данных DANSSINO на КАЭС (слева) и разностный спектр реакторных антинейтрино, полученный в ходе измерений (справа).

Проверка методики была осуществлена на прототипе DANSSINO. Несмотря на миниатюрный размер (объем всего лишь 40 литров со светосбором только на два ФЭУ), будучи смонтирован в 11 м от 3.15 ГВт реактора (модуль №4 КАЭС), в 2012 году DANSSINO измерил спектр реакторных антинейтрино, регистрируя 70 событий в день при отношении сигнал к фону S/B=1 (см. Рис.4) [3].

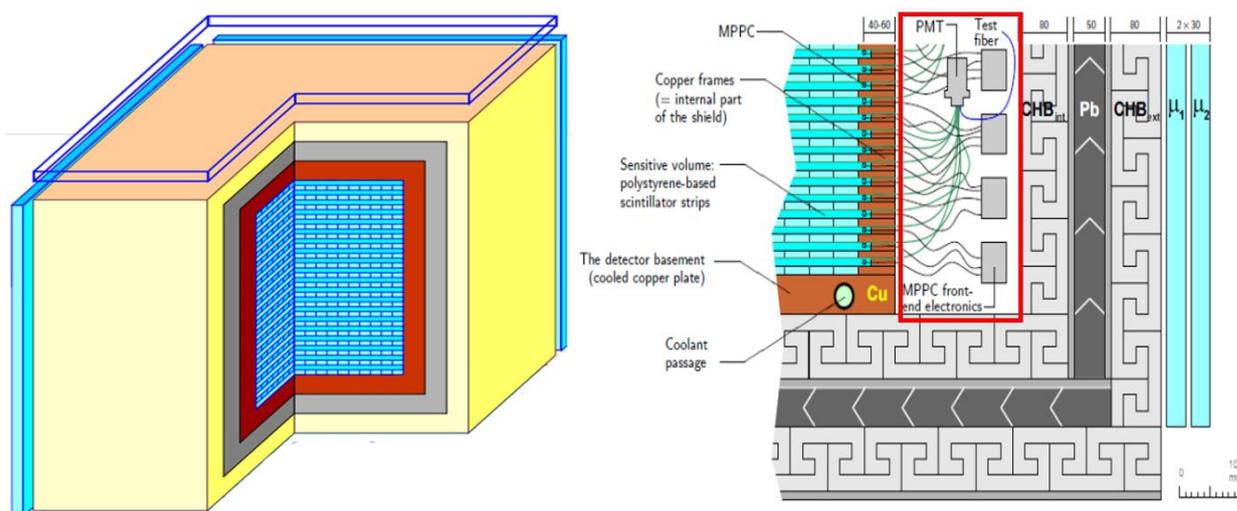


Рисунок 5. Спектрометр DANSS в сборе (слева) и конструкция его защиты (справа).

Спектрометр DANSS в целом представляет собой куб общим объемом 1 м³, окруженный комбинированной пассивной защитой (медь, свинец, борированный

полиэтилен), а также активной защитой от космических мюонов в виде сцинтилляционных пластин (Рис.5).

DANSS расположен под 4-й энергоблоком КАЭС на **подвижной платформе**, благодаря которой измерения проводятся в верхнем (10.9 м до реактора), среднем (11.9 м) и нижнем (12.9 м) положениях детектора (Рис.6). Это рекордно малое расстояние до промышленного реактора, на котором сегодня проводятся научные измерения во всем мире.

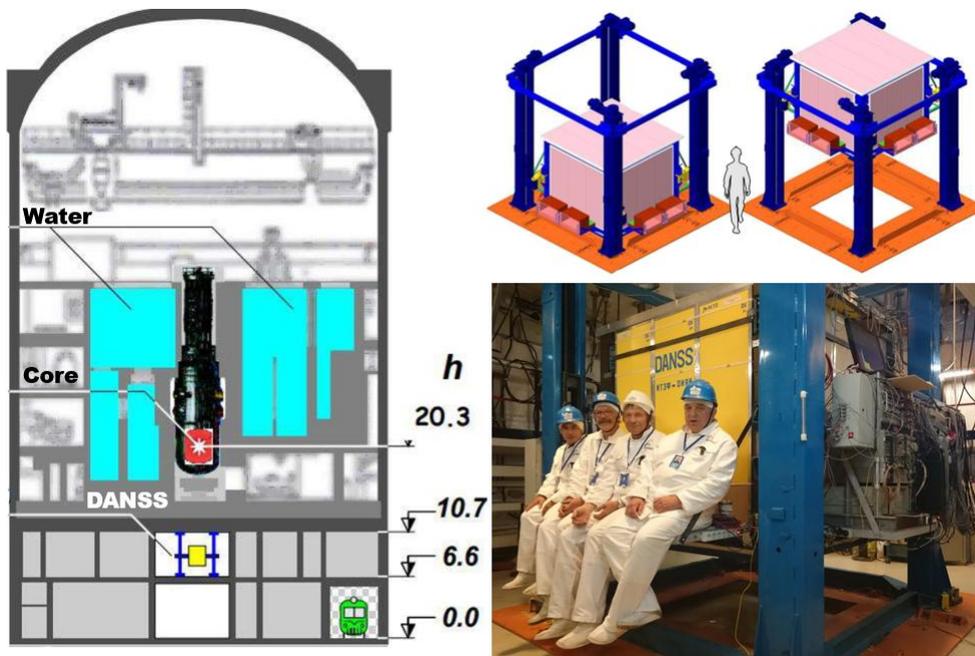


Рисунок 6. Спектрометр DANSS под 4-м энергоблоком КАЭС (слева), его подвижная платформа (справа сверху) и команда DANSS на борту (справа внизу).

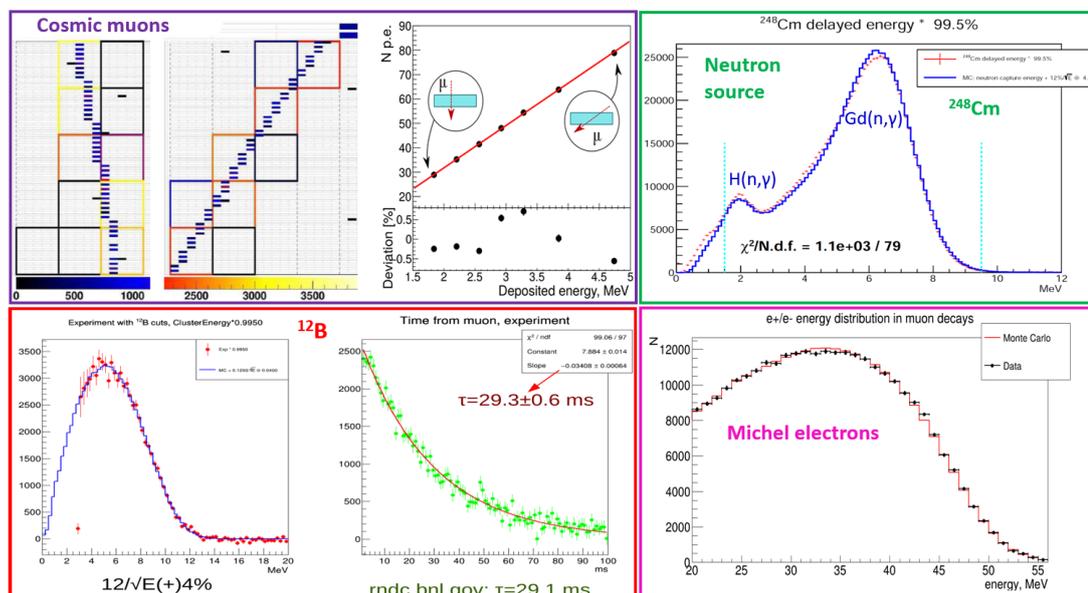


Рисунок 7. Проверка линейности световых выходов стрипов на космике (вверху слева), калибровки на нейтронах (вверху справа), боре ^{12}B (внизу слева) и Мишелевских электронах (внизу справа).

Смена положений происходит регулярно с недельным циклом прохода трех позиций для нивелирования систематики, связанной с изменением состава

ядерного топлива (отношение U/Pu) в ходе топливной кампании реактора. Еще одним важным обстоятельством является тот факт, что сам реактор и примыкающие к нему большие водные бассейны для хранения отработанного ядерного топлива обеспечивают хорошую защиту от космического излучения (примерно 50 м.в.э, 6-кратное подавление космических мюонов и полное подавление первичных нейтронов от космических лучей).

Детектирующей реакцией является обратный бета-распад (ОБР), благодаря использованию которого и высокой сегментации детектора удается эффективно измерять, фильтровать и подавлять все известные **компоненты фона**: фон случайных совпадений, фон от космических мюонов и фон от быстрых нейтронов.

Для **калибровки** детектора используются космические мюоны, источники гамма-излучения (^{22}Na и ^{60}Co) и нейтронов (^{248}Cm), ^{12}B и Мишелевские электроны, образующиеся в распадах космических мюонов. Тем самым, калибровки покрывают область [1-50] MeV, при этом точность калибровки, включая все систематические погрешности, составляет 1.7% (Рис.7). За четыре года измерений (3 топливных кампании) DANSS зарегистрировал почти 4 миллиона событий, то есть $\sim 1\text{M}$ нейтрино в год или 5000 антинейтрино в сутки. Аккумулированная статистика и спектры ОБР-позитронов (антинейтрино), измеренные спектрометром DANSS, показаны на Рис. 8.

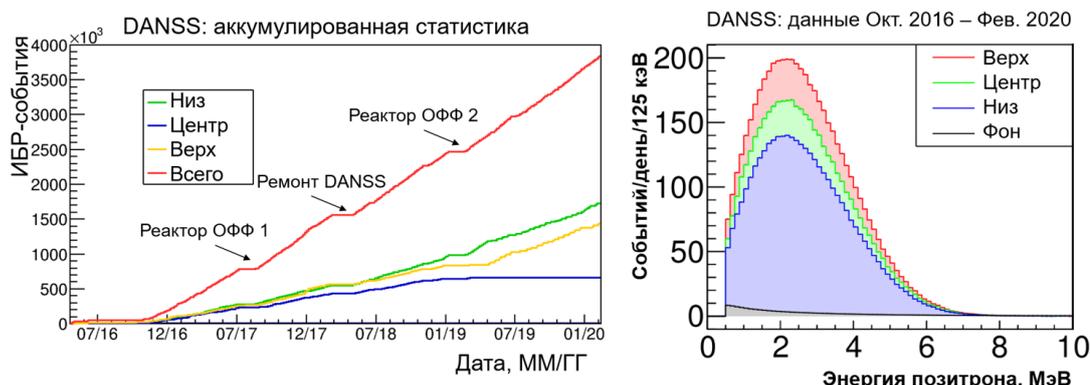


Рисунок 8. Статистика накопленных антинейтрино (слева) и спектры ОБР-позитронов в разных позициях детектора за вычетом всех фонов (справа).

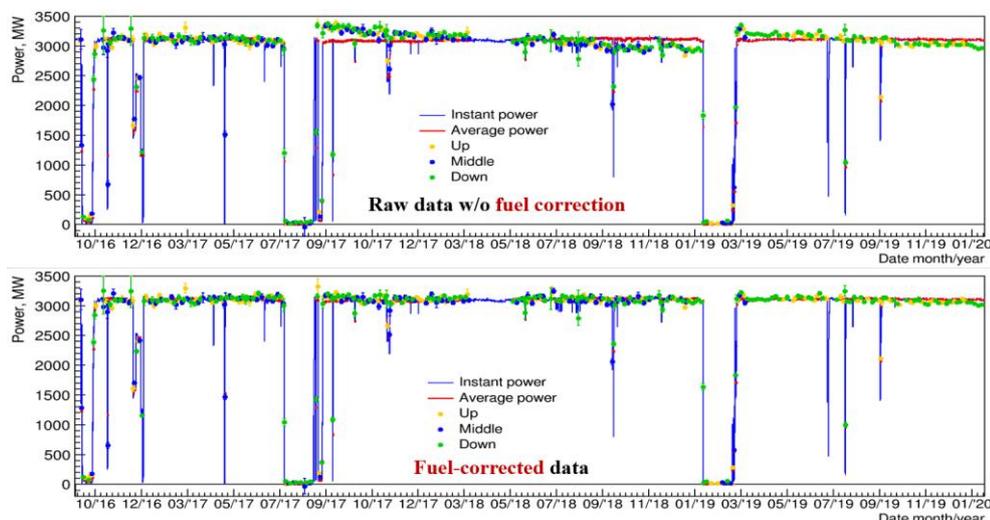


Рисунок 9. Сравнение мощности реактора (синяя линия) с измерениями DANSS (цветные точки трех положений, нормированных на R^2) с учетом состава топлива (вверху) и без учета (внизу).

В течении четырех лет 2016-2020 спектрометр DANSS производит непрерывный прецизионный мониторинг мощности реактора с точностью 1.5% на 2-дневной статистике, а также демонстрирует чувствительность к составу ядерного топлива – снижение скорости счета со временем из-за снижения отношения U/Pu (см. Рис. 9).

Главный результат DANSS на текущий момент (3М ОБР-событий в позициях Низ/Вверх) показан на Рис.10. Левый рисунок показывает побиновое отношение энергетических спектров ОБР-позитронов, измеренных спектрометром DANSS в положениях Низ/Вверх. Визуально и математически осцилляционный паттерн стерильного нейтрино на ней не наблюдается. Лучший фит 3+1 модели (фиолетовая кривая) имеет значимость менее 1.5σ и значимо не отличается от нулевой гипотезы отсутствия осцилляций (синяя кривая). Для примера на график нанесена ожидаемая форма этого спектра при наличии осцилляций, соответствующих лучшей точке RAA ($\sin^2(2\theta_{14})=0.05$, $\Delta m^2_{14}=2 \text{ эВ}^2$, оранжевая кривая) [1]. Наличие таких осцилляций исключено на уровне значимости более 5σ . На Рис.10 справа показана область фазового пространства, в которой осцилляции исключены текущим анализом (заливка бирюзой). Это лучший результат в мире на сегодняшний день среди реакторных экспериментов по поиску стерильного нейтрино, как видно из Рис.1, на котором также нанесены результаты конкурентов.

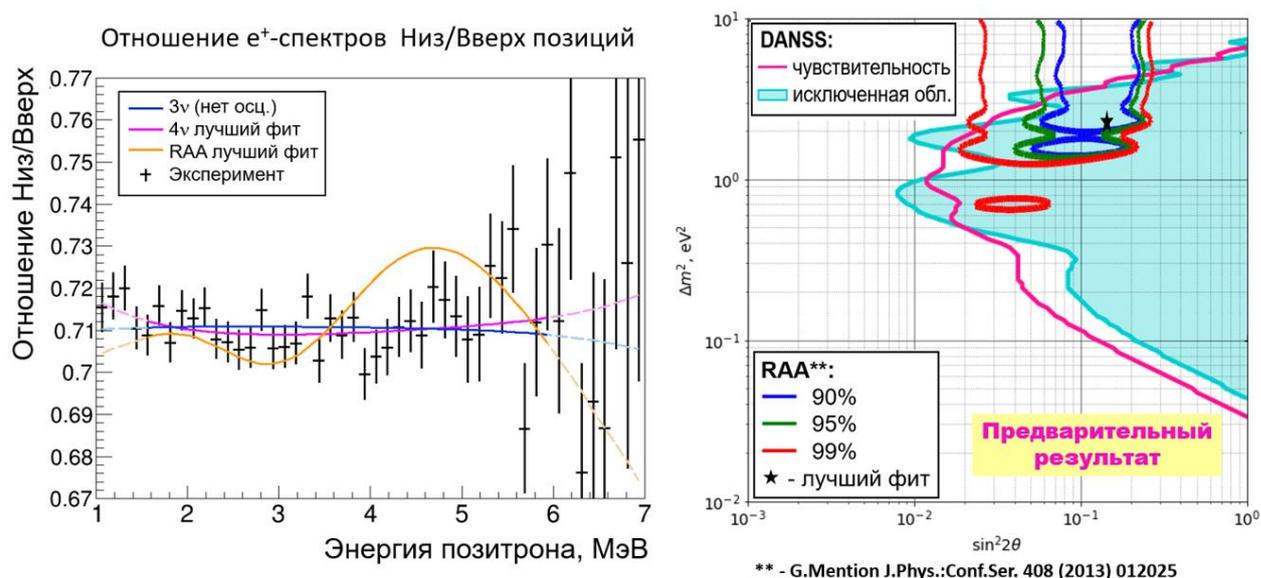


Рисунок 10. Слева: отношение позитронных ОБР-спектров, измеренных в позициях Низ/Вверх спектрометром DANSS. Справа: область, исключенная в результате текущего анализа (бирюзовая заливка). Модель 3+1, соответствующая лучшему фиту согласно RAA-публикации, показана оранжевой кривой слева и черной звездой справа.

Основной план работ на 2022-2024 год – разработка, создание, наладка, запуск модернизированного спектрометра DANSS-2 с последующим набором данных и его анализом.

К сожалению, в своей нынешней конфигурации DANSS не чувствителен к фазовой точке позитивного сигнала, заявленного экспериментом НЕЙТРИНО-4 (см. Рис.2 и работу [4]). Главная причина – невысокое энергетическое разрешение, размывающее эффект осцилляций. Поэтому **главной целью и мотивацией** модернизации спектрометра является существенное улучшение разрешения до 15% @ МэВ с нынешних 34% @ МэВ. Это позволит продвинуться в область сигнала НЕЙТРИНО-4, проверка которого является важной и актуальной

фундаментальной задачей нейтринной физики, что обсуждалось ранее. Кроме того, существенно расширится область проверенного фазового пространства возможных осцилляций в стерильное нейтрино (см. Рис.11).

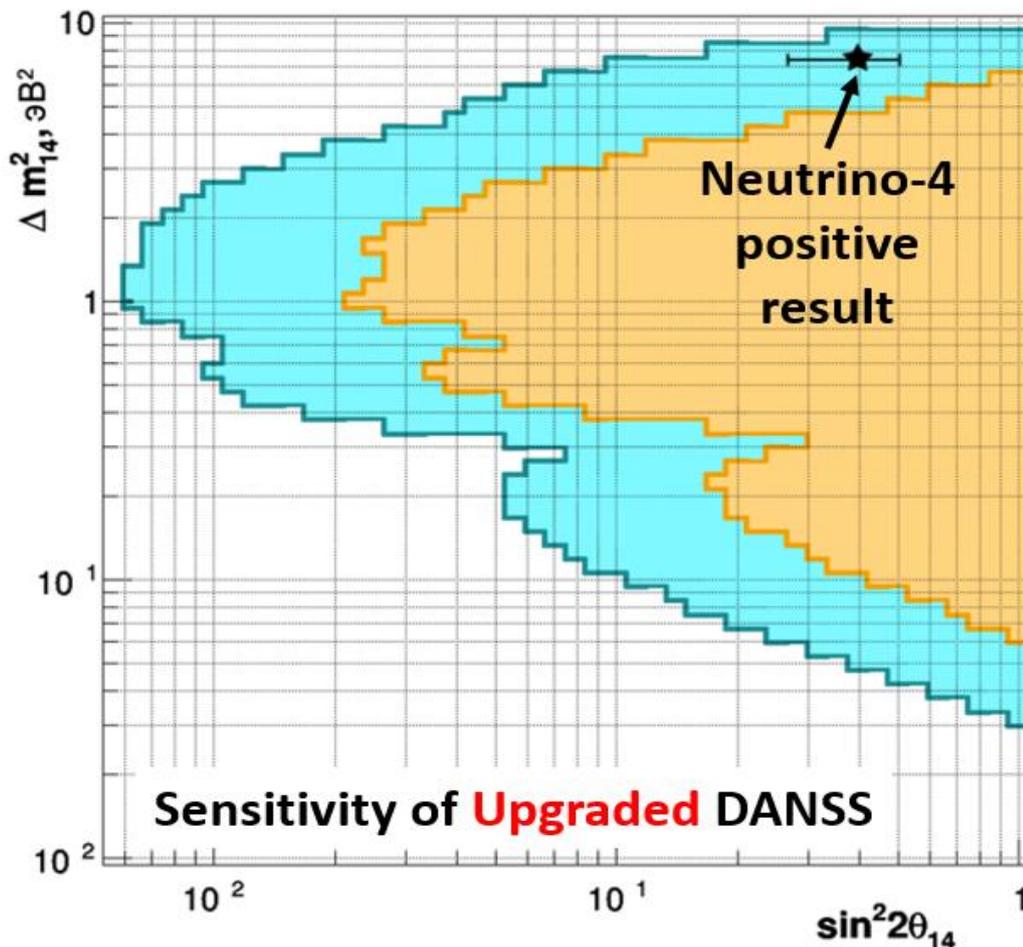


Рисунок 11. Оценка чувствительности модернизированного DANSS-2 (бирюзовая заливка) по результатам симуляций.

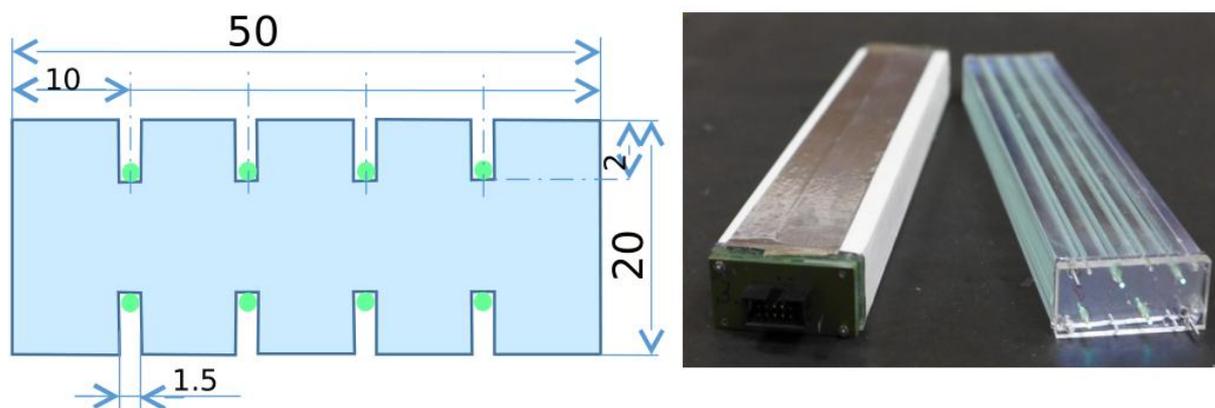


Рисунок 12. Дизайн профиля детектирующего элемента DANSS-2 (слева) и его прототипы ($L=1.2$ м), использовавшиеся в тестовых измерениях (справа).

Для достижения хорошего разрешения нам необходим **новый детектирующий элемент (НДЭ)**, дизайн которого показан на Рис. 12. По

сравнению со старым детектирующим элементом (СДЭ, см. Рис. 3, слева) он имеет ряд преимуществ:

- НДЭ будет изготовлен из высококачественного пластмассового сцинтиллятора, полученного методом полимеризации. СДЭ были изготовлены методом экструзии и имели невысокую прозрачность.
- Светосбор с НДЭ будет осуществляться при помощи восьми спектросмещающих фибр, считываемых восемью SiPM по 4 с каждой стороны.
- НДЭ будет вдвое толще СДЭ, что позволит лучше измерять (без мертвых слоев) энерговыделение ОБР-позитронов низких энергий.

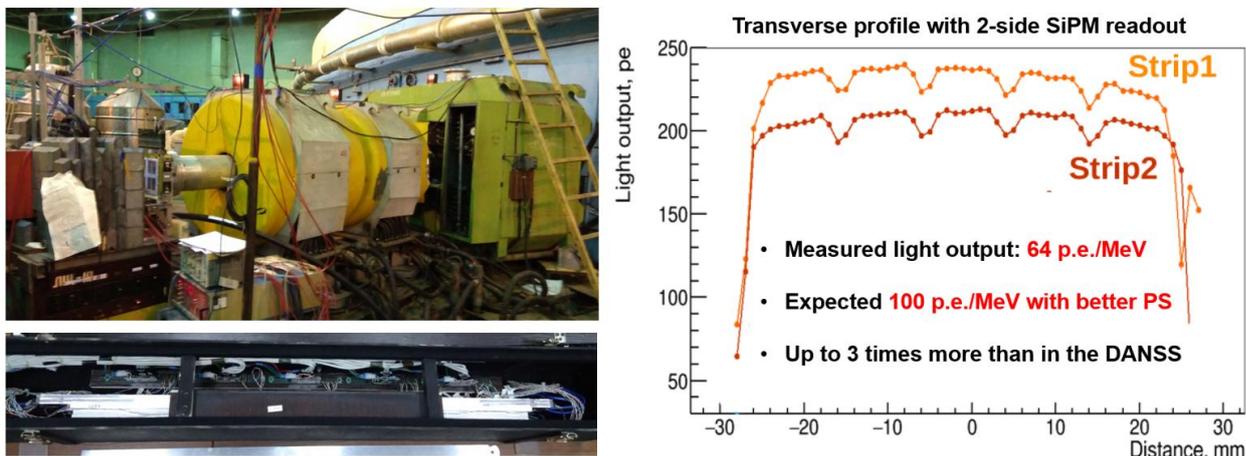


Рисунок 13. Пучок пионов в ПИЯФ, Гатчина (слева сверху), прототипы НДЭ (слева внизу) и результаты тестов профиля световыхода (справа).

Для проверки характеристик НДЭ были изготовлены два прототипа, тест которых на пионном пучке ПИЯФ (Гатчина) показал втрое лучший световыход по сравнению с СДЭ (см. Рис.13) и пространственным разрешением вершины ± 15 см по длине стрипа. При этом для прототипов были использованы старые пластмассовые сцинтилляторы (ПС), для DANSS-2 будут изготовлены новые ПС с лучшими характеристиками.

Принципиальным условием модернизации является сохранение тех же: а) пассивной защиты; б) активной защиты; в) мобильной платформы; г) системы накопления данных. Это позволит существенно сэкономить деньги и время по сравнению с вариантом замены или модернизации этих частей установки. Зато кардинально изменится начинка – **ядро спектрометра DANSS-2** будет собрано из 60 слоев по 24 НДЭ ($2 \times 5 \times 120$ см³, Рис. 12) с ортогональной укладкой, как и в DANSS (см. Рис.3, справа). Снятие света будет осуществляться только при помощи SiPM, прекрасно зарекомендовавших себя в DANSS. Полное избавление от дублирующей системы светосбора на традиционных ФЭУ позволит использовать освободившееся место (красный контур на Рис.5 справа) под удлиненные на 20 см НДЭ. В результате объем активной зоны детектора увеличится в 1.7 раз, а скорость счета – в 2 раза.

Слои полиэтиленовой пленки с добавлением оксида **гадолиния (захватчика нейтронов)** будут размещены между слоями стрипов. Симуляции показали, что оптимальная пленка (200 мкм, 25% гадолиния) обеспечит 90% захватов нейтронов на гадолинии. При этом существенно снизится масса пассивного материала в мертвых слоях (в 6 раз, 2% от массы гадолиния в DANSS-2 по сравнению с 12% в DANSS), детектор станет более однородным и герметичным.

Будут использованы новые крепления НДЭ, фронт-энд электроника (предусилители и коммутационные платы) с кардинально сниженным

энергопотреблением (до 50 Вт с нынешних 350 Вт). Наконец, будет разработана новая медная крепежная рама с системой охлаждения до 15° для дополнительного снижения шумов и кросс-токов SiPM.

Детекторы. Будут использованы новые SiPM S13360-1350PE с существенно меньшими шумами и кросс-токами. Выход с четырех SiPM на одной стороне стрипа будет объединен в один канал для сохранения количества каналов в системе накопления, при этом для настроек и калибровок предусмотрено индивидуальное управление включением/выключением и регулировкой напряжением SiPM. Двухсторонний светосбор позволит определять координату хитов по длине стрипа (с точностью ~ ±15 см) по разности времен прихода сигналов на SiPMы.

Система накопления данных. Предусмотрено использование системы **без общего триггера**. Сохраняться будут все сигналы по превышению порога в 3 пикселя. (~40 кэВ) суммы с двух сторон и не менее 1 пикселя с каждой стороны. Для ожидаемого уровня шумов (40/2 кГц одно/много-пиксельный с учетом охлаждения детекторов до 15°) и временном разрешении 50 нс (стандарт текущего firmware) мы получим 8 Гц шумовых сигналов на стрип и ~3 Мбайт/с сырых данных на весь ДАНСС соответственно по сравнению с ~7 Мбайт/с в DANSS. Сборка событий будет происходить в офлайн-режиме по временным меткам с частотой 125 МГц. Стендовые испытания такого подхода были выполнены нашими коллегами из ИТЭФ и подтвердили работоспособность методики.

Вклады различных факторов в энергетическое разрешение спектрометров DANSS и DANSS-2 сравниваются в Таблице 1.

Таблица 1. Вклады в разрешение от разных факторов в DANSS vs. DANSS-2.

Источник	Вклад в энергетическое разрешение			
	DANSS		DANSS-2	
	Величина, %VE	Примечание	Величина, %VE	Примечание
Фотостатистика	18,3	30 ф.э./МэВ	11,1	80 ф.э./МэВ
Информация о продольной координате	10,8	Только по хиту в поперечном слое или нейтрону	3,3	По разности времен и амплитуд в одном стрипе
Аннигиляционные гамма-кванты	9,8		5,0	Меньше за счет знания обеих координат для всех хитов
Поперечный профиль	7,8		2,3	
Гадолиний и мертвый слой	17,0	12% от массы стрипов	7,0	2% от массы стрипов
Добавка неизвестного происхождения	17,0		5,0	Меньше за счет существенно лучшей однородности детектора
Полное разрешение (сумма квадратов)	34,4		15,4	

План работ по модернизации спектрометра выглядит следующим образом.

1. Детальная проработка конструкции, тестирование и отладка отдельных элементов, окончательное утверждение дизайна всех элементов, разработка электроники будет осуществляться в течении 2021 года и завершится к середине 2022 года.

2. Параллельно с этим в 2021 году и до середины 2022 года будет осуществляться изготовление 1440 новых детектирующих элементов (НДЭ). Процесс будет осуществляться в три этапа:

а) изготовление пластин из пластмассового сцинтиллятора, их проверка (паспортизация) на предмет световыходов. Эта процедура будет осуществляться в Дубне силами дубненской группы. Планируемая скорость изготовления – 30-60 стрипов в неделю.

б) нарезка канавок, клеивание фибров и нанесение диффузионного отражающего покрытия на стрипы (матирование) будет выполняться сторонней коммерческой фирмой (г. Владимир) под контролем представителей дубненской группы, также ответственной за доставку стрипов из Дубны во Владимир.

в) оснастка стрипов SiPM-ами и окончательная паспортизация их индивидуальных характеристик будет выполняться в ИТЭФ силами наших коллег, которые также отвечают за транспортировку ячеек из Владимира в Москву.

3. «Сухая сборка» установки в чистой комнате в ИТЭФ для тестирования и отладки ее работы предусмотрена в течение полугода (вторая половина 2022). Осуществляться она будет силами группы ИТЭФ с возможным привлечением отдельных членов дубненской группы при необходимости.

4. Окончательная сборка и наладка установки DANSS-2 запланирована в первой половине 2023 года. Отметим, что выполнение работ по пунктам 1-3 будет осуществляться параллельно с работой спектрометра DANSS-2. Перед началом п.4 1-2 месяца потребуется на разборку DANSS.

5. Физический пуск и накопление данных спектрометром DANSS-2 запланирован на лето 2023 года. Минимальное время экспозиции для получения адекватных результатов составляет ~ 2.5 года

Оценки временных интервалов сделаны консервативно, поэтому при удачном стечении обстоятельств возможно ускорение процесса модернизации до полугода, и физический пуск DANSS-2 возможен в начале 2023 года.

В октябре 2020 года мы получили первую пробную партию новых стрипов, в лаборатории организован стенд по проверке световыходов и паспортизации стрипов (см. Рис.14). До конца года планируется отладить процедуры паспортизации и отгрузки стрипов согласно графику процесса, описанного выше. В следующем году начнется регулярное (30-60 стрипов в неделю) производство, тестирование и отправка стрипов.

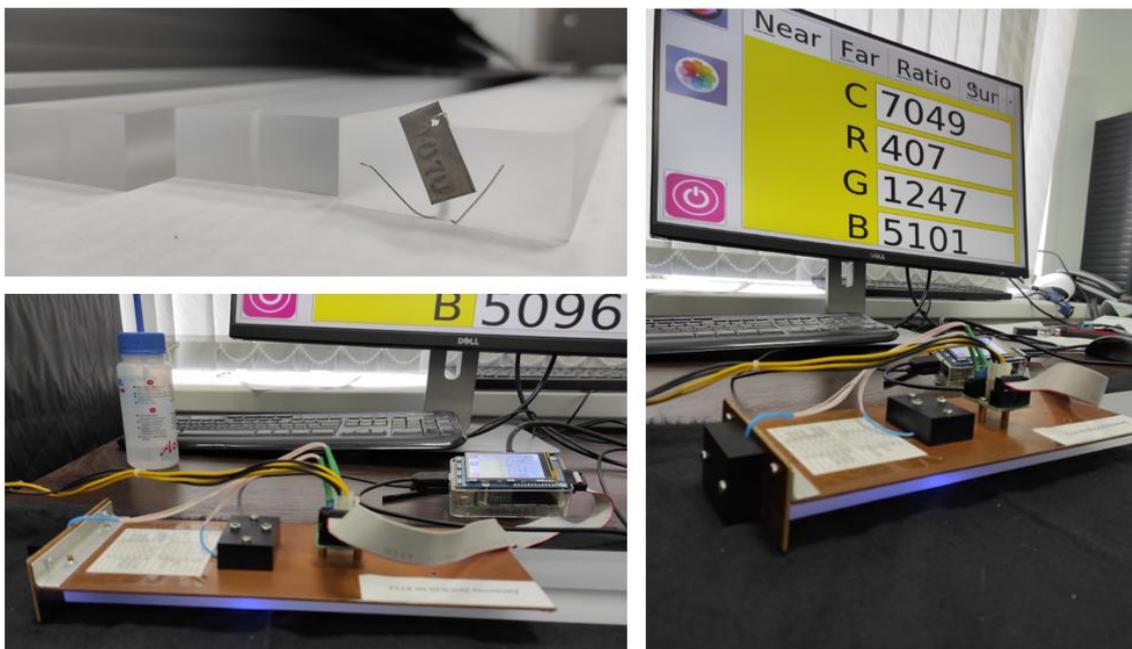


Рисунок 14. Новые стрипы (слева, сверху) и тестовый стенд для паспортизации (измерения световыхода) стрипов (остальное).

Остальные планы. Помимо создания модернизированного спектрометра DANSS-2 в рамках проекта будет осуществляться ряд других работ.

Обеспечение работы спектрометра DANSS. Детектор продолжает набор данных предположительно до конца 2022 года, и обеспечение его работы лежит полностью на группе ОИЯИ.

Анализ данных продолжается усилиями всех участвующих групп. Нами продолжается детальное изучение систематических погрешностей спектрометра – нейтронный фон, уточнение расчетов по составу ядерного топлива, улучшение методики расчетов чувствительности и областей исключения, улучшение калибровок, уточнение симуляций. Из новых идей отметим планы использования методов **машинного обучения** в обработке экспериментальных данных. Речь идет об использовании нейронных сетей для определения ОБР-сигналов. Оба сигнала от антинейтрино – позитрон (быстрый) и нейтрон (задержанный) имеют характерные паттерны в спектрометре, которые можно эффективно выделять, отсеивая фон, при помощи новых технологий обработки Больших Данных. Основной конечной задачей здесь является публикация к концу 2022 года финальных результатов, полученных DANSS в отношении осцилляций в стерильное нейтрино с учетом накопленных знаний об установке и эксперименте.

Завершение создания спектрометра S^3 . Детекторы S^3 являются предметом интереса наших чешских коллег (Институт технической и экспериментальной физики Чешского технического университета в Праге, ČVUT, ÚTEF) при посильной помощи группы ОИЯИ. С учетом проведенных *R&D*, концепция S^3 на сегодня представляется следующей (см. Рис.15).

Детектор будет собран из 80 пластин из сцинтиллятора на основе полистирола, имеющие размер $40 \times 20 \times 1$ см³ и произведенные фирмой NUVIA (бывший ENVINET) по технологии «между стеклами», собираются в куб размером $40 \times 40 \times 40$ см (Рис. 5). Между слоями прокладывается гадолиний-содержащая пленка на основе тайвека, изготовленная этой же фирмой (аналогично модернизированному DANSS-2).

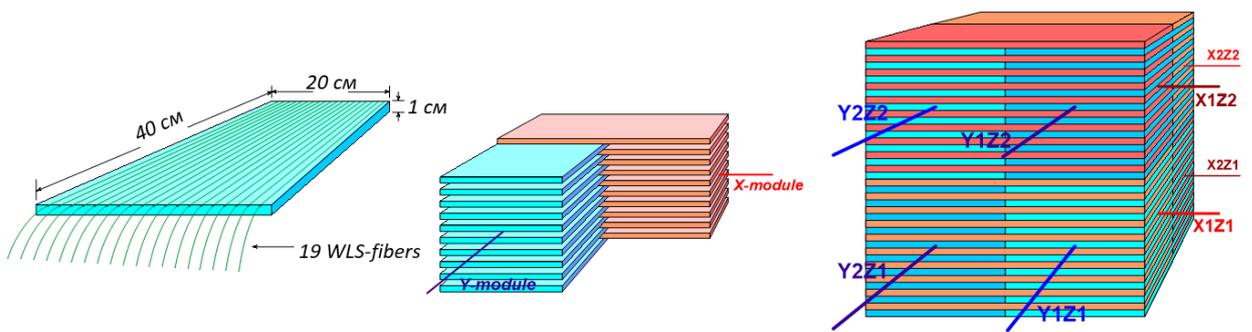


Рисунок 15. Концепция S^3 объемом 64 литра.

Каждые 10 пластин объединяются в X- или Y-модуль – опыт анализа данных **DANSS** однозначно показывает полезность такой слоистой структуры для подавления фона. Съём светового сигнала осуществляется с помощью WLS-фибр (спектрсмещающих оптоволокон), вклеенных в канавки с шагом 1 см. Светосбор будет организован с двух сторон на SiPM аналогично методике DANSS-2. Световыход ожидается на уровне 75-80 ф.э. @ MeV. При установке детектора S^3 в таком же помещении, как A336 (на Калининской АЭС или на АЭС в Темелине, Чехия), детектор будет регистрировать 300-400 нейтринных событий в сутки, чего для задач диагностики вполне достаточно.

Список литературы

1. G. Mention, et al. Reactor antineutrino anomaly Phys. Rev. D 83, 073006.
2. I.G. Alekseev et al., DANSS: Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid Scintillator, JINST 11 (2016) no.11, P11011, DOI: 10.1088/1748-0221/11/11/P11011
3. I.G. Alekseev et al., DANSSino: a pilot version of the DANSS neutrino detector, Phys.Part.Nucl.Lett. 11 (2014) 473-482, DOI: 10.1134/S1547477114040050
4. A.P. Serebrov et al. Preparation of the Neutrino-4 experiment on search for sterile neutrino and the obtained results of measurements. e-Print: 2005.05301 [hep-ex].
- 5.

Публикации и презентации. Результаты проекта DANSS представлены в многочисленных публикациях (полный список доступен по ссылке <https://docs.google.com/document/d/1lhx4SM67YcPC70vEBbjrAPLN2djniAVpy-KeFiHEnQ/edit?usp=sharing>), и в виде докладов на конференциях различного уровня. Ниже представлен список недавних докладов, сделанных членами группы ОИЯИ (полный список докладов доступен по ссылке https://docs.google.com/document/d/1jEklwWMMAnzdjhF_gG1yVE2JmDv-M3KmhQJ7N1S83GM/edit?usp=sharing).

1. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории. Игорь Житников, Status of the DANSS experiment
2. Доклад LXVIII International conference NUCLEUS 2018: Actual status of "DANSS" project
Доклад New Trends in High-Energy Physics 2018: Actual status of "DANSS" project Вячеслав Белов + 1 доклад Фомина М.В.
3. International Workshop on Particle Physics at Neutron Sources 2018, DANSS, М.Ширченко.
4. 6th Symposium on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics 2018. <https://indico.ibs.re.kr/event/212/>, М.Ширченко, DANSS
5. Yu. Shitov Status of the DANSS project / AAP 2018, 14th International Workshop on Applied Antineutrino Physics, 10-11 October 2018, Livermore, California, USA <https://neutrinos.llnl.gov/content/assets/docs/workshops/2018/AAP2018-DANSS-Shitov.pdf>
6. Yu. Shitov New results from the DANSS experiment / LP2019 XXIX International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, 5-10 August 2019, Toronto Canada, <https://indico.cern.ch/event/688643/contributions/3429530/>
7. Yu. Shitov Search for a light sterile neutrino at SBL reactor experiments / Seminar at University of Comenius, Bratislava, Slovakia, 14 November 2018. https://fmph.uniba.sk/detail-novinky/back_to_page/fakulta-matematiky-fyziky-a-informatiky-uk/article/translate-to-english-nuklearny-seminar-yuri-shitov-14112018/
8. Yu. Shitov, The DANSS project: recent status / Colloquium Prague 19, 24-25 October 2019, J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry <https://indico.cern.ch/event/802062/timetable/#all.detailed>
9. Yu. Shitov, Recent results from DANSS / NuPhys2019, Prospects in Neutrino Physics, 16-18 December 2019, London, UK, Invited oral talk is foreseen <https://indico.cern.ch/event/818781/timetable/#all.detailed>
10. Yu. Shitov, Recent results from the DANSS experiment, Neutrino-2020, Chicago, online, June 22-July 2, 2020 <https://indico.fnal.gov/event/43209/timetable/#20200622.detailed>
11. Irina Machikhiliyan The DANSS neutrino spectrometer: the results of reactor antineutrino studies, Nucleus-2020, <https://indico.cern.ch/event/839985/timetable/#all.detailed>

Диссертации. Два участника проекта DANSS успешно защитили диссертации в 2019 году. Дания Зинатулина (http://ftp.jinr.ru/dissertation/Zinatulina_autoref.pdf) и Марк Ширченко (http://159.93.39.20/dissertation/Shirchenko_autoref.pdf), в том числе, благодаря опыту, накопленному в работе над DANSS. В настоящее время они возглавили собственный проект MONUMENT, осуществляющийся теперь в рамках настоящей темы. В настоящее время над диссертациями по теме DANSS работают И. Житников, М. Фомина, В. Белов и С.Казарцев, защиты планируются в 2022-2024 гг.

Оценка необходимых кадровых ресурсов

Сотрудники ЛЯП ОИЯИ: продолжение работ с детектором **DANSS** (дежурство на установке, обработка и анализ данных, текущий ремонт); разработка, создание, запуск и эксплуатация детектора **DANSS-2** №2 на КАЭС (*R&D*, монтаж, электроника, анализ), создание и отладка детектора **S³**.

Сотрудники ОИЯИ			DANSS		DANSS-2		
			Виды работ на нейтринных спектрометрах				
Фамилия	Должность	доля ставки	Обслуживание спектрометра	Анализ данных, симуляции	R&D	Монтаж, электроника	Анализ данных, симуляции
Бруданин В.Б.	нач.отд	0.1	координация всех работ				
Шитов Ю.А.	нач.сек	0.5	руководство всеми работами и участие в них				
Белов В.В.	мнс	0.3	+	+	+	+	+
Вольных В.П.	вед. инж	0.1		+			+
Житников И.В.	нс	0.5	+	+	+	+	+
Казарцев С.В.	мнс	0.2	+		+	+	+
Киянов С.П.	ст. инж	0.2	+		+	+	
Кузнецов А.С.	инж	0.9	+		+	+	+
Мамедов Ф.	снс	0.5		+	+	+	+
Мачихильян И.В.	ст. инж	0.5		+			+
Медведев Д.В.	нс	0.3	+			+	
Пушков Д. С.	ст. инж	0.3	+			+	
Розова И.Е.	инж	0.4			+	+	
Саламатин А.В.	снс	0.1		+	+	+	
Философов Д.В.	нач.сек	0.1			+	+	
Фомина М.В.	мнс	0.4		+	+	+	+
Шевчик Е.А.	ст.инж	0.2	+		+	+	+
Итого		5.6					

Сотрудники ИТЭФ, ФИАН (Москва): И.Г.Алексеев, А.Ершова, А.С.Кобякин, В.М.Нестеров, К.А.Перминов, В.Ю. Русинов, Э.И. Самигуллин, Д.Н.Свирида, Н.А.Скробова, А.С.Старостин, Е.И. Тарковский, А.Е.Яковлева – участие в обслуживании и анализе данных детектора **DANSS**, а также разработке, создании, запуске и анализе данных модернизированного спектрометра **DANSS-2**.

Сотрудники ÚTEF ČVUT (Прага): M.Špavorová, L.Fajt, R.Hodák, Z.Hons, P.Přidal, E.Rukhadze, I.Štekl – разработка, создание, запуск, обслуживание и анализ данных детектора **S³**.

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для продления проекта
«Детектор реакторных антинейтрино на основе пластмассового
сцинтиллятора DANSS»**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоим. (\$ тыс.). Потребности в ресурсах	Предложение ЛЯП по распределению финансирования и ресурсов			
			1 год	2 год	3 год	
Затраты	Материалы для детектора DANSS-2 (стрипы, SiPM, фибры и т.п.)	520	180	160	180	
	Расходные материалы (оптич. клей, разъемы, кабель, и т. п.)	30	10	10	10	
	Материалы для S3 (фибры, электроника, компьютеры)	30	10	10	10	
	Итого	580	200	180	200	
Необходим. ресурсы	Нормо-час	Ресурсы – конструкторского бюро лаборатории,	300	100	100	
		– опытного производства лаборатории,	600	200	200	
Источники финансирования	Бюджет. средства	Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства	580	200	180	200
	Внебюдж. ср-ва	Вклады коллаборантов.	0	0	0	0
		Средства по грантам.	0	0	0	0

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

Краткий анализ сильных и слабых сторон, возможностей, угроз

Сильные стороны проекта:

- Сделанные на основе твердого пластмассового сцинтиллятора с нейтронным поглотителем из гадолиния, спектрометры **DANSS**, будущий **DANSS-2** и **S³** не имеют ограничений на размещение вблизи промышленных реакторов. Использование пластмассовых сцинтилляторов для создания детекторов, работающих на поверхности и с возможностью мобильного перемещения (помещение на шасси машины-грузовика) – современный тренд создания детекторов для мониторинга реакторов (проекты **CHANDLER**, **CORMORAD**, **PANDA**);
- будучи установленным в 10 метрах под реактором ВВЭР1000, детектор облучается рекордно высоким нейтронным потоком – 5×10^{13} 1/см²/с (в таких хороших условиях удалось поработать в конце 80ых группе Л.Михаэляна на Ровенской АЭС, правда, при менее мощном реакторе ВВЭР440);
- прикрытый сверху большой массой водородсодержащего вещества (~50 м водного эквивалента), он не подвержен воздействию адронной составляющей космического фона (нечто похожее было лишь в условиях ныне ликвидированного подземного военного реактора в Красноярске);
- высокая степень сегментации облегчает идентификацию нейтринных событий, подавлению и точному определению всех каналов фона. Сегментация теперь обязательный элемент практически во всех проектах нашего направления;
- регулярные (3 раза в неделю) перемещения исключают большинство систематических ошибок, присущих исследованиям осцилляций (в нашем проекте впервые было предложено делать детектор подвижным, это же теперь используется в **Нейтрино4** и предлагается в некоторых других проектах).

К слабым сторонам относятся:

- невысокое энергетическое разрешение, обусловленное несколькими факторами – плохой прозрачностью сцинтилляционных стрипов, изготовленных экструзией, большое затухание в WLS-фибрах, наличие мертвых слоев переменной толщины между слоями сцинтиллятора, неоднородность фотокатодов компактных ФЭУ. К счастью, все эти недостатки планируется преодолеть в детекторах **DANSS-2** и **S³**;
- сложная внутренняя структура не позволяет точно рассчитать абсолютную эффективность детектора. Опять-таки, модернизированный **DANSS-2** и **S³** будут иметь более однородную структуру и меньшее количество мертвых слоев;
- сцинтиллятор на основе полистирола содержит в полтора раза меньше атомов водорода (~7.7 %wt.), чем широко используемый жидкий сцинтиллятор на основе ЛАБ (~11.5 %wt.), что напрямую влияет на эффективность регистрации антинейтрино.

По этим причинам детектор **DANSS** не является прецизионным инструментом для измерения точной формы спектра реакторных антинейтрино. Но следует подчеркнуть, что новые детекторы **DANSS-2** и **S³** будут обладать большими возможностями в этом плане благодаря существенно улучшенному энергетическому разрешению, меньшему количеству мертвых слоев внутри детектора и большей однородности.