

Предложение о продлении проекта

DANSS

Детектор реакторных антинейтрино на основе пластического сцинтиллятора

Тема: **03-2-1100-2010/2018** (неускорительная нейтринная физика и астрофизика)

Лаборатория ядерных проблем (ЛЯП ОИЯИ), Дубна

В.В.Белов, В.Б.Бруданин, В.Г.Егоров, И.В.Житников, Д.Р.Зинатулина,
С.В.Казарцев, А.С.Кузнецов, Д.В.Медведев, А.Г.Ольшевский, И.Е.Розова,
Н.С.Румянцева, М.В.Фомина, Е.А.Шевчик, М.В.Ширченко, Ю.А.Шитов

Институт теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), Москва

И.Г.Алексеев, А.С.Кобякин, И.В.Мачихильян, Д.Н.Свирида, Н.А.Скробова,
А.С.Старостин

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

М.Špavorová, L.Fajt, R.Hodák, Z.Hons, F.Mamedov, P.Přidal, E.Rukhadze, I.Štekl,
J.Vlášek.

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

М.В.Данилов

Руководитель проекта В.Г. Егоров (egorov@jinr.ru)

Заместитель руководителя проекта В.Б. Бруданин

Аннотация

В рамках данного проекта разработан и создан относительно компактный нейтринный спектрометр **DANSS** с чувствительным объемом 1 м^3 , который не содержит легко воспламеняющихся или других опасных жидкостей и потому не имеет ограничений на установку вблизи мощных промышленных реакторов. Спектрометр смонтирован на четвертом энергоблоке Калининской АЭС в помещении А336, находящемся под реактором ВВЭР1000 с тепловой мощностью 3100 МВт. Благодаря такому размещению, обеспечивающему около 10^4 ОБР взаимодействий в сутки, детектор оказывается прикрытым от космического излучения большой массой водородсодержащего вещества, находящегося сверху. Вместе с этим, высокая степень сегментации пластмассового сцинтиллятора, а также использование комбинированной активной и пассивной защиты, обеспечивают подавление фона до уровня в несколько процентов при регистрации около 5000 полезных событий в сутки. Подъемный механизм позволяет в режиме on-line за несколько минут перемещать спектрометр на 2 метра по вертикали, тем самым меняя расстояние между его центром и центром активной зоны реактора от 10.7 до 12.7 метра. Благодаря этой особенности, в настоящее время детектор **DANSS** используется для поиска нейтринных осцилляций в стерильный вид на малых дистанциях. Ожидается, что в 2018 году будет получен окончательный результат по проверке существования «реакторной аномалии».

В период 2019 – 2021 гг. планируется, во-первых, существенно расширить область ограничения осцилляционных параметров (за счет увеличения статистики и, главным образом, за счет более полного изучения систематических эффектов) и, во-вторых, в течение двух-трех кампаний осуществить диагностику работы реактора, связав данные о нейтринном спектре с меняющимся составом топлива и тепловой мощностью. Затраты на эксплуатацию оцениваются в \$30,000 в год и состоят, в основном, в оплате постоянного пребывания сотрудников ЛЯП ОИЯИ на КАЭС (включая аренду офисно-складского помещения и транспорт).

Предполагается также принять посильное участие (в основном, материальное, в пределах \$170,000) в совместном (**ОИЯИ + NEOS + Нейтрино4**) создании дополнительного нейтринного детектора возле реактора СМЗ в НИИАР (Димитровград), что дает возможность измерить нейтринный спектр на дистанциях 5-18 метров.

Кроме того, планируется с учетом накопленного опыта разработать и создать на основе других базовых элементов два уменьшенных нейтринных детектора **S³ (S-cube)** с улучшенными параметрами. При чувствительном объеме 64 литра такой детектор сможет регистрировать около 300-400 нейтрино в сутки и, работая совместно с большим детектором **DANSS**, осуществить более полный и надежный контроль за реактором. Стоимость вклада ОИЯИ в создание одного из двух детекторов **S³** оценивается в ~\$270,000 (второй детектор будет создаваться силами ÚTEF ČVUT в Праге для установки на АЭС Темелин, Чехия).

1. Введение

Целью проекта (ОИЯИ + ИТЭФ), начатого в 2010 году, являлась разработка детектора реакторных антинейтрино и его использование для нейтринной диагностики промышленных реакторов. В 2011 г. после появления гипотезы о «реакторной аномалии» ещё одной целью стал поиск нейтринных осцилляций в стерильное состояние.

За время реализации проекта нами был разработан, создан и запущен уникальный нейтринный спектрометр **DANSS** (<https://arxiv.org/pdf/1606.02896.pdf>)

[physics.ins-det]), свободный от многих недостатков, присущих другим подобным установкам:

- сделанный на основе твердого пластмассового сцинтиллятора, он не имеет ограничений на размещение вблизи промышленных реакторов;
- будучи установленным в 10 метрах под реактором ВВЭР1000, он облучается рекордно высоким нейтринным потоком – 5×10^{13} 1/см²/с;
- прикрытый сверху большой массой водородсодержащего вещества (~50 м водного эквивалента), он не подвержен воздействию адронной составляющей космического фона;
- высокая степень сегментации облегчает идентификацию нейтринных событий;
- регулярные (3 раза в неделю) перемещения исключают большинство систематических ошибок, присущих исследованиям осцилляций.

В конце 2016 года детектор **DANSS** вышел на проектный режим, и начался набор данных.

Для полной реализации поставленных целей предлагается продлить проект на период 2019-2021 гг. и за это время

1. накопить достаточную статистику для расширения зоны чувствительности к осцилляционным параметрам до значений $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) \approx 0.01$ при $\Delta m^2_{\text{new}} \approx (0.1 - 5.0)$ эВ²;
2. провести измерения зависимости нейтринного спектра от мощности реактора и состава топлива в ходе кампании в течение 3 лет (2 полных кампании);
3. предпринять шаги по измерению нейтринного спектра на дистанциях от 5 до 15-18 метров на вновь создаваемом детекторе в НИИАР (в сотрудничестве с **NEOS** и **Нейтрино4**);
4. разработать и создать два уменьшенных и упрощенных нейтринных детектора **S³** с улучшенными параметрами для использования на Калининской АЭС (Россия) и на АЭС в г.Темелин (Чехия).

Затраты на реализацию пп.1-2 оцениваются в \$30,000 в год, на п.3 – в \$170,000, а на п.4 – в \$270,000.

2. Состояние исследований

2.1. Состояние исследований в конкурирующих проектах

В настоящее время все существующие (конкурирующие) проекты в мире можно разделить на две почти не пересекающиеся группы в соответствии с их задачами:

- проекты по нейтринной диагностике промышленных реакторов и
- проекты по поиску нейтринных осцилляций на малых расстояниях.

В первую группу, решающую прикладную задачу, можно включить проекты, регулярно рассматриваемые на ежегодных рабочих совещаниях серии **AAP** (Workshop Applied Antineutrino Physics), последнее из которых – **AAP-2017** – должно было состояться в Индии [1], а главные результаты предыдущих хорошо отражены в обзоре, опубликованном в обзоре [2]. Из проектов, относящихся к этой группе (**NUCIFER** [3], **CORMORAD** [4], **PANDA** [5], **NEOS** [6], **WATCHMAN** [7], **ANGRA** [8], **NULAT** [9], **IDREAM** [10], **VIDARR** [11], **SoLid** [12], **CHANDLER** [13]), дальше всех

продвинулись французский **NUCIFER** и южнокорейский **NEOS**, причем только последнему удалось получить отношение сигнала к фону больше единицы. Остальные же проекты либо были отклонены, либо находятся еще только на стадии *R&D*, либо столкнулись с невозможностью побороть фон, во много раз превышающий искомый эффект. Нужно сказать, что абсолютное большинство проектов используют жидкий сцинтиллятор, и потому ни один из них пока не был допущен к промышленному реактору ближе, чем на 25-30 метров.

Что касается проектов, решающих задачу поиска нейтринных осцилляций в стерильное состояние, то некоторые из них нацелены на измерение теоретически хорошо известного нейтринного спектра от искусственных радиоактивных источников с помощью уже действующих больших подземных нейтринных детекторов: **SOX** [14] (BOREXINO + $^{144}\text{Ce/Pm}$), **CeLAND** [15] (KamLAND + $^{144}\text{Ce/Pm}$), **BEST** [16] (SAGE + ^{51}Cr). Из них подготовительные работы близки к завершению лишь по проекту **SOX**, интенсивный источник ^{144}Ce заказан на предприятии «Маяк» в России, ведется подготовка к его транспортировке в Италию в марте 2018 года. Если удастся преодолеть запрет от местных итальянских властей, инициированный «зелеными», то далее последуют измерения и анализ данных. С учетом того, что период полураспада ^{144}Ce составляет 285 дней, то у коллаборации **SOX** есть реальные шансы увидеть какой-либо эффект к концу 2018.

Вторая часть осцилляционных проектов (**PROSPECT** [17], **Нейтрино4** [18], **STEREO** [19]) использует исследовательские реакторы, мощность которых не превышает 30-100 МВт. В этом случае разрешается применение жидких сцинтилляторов, но при этом, как правило, отсутствует возможность хорошо защититься от нейтронной составляющей космического фона, поскольку существующие здания с исследовательскими реакторами не настолько массивны и не имеют таких больших водных резервуаров, как промышленные АЭС.

2.2. Место DANSS среди аналогичных проектов

Наш проект занимает лидирующее положение среди всех вышеперечисленных. За время его реализации нами был разработан, создан и запущен нейтринный спектрометр **DANSS** [20], свободный от многих недостатков, присущих другим подобным установкам.

Во-первых, наш детектор вместо традиционного жидкого использует твердый сцинтиллятор на основе полистирола. Так как он не содержит легко воспламеняющихся или других опасных жидкостей, то не имеет ограничений на установку вблизи мощных промышленных реакторов и потому смонтирован на 4-ом энергоблоке Калининской АЭС в помещении АЗ36, находящемся под реактором ВВЭР1000 с тепловой мощностью 3100 МВт (Рис.1). Благодаря такому размещению, поток реакторных антинейтрино в районе детектора составляет 5×10^{13} 1/см²/с, обеспечивая в нем около 10^4 ОБР взаимодействий в сутки. Кроме того, находясь в нижней части реакторного здания, детектор оказывается прикрытым от космического излучения большой массой водородсодержащего вещества, находящегося сверху – это и сам котел реактора, и толстая бетонная защита, и бассейны выдержки отработанного топлива, и резервуары для хранения технологических жидкостей (борной кислоты и т. п.). Суммарная толщина этой «дармовой» защиты составляет 50 м водного эквивалента, что вполне достаточно для полного устранения адронной составляющей космического фона, являющейся главным источником паразитных событий, трудно отличимых от ОБР.

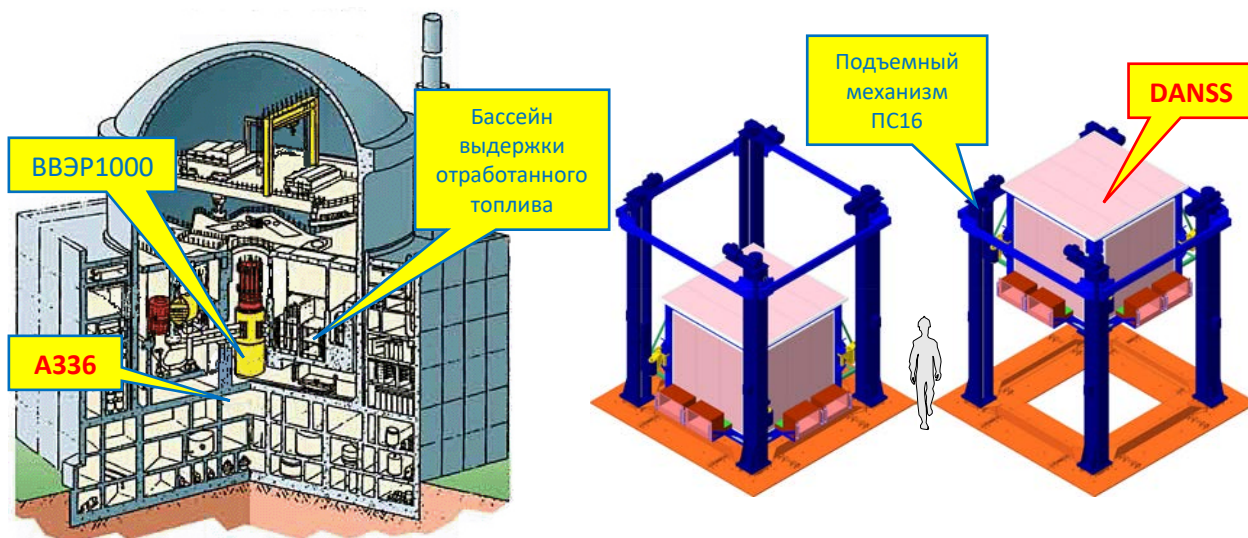


Рис.1. Слева: расположение комнаты А336 под активной зоной ВВЭР1000. Справа: подъемник ПС16 с установленным на нем детектором **DANSS**.

Во-вторых, чувствительный объем детектора **DANSS** имеет высокую степень сегментации – он состоит из 2500 независимых пластмассовых сцинтилляционных ячеек («стрипов») с суммарным объемом в 1 м³ (Рис. 2). Это дает детальную трехмерную картину энерговыделения для каждого события и тем самым повышает надежность его идентификации. Все это, наряду с применением комбинированной активной и пассивной защиты, обеспечивает подавление фона до уровня в несколько процентов.



Рис. 2. Слева: детектор в процессе монтажа 2500 стрипов. Справа: работающий детектор **DANSS** на подъемной платформе в ее нижнем положении.

В-третьих, детектор **DANSS** вместе со своей защитой, электроникой и всеми вспомогательными устройствами смонтирован на подвижной платформе. Подъемный механизм ПС16 позволяет в режиме *on-line* за 4 минуты перемещать спектрометр на 2 метра по вертикали, тем самым меняя расстояние между его центром и центром активной зоны реактора от 10.7 до 12.7 метра. Благодаря этой особенности, в настоящее время детектор **DANSS** используется для поиска нейтринных осцилляций в стерильный вид на малых дистанциях. В большинстве других проектов это делается (или планируется делать) путем точного измерения энергетического нейтринного спектра и затем – сравнения его со спектром, рассчитанным теоретически. При этом, для реакторных нейтрино всегда остается

открытым вопросом о точности используемой при расчетах модели. Мы же применяем совершенно другой, модельно-независимый, подход. Вместо сравнения самого спектра, мы анализируем его изменение с расстоянием. В этом случае полностью исключаются возможные систематические ошибки, связанные с неточностью расчетной модели (она вообще не требуется), плохим знанием абсолютной эффективности детектора, состава топлива, колебаний мощности реактора, мертвого времени и др. Если перемещать детектор достаточно часто (а это постоянно делается нами трижды в неделю), то и такие факторы, как постепенное изменение состава топлива и геометрического распределения интенсивности горения за время кампании (18 месяцев), тоже становятся пренебрежимо малыми.

К сожалению, монтаж и запуск спектрометра **DANSS** происходили медленнее, чем планировалось. В частности, почти год нам пришлось ждать плановой остановки реактора, чтобы произвести сварочные работы, необходимые при монтаже основы подъемника (по внутренним правилам КАЭС они запрещены при работающем реакторе). Затем из-за заводского дефекта в редукторе подъемника более месяца ушло на его ремонт. Для устранения течи в системе водяного охлаждения детектора летом 2016 г. мы вынуждены были почти полностью разобрать всю многослойную защиту, что заняло около 3 месяцев. Такие досадные проблемы, к сожалению, неизбежны при создании новых экспериментальных установок. Тем не менее, начиная с октября 2016 г. спектрометр заработал в полном объеме, хотя мелкие недоработки устранялись вплоть до февраля 2017 г.

С тех пор все работает стабильно, и к середине 2018 г. мы рассчитываем накопить достаточную статистику, чтобы сделать окончательный вывод о существовании или отсутствии «реакторной аномалии». Отметим, что в анализе можно использовать только периоды стабильной работы реактора, когда его тепловая мощность составляет от 3000 до 3100 МВт – в противном случае геометрия активной зоны сильно меняется, что может исказить изучаемый эффект.

На Рис.3 показаны примеры временного и энергетического спектров, измеренных только с помощью 50 ФЭУ (аналогичные данные имеются и с 2500 MRPC). На временном распределении нарастающий участок соответствует замедлению образующегося в ОБР нейтрона с характерным временем $\tau_m \approx 3$ мкс, а спадающий участок – его захвату с $\tau_c \approx 14$ мкс. Очевидно, что при выключенном реакторе форма распределения тоже соответствует регистрации нейтронов, однако происхождение их иное. Как мы полагаем, эти нейтроны образуются в окружающих детектор материалах под действием мюонов. Об этом же свидетельствует отличающаяся форма энергетического фонового спектра. Корректный учет этого фона, а также фона, обусловленного случайными совпадениями (об их количестве говорит асимптотическая правая часть показанных кривых), требует дальнейших исследований.

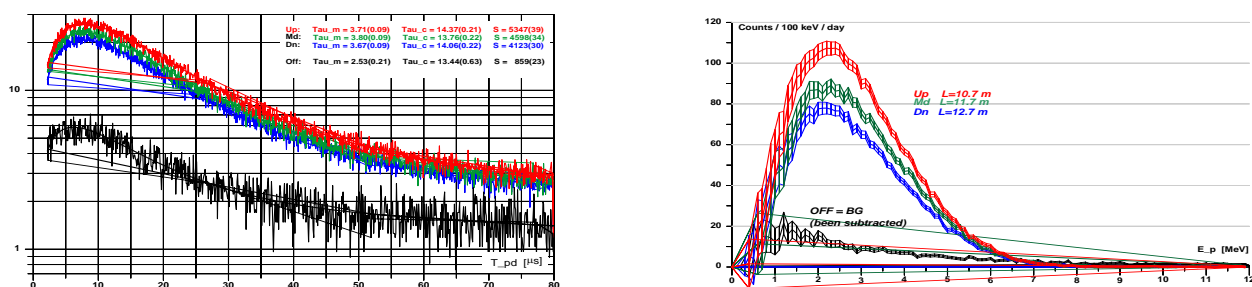


Рис.3. Временной и энергетический спектры для разного расстояния L от детектора до центра активной зоны: Up ($L=10.7$ м), Md ($L=11.7$ м), Dn ($L=12.7$ м). Черным цветом показаны фоновые спектры при заглушенном реакторе.

Предварительный анализ части накопленных данных позволяет уже сейчас построить карту (Рис.4), показывающую область, в которой с вероятностью 99% осцилляционные параметры Δm^2_{new} и $\sin^2(2\theta_{\text{new}})$ находиться не могут.

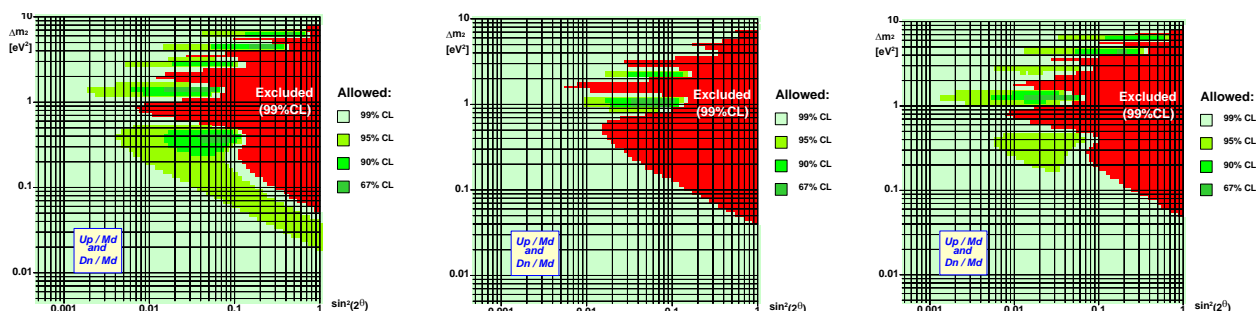


Рис.4. Разрешенные области осцилляционных параметров, при разных условиях сортировки данных **DANSS** (Рисунки носят лишь иллюстративный характер и не являются окончательными).

Одновременно с работами по монтажу, запуску и обслуживанию спектрометра **DANSS**, нами проводились изыскания (*R&D*) по разработке следующей версии нейтринного детектора – **S³** (*S-cube*). Слабыми местами **DANSS** являются, во-первых, недостаточное энергетическое разрешение и, во-вторых, избыточная сложность. Первый из этих недостатков обусловлен, главным образом, низким качеством сцинтилляционных стрипов, изготовленных в Харькове по экструзионной технологии. Вторая же особенность, по-видимому, изначально лишней не была, поскольку нейтринный детектор с такой структурой создавался впервые в мире, возможные проблемы не были известны *a priori*, и потому некоторые системы были нами продублированы. Теперь же, приобретая нужный опыт, мы видим свои ошибки и понимаем, что для задач реакторной диагностики можно создать детектор, который был бы одновременно и проще, и лучше, и дешевле.

Вместо сцинтилляционных стрипов метровой длины для **S³** было решено использовать более короткие и широкие пластины размером 40×20×1 см, производимые чешской фирмой NUVIA (бывш. ENVINET). В результате наших многочисленных тестов химический состав сцинтиллятора был оптимизирован, и фирма изготовила 160 таких пластин для двух детекторов **S³**, один из которых (№1) будет делаться в Праге, а другой (№2) – в Дубне. В 2017 г. с одной из этих пластин были проведены тесты, показавшие, что при использовании соответствующих ФЭУ вполне реально улучшить энергетическое разрешение в 2 раза по сравнению с **DANSS**, получив на 1 МэВ до 80 фотоэлектронов вместо 21. Одновременно были выяснены возможности определения координаты события по разности времени прихода светового сигнала.

2.3. Список литературы

1. International Workshop on Applied Antineutrino Physics 2017
<http://www.aap.sympnp.org/>
2. N. S. Bowden, K. M. Heeger, P. Huber, C. Mariani, R. B. Vogelaar, "AAP 2015 -- Conference Summary", <https://arxiv.org/pdf/1602.04759.pdf> [hep-ex]
3. "Online Monitoring of the Osiris Reactor with the Nucifer Neutrino Detector", Phys.Rev. **D93** (2016) 112006; <https://arxiv.org/pdf/1509.05610.pdf> [physics.ins-det].
4. <https://www.ge.infn.it/~batta/antinu/helsinki11-battaglieri-red.pdf>
5. "Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method", NIM A757 (2014) 33-39.
6. "A sterile neutrino search at NEOS Experiment", <https://arxiv.org/pdf/1610.05134.pdf> [hep-ex]
7. "The Physics and Nuclear Nonproliferation Goals of WATCHMAN: A Water Cherenkov Monitor for ANTineutrinos", <https://arxiv.org/pdf/1502.01132.pdf> [physics.ins-det].
8. "Angra dos Reis Reactor Neutrino Oscillation Experiment", Brazilian J. of Phys., vol. 36, no. 4A, December, 2006.
9. "A new type of Neutrino Detector for Sterile Neutrino Search at Nuclear Reactors and Nuclear Nonproliferation Applications", <https://arxiv.org/pdf/1501.06935.pdf> [physics.ins-det]
10. "The industrial iDREAM detector for neutrino monitoring of the operating modes of nuclear reactors", Moscow University Physics Bulletin 70 (2015) 190–194.
11. <http://www.project-vidarr.com/the-project/>
12. "First results of the deployment of a SoLid detector module at the SCK•CEN BR2 reactor", <https://arxiv.org/pdf/1510.07835.pdf> [hep-ex].
13. <https://www.youtube.com/watch?v=iwhKiwKCNr0>
14. "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.
15. "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].
16. V.N.Gavrin et al., "Search for sterile neutrinos on the Gallium Germanium Neutrino Telescope with artificial neutrino sources in the BEST experiment", J. Phys.: Conf. Ser. 798 (2017) 012113.
17. J. Ashenfelter et al., "PROSPECT - A Precision Reactor Oscillation and Spectrum Experiment at Short Baselines", <https://arxiv.org/pdf/1309.7647.pdf> [physics.ins-det];
"The PROSPECT Physics Program", <https://arxiv.org/pdf/1512.02202.pdf> [physics.ins-det].
18. A.Serebrov et al., "Experiment NEUTRINO-4 Search for Sterile Neutrino", <https://arxiv.org/pdf/1702.00941.pdf> [physics.ins-det].
19. "STEREO: Search for sterile neutrinos at the ILL", <https://arxiv.org/pdf/1702.02498.pdf> [physics.ins-det];
"Search for eV Sterile Neutrinos – The Stereo Experiment", <https://arxiv.org/pdf/1710.06310.pdf> [hep-ex].
20. "DANSS: Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid Scintillator", <https://arxiv.org/pdf/1606.02896.pdf> [physics.ins-det]; "Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid-state plastic Scintillator (DANSS). Status and first results". J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) 012152

3. Описание предлагаемого исследования

В период 2019-2021 гг. предлагается провести работы по трем направлениям: продолжить поиск нейтринных осцилляций (зависимость нейтринного спектра от расстояния), осуществить нейтринную диагностику реактора (отследить эволюцию нейтринного спектра со временем в ходе кампании) и запустить в работу два новых нейтринных детектора S³ (S-cube).

3.1. Продолжение поиска нейтринных осцилляций.

Как уже говорилось, в 2018 году мы планируем дать окончательный ответ на вопрос о существовании ранее провозглашенной «реакторной аномалии» – осцилляции реакторных антинейтрино в стерильное состояние с параметрами $\Delta m_{\text{new}}^2 \approx 2 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) \approx 0.17$. Ожидается, что наш ответ будет, скорее всего, отрицательным.

Однако, это ни в коей мере не означает возможности существования таких осцилляций с другими параметрами. Расчеты показывают, что для условий **DANSS** (дистанции в диапазоне от 10.7 до 12.7 м) за один-два года измерений можно расширить зону чувствительности до значений $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) \approx 0.01$ при $\Delta m_{\text{new}}^2 \approx (0.1 - 5.0) \text{ эВ}^2$. Для этого нужно просто продолжать измерения со спектрометром **DANSS**, отслеживая эволюцию спектра с расстоянием и проводя необходимые тесты с калибровочными источниками. Затраты при этом потребуются лишь на поддержание установки в рабочем состоянии (оплата обслуживания кондиционеров, текущего мелкого ремонта, и т. п.), а также на постоянное присутствие на КАЭС двоих сотрудников ОИЯИ на основе «вахтового метода» (транспорт + проживание + аренда офисно-складских помещений), что в сумме составляет ~\$30,000 в год.

Еще более расширить зону чувствительности в область как меньших, так и больших Δm^2 , можно было бы, изменив диапазон дистанций до реактора. Хотя в настоящих условиях сделать это не позволяют габариты помещения АЗЗБ, существуют два других возможных решения. Первое состоит в том, чтобы на том же 4-ом энергоблоке КАЭС ниже этажом установить какой-либо дополнительный нейтринный детектор и, таким образом, измерить нейтринный спектр на дистанции 17 м. Мы рассмотрели возможность перемещения туда южнокорейского спектрометра **NEOS**, но формальные сложности, связанные с режимом ядерного объекта, делают эту задачу трудновыполнимой. В результате, мы приняли второе решение. Оно заключается в том, чтобы, объединив усилия и опыт участников **DANSS**, **NEOS** и **Нейтрино4**, сделать в НИИАР (г. Димитровград) рядом с работающим детектором **Нейтрино4** еще один спектрометр, используя элементы **NEOS** и наши наработки. Затраты со стороны ОИЯИ на такое сотрудничество оцениваются в \$170,000, большая часть которых должна покрыть изготовление или приобретение 200 счетчиков размером 50×50×5 см для системы мюонного вето.

3.2. Измерения зависимости нейтринного спектра от мощности реактора и состава топлива в ходе кампании.

Эта задача, как и предыдущая, требует лишь продолжения непрерывных измерений со спектрометром **DANSS** в течение хотя бы двух полных полуторагодовых реакторных кампаний. При этом ожидается, что интегральный нейтринный поток за кампанию должен плавно уменьшиться на 5-7%, а энергетический спектр стать «жестче», также на несколько процентов. Результаты измерений покажут, во-первых, перспективы реального использования нейтринной диагностики промышленных реакторов (контроль за мощностью и за наработкой оружейного ²³⁹Pu, что важно и с экономической точки зрения, и для международного

контроля за нераспространением делящихся материалов) и, во-вторых, позволят сравнить различные модели, по которым ведутся расчеты нейтринных спектров.

3.3. Создание и запуск двух детекторов S^3 (*S-cube*).

Детекторы S^3 , в отличие от **DANSS**, разрабатываются в ином авторском составе – вместо ИТЭФ (Москва) в этих работах активно участвует Институт технической и экспериментальной физики Чешского технического университета в Праге (ČVUT, ÚTEF). С учетом проведенных исследований (*R&D*), концепция S^3 на сегодня представляется следующей.

80 пластин из сцинтиллятора на основе полистирола, имеющие размер 40×20×1 см и произведенные фирмой NUVIA (бывший ENVINET) по технологии «между стеклом», собираются в куб размером 40×40×40 см (Рис. 5). Между слоями прокладывается гадолиний-содержащая пленка на основе тайвека, изготовленная этой же фирмой.

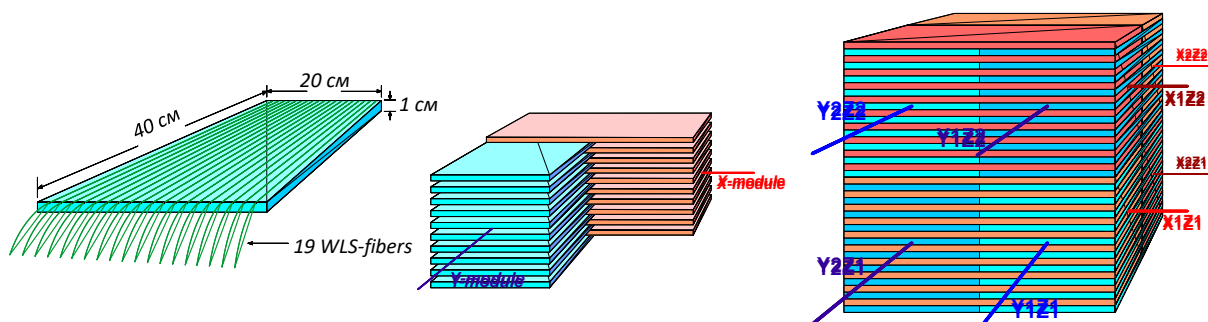


Рис. 5. Сцинтилляционные пластины, объединенные в пересекающиеся X- и Y-модули, образуют куб объемом 64 литра.

В отличие от **DANSS**, пластины не будут иметь каких-то специальных несущих рам (опыт **DANSS** показывает, что это не нужно). Вместо медного внутреннего слоя защиты будет использоваться либо слой полиэтиленового замедлителя для внешних нейтронов, либо слой пластмассового сцинтиллятора, одновременно выполняющий роль замедлителя и гамма-кетчера. В остальном защита будет аналогична используемой в **DANSS**.

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. При этом рассматриваются два варианта, один из которых будет реализован в ÚTEF, а другой – в ОИЯИ.

В первом варианте один (тыловой) конец каждой WLS-фибры оканчивается зеркальным покрытием. С другой (фронтальной) стороны четные фибры (9 штук) заводятся на МРРС типа S13360-3075PE фирмы Hamamatsu, имеющие размер 3×3 мм (один МРРС на каждую пластину), а нечетные (10 штук) объединяются с такими же фибрами от остальных пластин модуля и заводятся либо одним общим пучком на ФЭУ H13543-20, либо в виде 10 индивидуальных пучков на отдельные сегменты матричного ФЭУ H8711-20. Таким образом, ФЭУ (один на каждый модуль) вырабатывает сигнал о суммарном энерговыделении в данном модуле, а сигналы с 80 МРРС определяют геометрическое распределение энергии по 80 пластинам.

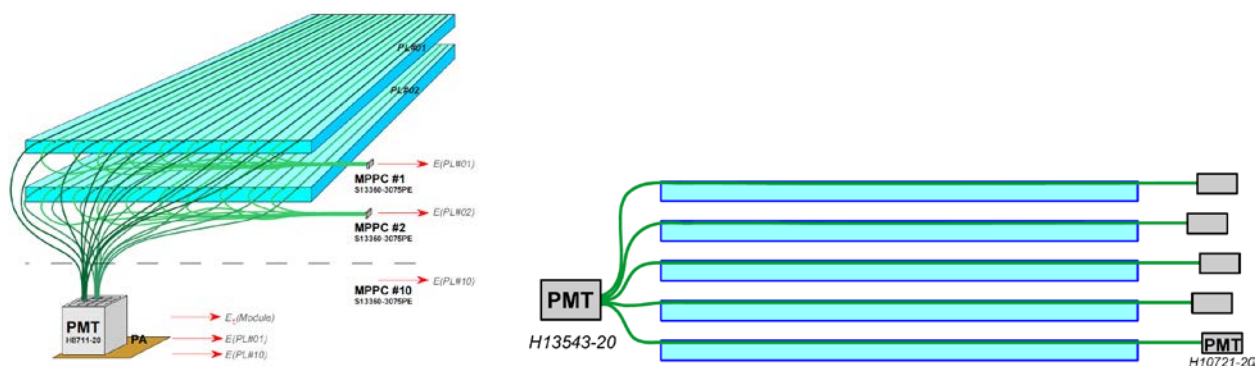


Рис. 6. Два варианта съема светового сигнала с модуля. Слева: 1 ФЭУ + 10 МРРС. Справа: 1 ФЭУ + 10 ФЭУ.

Второй вариант предполагает двусторонний съём светового сигнала с каждой фибры. С одной стороны модуля все фибры (по 19 с каждой пластины) объединены в один пучок и поданы на ФЭУ H13543-20, регистрирующий суммарную энергию, выделившуюся в модуле. С другой же стороны каждая пластина всеми своими 19 фибрами соединена с персональным маленьким ФЭУ H10721-20, который, подобно МРРС в первом варианте, даёт информацию о распределении энергии между пластинами. К сожалению, из-за малых размеров детектора нам, по-видимому, не удастся в полной мере реализовать преимущества двустороннего съёма сигнала в смысле определения продольной координаты точки взаимодействия по разнице времён или амплитуд – и тот, и другой способы в данном случае не дают точности лучше 15-20 см.

Оба варианта имеют свои сильные и слабые стороны. Первый вариант проще в изготовлении и дешевле, поскольку вместо 80 индивидуальных ФЭУ использует относительно дешёвые МРРС, но зато второй вариант не требует специализированной front-end электроники для согласования их слабых сигналов. Кроме того, ФЭУ, в отличие от МРРС, может нормально работать без искусственного охлаждения, что делает принципиально возможной эксплуатацию детектора внутри гермообъёма реактора, где температура может достигать +50 градусов.

Тесты показывают, что для обоих вариантов энергетическое разрешение может быть существенно улучшено по сравнению с **DANSS**. Если для **DANSS** суммарное количество фотоэлектронов, образующихся в фотодатчиках при энерговыделении в 1 МэВ, не превышает 20-25, то в **S³** оно ожидается на уровне 75-80. При установке детектора **S³** в таком же помещении, как АЗ36 (на Калининской АЭС или на АЭС в Темелине), детектор будет регистрировать 300-400 нейтринных событий в сутки, чего для задач диагностики вполне достаточно.

Наиболее затратной частью при изготовлении нашего детектора **S³** являются 8 фотоумножителей (ФЭУ) японской фирмы Hamamatsu – H13543-20 – стоимостью по 2190 Евро за штуку и 112 более дешёвых ФЭУ H10721-20, которые используются нами как в самом детекторе (80 штук), так и в системе его мюонного вето (32 штуки). Суммарная стоимость материалов и элементов для создания одного из двух детекторов весьма приблизительно оценивается нами в \$270,000.

4. Оценка необходимых кадровых ресурсов

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

Нейтронный спектрометр:			DANSS				S ³ (№2)				
Сотрудники ОИЯИ			Вид работ								
Фамилия (цветом отмечены молодые сотрудники)	Должность	% участия	Обслуживание спектрометра	Дежурство на установке	Анализ данных	МК-симуляции	R&D	Монтаж	Электроника набора данных	Анализ данных	МК-симуляции
В.В. Белов	мнс	10 0	+	+	+		+	+	+	+	
В.Б. Бруданин	н.от д	10	координация всех работ								
В.Г. Егоров	н.сек	10 0	руководство всеми работами и участие в них								
М.В. Фомина	мнс	10 0			+	+	+	+		+	+
С.В. Казарцев	мнс	10 0	+	+			+	+	+	+	
А.С. Кузнецов	инж.	10 0	+	+		+	+	+	+	+	+
Д.В. Медведев	нс	30	+	+				+	+		
А.Г. Ольшевский	н.от д	5	координация части работ								
И.Е. Розова	мнс	50			+		+	+	+		
Н.С. Румянцева	мнс	30			+		+	+	+		
Е.А. Шевчик	инж	30	+	+			+	+	+	+	
М.В. Ширченко	нс	50	+	+			+	+	+		
Ю.А. Шитов	снс	50			+	+	+	+	+		+
И.В. Житников	мнс	10 0	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Д.Р. Зинатулина	мнс	50					+	+	+		

Сотрудники ИТЭФ, ФИАН (Москва): И.Г.Алексеев, М.В.Данилов, А.С.Кобякин, И.В.Мачихильян, Д.Н.Свирида, Н.А.Скрובה, А.С.Старостин - продолжение работ с детектором **DANSS** (обработка данных, МК-симуляции, участие в ремонте).

Сотрудники ÚTEF ČVUT (Прага): M.Špavorová, L.Fajt, R.Hodák, Z.Hons, F.Mamedov, P.Přidal, E.Rukhadze, I.Štekl, J.Vlášek - разработка и создание детектора **S³ №1**, его эксплуатация на АЭС в Темелине.

5. Оценка необходимых материальных ресурсов.

Для продолжения работы спектрометра **DANSS** требуется, чтобы на Калининской АЭС непрерывно находились два сотрудника ОИЯИ (управление регулярным перемещением подъемника, копирование накопленных данных, контроль за работой аппаратуры). Оплата их пребывания на вахтовой основе в г.Удомля Тверской области (транспорт + суточные + проживание + аренда офисного и складского помещений), а также дополнительных поездок для текущего ремонта, составляет \$30,000 в год.

Для создания одного из двух детекторов **S³** требуется:

- 80 ФЭУ *H10721-20* – индивидуальный съём сигнала с 80 пластин
- 8 ФЭУ *H13543-20* – коллективный съём сигнала с 8 модулей
- спектросмещающее (WLS) оптоволокно – 1.2 км
- 32 сцинтилляционные пластины (по 1 м²) для мюонного вето
- 32 ФЭУ *H10721-20* – съём сигналов с пластин мюонного вето
- 2 крейта (VME и NIM) с контроллером и блоками FADC
- компьютеры и сменные жесткие диски для хранения данных (2 ТБ в неделю)
- борированный полиэтилен для защиты от нейтронов (1 тонна)
- свинец для защиты от гамма-лучей (6 тонн)
- нейтронные и гамма-датчики, кабели, разъемы, инструменты, и т.п.
- механическая конструкция для крепления детектора и многотонной защиты.

Вклад в создание совместного (**ОИЯИ + Нейтрино4 + NEOS**) нейтринного спектрометра в НИИАР:

- закупка/изготовление 200 сцинтилляционных счетчиков мюонного вето
- посредничество при транспортировке элементов **NEOS** в НИИАР
- проведение регулярных рабочих совещаний коллаборации.

6. Краткий анализ сильных и слабых сторон, возможностей, угроз

Сильные стороны проекта:

- сделанные на основе твердого пластмассового сцинтиллятора, и **DANSS**, и **S³** не имеют ограничений на размещение вблизи промышленных реакторов (после нас эта же идея была предложена, но так и не реализована в проектах **CORMORAD** и **PANDA**);
- будучи установленным в 10 метрах под реактором ВВЭР1000, детектор облучается рекордно высоким нейтринным 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 (к этой же идее после нескольких лет пришли авторы проектов **Нейтрино4** и **NULAT**);
- 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:

- относительно плохое 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. Отчасти этот недостаток будет уменьшен в детекторе **S³**;
- сложная внутренняя структура не позволяет точно рассчитать абсолютную эффективность детектора;
- 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).

По этим причинам детекторы **DANSS** и **S³** не следует использовать для прецизионного абсолютного измерения нейтринных спектров (по крайней мере, указывая это как главную цель).

Реальную конкуренцию нашему проекту в ближайшие годы может составить только эксперимент **SOX**, поскольку в нем планируется использовать уже давно работающий низкофоновый подземный нейтринный детектор **BOREXINO**, не требующий каких-либо существенных переделок. Кроме того, ожидаемый нейтринный спектр от р/а источника ¹⁴⁴Ce/Pm может быть теоретически вычислен с большой точностью (в отличие от спектров нейтрино в реакторных проектах).