

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

КУРСОВАЯ РАБОТА СТУДЕНТА 203 ГРУППЫ
АКУНЦА ИЛЬИ СЕРГЕЕВИЧА
НА ТЕМУ:

Компактные детекторы антинейтрино

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
ДОЦЕНТ, К.Ф.-М.Н., ШИРОКОВ Е.В.

МОСКВА, 2020

Содержание

1	Введение	3
2	Регистрация антинейтрино	3
3	Компактные детекторы антинейтрино	5
3.1	iDREAM	5
3.2	MiniCHANDLER	6
3.3	PANDA	7
3.4	NuLat	8
3.5	PROSPECT	9
4	Вывод	11
5	Список литературы и ссылки	12

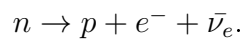
1 Введение

Нейтрино и антинейтрино – это элементарные субатомные частицы со спином $s = \frac{1}{2}$ и без электрического заряда. В Стандартной Модели эти частицы считаются безмассовыми, однако на данный момент известно, что, например, для электронного нейтрино ν_e нижняя граница массы определена как 0,25 эВ, а верхняя равна 1 эВ.

Существуют три различных типа нейтрино: электронное (ν_e), мюонное (ν_μ) и тау-нейтрино (ν_τ). Нейтрино и антинейтрино являются частью лептонного семейства частиц, что означает, что они не взаимодействуют с помощью сильной ядерной силы.

Антинейтрино взаимодействуют с другой материей только через гравитационные и слабые силы, что затрудняет их экспериментальное обнаружение. Также антинейтрино (как и нейтрино) имеет маленькое поперечное эффективное сечение реакции ($\sigma \approx 10^{-43}$ см²), что позволяет им проходить сквозь материалы почти беспрепятственно, давая нам окна в процессы, происходящие в космосе, а также внутри земных экспериментов.

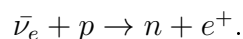
В ядерном реакторе особенно происходит β^- -распад, так как общей особенностью продуктов деления является избыток нейтронов. Нестабильный фрагмент деления с избытком нейтронов подвергается β^- -распаду, при котором нейтрон превращается в протон, электрон и электронное антинейтрино:



Поэтому каждый ядерный реактор является очень мощным управляемым источником антинейтрино, и учёные со всего мира изучают возможности использования этих частиц для мониторинга реакторов.

2 Регистрация антинейтрино

Впервые объявили о регистрации антинейтрино в 1956 году. Два американца Фредерик Райнес и Клайд Коуэн на одном из первых ядерных реакторов в Саванна Ривере провели эксперимент и зарегистрировали новую частицу – нейтрино. По окончании экспериментов выяснилось, что, на самом деле, они зарегистрировали именно антинейтрино, которое возникает в β^- -распаде. Свидетельством существования антинейтрино явилось наблюдение реакции обратного β -распада:

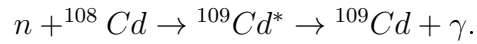


Эти частицы впервые были обнаружены в результате их взаимодействия с протонами в большом резервуаре с водой. Он был установлен рядом с ядерным реактором в качестве управляемого источника антинейтрино. Также необходимо отметить, что реакция обратного β -распада является пороговой, в связи с этим регистрируются антинейтрино с энергией больше 1,8 МэВ.

Из реакции очевидно, что позитрон быстро аннигилирует с электроном, что образует два гамма-кванта, которые можно зарегистрировать:

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma.$$

Кроме этого, так же возможно зарегистрировать нейтрон, используя кадмий, который при поглощении нейтрона переходит в возбужденное состояние, что снова вызывает гамма-излучение.



С помощью сцинтилляторов и фотоумножителей обе вспышки можно зафиксировать, что и позволило объявить о регистрации антинейтрино.

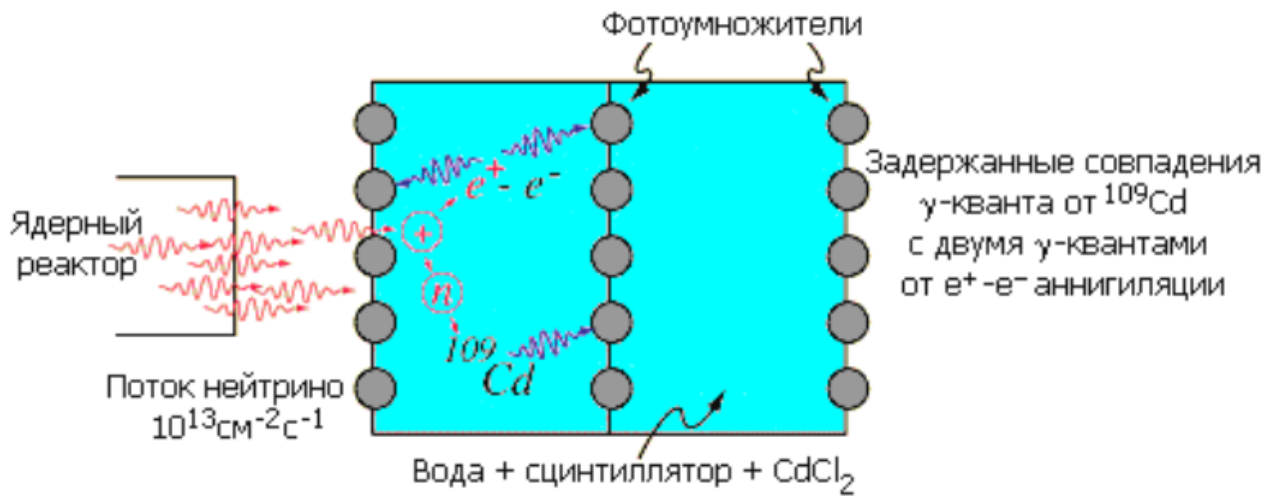


Рис. 1. Эксперимент в Саванна Ривер

После этого эксперимента исследователи со всего мира начали изучать антинейтрино и возможности прикладного применения этих частиц.

3 Компактные детекторы антинейтрино

Уже давно целью физиков в области нейтрино является создание компактных, мобильных (пригодных к перевозке) детекторов антинейтрино, и многие из таких устройств в настоящее время находятся в работе или разработке. Основная характеристика этих детекторов – практичность использования. Хотя их скорость захвата нейтрино ограничена их небольшими объемами, эти детекторы имеют преимущество в том, что работают в непосредственной близости от реакторов и могут быть быстро перемещены с одного объекта на другой в течение их активной жизни.

В данный момент существуют несколько проектов компактных детекторов антинейтрино: iDream (Россия), MiniCHANDLER (США), PANDA (Япония), PROSPECT (США), NuLat (США). Во всех этих детекторах, как и в эксперименте Ф. Райнеса и К. Коуэна в Саванна-Ривер, используется сцинтилляционный метод, который основан на обратном β -распаде. Главное преимущество этого метода: возможность использования разнообразных рабочих веществ.

3.1 iDream

Детектор-спектрометр реакторных антинейтрино iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring) создан совместными усилиями специалистов НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова и НИЦ Курчатовского института.

Цель создания опытного образца детектора антинейтрино iDREAM — демонстрация применения нейтринного метода в условиях промышленной АЭС с реакторами типа ВВЭР (Водо-Водяной Энергетический Реактор). Расчетная эффективность регистрации антинейтрино детектором iDREAM позволяет его размещать вне реакторного цеха на удалении 20–30 м от активной зоны реактора.

Адронная компонента космического излучения и, в частности, атмосферные нейтроны с энергиями несколько МэВ представляют основные источники фона детектора на поверхности. Поток нейтронов на поверхности составляет около $\Phi_0 \approx 15 \div 20 \text{ м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ в зависимости от состава поверхности, но быстро падает до величин $\sim 10^{-4} \text{ м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ на глубине ~ 20 м. в. э. (метров водного эквивалента) по экспоненциальному закону:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-(h/L)} \text{ нейтронов}/(\text{м}^2/\text{с}),$$

где h — толщина слоя в м. в. э., $L \sim 1,5$ м — средний пробег нейтронной компоненты.

Таким образом, для обеспечения оптимальных фоновых условий, соответствующих расположению детектора на глубинах больше $15 \div 20$ м. в. э., предпочтительно устанавливать детектор в нижних этажах здания АЭС.

В детекторе iDREAM используется два типа жидкого сцинтиллятора (с гадолинием и без него) и буферная жидкость, сделанные на основе ЛАБ российского производства. Общий объем жидкости около 3500 л.

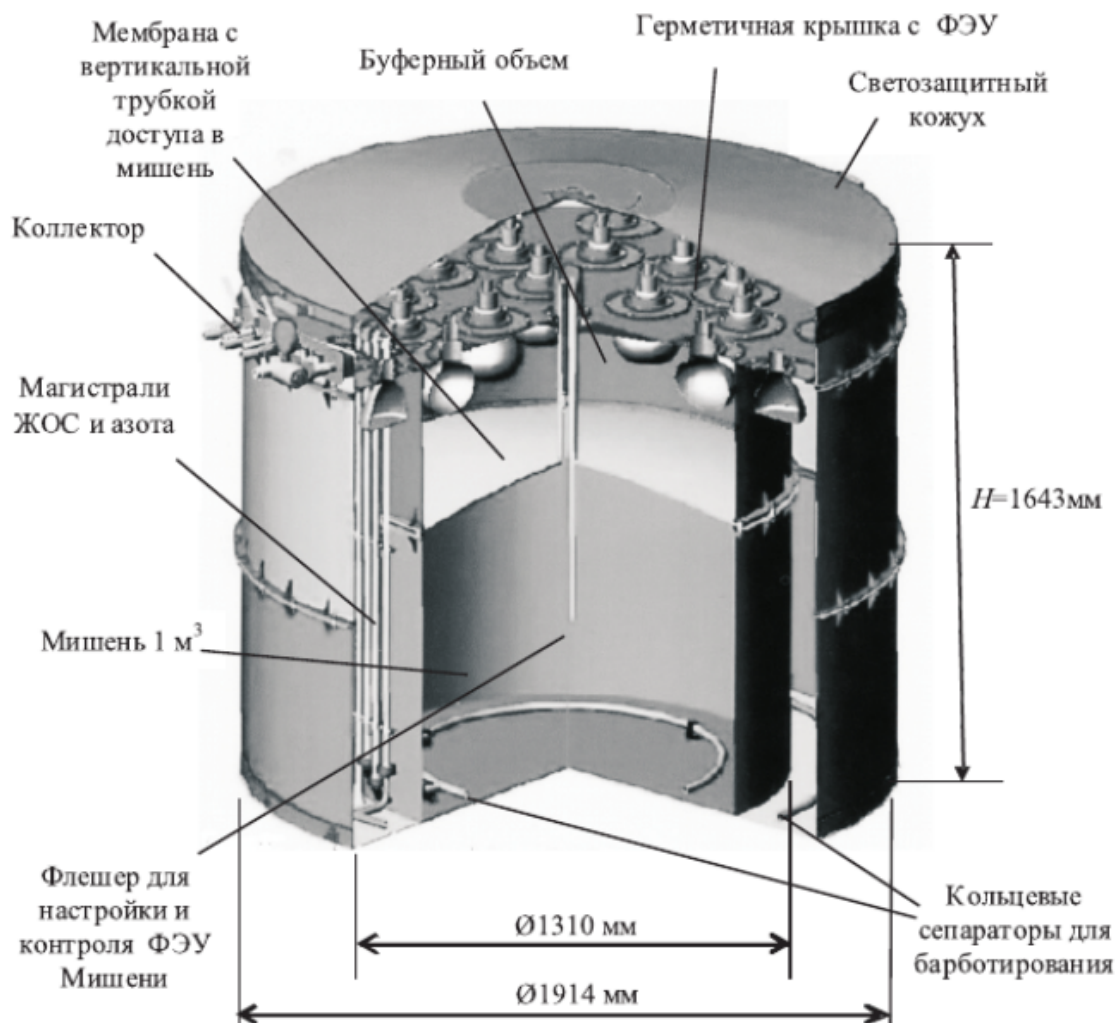


Рис. 2. Общий вид и конструкция детектора iDREAM

Детектор антинейтрино iDREAM готов к установке на АЭС и есть надежда, что совместными усилиями создавших его ученых и специалистов ГК Росатом, будет проведен демонстрационный эксперимент по мониторингу работы промышленного атомного реактора и измерению спектра реакторных антинейтрино, который даст новые экспериментальные данные для исследований фундаментальных свойств нейтрино, однако сейчас этот проект находится без движения.

3.2 MiniCHANDLER

Детектор антинейтрино весом 80 кг на основе твердого пластикового сцинтиллятора под названием MiniCHANDLER (Mini Carbon Hydrogen Anti-Neutrino Detector with a Lithium Enhanced Raghavan optical lattice) работал в течение почти трех месяцев на расстоянии 25 м от активной зоны теплового реактора мощностью 2,9 ГВт на АЭС в North Anna (г. Минерал, штат Вирджиния, США). Было сообщено об обнаружении сигнала антинейтрино в результате обратного β -распада без защитного барьера и минимального экранирования. Этот результат также демонстрирует, что трехмерная сегментация может

использоваться для значительного улучшения отношения сигнал / шум. Кроме того, это измерение представляет собой наблюдение позитронного спектра в небольшом детекторе с поверхностным развертыванием. Это наблюдение реакторных антинейтрино было достигнуто с помощью компактного детектора, установленного в обычном небольшом трейлере.

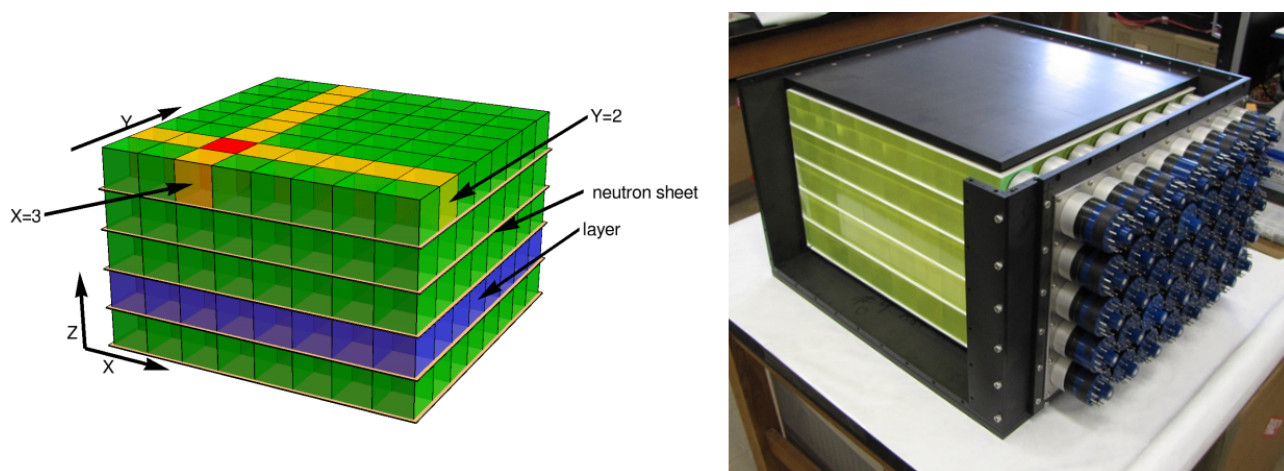


Рис. 3. Слева: Схема детектора MiniCHANDLER. Справа: Детектор MiniCHANDLER во время сборки, с одной открытой стороной, показывающий чередующиеся слои сдвига длины волны, пластмассовые кубы сцинтиллятора и нейтронные листы

Детектор MiniCHANDLER включает в себя электронику и вычислительную систему сбора данных DAQ (Data AcQuisition), которые были загружены в 14-футовый (4,27 м) трейлер, получивший название Mobile Neutrino Lab. В последствии он был оснащен тщательно продуманным бесшумным блоком питания, кондиционером и беспроводной связью, позволяющей полностью дистанционно управлять им. 15 июня 2017 года, после нескольких недель пусконаладочных работ и испытаний в компании Virginia Tech, прицеп был перевезен на атомную электростанцию North Anna в г. Минерал. Станция North Anna состоит из двух реакторов с водой под давлением, каждый из которых имеет лицензионную тепловую мощность 2940 МВт. Мобильная лаборатория "Нейтрино" была развернута рядом с реактором 2, на расстоянии около 25 м от центра активной зоны. В этом месте она находилась примерно в 90 м от активной зоны реактора 1, поэтому на нее приходилось около 7% нейтринных взаимодействий в детекторе.

3.3 PANDA

PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) – новый разработанный в Японии детектор антинейтрино сегментированного типа, состоящий из модулей, изготовленных из пластиковых сцинтилляторов, для применения в ядерной безопасности. Сами пластиковые сцинтилляционные стержни (10 см × 10 см × 100 см), обернуты алюминированными майларовыми пленками, покрытыми гадолинием Gd (4,9 мг Gd на см²) с краской, защищающей от нейтронов. Каждый бар соединён с акриловыми световодами и фотоумножителями на обоих концах (рис. 5). Фотоумножители Hamamatsu используются для обнару-

жения света, обеспечивая большую динамику обнаружения света от фотоэлектронного до нескольких МэВ и гарантируя эффективную коллекцию света.

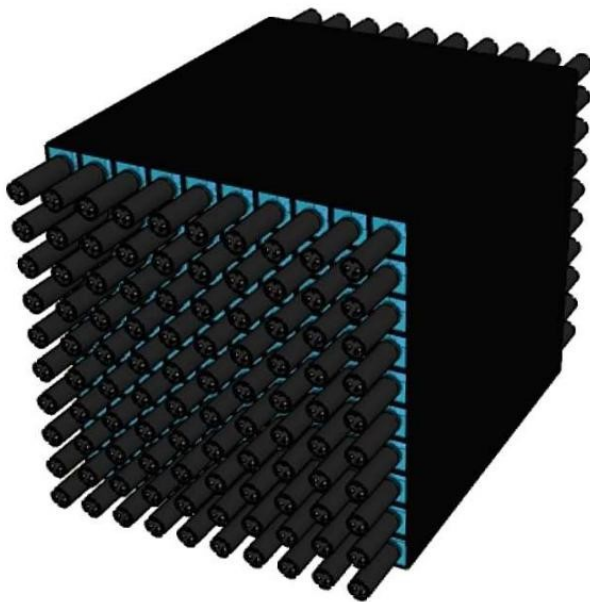


Рис. 4. Концептуальный дизайн детектора антинейтрино PANDA. Примерный общий размер цели – 1 м^3

Поскольку детектор имеет тонкую сегментированную структуру, становится возможным использовать информацию о топологии событий, чтобы пометить антинейтринные события и отличать их от фона. Тонкая сегментация детектора также дает возможность идентифицировать и отклонять проходящие пути, такие как мюоны космических лучей. В дополнение к относительно большому энергетическому запасу, проходящие мюоны характеризуются серией попаданий, распределенных по линии в детекторе.

Детектор PANDA является твердым и невоспламеняющимся. Его преимущества: он сравнительно мал, легко перевозится в фургоне и предназначен для мониторинга реактора снаружи.

3.4 NuLat

NuLat (the Neutrino Lattice) – новый детектор, расположенный на Гавайях (США), предназначенный для исследования электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$ в нескольких метрах от ядерного реактора. NuLat имеет оптическую решётку Рагхавана и состоит из 3375 борсодержащих пластиковых сцинтилляторов или ^6Li , границы кубических ячеек имеют воздушный зазор 0,127 мм, что приводит к полному внутреннему отражению сцинтилляционного света, помогая в восстановлении энергии. Каналирование света в трех измерениях позволяет реконструировать вершины как в пространстве, так и во времени. NuLat обеспечивает превосходное пространственное и энергетическое разрешение, позволяя проводить глубокие исследования топологии событий. Эти особенности позволяют различать сигналы обратного β -распада и схемы колебаний даже при наличии других фонов.

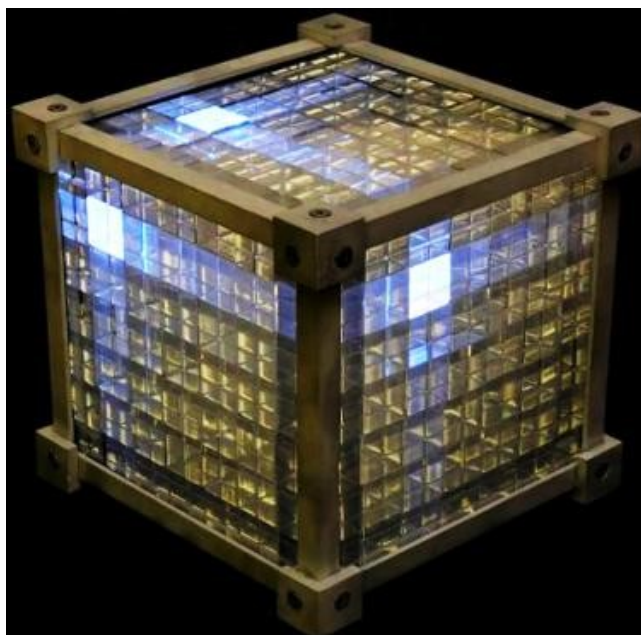


Рис. 5. Вид детектора NuLat

Конструкция NuLat включает матрицу $15 \times 15 \times 15$ кубов, содержащую 3375 кубов пластикового сцинтиллятора с ${}^6\text{Li}$, загруженного на 6,35 см, на расстоянии 0,25 мм друг от друга. Основой пластика для них является поливинилтолуол, который имеет показатель преломления равен 1,58. Для простоты конструкции в базовом варианте используются воздушные зазоры (критический угол равен 39°). Таким образом, ячейка внутри NuLat будет иметь подавляющее большинство света, идущего к шести фотоумножителям, которые его видят, с некоторым поглощением света. Полный комплект приборов потребует в общей сложности 1350 фотоумножителей и световодов LG. Световоды служат в качестве основного средства для соединения квадратного поперечного сечения каналов решетки с круглым фотокатодом. Считывание данных будет осуществляться при помощи быстродействующей электроники, разработанной в Гавайском университете в Маноа.

NuLat предлагает короткие базовые наблюдения антинейтрино из ядерных реакторов, позволяя глубже понять спектр нейтринных колебаний. Он также имеет приложения для специального мониторинга ядерных материалов и фоновых наблюдений вблизи реакторов. Его конструкция позволяет определять форму импульса и быстро реагировать на отбраковку фона.

3.5 PROSPECT

PROSPECT (the Precision Reactor Oscillation and Spectrum Experiment) – это американский мобильный детектор антинейтрино, покрывающий расстояния от 7 до 13 м от активной зоны изотопного реактора с высоким потоком. Он прощупывает наиболее подходящую точку для экспериментов по исчезновению электрона и предпочтительные области стерильного нейтринного параметра пространства. PROSPECT будет проверять происхождение спектральных отклонений, наблюдаемых в последних экспериментах, искать

стерильные нейтрино, и обращаться к гипотезе стерильных нейтрино как к объяснению аномалии реактора. PROSPECT предназначен как для точного измерения спектра анти-нейтрино от высокообогащенного уранового реактора, так и для зондирования стерильных нейтрино в электронно-волновом масштабе путем поиска нейтринных осцилляций по метровым базовым линиям. PROSPECT использует сегментированный 6-литровый жидкостный сцинтилляционный детектор для эффективного обнаружения электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$ через обратную реакцию β -распада.

PROSPECT устанавливается в экспериментальной комнате HFIR (High Flux Isotope Reactor) на уровне земли, на один этаж выше активной зоны и резервуара HFIR, как показано на рис.7. Бетонная стена толщиной в один метр отделяет помещение от бассейна с реактором. Номинальный уровень воды в бассейне составляет 3,1 м над центром детектора. Часть детектора опирается на твердый, многоугольной, бетонный монолит, окружающий и поддерживающий бассейн и конструкцию реактора. Остальная часть детектора опирается на стальной бетонный пол толщиной 0,15 м над большой комнатой, в которой проводилось множество экспериментов по рассеянию тепловых нейтронов и линий пучка холодных нейтронов. Железобетонная кровля толщиной 0,20 м находится на высоте 5,5 м над центром детектора.

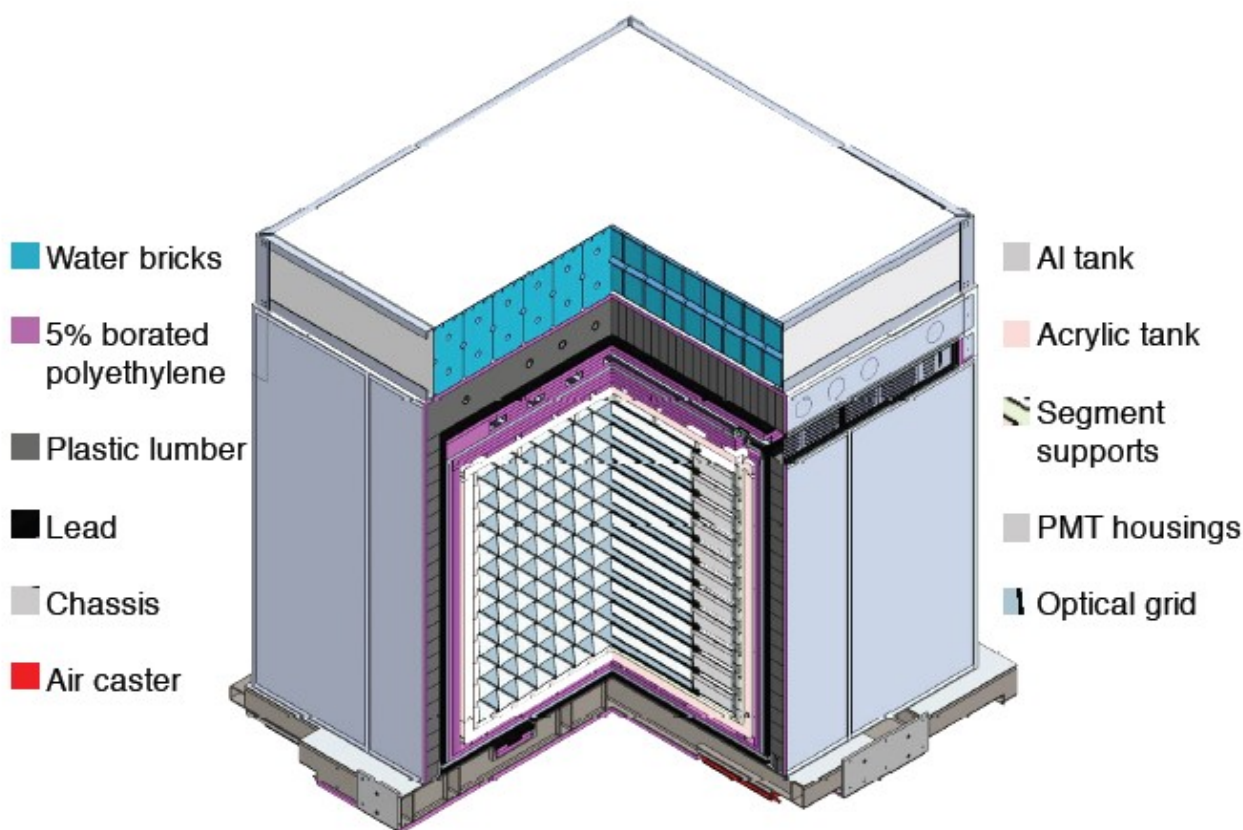


Рис. 6. Трёхмерное изображение детектора и модели сборки экрана

4 Вывод

Достижения в области экспериментальных методов обнаружения антинейтрино, хорошо отработанные и ставшие доступными благодаря большим детекторам антинейтрино, привели к разработке компактных, недорогих детекторов. Ключевые особенности этих детекторов включают относительную портативность и практичность использования. Хотя их скорость захвата антинейтрино ограничена их небольшими объемами, эти детекторы имеют преимущество в том, что они работают в непосредственной близости от реакторов и перемещаются и передислоцируются в течение периода их гарантированной эксплуатации.

Компактные детекторы антинейтрино применяются для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области физики нейтрино и изучения уникальных свойств нейтрино (несмотря на прогресс в нейтринной физике, многие свойства нейтрино пока остаются неизвестными). К ним можно отнести абсолютную массу покоя этой частицы, тип (дираковская или майорановская), количество поколений. Законы сохранения и фундаментальные симметрии также нуждаются в проверке. Все эти вопросы требуют глубокого исследования физических свойств и природы нейтрино, а компактные детекторы призваны решить все проблемы в этой области.

Также компактные детекторы антинейтрино используются для мониторинга ядерных реакторов. Это уже было продемонстрировано на энергетических реакторах в России, США и Японии с помощью детекторов, специально разработанных для мониторинга реактора и гарантий нераспространения. Поскольку мощность реактора велика, идущий из него нейтринный поток огромен. Поэтому если рядом с реактором, на расстоянии нескольких метров, поставить компактный детектор антинейтрино, то он, даже при всей неуловимости этих частиц, сможет регистрировать их сотнями в сутки и отслеживать работу реактора в реальном времени. Эта существующая возможность мониторинга может оказаться полезной в контексте режима гарантий Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

Благодаря детекторам, элементарные частицы продолжают давать новое и захватывающее понимание физики. Продолжение работ по усовершенствованию существующих компактных детекторов антинейтрино и созданию новых имеет огромное значение для развития науки.

5 Список литературы и ссылки

1. [http : //uzmu.phys.msu.ru/file/2019/3/1930408.pdf](http://uzmu.phys.msu.ru/file/2019/3/1930408.pdf) А.С. Чепурнов “Спектрометр реакторных антинейтрино iDREAM для прикладных и фундаментальных исследований”.
2. [http : //nuclphys.sinp.msu.ru/antimatter/ant05.html](http://nuclphys.sinp.msu.ru/antimatter/ant05.html) “Нейтрино. Антинейтрино”.
3. [https : //arxiv.org/pdf/1808.00097.pdf](https://arxiv.org/pdf/1808.00097.pdf) J. Ashenfelter, A.B. Balantekin, C. Baldenegro, H.R. Band, C.D. Bass , D.E. Bergeron, D. Berish , L.J. Bignell, N.S. Bowden, J. Boyle, J. Bricco, J.P. Brodsky, C.D. Bryan, A. Bykadorova Telles, J.J. Cherwinka, T. Classen, K. Commeford, A.J. Conant, A.A. Cox, D. Davee, D. Dean, G. Deichert, M.V. Diwan, M.J. Dolinski, A. Erickson, M. Febbraro, B.T. Foust, J.K. Gaison, A. Galindo-Uribarri, C.E. Gilbert, K.E. Gilje, A. Glenn, B.W. Goddard, B.T. Hackett, K. Han, S. Hans, A.B. Hansell, K.M. Heeger, B. Heffron, J. Insler, D.E. Jaffe, X. Ji, D.C. Jones, K. Koehler, O. Kyzlyova, C.E. Lane, T.J. Langford, J. LaRosa, B.R. Littlejohn, F. Lopez, X. Lu, D.A. Martinez Caicedo, J.T. Matta, R.D. McKeown, M.P. Mendenhall, H.J. Miller, J.M. Minock, P.E. Mueller, H.P. Mumm, J. Napolitano, R. Neilson, J.A. Nikkel, D. Norcini, S. Nour, D.A. Pushin, X. Qian, E. Romero-Romero, R. Rosero, D. Sarenac, B.S. Seilhan, R. Sharma, P.T. Surukuchi , C. Trinh, M.A. Tyra, R.L. Varner, B. Viren, J.M. Wagner, W. Wang, B. White, C. White, J. Wilhelmi, T. Wise, H. Yao, M. Yeh, Y.-R. Yen, A. Zhang, C. Zhang, X. Zhang, M. Zhao “The PROSPECT Reactor Antineutrino Experiment”.
4. [https : //sci-hub.tw/10.1080/08929882.2010.529785](https://sci-hub.tw/10.1080/08929882.2010.529785) A. Bernstein, G. Baldwin, B. Boyer, M. Goodman, J. Learned, J. Lund, D. Reyna, and R. Svoboda “Nuclear Security Applications of Antineutrino Detectors: Current Capabilities and Future Prospect”.
5. [https : //iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1216/1/012011/pdf](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1216/1/012011/pdf) R. Dorrill “NuLat: A Compact, Segmented, Mobile Anti-neutrino Detector”.
6. [https : //arxiv.org/abs/1812.02163](https://arxiv.org/abs/1812.02163) A. Haghghat, P. Huber, S. Li, J.M. Link, C. Mariani, J. Park, T. Subedi “Observation of Reactor Antineutrinos with a Rapidly-Deployable Surface-Level Detector”.
7. [https : //arxiv.org/pdf/1206.6566.pdf](https://arxiv.org/pdf/1206.6566.pdf) Y. Kuroda, S. Oguri, R. Nakata, Y. Kato, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa “A mobile antineutrino detector with plastic scintillators”.