

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

«МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА АНТИНЕЙТРИНО В ДЕТЕКТОРЕ  
iDREAM»

Выполнил студент  
413 группы  
Акунец Илья Сергеевич

---

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н. Чепурнов Александр Сергеевич

---

Допущен к защите  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

МОСКВА

2022

# Оглавление

Введение . . . . .	3
1. Нейтрино . . . . .	5
1.1. Теоретическое введение . . . . .	5
1.2. Открытие и регистрация антинейтрино . . . . .	6
1.3. Реакция обратного бета-распада . . . . .	7
2. Детектор iDREAM . . . . .	10
3. Компактные детекторы антинейтрино . . . . .	13
3.1. MiniCHANDLER . . . . .	13
3.2. PANDA . . . . .	15
3.3. NuLat . . . . .	16
3.4. NEOS . . . . .	18
3.5. Nucifer . . . . .	19
3.6. PROSPECT . . . . .	20
3.7. Применение компактных детекторов . . . . .	22
4. Спектр реакторных антинейтрино . . . . .	23
4.1. Теоретическое определение спектра реакторных антинейтрино	23
4.2. Эксперименты по измерению спектра реакторных антинейтрино	25
4.2.1. Double Chooz . . . . .	25
4.2.2. Daya Bay . . . . .	27
4.2.3. RENO . . . . .	28
4.3. Плечо в спектрах реакторных антинейтрино . . . . .	30
5. Моделирование спектра реакторных антинейтрино для Калининской АЭС . . . . .	33

6. Выводы . . . . .	38
Заключение . . . . .	39
Список литературы . . . . .	40

## ВВЕДЕНИЕ

Ядерные реакторы являются интенсивными, регулируемыми источниками низкоэнергетических антинейтрино. Они часто используются в исследованиях фундаментальных свойств нейтрино, и так же продолжают играть эту роль в ближайшем будущем. Поэтому очень важно более детально изучить спектр антинейтрино от реакторов и смоделировать его. Точное знание этого спектра имеет важное значение для исследований нейтринных осцилляций и мониторинга ядерных реакторов. Новые эксперименты также позволят изучить, так называемую, «реакторную аномалию» и возможное происхождение, так называемого, "плеча наблюдаемого в спектрах антинейтрино, измеренных в недавних экспериментах на реакторах с большой статистикой.

Промышленный детектор iDREAM предназначен для мониторинга режимов работы (тепловой мощности и режима останковки) атомных реакторов нейтринным методом и для оценки накопления радионуклидов в топливе. Измерения на детекторе планируют проводить непрерывно в течении всей кампании реактора на Калининской АЭС. Для более совершенного контроля работы реактора необходимо моделирование спектра антинейтрино.

Для прецизионных реакторных нейтринных исследований важно точное знание потока и спектра реакторных нейтрино. Этот вопрос стал более актуальным после переоценки спектров, которая привела к пересмотру в сторону увеличения ожидаемого сигнала реакторного антинейтрино на 6%. Эти пересмотры показали, что во многих экспериментах по измерению спектра антинейтрино не хватает примерно 6% сигнала, независимо от расстояния от реактора, начиная с  $L \geq 10$  м [1]. Этот недостаток стал известен как "реакторная аномалия" и

был интерпретирован как возможное указание на существование дополнительного, четвертого, обязательно стерильного, легкого нейтрино с массой, которое становится наблюдаемым через субдоминантное смешивание с активными нейтрино. Если это подтвердится, то это будет открытием фундаментальной важности. Интерпретация этой аномалии при помощи стерильного нейтрино зависит от точности измерения ожидаемого потока электронных антинейтрино реактора, поэтому так важно точно знать спектр антинейтрино при различных условиях.

Для этого необходимо моделирование спектра антинейтрино для детектора iDREAM и сравнение его с экспериментальными спектрами.

В первой главе рассказывается о нейтрино, об эксперименте по его открытию и о реакции обратного бета-распада, которая используется в детекторе iDREAM и позволяет изучить свойства нейтрино.

Вторая глава посвящена компактному детектору iDREAM и его свойствам.

Третья глава включает в себя описания других компактных детекторов, которые, наряду с iDREAM, служат для изучения потока нейтрино на короткой базе и мониторинга реакторов, рядом с которыми они были размещены.

В четвёртой главе рассматриваются теоретическое определение и эксперименты по измерению спектра реакторных антинейтрино, а также фундаментальные и прикладные вопросы, которые могут быть решены через исследование реакторных антинейтрино.

В пятой главе представлены результаты моделирования спектра реакторных антинейтрино в детекторе iDREAM, установленного на Калининской АЭС.

В заключении даётся краткое описание полученных результатов и делаются выводы.

## 1. Нейтрино

### 1.1. Теоретическое введение

Нейтрино и антинейтрино – это элементарные субатомные частицы со спином  $s = \frac{1}{2}$  и без электрического заряда. Существуют три различных типа нейтрино: электронное ( $\nu_e$ ), мюонное ( $\nu_\mu$ ) и тау-нейтрино ( $\nu_\tau$ ). Нейтрино и антинейтрино являются частью лептонного семейства частиц, что означает, что они не участвуют в сильном взаимодействии.

Физика нейтрино бурно развивается. За последние десятилетия были сделаны важные открытия в этой области физики, самое значимое из которых – это регистрация явления нейтринных осцилляций. Явление нейтринных осцилляций – переход нейтрино одного типа (электронного, мюонного или тау-нейтрино) в нейтрино других типов активно исследовалось в последние два десятилетия и неоднократно наблюдалось в различных экспериментах. При помощи детекторов подтвердилась гипотеза о наличии массы у нейтрино, например, на данный момент известно, что для электронного нейтрино  $\nu_e$  нижняя граница массы определена как 0,25 эВ, а верхняя равна 1 эВ.

Антинейтрино взаимодействуют с другой материей только через гравитационные и слабые силы, что затрудняет их экспериментальное обнаружение. Также антинейтрино (как и нейтрино) имеет маленькое сечение реакции обратного бета-распада ( $\sigma \approx 10^{-43} \text{ см}^2$ ), что позволяет им проходить сквозь материалы почти беспрепятственно, давая нам окна в процессы, происходящие в космосе, а также внутри земных экспериментов.

Общей особенностью продуктов деления является избыток нейтронов. Нестабильный фрагмент деления с избытком нейтронов подвергается  $\beta^-$ -распаду, при котором нейтрон превращается в протон, электрон и электронное антинейтрино:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e.$$

Поэтому каждый ядерный реактор является очень мощным управляемым источником антинейтрино, а моделирование спектра антинейтрино поможет учёным использовать эти частицы для мониторинга реакторов.

## 1.2. Открытие и регистрация антинейтрино

Существование нейтрино было предложено Паули еще в 1930 году, чтобы решить очевидную в то время проблему несохранения энергии и углового момента в ядерном бета-распаде. Однако доказательства того, что нейтрино являются реальными частицами, пришлось ждать. 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  $\beta^{-}$ -распаде. Свидетельством существования антинейтрино явилось наблюдение реакции обратного  $\beta$ -распада:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^{+}.$$

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  $\beta$ -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.

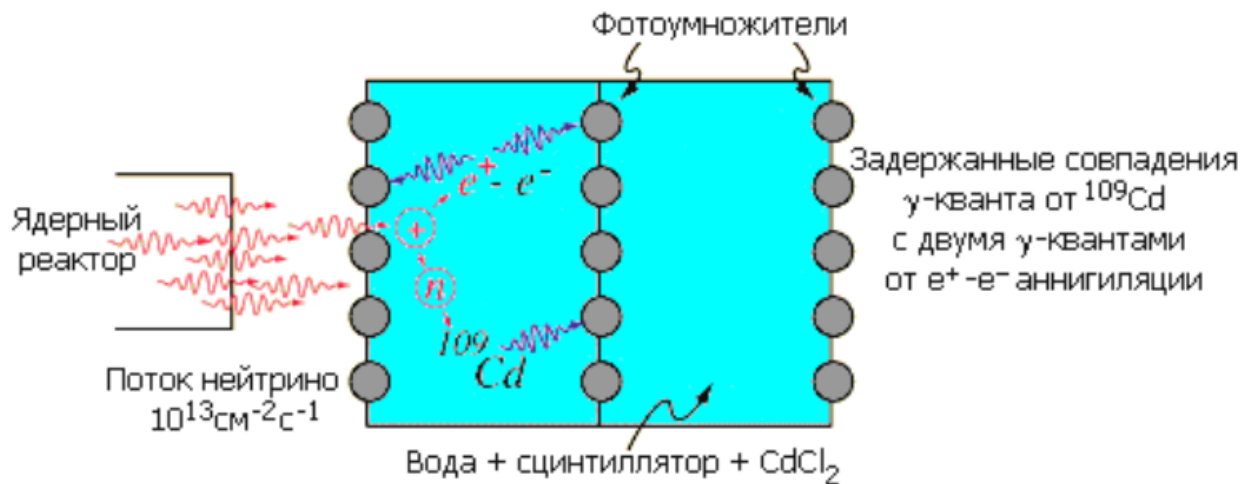


Рис. 1.1: Эксперимент в Саванна Ривер

Именно такая экспериментальная методика легла в основу множества экспериментов по изучению электронного антинейтрино.

### 1.3. Реакция обратного бета-распада

Регистрация потока антинейтрино, позволяющая измерить число ядер, испытавших деление и бета-распад в реакторе, осуществляется путем захвата антинейтрино протонами мишени. Такой процесс называется реакцией обратного бета-распада, в ходе которой образуются продукты, которые хорошо регистрируются сцинтиляционными детекторами. Рисунок 1.2. иллюстрирует процесс захвата антинейтрино с последующим образованием позитрона и нейтрона.



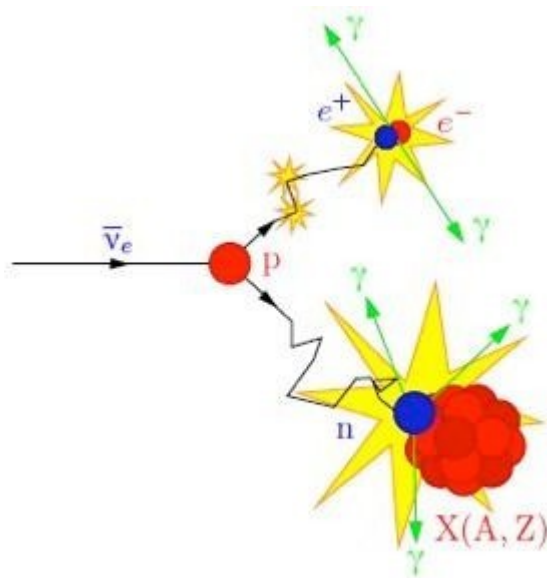


Рис. 1.2: Схема реакции обратного бета-распада

Поскольку сечение реакции обратного бета-распада при энергиях реакторных антинейтрино (до 10 МэВ) составляет  $\sigma \sim 10^{-43}$  см<sup>2</sup>, то для эффективной регистрации вещество мишени должно содержать как можно большее количество протонов. Для удовлетворения данного требования наиболее подходящими являются жидкие органические сцинтилляторы, обладающие хорошей прозрачностью и состоящие из большого числа химических соединений водорода и углерода, а также имеющие большой световыход.

Рассматриваемая реакция является пороговой.

$$E_{thr.real} = \frac{(m_n + m_e)^2 - m_p^2}{2m_p} = 1,806 \text{ МэВ},$$

где  $m_e = 0.511$  МэВ – масса электрона,  $m_p = 938.272$  МэВ – масса протона,  $m_n = 939.565$  МэВ – масса нейтрона

Чтобы антинейтрино из реактора провзаимодействовало с протоном вещества мишени детектора, его энергия должна быть выше полученного порога.

Характерный спектр антинейтрино, вылетевших из реактора, имеет вид, представленный на рис.1.3:

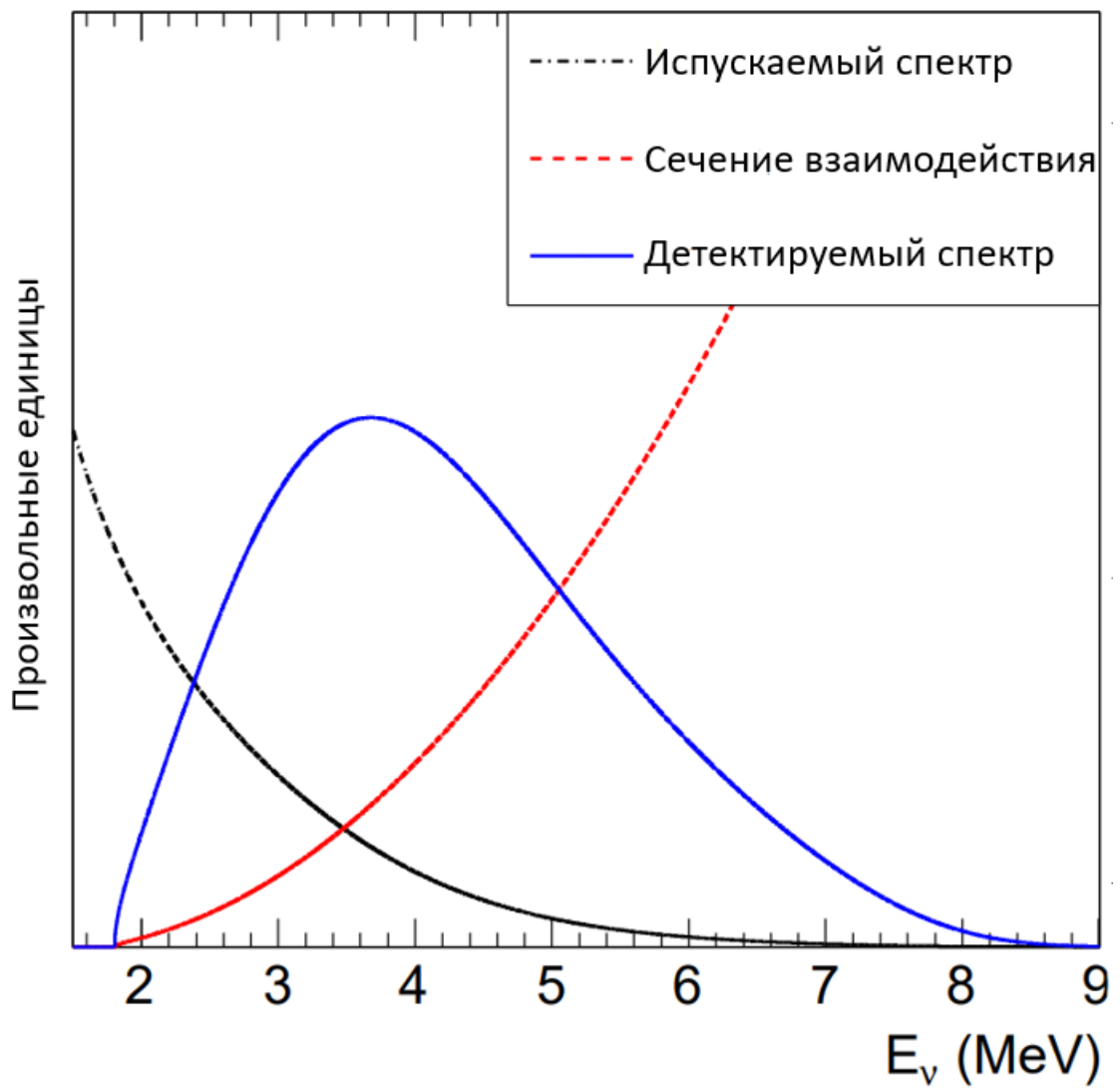


Рис. 1.3: Характерный спектр антинейтрино

Спектр реакторных антинейтрино простирается до примерно 10 МэВ.

## 2. Детектор iDREAM

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. Поскольку мощность реактора велика, идущий из него нейтринный поток огромен. Поэтому если рядом с реактором, на расстоянии нескольких метров, поставить нейтринный детектор, то он, даже при всей неуловимости нейтрино, сможет регистрировать их тысячами 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). Одним из таких детекторов является детектор iDREAM русского производства.

Промышленный 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 [2].

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 15-30 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  $\sim 20$  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 3500л.

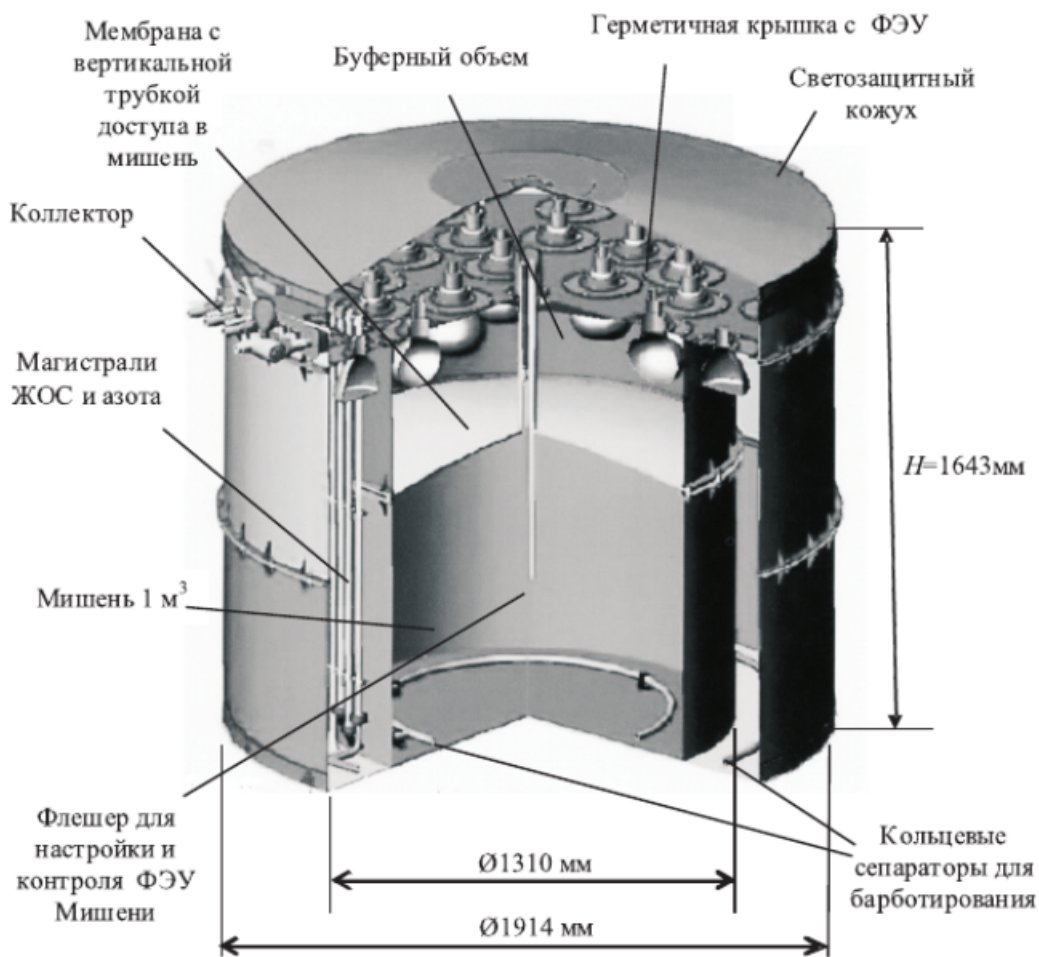


Рис. 2.1: Общий вид и конструкция детектора iDREAM

Ввод детектора антинейтрино iDREAM, установленного в зале на уровне земли, в 20 м от активной зоны реактора на Калининской АЭС, в эксплуатацию был завершён летом 2021 года [3]. Сейчас детектор антинейтрино iDREAM готов к экспериментам по мониторингу работы промышленного атомного реактора и измерению спектра реакторных антинейтрино, который даст новые экспериментальные данные для исследований фундаментальных свойств нейтрино.

### 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. В этой главе представлены различные компактные детекторы похожие на детектор iDREAM, со своими характеристиками и преимуществами. Все они предназначены, как для мониторинга реакторов рядом с которыми они расположены, так и для измерения спектра антинейтрино от АЭС.

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. Такие детекторы используют для мониторинга работы реакторов и измерения спектра антинейтрино на ближней базе.

В данный момент существуют несколько проектов компактных детекторов антинейтрино: iDREAM (Россия), PANDA (Япония), MiniCHANDLER (США), NuLat (США), NEOS (Южная Корея), PROSPECT (США) и другие. Во всех этих детекторах, как и в эксперименте Ф. Райнеса и К. Коуэна в Саванна-Ривер, используется сцинтилляционный метод, который основан на обратном  $\beta$ -распаде.

#### 3.1. 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  $\beta$ -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 [4].

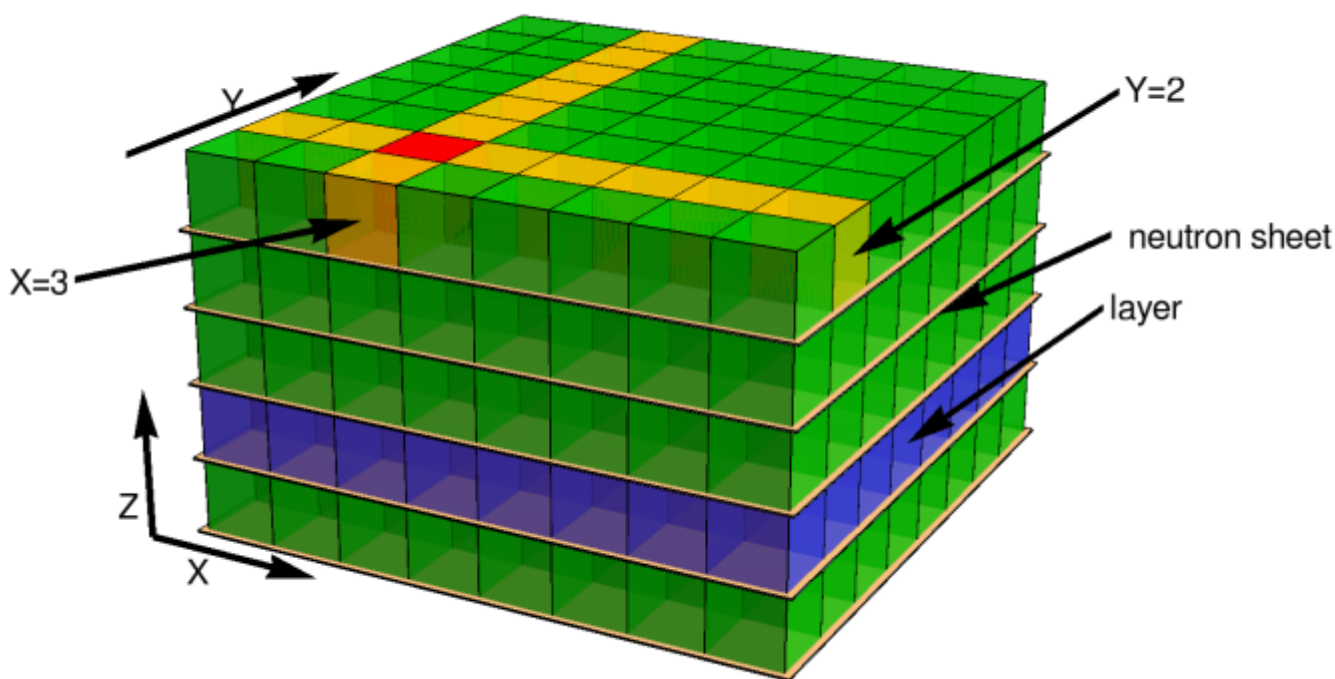


Рис. 3.1: Слева: Схема детектора MiniCHANDLER. Справа: Детектор MiniCHANDLER во время сборки, с одной открытой стороной, показывающий чередующиеся слои сдвига длины волны, пластмассовые кубы сцинтиллятора и нейтронные листы.

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, 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.

### 3.2. PANDA

PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detector Array) – новый сделанный 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 см<sup>2</sup>) с краской, защищающей от нейтронов. Каждый бар соединён с акриловыми световодами и фотоумножителями на обоих концах (рис. 3.2.). Фотоумножители Hamamatsu используются для обнаружения света, обеспечивая большую динамику обнаружения света от фотоэлектронного до нескольких МэВ и гарантируя эффективную коллекцию света [5].



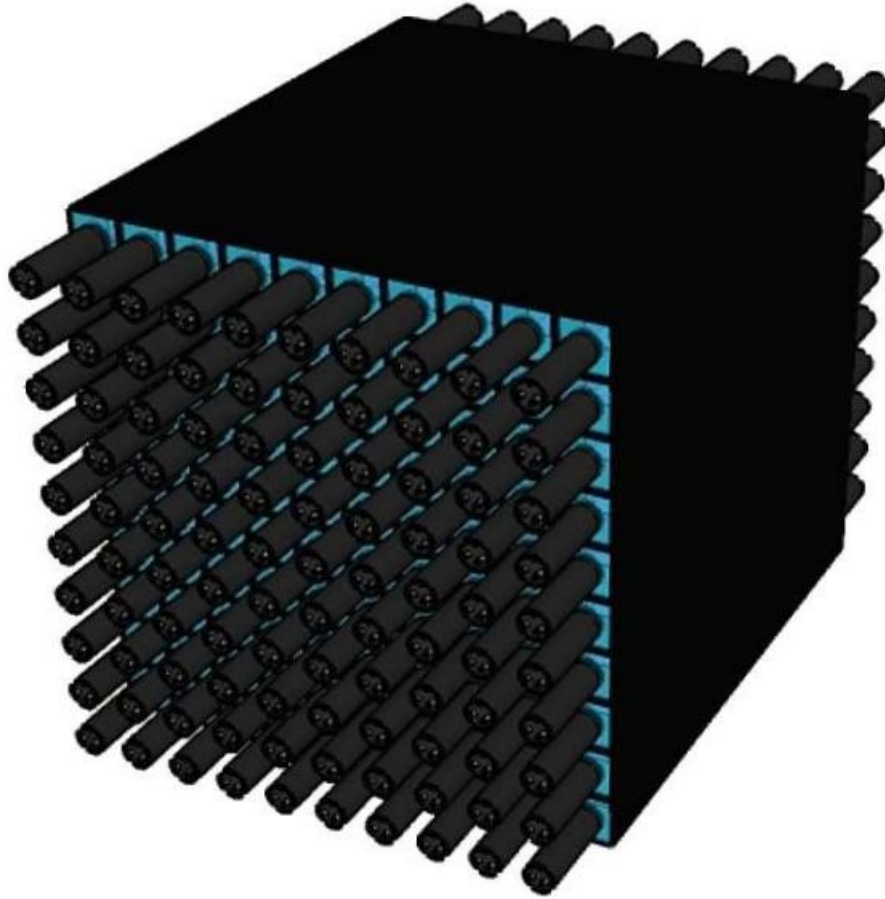


Рис. 3.2: Концептуальный дизайн детектора антинейтрино PANDA. Примерный общий размер цели –  $1 \text{ м}^3$

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.

### 3.3. 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  $6\text{Li}$ , границы кубических ячеек имеют воздушный зазор 0,127 мм, что приводит к полному внутреннему отражению сцинтилляционного света, помогая в восстановлении энергии. Канализование 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  $\beta$ -распада и схемы колебаний даже при наличии других фонов [6].

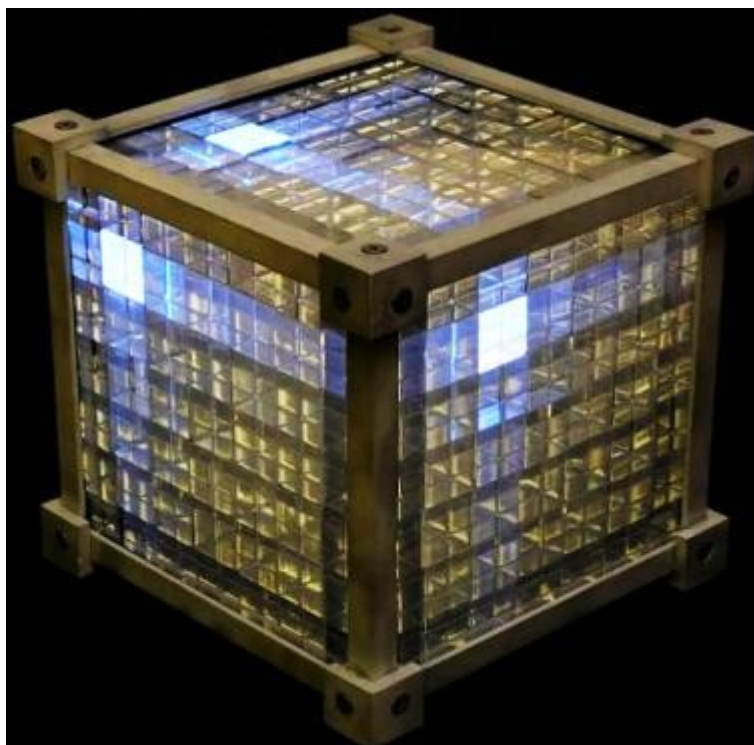


Рис. 3.3: Вид детектора NuLat

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  $39^\circ$ ). 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.

#### 3.4. NEOS

Детектор NEOS (NEutrino Oscillation at Short baseline) установлен в реакторном блоке АЭС "Ханбит расположенном в Йонгване, Южная Корея. NEOS изучает поведение реакторной нейтринной осцилляции на коротких расстояниях. Детектор ежедневно получает около 2 000 событий обратного бета-распада с момента стабилизации его работы. Тепловая мощность активной зоны реактора составляет 2,8 ГВт, диаметр - 3,1 м, высота - 3,8 м. Расстояние между активной зоной реактора и детектором составляет около 24 м [7].

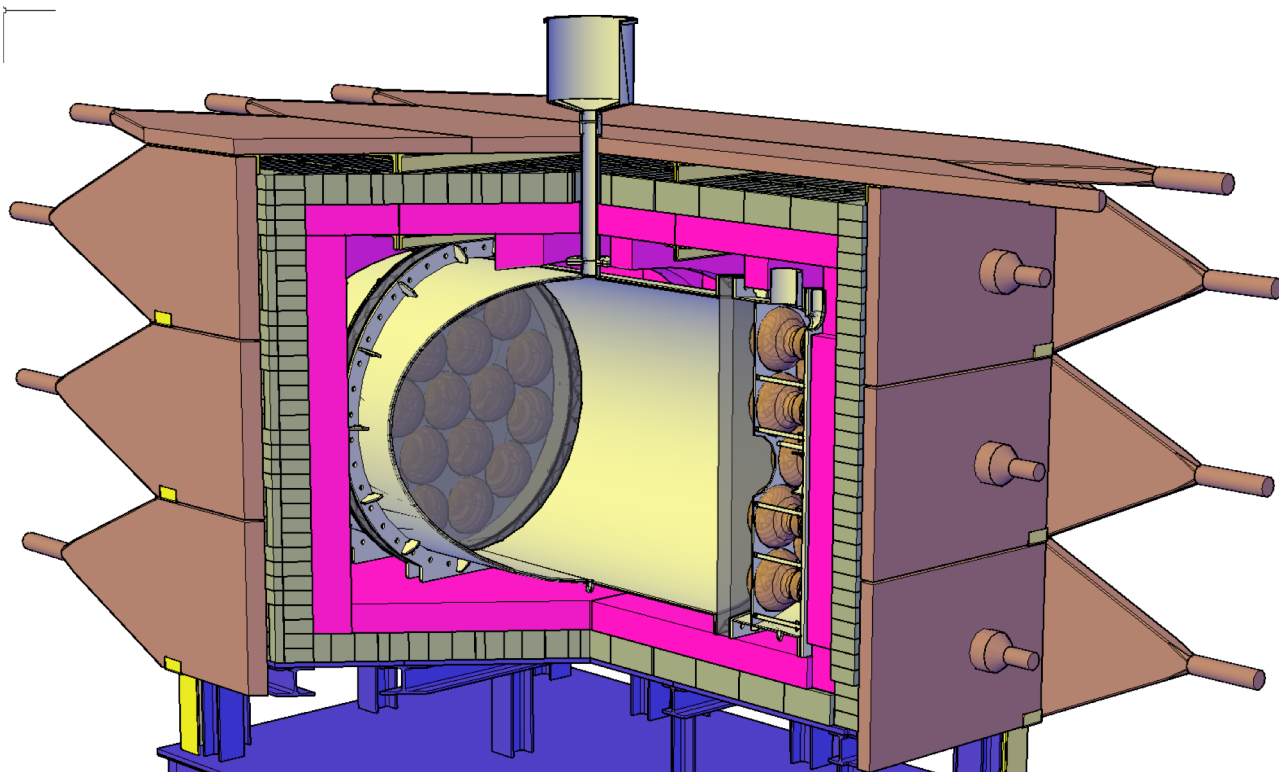


Рис. 3.4: Вид детектора NEOS

Детектор состоит из активной мишени, двух буферных емкостей, экранов и мюонных детекторов, как показано на рисунке №3.4. Активная мишень находится в цилиндрическом резервуаре объемом 1000 л с гадолиниевым жидким сцинтиллятором. По обе стороны от мишени находятся две буферные емкости, заполненные минеральным маслом, а в каждой буферной емкости установлены девятнадцать 8-дюймовых фотоумножителей.

### 3.5. Nucifer

Nucifer – это французский компактный детектор, проводящий измерения потока антинейтрино, развернутый на расстоянии всего 7,2 м от активной зоны реактора Osiris, работающего на тепловой мощности 70 МВт, для поиска стерильных нейтрино. Объем детектора составляет  $0.8\text{ м}^3$ . Детектор работает дистанционно на небольшой глубине, эквивалентной 12 м воды, и в условиях интенсивного радиационного фона. Скорость счета составила  $281 \pm 7$  (стат.)  $\pm 18$  (сист.) событий в день при расчетной величине  $277 \pm 23$  событий в день [8].

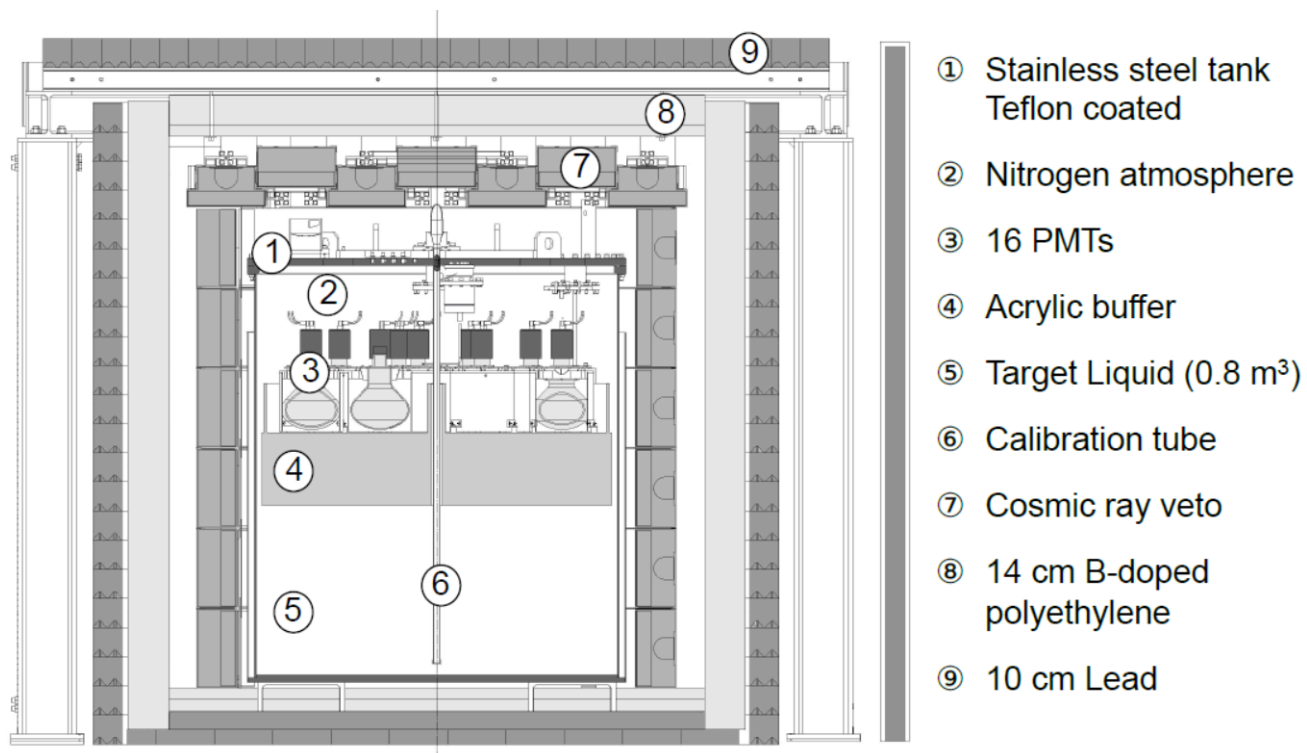


Рис. 3.5: Вид в разрезе на детектор Nucifer. Общий объем составляет около  $3 \times 3 \times 2.4 \text{ м}^3$

Жидкий сцинтиллятор находится в цилиндрическом сосуде из нержавеющей стали (высота 1404,2 мм, диаметр 1250,4 мм). Внутренняя поверхность этого сосуда покрыта отражающим белым тефлоном, выбранным за его химическую совместимость с жидким сцинтиллятором, а также для увеличения сбора видимого света. Резервуар содержит 846,8 л жидкого гадолиниевого сцинтиллятора для усиления захвата тепловых нейтронов и регистрации нейтронного захвата.

### 3.6. 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 антинейтрино 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 антинейтрино через обратную реакцию  $\beta$ -распада [9].

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. 3.5. 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.

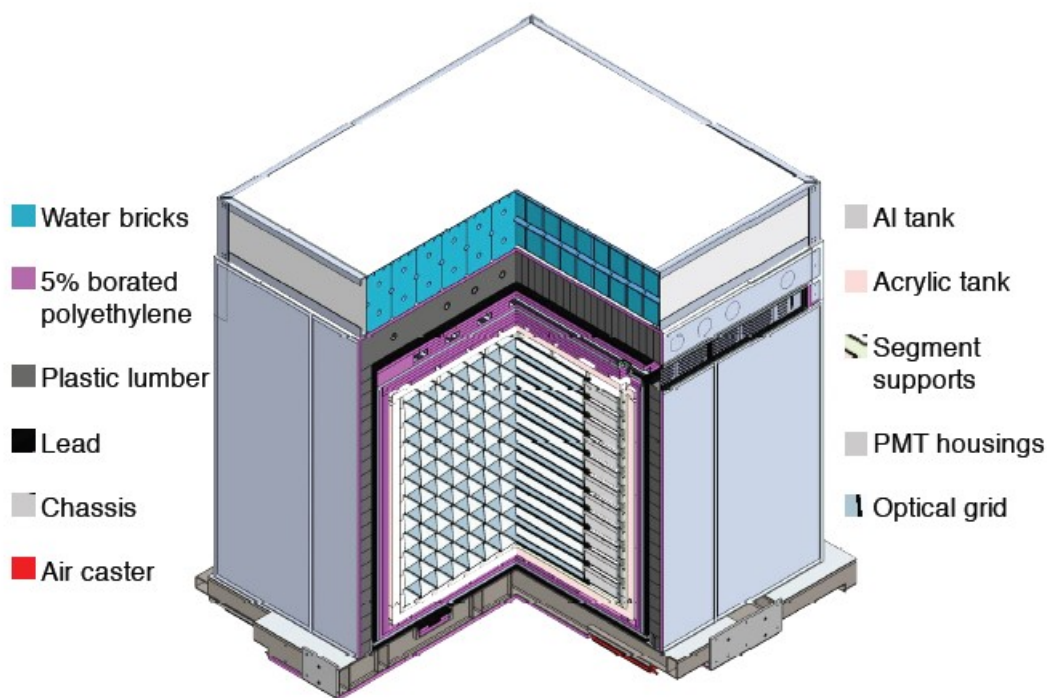


Рис. 3.6: Трёхмерное изображение детектора PROSPECT

### 3.7. Применение компактных детекторов

Все вышеперечисленные детекторы используются или использовались для мониторинга ядерных реакторов. Также их применение заключается в том, что данные детекторы можно установить в любую точку рядом с любым реактором и, тем самым, измерять спектр антинейтрино на небольших расстояниях от самих реакторов. Далее полученный экспериментальным методом спектр можно сравнивать с смоделированным, чтобы делать выводы о свойствах нейтрино и реактора.

## 4. Спектр реакторных антинейтрино

### 4.1. Теоретическое определение спектра реакторных антинейтрино

Полный спектр  $S(E_{\bar{\nu}_e})$  складывается из парциальных [10]. Обозначив через  $R$  полную скорость деления в рассматриваемом реакторе (число делений в единицу времени), имеем

$$S(E_{\bar{\nu}_e}) = R\Delta(E_{\bar{\nu}_e}),$$

где  $\Delta(E_{\bar{\nu}_e})$  - полный спектр, нормализованный на один акт деления, и

$$\Delta(E_{\bar{\nu}_e}) = \sum_{i=1}^4 f_i \lambda_i(E_{\bar{\nu}_e}).$$

$\lambda_i(E_{\bar{\nu}_e})$  и  $f_i$  есть соответственно парциальный спектр и доля от полного числа делений, которая приходится на  $i$ -ый изотоп из четырёх представленных ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ )

Номинальную тепловую мощность реактора  $P_{\text{теп}}$  можно записать двумя способами:

$$P_{\text{теп}} = R\langle Q \rangle = \sum_{i=1}^4 f_i Q_i$$

$$P_{\text{теп}} = \frac{P_i}{p_i} = \frac{R f_i Q_i}{p_i}$$

где  $\langle Q \rangle$  есть средняя тепловая энергия (т.е. уже с учётом потерь), генерируемая на одно деление,  $Q_i$  - тепловая энергия, выделяемая на одно деление изотопа  $i$ ,  $P_i$  - тепловая мощность, возникающая при распаде  $i$ -го нуклида. Отсюда следует, что

$$p_i = \frac{f_i Q_i}{\sum_{i=1}^4 f_i Q_i}$$



Каждый спектр представить в виде экспоненты от полинома 5-го порядка:

$$\lambda_i(E_{\bar{\nu}_e}) = \exp\left(\sum_{p=1}^6 a_p^i E_{\bar{\nu}_e}^{p-1}\right)$$

Фактическая тепловая мощность получается умножением номинальной мощности на так называемый коэффициент использования установленной мощности  $K_{\text{КИУМ}}$  (сокр. КИУМ). Таким образом, спектр реакторных антинейтрино описывается следующей формулой:

$$S(E_{\bar{\nu}_e}) = P_{\text{теп}} K_{\text{КИУМ}} \sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{Q_i} \lambda_i(E_{\bar{\nu}_e})$$

Значения КИУМ для конкретных временных интервалов (месяц или год) берутся из базы данных МАГАТЭ.

Поток антинейтрино уменьшается при прохождении частицами расстояний от реакторов до детектора вследствие осцилляции. Учесть это явление можно, добавив ещё один множитель – вероятность выживания электронного антинейтрино  $P_{ee} = P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ . Мы проводим расчёт в приближении осцилляций в вакууме с учётом наличия трёх массовых состояний со следующим отношением разности квадратов масс:

$$\Delta m_{31}^2 \sim \Delta m_{32}^2 \gg \Delta m_{21}^2$$

В приближении осцилляций в вакууме вероятность выживания электронного антинейтрино есть:

$$P_{ee} = \sin^4 \theta_{13} + \cos^4 \theta_{13} \left(1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{1.267 \Delta m_{21}^2 l}{4E}\right)\right),$$

где  $\theta_{13}$  и  $\theta_{12}$  - углы смешивания,  $E$  - энергия антинейтрино,  $l$  - длина осцилляций.

Можно предположить, что длина осцилляций много меньше расстояния от реакторов до детектора, поэтому можно заменить последний член в скобках в выражении для  $P_{ee}$  средним значением. В результате, используя параметры осцилляции для вероятности выживания электронного антинейтрино при нормальной иерархии нейтринных масс имеем

$$\langle P_{ee} \rangle \approx \sin^4 \theta_{13} + \cos^4 \theta_{13} \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{12}\right) \approx 0.54$$

Делая поправку на протекание реальных осцилляций в веществе, далее будем использовать значение  $\langle P_{ee} \rangle = 0.55$  для потока реакторных антинейтрино в детекторе вне зависимости от энергии частиц.

Для сечения реакции обратного бета-распада (ОБР)  $\sigma_{\text{ОБР}}(E_{\bar{\nu}_e})$  используется приближённая формула:

$$\sigma_{\text{ОБР}}(E_{\bar{\nu}_e}) = 10^{-43} \text{ см}^2 * p_e E_e E_{\bar{\nu}_e}^{-0.07056+0.02018 \ln E_{\bar{\nu}_e} - 0.001953 \ln^3 E_{\bar{\nu}_e}},$$

$$E_{e^+} = E_{\bar{\nu}_e} - \Delta, \quad \Delta = m_n - m_p \approx 1.293 \text{ МэВ}, \quad p_{e^+} = \sqrt{E_{e^+}^2 - m_{e^+}^2},$$

где  $E_{e^+}$  есть полная энергия позитрона,  $p_{e^+}$  - импульс позитрона,  $m_n$ ,  $m_p$  и  $m_{e^+}$  есть соответственно массы нейтрона, протона и позитрона.

В итоге число реакторных антинейтрино  $N_{\text{реак}}$ , зарегистрированных в детекторе с  $N_p$  «свободными» протонами за время  $\tau$  составляет:

$$N_{\text{реак}} = \epsilon N_p \tau \sum_{m=1}^{M_{\text{реак}}} \frac{P_{\text{реак}}^m}{4\pi L_m^2} \langle K_{\text{КИУМ}} \rangle * \\ * \int dE_{\bar{\nu}_e} \sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{Q_i} \lambda_i(E_{\bar{\nu}_e}) P_{ee}(E_{\bar{\nu}_e}, L_m) \sigma_{\text{ОБР}}(E_{\bar{\nu}_e})$$

При расчёте и моделировании были сделаны допущения, что  $\epsilon = 0.85$  и не изменяется в зависимости от энергии частиц. В реальной ситуации ожидается  $\epsilon \sim 0.80 - 0.85$ . Индекс  $m$  определяет номер реактора, число  $M_{\text{реак}}$  задаёт количество учитываемых при расчётах реакторов,  $L_m$  - расстояние до реактора  $m$ . Среднее значение коэффициента использования установленной мощности  $\langle K_{\text{КИУМ}} \rangle$  берётся для выбранного времени экспозиции  $\tau$ . Положив  $\tau = 1 \text{ г} \approx 3.16 * 10^7 \text{ с}$ , а количество «свободных» протонов в мишени равным  $10^{32}$ , можно перейти от числа антинейтрино к скорости счёта в единицах TNU.

## 4.2. Эксперименты по измерению спектра реакторных антинейтрино

### 4.2.1. Double Chooz

В реакторном эксперименте Double Chooz (Франция) измеряется поток электронных антинейтрино на среднем расстоянии около 1 км от

реакторов мощностью 4.2 ГВт атомной станции Chooz, расположенной на севере Франции, в Арденнах, вблизи границы с Бельгией. Слово «Double» означает, что в эксперименте используются два детектора нейтрино: ближний и дальний. Реакторы и расположение детекторов показано на рис. 4.1. Дальний детектор нейтрино (нейтринная мишень) находится на расстоянии около 1 км от реакторов и представляет собой цилиндр объемом  $10 \text{ м}^3$ , заполненный жидким сцинтиллятором с растворенным в нем гадолинием. Мишень окружена цилиндрическими детекторами, наполненными жидким сцинтиллятором и минеральным маслом (для защиты от внешнего  $\gamma$ -фона, космических мюонов и нейтронов, рожденных вне детектора). Электронные антинейтрино детектируются через реакцию обратного бета-распада.

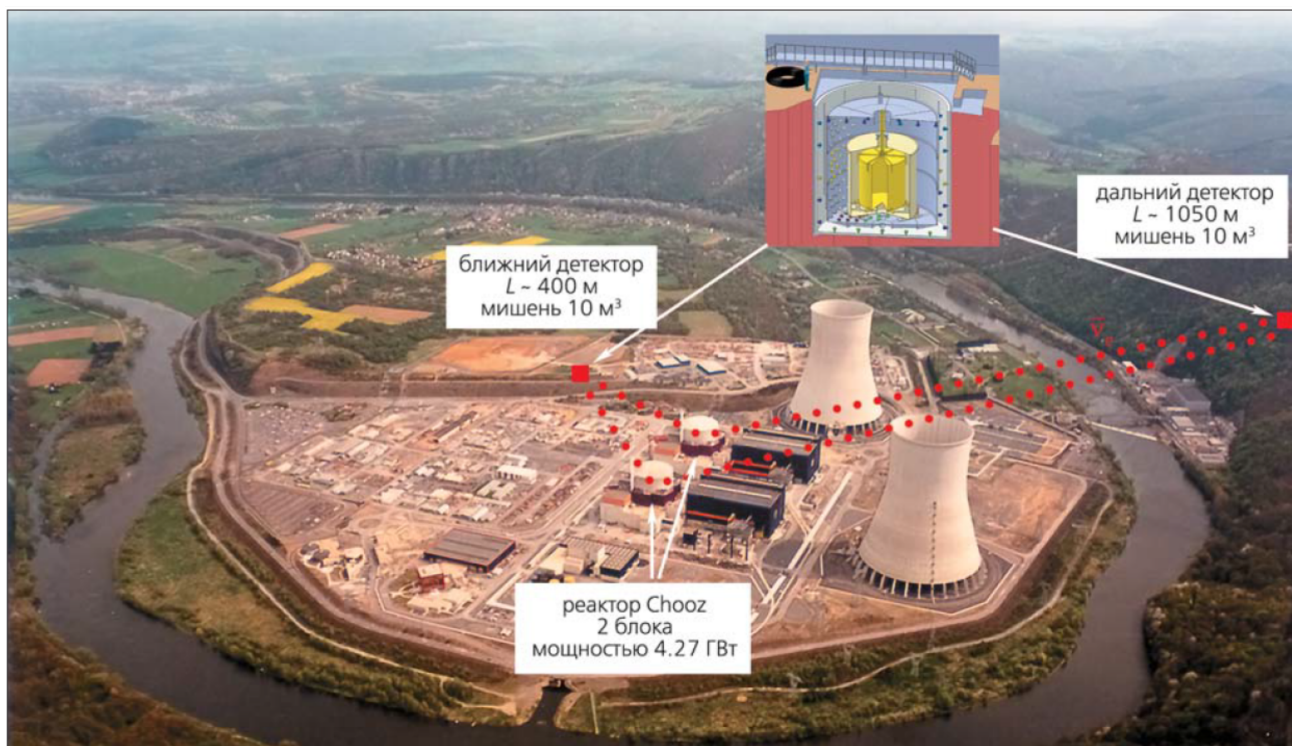


Рис. 4.1: Схема эксперимента Double Chooz

Совпадение мгновенного сигнала от позитрона и задержанного сигнала от нейтрона (после его замедления и захвата гадолинием) обеспечивает надежную идентификацию нейтринного взаимодействия в детекторе. После набора статистики в течение 97 дней было зарегистрировано около 4 тыс. нейтринных событий и была получена

величина  $\theta_{13}$ . При этом нулевая величина  $\theta_{13}$  была исключена с вероятностью 95%. После анализа нейтринных событий был получен следующий результат:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.030(stat.) \pm 0.025(syst.)$$

#### 4.2.2. Daya Bay

В эксперименте Daya Bay (Китай) шесть идентичных детекторов (три ближних и три дальних) общим весом 120 т измеряют спектры электронных антинейтрино от комплекса атомных станций Daya Bay (расположен на юге Китая, к северу от Гонконга) общей мощностью около 17 ГВт. Среднее расстояние от реакторов до ближних детекторов 500-800 м, до дальних — 1.5-1.9 км. Каждый детектор представляет собой бак диаметром около 3 м, заполненный жидким сцинтиллятором с растворенным в нем гадолинием и погруженный в емкость с минеральным маслом, которая помогает устранить фон. В свою очередь, эта емкость помещена в контейнер, заполненный чистой водой и просматриваемый фотоумножителями. Такой черенковский детектор позволяет снизить фон космических мюонов и возникающих в окружающей среде нейтронов.

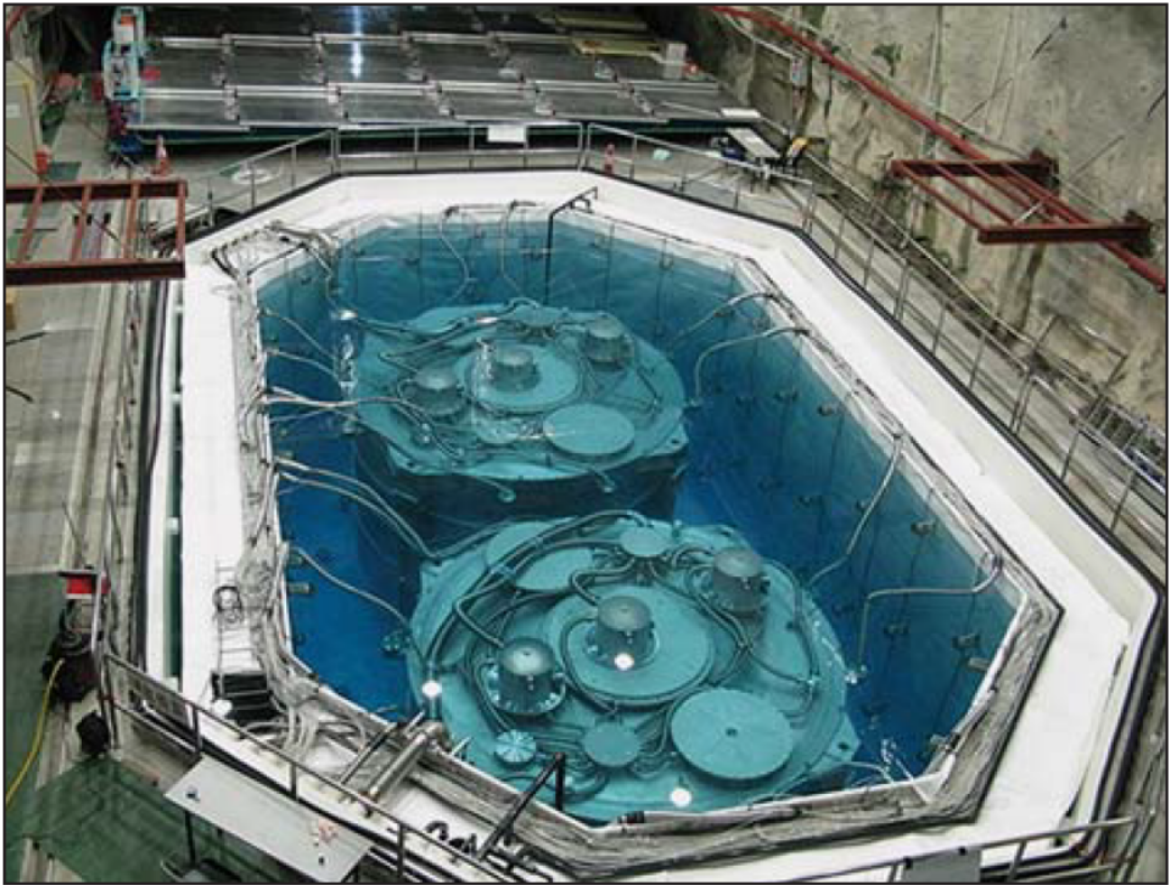


Рис. 4.2: Два ближних нейтринных детектора эксперимента Daya Bay

Число нейтринных событий в дальних детекторах и спектр частиц в отсутствие осцилляций предсказывается на основе измерений в ближних детекторах. Большая мощность реакторов позволила зарегистрировать около 104 реакторных антинейтрино в трех дальних детекторах в течение всего 55 дней набора статистики.

$$R = 0.940 \pm 0.011(stat.) \pm 0.004(syst.)$$

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(stat.) \pm 0.05(syst.)$$

#### 4.2.3. RENO

Реакторный эксперимент RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) использует шесть реакторов атомной станции Yonggwan в Южной Корее, каждый из которых обладает максимальной мощностью около 2.8 ГВт. Установка включает в себя два идентичных нейтринных детектора: ближний, расположенный на расстоянии около 400 м от

реакторов, и дальний, на расстоянии около 1.4 км. Активным элементом обоих детекторов, как и в двух других реакторных экспериментах, описанных выше, служит жидкий сцинтиллятор с добавкой гадолиния. Масса каждого детектора составляет 16 т. Первый результат эксперимента базируется на статистике, накопленной с августа 2011 г. в течение 230 дней, при полной мощности всех реакторов в течение этого периода. За это время в дальнем детекторе было зарегистрировано более 17 тыс. событий-кандидатов в электронные антинейтрино. Было получено следующее отношение числа измеренных нейтринных событий к ожидаемому в отсутствие осцилляций:

$$R = 0.920 \pm 0.009(stat.) \pm 0.014(syst.),$$

Это однозначно подтверждает дефицит нейтрино в дальнем детекторе за счет осцилляций.

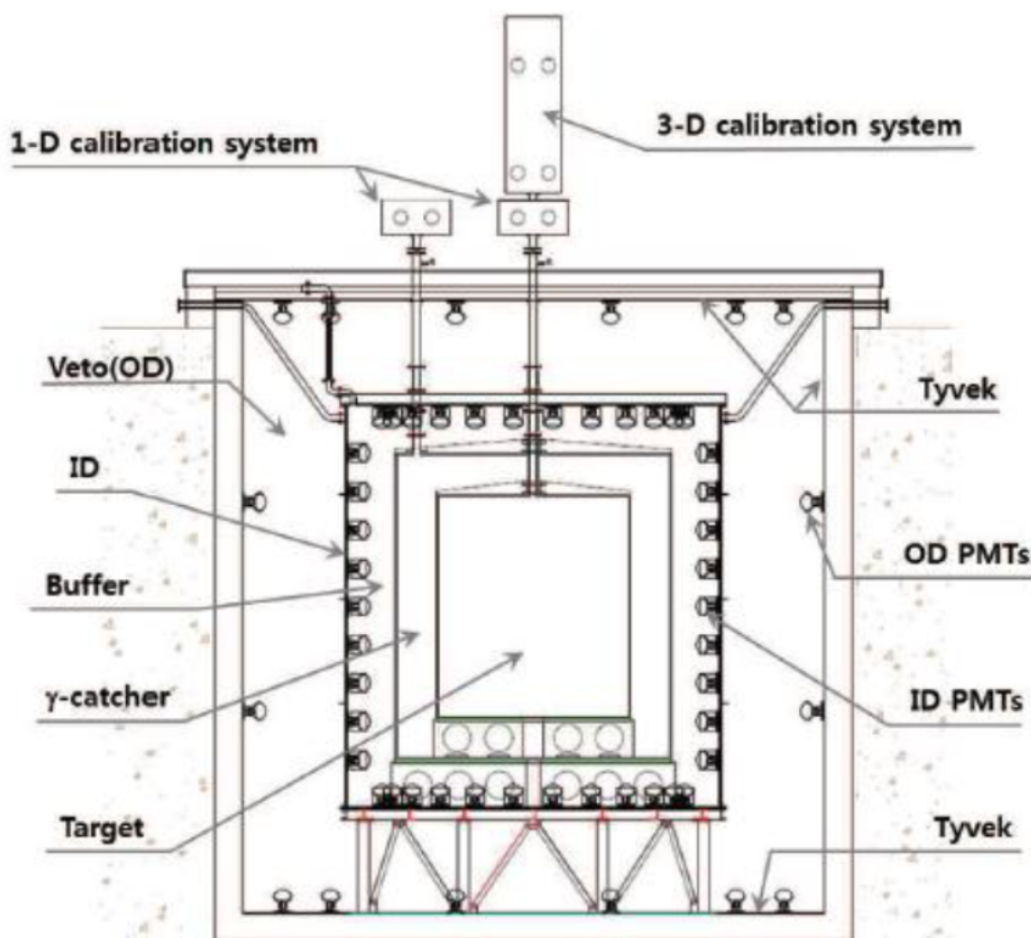


Рис. 4.3: Схема детектора RENO

### 4.3. Плечо в спектрах реакторных антинейтрино

В трёх недавних экспериментах на больших реакторах, Daya Bay, RENO и Double Chooz, учёные наблюдали особенность (или, так называемое, плечо) в экспериментальном спектре при 4-6 МэВ энергии быстрого позитрона:

$$E_{e^+} \approx E_\nu + (M_p - M_n - M_e) + 2M_e.$$

Пример данных, полученных в экспериментах Daya Bay и RENO, показан на рисинках 5.1 и 5.2. [1]. В случае Daya Bay измеренный спектр отклоняется от предсказаний более чем на  $2\sigma$  во всем диапазоне энергий и на  $4\sigma$  в диапазоне 4-6 МэВ. В двух других экспериментах (RENO и Double Chooz) получены аналогичные данные и аналогичная значимость. Спектральная форма плеча не может быть порождена стандартной зависимостью осцилляций нейтрино  $L/E_\nu$ , независимо от возможного существования стерильных нейтрино. Кроме того, его энергия слишком высока, чтобы быть порожденной антинейтрино, испускаемыми при взаимодействии нейтронов со структурным материалом в реакторе или отработанным топливом. Его происхождение должно быть вызвано  $\bar{\nu}_e$ -излучением топлива реактора.

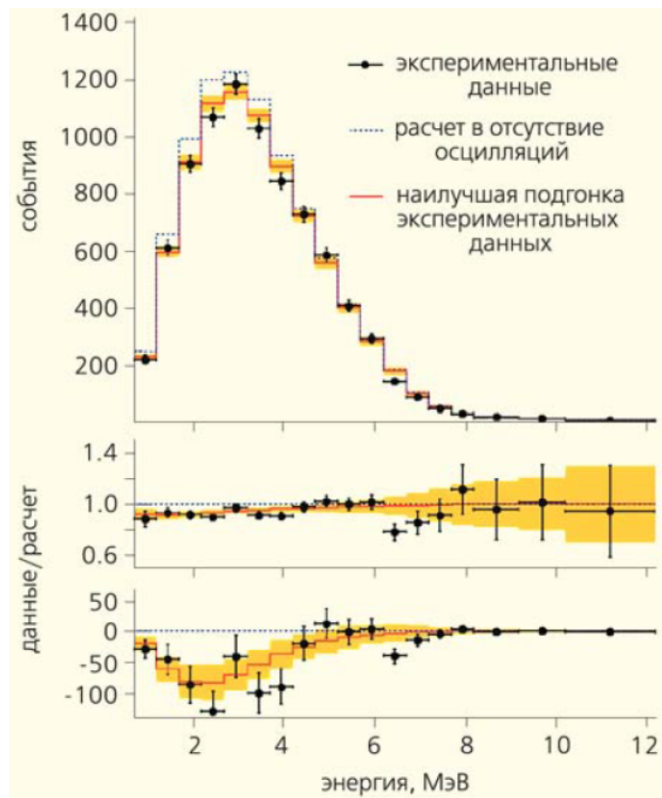


Рис. 4.4: Спектр, наблюдаемый в детекторах в эксперименте Double Chooz

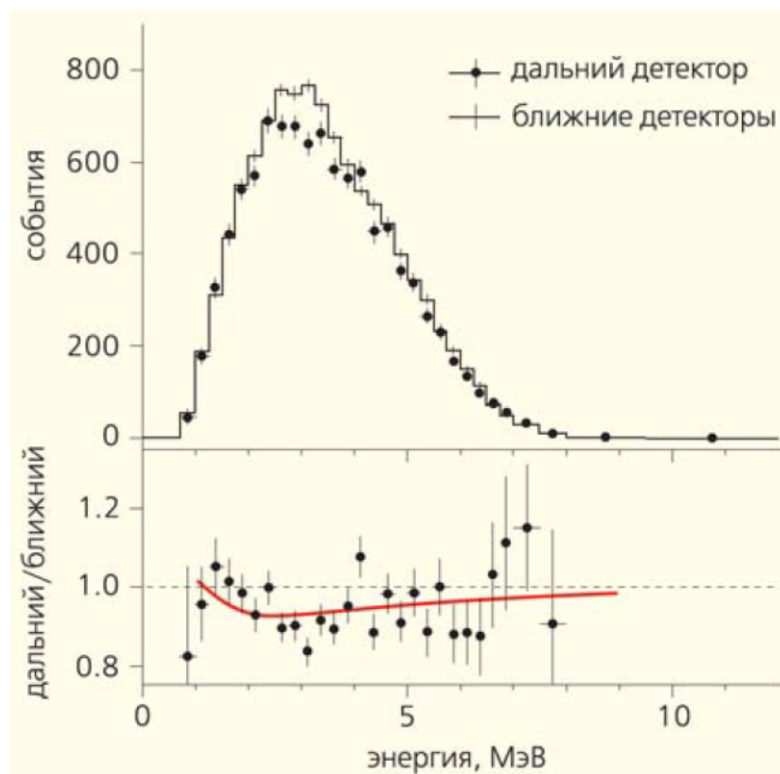


Рис. 4.5: Спектр, наблюдаемый в детекторе в эксперименте Daya Bay



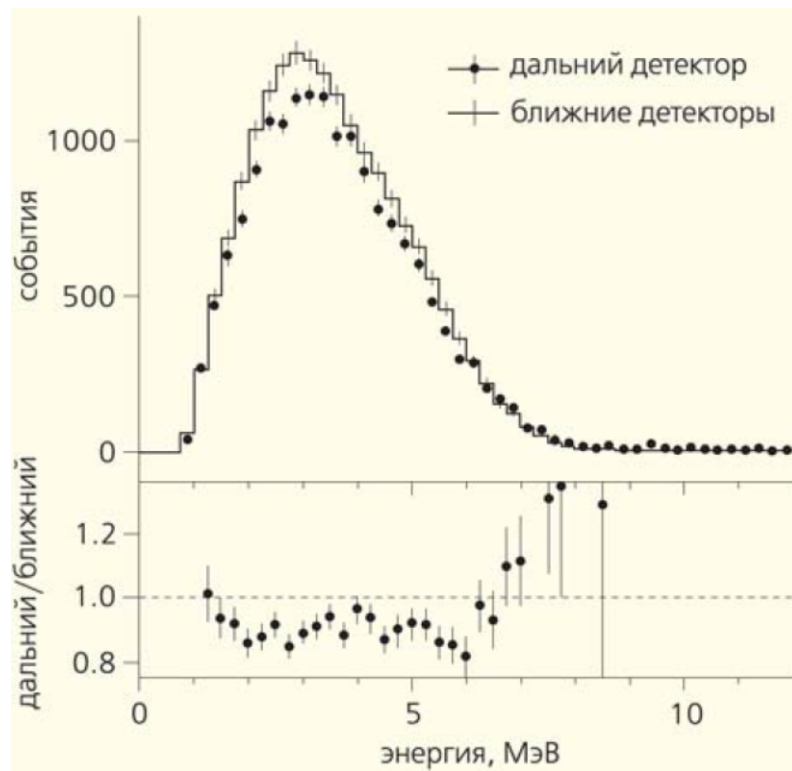


Рис. 4.6: Спектр, наблюдаемый в детекторе в эксперименте RENO

## 5. Моделирование спектра реакторных антинейтрино для Калининской АЭС

Сейчас детектор iDREAM размещён рядом с Калининской АЭС. В частности, с помощью этого детектора измеряется спектр антинейтрино. Для изучения фундаментальных вопросов физики нейтрино или для исследования изотопного состава реактора пригодится смоделированный ожидаемый спектр антинейтрино. Он понадобится при сравнении его с измеренным в эксперименте спектром.

При помощи языка программирования Python 3 было произведено моделирование спектра реакторных антинейтрино. В программе были заданы все необходимые физические константы, фактические параметры детектора iDREAM и Калининской АЭС из баз данных:

1.  $m_e = 0.511$  МэВ – масса электрона
2.  $m_p = 938.272$  МэВ – масса протона
3.  $m_n = 939.565$  МэВ – масса нейтрона
4.  $R = 36.6 * 10^3 c^{-1}$  – полная скорость деления в рассматриваемом реакторе, число делений в единицу времени
5.  $Q_{235U} = (202.36 \pm 0.26)$  МэВ – тепловая энергия, выделяемая на одно деление изотопа  $^{235}U$
6.  $Q_{238U} = (205.99 \pm 0.52)$  МэВ – тепловая энергия, выделяемая на одно деление изотопа  $^{238}U$
7.  $Q_{239Pu} = (211.12 \pm 0.34)$  МэВ – тепловая энергия, выделяемая на одно деление изотопа  $^{239}Pu$
8.  $Q_{241Pu} = (214.26 \pm 0.33)$  МэВ – тепловая энергия, выделяемая на одно деление изотопа  $^{241}Pu$

9.  $a_p^i$  – коэффициенты полиномов, используемых для описания парциальных спектров реакторных антинейтрино (представлены в статье [12])
10.  $\sin^2(\theta_{12}) = 0.308 \pm 0.017$  – квадрат синуса от угла смешивания слабого взаимодействия  $\theta_{12}$  (угла Вайнберга)
11.  $\sin^2(\theta_{13}) = 0.0234 \pm 0.0020$  – квадрат синуса от угла смешивания слабого взаимодействия  $\theta_{13}$  (угла Вайнберга)
12.  $\epsilon = 0.8$  – эффективность регистрации антинейтрино в детекторе
13.  $N_p = 10^{32}$  – число «свободных» протонов в мишени детектора iDREAM

Описание данных физических величин представлено в четвёртой главе.

Запрограммировав, формулу:

$$N_{\text{реак}} = \epsilon N_p \tau \sum_{m=1}^{M_{\text{реак}}} \frac{P_{\text{реак}}^m}{4\pi L_m^2} \langle K_{\text{КИУМ}} \rangle * \\ * \int dE_{\bar{\nu}_e} \sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{Q_i} \lambda_i(E_{\bar{\nu}_e}) P_{ee}(E_{\bar{\nu}_e}, L_m) \sigma_{\text{ОБР}}(E_{\bar{\nu}_e}),$$

и расписав каждую величину, зависящую от других параметров, при помощи отдельной функции в Python 3, можно получить спектры для различных цепочек распада. Источниками антинейтрино в топливе атомных электростанций являются цепочки распадов четырёх радиоактивных изотопов, а именно  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ . Спектр реакторных антинейтрино простирается от пороговой энергии реакции обратного бета распада ( $\approx 1.8$  МэВ) до 10 МэВ.

Далее в работе на одном рисунке приведены спектры для одного дня ( $\tau = 86400$  с) набора данных, реального расстояния от реактора до мишени ( $L = 15$  метров) и фактической массы мишени детектора iDREAM и для различных цепочек распадов радонуклидов на Калининской АЭС.

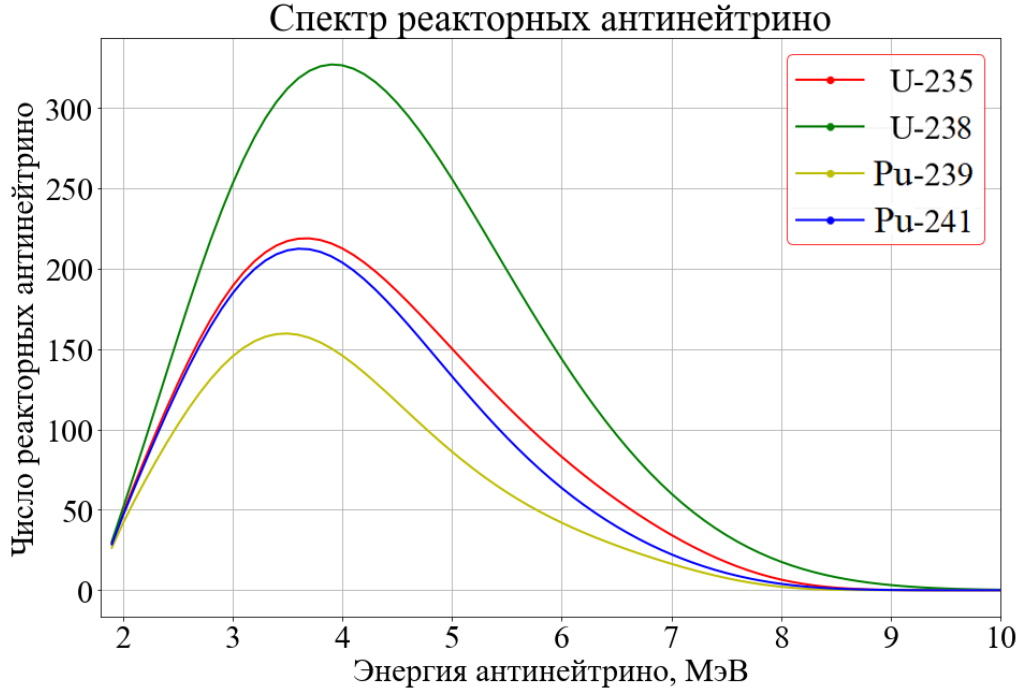


Рис. 5.1: Смоделированный спектр реакторных антинейтрино в детекторе iDREAM для разных цепочек распадов радиоактивных изотопов

Вычислим погрешность в расчёте спектра для  $i$ -го радиоактивного изотопа. Тепловая энергия, выделяемая на одно деление  $i$ -го изотопа и квадраты синусов от углов смешивания имеют погрешности [12]. Найдём вклад погрешностей этих величин в общую ошибку модели.

$$\delta N_Q = \frac{\partial N_{\text{пeак}}}{\partial Q_i} = \frac{N_{\text{пeак}}}{Q_i^2} \sigma_Q$$

Преобразуем вероятность выживания электронного антинейтрино:

$$\begin{aligned} \langle P_{ee} \rangle &\approx \sin^4 \theta_{13} + \cos^4 \theta_{13} \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{12}\right) = \\ &= 1 - 2 \sin^2 \theta_{12} (1 - \sin^2 \theta_{12}) (1 - (\sin^2 \theta_{13})^2) \end{aligned}$$

$$\delta N_{\sin^2 \theta_{12}} = \frac{\partial N_{\text{пeак}}}{\partial (\sin^2 \theta_{12})} = \frac{N_{\text{пeак}} (-2(1 - 2 \sin^2 \theta_{12})(1 - (\sin^2 \theta_{13})^2))}{\langle P_{ee} \rangle} \sigma_{\sin^2 \theta_{12}}$$

$$\delta N_{\sin^2 \theta_{13}} = \frac{\partial N_{\text{пeак}}}{\partial (\sin^2 \theta_{13})} = \frac{N_{\text{пeак}} (4 \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \theta_{13} (1 - \sin^2 \theta_{12}))}{\langle P_{ee} \rangle} \sigma_{\sin^2 \theta_{13}}$$

Общая ошибка модели в расчёте спектра для  $i$ -го радиоактивного изотопа вычисляется по формуле:

$$\delta N_{\text{пeак}} = \sqrt{(\delta N_Q)^2 + (\delta N_{\sin^2 \theta_{12}})^2 + (\delta N_{\sin^2 \theta_{13}})^2}$$

1) Для изотопа урана  $^{235}\text{U}$ : Число провзаимодействующих антинейтрино:

$$N_{\text{реак}} = 719 \pm 17$$

2) Для изотопа урана  $^{238}\text{U}$ : Число провзаимодействующих антинейтрино:

$$N_{\text{реак}} = 1108 \pm 27$$

3) Для изотопа урана  $^{239}\text{Pu}$ : Число провзаимодействующих антинейтрино:

$$N_{\text{реак}} = 475 \pm 11$$

4) Для изотопа урана  $^{241}\text{Pu}$ : Число провзаимодействующих антинейтрино:

$$N_{\text{реак}} = 653 \pm 16$$

Ниже предствален ожидаемый спектр реакторных антинейтрино в детекторе iDREAM на Калининской АЭС.

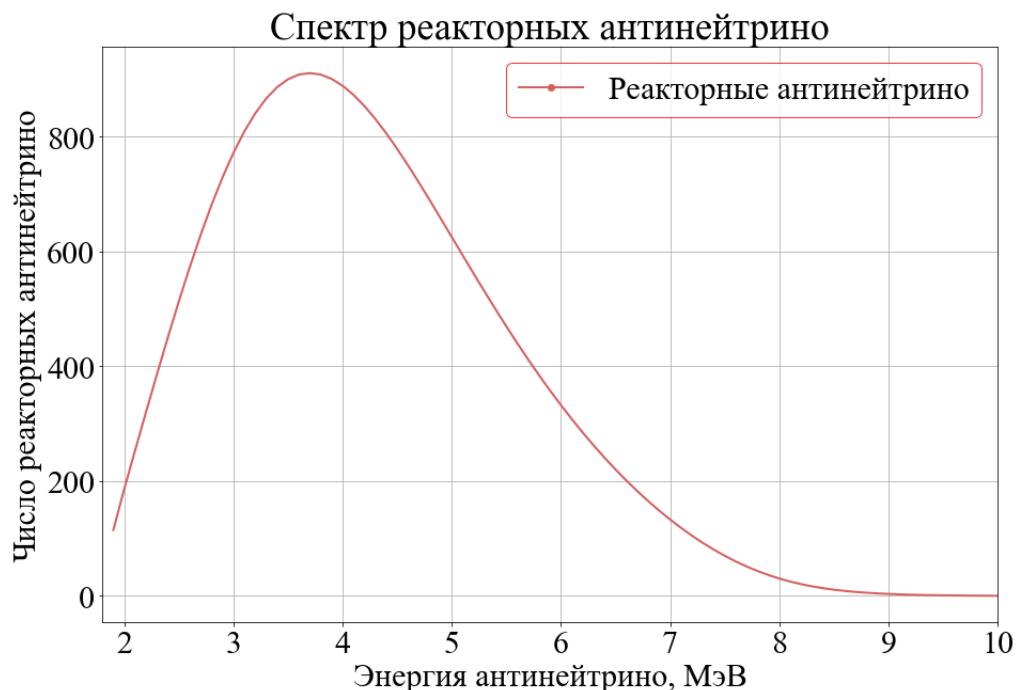


Рис. 5.2: Смоделированный спектр реакторных антинейтрино в детекторе iDREAM на Калининской АЭС

Погрешность этого спектра вычисляется по формуле:

$$\delta N_{\text{реак}} = \sum_{i=1}^4 \delta N_{\text{реак}_i}$$

Следовательно:

$$N_{\text{реак}} = 2956 \pm 71$$

Погрешность составляет примерно 3%.

Все экспериментально измеренные спектры антринейтрино в детекторе iDREAM, установленном на расстоянии 15 м от реактора следует сравнивать с моделью для разработки новых и доказательства старых гипотез о свойствах нейтрино.

## 6. Выводы

В ходе работы был проведен обзор различных экспериментов по измерению спектра антинейтрино от атомных электростанций, были изучены различные виды компактных детекторов, похожих на детектор iDREAM, предназначенных для мониторинга реакторов и измерения спектра на короткой базе. Описан теоретически и смоделирован при помощи языка программирования Python 3 спектр реакторных антинейтрино в детекторе iDREAM, расположенном рядом с Калининской АЭС.

Данный спектр похож по форме на экспериментальные спектры, полученные на недавних экспериментах Daya Bay, Double Chooz, RENO, так же присутствует особенность в виде плеча. Максимум смоделированного спектра соответствует энергии позитрона равной 4-6 МэВ, как и в вышеупомянутых экспериментах. Был произведен расчет ожидаемого числа антинейтринных событий в детекторе iDREAM в условиях измерений потока антинейтрино от реактора на Калининской АЭС, который составил  $\sim 2956 \pm 71$  событий в сутки. Стоит учесть, что мощность реактора обусловлена энерговыделением во всех цепочках. Также на конечный счёт в детекторе влияют осцилляции.

Совместное использование моделирования спектра детектора iDREAM и реального спектра измеренного рядом с реактором на Калининской АЭС и сравнение полученных результатов может нам лучше исследовать свойства нейтрино, их осцилляции и ответить на фундаментальные вопросы в этой "новой" области физики. Как объяснить "реакторную аномалию"? Существует ли стерильные нейтрино?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ближайших планах у наших учёных полномасштабные измерения спектра антинейтрино от одного из реакторов на Калининской АЭС. Помимо прикладных целей, таких как дистанционный мониторинг реактора, детектор iDREAM может служить для получения фундаментальных знаний о поведении антинейтрино на короткой базе.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. C. Hayes, P. Vogel "Reactor Neutrino Spectra".
2. [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”.
3. A. Abramov, A. Chepurnov, A. Etenko, M. Gromov, A. Konstantinov, D. Kuznetsov, E. Litvinovich, G. Lukyanchenko, I. Machulin, A. Murchenko, A. Nemeryuk, R. Nugmanov, B. Obinyakov, A. Oralbaev, A. Rastimeshin, M. Skorokhvatov, S. Sukhotin, O. Titov "iDREAM: Industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant".
4. [https : //arxiv.org/abs/1812.02163](https://arxiv.org/abs/1812.02163) A. Haghigat, P. Huber, S. Li, J.M. Link, C. Mariani, J. Park, T. Subedi “Observation of Reactor Antineutrinos with a Rapidly-Deployable Surface-Level Detector”.
5. [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”.
6. [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”.
7. G. Boireau, L. Bouvet, A.P. Collin, G. Coulloux, M. Cribier, H. Deschamp, V. Durand, M. Fechner, V. Fischer, J. Gaffiot, N. Gerard Castaing, R. Granelli, Y. Kato, T. Lasserre, L. Latron, P. Legou, A. Letourneau, D. Lhuillier, G. Mention, Th. A. Mueller, T-A. Nghiem, N. Pedrol, J. Pelzer, M. Pequignot, Y. Piret, G. Prono, L. Scola, P. Starzinski, M. Vivier, E.

- Dumonteil, D. Mancusi, C. Varignon, C. Buck, M. Lindner, J. Bazoma, S. Bouvier, V.M. Bui, V. Communeau, A. Cucoanes, M. Fallot, M. Gautier, L. Giot, G. Guilloux, M. Lenoir, J. Martino, G. Mercier, T. Milieto, N. Peuvrel, A. Porta, N. Le Quere, C. Renard, L.M. Rigalleau, D. Roy, T. Vilajosana, F. Yermia5 "Online Monitoring of the Osiris Reactor with the Nucifer Neutrino Detector".
8. Kyung-Kwang Joo, Ba-Ro Kim, Chang-Hwan Jang, Youngju Ko, Kim Siyeon, Eun-Ju Jeon, Young-Duk Kim, Jaison Lee, Moo-Hyun Lee, Yoo-Min Oh, Hyang-Kyu Park, Kang-Soon Park, Bo-Young Han, Gwang-Min Sun, Hong-Joo Kim, Joo-Young Lee, Hyunsoo Kim, Jinyu Kim, Kyung-Min Seo "NEOS Detector for Reactor Antineutrinos".
9. <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. Kyzylova, 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"
10. М.Б. Громов "ОТЧЕТ за 2020"
11. Ю.Г. Куденко "Нейтринная физика: год угла смешивания  $\theta_{13}$ "

12. <https://arxiv.org/pdf/1411.6475v2.pdf> M. Baldoncini et al. "Reference worldwide model for antineutrinos from reactors"