

Применение детекторов антинейтрино в ядерной безопасности: текущие возможности и будущие перспективы

А. Бернштейн, Г. Болдуин, Б. Бойер, М. Гудмэн, Дж. Лернед, Дж. Лунд, Д. Рейна, и Р. Свобода

Антинейтрино - это электрически нейтральные частицы с массой, почти равной нулю, образующиеся в большом количестве в активных зонах ядерных реакторов и в ядерных взрывах. Значительные достижения в понимании их свойств, и в технологии детекторов, достигнутые в течение пятидесяти лет после их открытия, открыли путь новой научной дисциплине - прикладной физике антинейтрино. Поскольку антинейтрино неразрывно связаны с процессом ядерного деления, у них имеется много интересных применений в проблеме ядерного нераспространения. В этой статье представлен всесторонний анализ прикладной физики антинейтрино, относящийся к нераспространению, рассмотрены последние достижения в этой области, описано перекрытие этой возникающей научной дисциплины с другими продолжающимися фундаментальными и прикладными исследованиями антинейтрино, и проложен курс исследований и разработок для будущих применений. Статья предназначена стать справочным материалом для политиков, исследователей и широкого сообщества ядерного нераспространения.

А. Бернштейн работает в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, Ливермор, Калифорния, США. Г. Болдуин работает в Национальных лабораториях Сандия, Альбукерке, Нью-Мексико, США. Б. Бойер, Дж. Лунд и Д. Рейна работают в Лос-Аламосской национальной лаборатории, Лос-Аламос, Нью-Мексико, США. М. Гудмэн работает в Аргоннской национальной лаборатории, Аргонн, Иллинойс, США. Дж. Лернед работает в Гавайском университете, Гонолулу, Гавайи, США. Р. Свобода работает в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, Ливермор, Калифорния, США и Калифорнийском университете, Дэвис, Калифорния, США.

Статья получена редакцией 28 октября 2009 года и принята к опубликованию 29 сентября 2010 года.

Почтовый адрес для корреспонденций: A. Bernstein, Lawrence Livermore National Laboratory, MS L-211, 7000 East Ave., Livermore, California 94550, USA.

Электронный адрес: bernstein3@llnl.gov

ПОЛИТИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Сейчас можно следить за операционным состоянием, уровнями мощности, и содержанием осколков деления в ядерных реакторах в реальном времени с помощью простых детекторов на расстояниях в десятки метров от реактора. Это уже было продемонстрировано на гражданских энергетических реакторах в России и Соединенных Штатах с помощью детекторов, специально разработанных для мониторинга реактора и гарантий нераспространения¹. Эта существующая возможность мониторинга в ближней области может оказаться полезной в контексте режима гарантий Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и других кооперативных режимов мониторинга, таких, как предлагаемый Договор о прекращении производства расщепляющихся материалов².

Современная технология может позволить кооперативный мониторинг, обнаружение, или исключение реакторов с тепловой мощностью 5 - 10 МВт на расстоянии до 10 км от объекта, хотя это и не является частью любого существующего договора. В принципе открытие и исключение возможно также и на больших расстояниях, так же как и дистанционное обнаружение ядерного взрыва на уровне килотонны. Однако, требуемые массы детекторов будут в 10 - 100 раз больше, чем существующие, и достижение этих целей дальнего обнаружения потребует значительных исследований и разработок (НИР) по нескольким направлениям. Многие элементы необходимой программы НИР уже изучаются в сообществе фундаментальной физики в форме очень больших экспериментов по обнаружению антинейтрино.

Детекторы антинейтрино, вероятно, будут бесполезными для обнаружения или мониторинга неактивных некритических расщепляющихся материалов, независимо от количества материала или размера детектора, поскольку интенсивность излучения этих материалов несравнимо меньше, чем у критических систем.

Выводы и рекомендации этой статьи таковы:

1. Был продемонстрирован практический мониторинг в ближней области (менее 100 м) реакторов с водой под давлением (РВД) с помощью детекторов антинейтрино, который предлагает многообещающее дополнение к существующим методам мониторинга реакторов для МАГАТЭ и других режимов гарантий. Мы рекомендуем дальнейшее исследование возможностей мониторинга на малых расстояниях с помощью антинейтрино для определения операционного состояния, тепловой мощности, и содержания осколков

деления в реакторах для гарантий. В частности, дальнейшие НИР будут полезны для определения уровней чувствительности реакторов других типов (не РВД), прямого измерения и моделирования интенсивностей и спектров антинейтрино в различных реакторах, и изучения детекторов с лучшими характеристиками развертывания. Мы также рекомендуем тесное сотрудничество сообщества физики антинейтрино, МАГАТЭ и соответствующими правительственными агентствами во всем мире для того, чтобы обеспечить хорошее соответствие разработок требованиям гарантий.

2. Мониторинг операционного состояния и присутствия или отсутствия реакторов с тепловой мощностью 10 МВт на среднем расстоянии (1 - 10 км), и установление верхних пределов производства плутония в таких реакторах возможны на существующем уровне технологии, в предположении использования детекторов на больших глубинах погружения (1 км) в тех частях мира, где низок фон от коммерческих реакторов. Мы рекомендуем разработку детекторов двойного назначения (для целей физики и нераспространения) массой в 1000 - 10000 тонн. Далее мы рекомендуем направить НИР на сокращение расходов посредством, среди других вариантов, уменьшения глубины погружения при поддержании подходящих уровней отношения сигнала к шуму, и улучшения сбора света, генерируемого при взаимодействии антинейтрино с водой и сцинтилляционными детекторами. Поскольку детекторы обычно будут устанавливаться внутри страны, режимы мониторинга на среднем расстоянии, вероятно, будут кооперативными по своей природе. Поэтому мы рекомендуем политические исследования и анализ выгоды затрат кооперативного развертывания в контексте будущих договоров и соглашений.

3. Мониторинг наличия или отсутствия, или операционного состояния реакторов с тепловой мощностью в 10 МВт на больших расстояниях (10 - 500 км), и установление верхних пределов на производство плутония в таких реакторах, потребует детекторов масштаба 10 000 - 10 000 000 тонн (10 мегатонн). По причине стоимости они, вероятно, будут состоять из чистой воды с присадкой веществ, поглощающих нейтроны. Американские и международные группы предлагали детекторы такого рода с массой порядка 100 000 тонн. Эти предложения сейчас находятся на стадии концептуального проекта, разрабатываемого совместно с финансирующими агентствами с задачей достижения различных целей фундаментальной

физики. Мы рекомендуем, чтобы техническое сообщество нераспространения активно участвовало в этих работах по эксперименту и его планированию. Такое участие поможет обеспечить, чтобы наилучшие технологии из фундаментальной науки были привлечены к проблеме нераспространения. Аналогично, политическое сообщество, так же как и финансирующие агентства по науке и нераспространению, проанализировали последствия существования таких детекторов, и, в частности, рассмотрели сценарии планирования и совместного финансирования в проекты, включающие совместные научные задачи и задачи нераспространения.

4. Обнаружение ядерного взрыва предлагает уникальную возможность однозначного дистанционного подтверждения ядерной природы такого события. К сожалению, эта возможность, по-видимому, является наиболее сложной темой из обсуждаемых в этой статье. Как обсуждалось в предыдущих несекретных отчетах, дальность в 10 - 100 км для предвидимых детекторов и мощности взрыва в 1 килотонну представляется наиболее подходящей для кооперативного мониторинга испытательных полигонов в относительно запрещающих обстоятельствах³. Хотя имеются различия в фонах из-за взрывного характера импульса антинейтрино от бомбы на делении ядер, многие из исследований для разработки детектора могут быть проведены в ходе реализации приведенных выше рекомендаций 2 и 3 по НИР. В политическом контексте мы рекомендуем провести анализ потенциального влияния различных кооперативных развертываний на Договор о полном запрещении испытаний ядерного оружия и другие будущие режимы верификации запрета испытаний.

ВВЕДЕНИЕ

В этой статье представлен всесторонний анализ прикладной физики антинейтрино, относящийся к нераспространению, рассмотрены последние достижения в этой области, описано перекрытие этой возникающей научной дисциплины с другими продолжающимися фундаментальными и прикладными исследованиями антинейтрино, и проложен курс исследований и разработок для будущих применений. Статья предназначена стать справочным материалом для политиков, исследователей и широкого сообщества ядерного нераспространения. Более полное рассмотрение физики и технологии обнаружения антинейтрино можно найти в расширенном варианте статьи авторов⁴.

Статья организована следующим образом.

В следующем разделе мы дадим общий обзор информации, которую детекторы антинейтрино могут предоставить для мониторинга реактора, обнаружения реактора, и обнаружения ядерного взрыва, и предоставим иллюстративные примеры развертывания. Далее мы более подробно опишем физику образования и детектирования антинейтрино, относящуюся к ядерным реакторам, а затем приведем описание образования и детектирования антинейтрино от ядерных взрывов.

Рассматриваются применения детекторов антинейтрино "ближнего действия" (10 метров - 1 километр) с упором на существующие демонстрации кооперативного мониторинга и гарантий ядерных реакторов. Обсуждается текущая практика гарантий МАГАТЭ на различных реакторах и рассматриваются возможные преимущества детекторов антинейтрино в контексте гарантий. В статье описывается современное состояние детектирования антинейтрино в применении к мониторингу ближнего действия. Представлен набор общих требований к развертыванию на небольших расстояниях и приоритеты НИР для улучшенных детекторов антинейтрино для мониторинга в ближней области.

Рассматриваются текущие и будущие возможности поиска действующих реакторов или исключения их наличия на средних расстояниях (1 - 10 км от объекта) и больших расстояниях (10 - 500 км от объекта) и приоритеты НИР для этих детекторов.

Наконец, в статье приводится краткий обзор фундаментальных физических исследований, которые имеют отношение к прикладной физике антинейтрино.

ОБЗОР И ПРИМЕРЫ ИЗМЕРЕНИЙ АНТИНЕЙТРИНО В ИНТЕРЕСАХ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

Возможную полезность сигнала антинейтрино для проблемы нераспространения легко понять, не углубляясь в подробности механизмов образования и детектирования, которые будут рассмотрены в следующем разделе. Измерения, представляющие интерес для приложений, обсуждаемых в этой статье, включают (в порядке убывания доступности для текущей технологии):

- *Интенсивность* антинейтрино от данного источника, будь то реактор или взрывное устройство на делении ядер.
- *Энергетический спектр* антинейтрино.
- *Направление* антинейтрино.

Информация, получаемая из измерений интенсивности антинейтрино

Интенсивность антинейтрино, излучаемого реакторами, зависит от тепловой мощности и изотопного состава расщепляющихся материалов в реакторе. Поэтому интенсивность антинейтрино может быть использована для непрерывного определения операционного состояния реактора (включен или выключен) и его мощности в реальном времени. Если мощность реактора и его начальная загрузка топливом известны из других источников, и скорость счета антинейтрино достаточно велика (приблизительно сотни или тысячи событий в день или неделю), то интенсивность антинейтрино может быть использована для оценки изменения количества расщепляемого урана и плутония в активной зоне реактора. Для заданного типа топлива степень нейтронного облучения первично определяет эти изменяющиеся количества расщепляющихся материалов, и ее называют "выгоранием". Выгорание топлива при выгрузке непосредственно коррелирует с количеством плутония в отработанном топливе, и в контексте гарантий для реакторов оно является важным параметром.

Во всем мире было проведено много экспериментов по измерению интенсивности антинейтрино у реакторов⁵⁻¹⁰. Два эксперимента, описанные в следующем разделе, были построены специально для демонстрации возможности мониторинга реактора в контексте ядерных гарантий¹¹.

Интенсивность антинейтрино от ядерных взрывов зависит от мощности взрыва и от изотопного состава взорвавшихся расщепляющихся материалов. Короткий всплеск антинейтрино, излучаемых ядерным оружием, может поэтому быть использован для измерения полного энерговыделения при делении ядер в ядерном взрыве, так же как и для подтверждения того, что взрыв действительно произошел из-за деления. В предыдущей работе было представлено подробное исследование полезности метода, характеристик детектора и стоимости для детекторов ядерных взрывов¹².

Информация, получаемая из энергетического спектра антинейтрино

Подобно интенсивности антинейтрино, энергетический спектр антинейтрино зависит от мощности реактора и изотопного состава расщепляющихся материалов. Из спектральных измерений могут быть получены оценки как изотопного состава расщепляющихся материалов в реакторе, так и его тепловой мощности, без необходимости независимого измерения тепловой мощности реактора, при условии достаточной статистики измерений. Так же как и измерения интенсивности, спектральные измерения антинейтрино были проведены в многочисленных экспериментах по фундаментальной физике¹³. Были также проведены теоретические оценки спектров антинейтрино из реактора для основных расщепляющихся изотопов¹⁴. Точность этих оценок равна нескольким процентам, и они в первую очередь определяются по экспериментально измеренным спектрам электронов продуктов деления этих изотопов¹⁵. В комбинации с моделями эволюции реакторного топлива, такими, как ORIGEN, можно предска-

зять спектр антинейтрино данного реактора¹⁶.

Информация, получаемая из направления антинейтрино

Направление антинейтрино может в принципе быть использовано для определения местоположения бомбы или реактора. По причинам, описанным в следующих разделах, направление измерить трудно. Однако, группа Choоз успешно восстановила направление антинейтрино от известного реакторного источника с точностью примерно 20 градусов¹⁷.

Эти три типа измерений лежат в основе всех потенциальных использований детекторов антинейтрино, которые описаны в следующих разделах. Для того, чтобы читатель лучше ориентировался в возможностях, на рис.1 показаны несколько возможных вариантов развертывания, различающихся по дальности и глубине погружения. Далее будут представлены примеры измерений, которые могут быть сделаны сейчас, или в ближайшем будущем, в трех интересных диапазонах расстояний, а именно:

1. *Ближняя зона:* 10 метров - 1 км от атомной электростанции или исследовательского реактора.
2. *Средняя зона:* 1 - 10 километров от ядерного реактора.
3. *Дальняя зона:* 10 км, или более, от ядерного взрыва или ядерного реактора.

Мы вернемся к этим примерам, в отдельных случаях с большими подробностями, в разделах этой статьи по приложениям метода.



Рисунок 1: Представление сценариев развертывания детекторов антинейтрино. Детектор SONGS1 весом в 1 тонну и детектор антинейтрино с жидким сцинтиллятором в Камиока весом в 1000 тонн (KamLAND) были развернуты и работали в течение нескольких лет. Надписи на рисунке приведены ниже в таблице.

Применение детекторов антинейтрино в безопасности	
Наземный	<ul style="list-style-type: none"> • расстояние 100 км • вес 100 кТ • технология: сцинтиллятор или вода • состояние: сегментирование, требуется НИР
Наземный	<ul style="list-style-type: none"> • расстояние 10 км • вес 1 кТ • технология: сцинтиллятор или вода • состояние: сегментирование, требуется НИР
Наземный	<ul style="list-style-type: none"> • мобильный • расстояние 100 м • вес 50 Т • технология: сцинтиллятор или вода • состояние: сегментирование, требуется НИР
SONGS1	Тип KamLAND

<ul style="list-style-type: none"> • расстояние 100 м • глубина 10 м • вес 1 Т • технология: сцинтиллятор • состояние: действующий 	<ul style="list-style-type: none"> • расстояние 10 км • глубина 1 км • вес 1 кТ • технология: сцинтиллятор • состояние: действующий
Hanohano <ul style="list-style-type: none"> • расстояние 50 км • глубина 1 км • вес 10 кТ • технология: сцинтиллятор • состояние: предлагаемый 	Hyper-K <ul style="list-style-type: none"> • расстояние 100 км • глубина 2 км • вес 100 кТ • технология: вода • состояние: предлагаемый

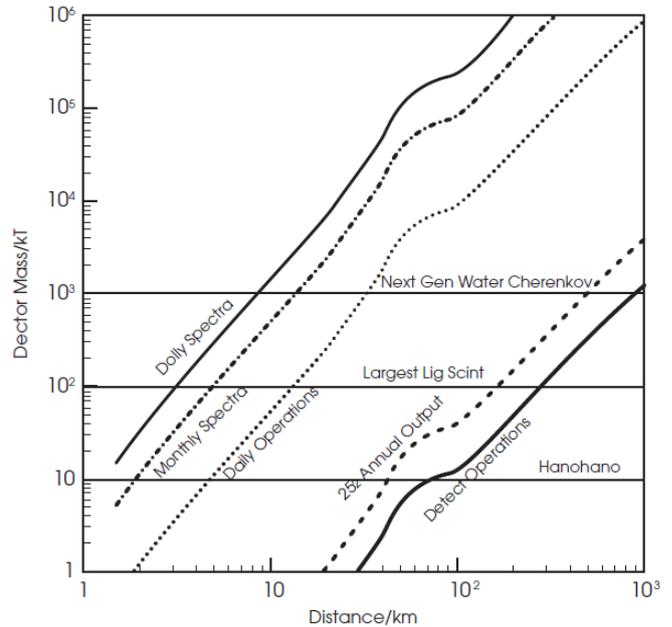


Рисунок 2: График зависимости требуемой массы детектора (в килотоннах, по вертикальной оси) от заданного расстояния до источника (в км, по горизонтальной оси) и от применения, в предположении нулевого фона с использованием наиболее часто применяемого взаимодействия антинейтрино с детектором (обратный бета-распад). Обнаружением считается подтверждение присутствия реактора мощностью 10 МВт (тепловых) регистрацией более пяти событий в течение года. Измерение годового выхода с 16 зарегистрированными событиями за 1 год предоставит оценку тепловой мощности реактора с точностью 25%. Измерение ежедневных операций потребует 3600 событий в год, измерение ежемесячных спектров потребует 36000 событий в год, и для ежедневных спектров понадобится 36000 событий в день. Масштабируемое поведение в основном определяется зависимостью потока антинейтрино, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Изломы каждой кривой вызваны известным эффектом осцилляций антинейтрино от реактора, впервые измеренной в эксперименте KamLAND. Дальнейшую информацию об осцилляциях антинейтрино из реактора можно найти в последнем разделе этой статьи (K. Eguchi et al. (KamLAND), Phys. Rev. Lett. 90 (2003)). Надписи на рисунке (сверху вниз и слева направо): 1 - водные черенковские детекторы следующего поколения; 2 - ежедневные спектры; 3 - самый большой жидкий сцинтиллятор; 4 - ежемесячные спектры; 5 - ежедневные операции; 6 - годовой выход с точностью 25%; 7 - обнаружение операций; 8 - детектор Ганогано.

На рис. 2 показана сводная зависимость размера детектора от расстояния до реактора мощностью в 10 МВт (тепловых). Из-за высокой проникающей способности антинейтрино расчеты защиты и ослабления, такие, которые требуются для детектирования гамма-лучей и нейтронов, не нужны для расчета интенсивности антинейтрино. Для данного взаимодействия и типа детектора основными переменными, влияющими на размер детектора, являются расстояние до источника, сила источника (мощность ядерного взрыва или тепловая мощность реактора), и степень защиты от внешнего фона. Имеется также сравнительно небольшой поправочный фактор из-

за осцилляций антинейтрино, который будет описан позже, и который зависит от отношения энергии антинейтрино и расстояния до реактора.

Представительные примеры применения мониторинга и детектирования антинейтрино к нераспространению

Мониторинг реактора в ближней зоне. Детектор антинейтрино массой около 1 тонны, работавший в 24,5 метрах от активной зоны реактора с тепловой мощностью 3,46 ГВт на атомной электростанции Сан Онофре (SONGS) в Южной Калифорнии, использовался для неавыязчивого мониторинга операционного состояния, относительной тепловой мощности и содержания расщепляющихся материалов в реакторе. Операционное состояние реактора (включен или выключен) обнаруживалось в течение 5 часов от выключения или запуска с достоверностью в 99%. Относительная мощность реактора измерялась с точностью в 3% (по отношению к начальному значению) за одну неделю. При известной постоянной мощности реактора и загрузке топлива изменения в содержании расщепляющихся материалов, соответствующие потреблению 500 кг урана-235 и производству примерно 80 кг плутония были обнаруживаемы приблизительно за 4 месяца. При небольших изменениях конструкции прототипа можно достичь дальнейшего улучшения прибора. С примерно такими же размерами детектора на расстоянии в 5 метров можно добиться такой же точности для мощности и операционного состояния исследовательского реактора с тепловой мощностью 100 МВт. Развертывание прибора описано ниже в разделе "Применения в ближней зоне: гарантии и кооперативный мониторинг".

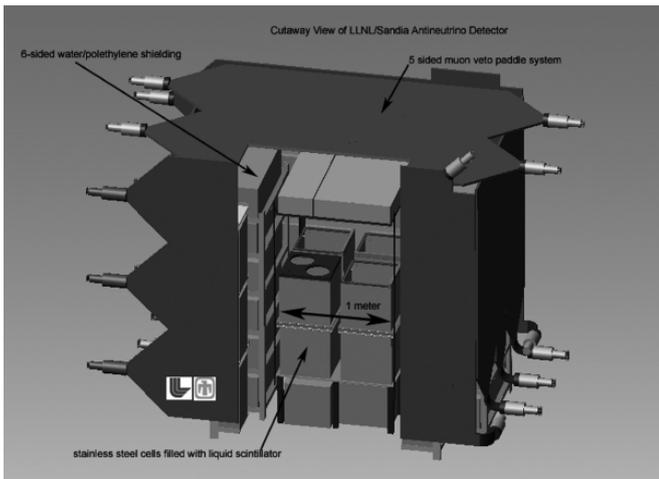


Рисунок 3: Детектор SONGS1, развернутый группой Ливерморской национальной лабораторией им. Лоуренса и Национальных лабораторий Сандия на атомной электростанции Сан Онофре в Южной Калифорнии, продемонстрировал стабильный кооперативный мониторинг мощности реактора и содержания расщепляющихся материалов в топливе с помощью непосещаемого датчика. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 - вид в разрезе детектора антинейтрино Ливерморской национальной лабораторией им. Лоуренса и Национальных лабораторий Сандия; 2 - антисовпадательная система для мюонов с пластинами с 5 сторон; 3 - водно-полиэтиленовая защита с 6 сторон; 4 - 1 метр; 5 - ячейки из нержавеющей стали, наполненные жидким сцинтиллятором.

Обнаружение, исключение и операционное состояние реактора в средней зоне. Крупнейшим из работающих в настоящее время детекторов антинейтрино от реактора является большой детектор антинейтрино в Камиока (KamLAND)¹⁸. Детектор KamLAND представляет собой детектор с жидким сцинтиллятором массой 1000 тонн, работающий на глубине в 1000 метров. С таким детектором и на такой глубине работа реактора с тепловой мощностью 10 МВт может быть исключена в радиусе 10 км за 3 месяца на уровне достоверности в 95%, если

рядом не будет никаких других реакторов. Если реактор будет обнаружен, то его мощность можно будет оценить с точностью в 25% за 8 месяцев. Дополнительные известные или неизвестные реакторы могут изменить уровни фона и требования к размеру детектора. Применения в средней зоне рассматриваются в разделе "Применения в средней зоне: обнаружение и мониторинг реакторов от 1 до 10 км".

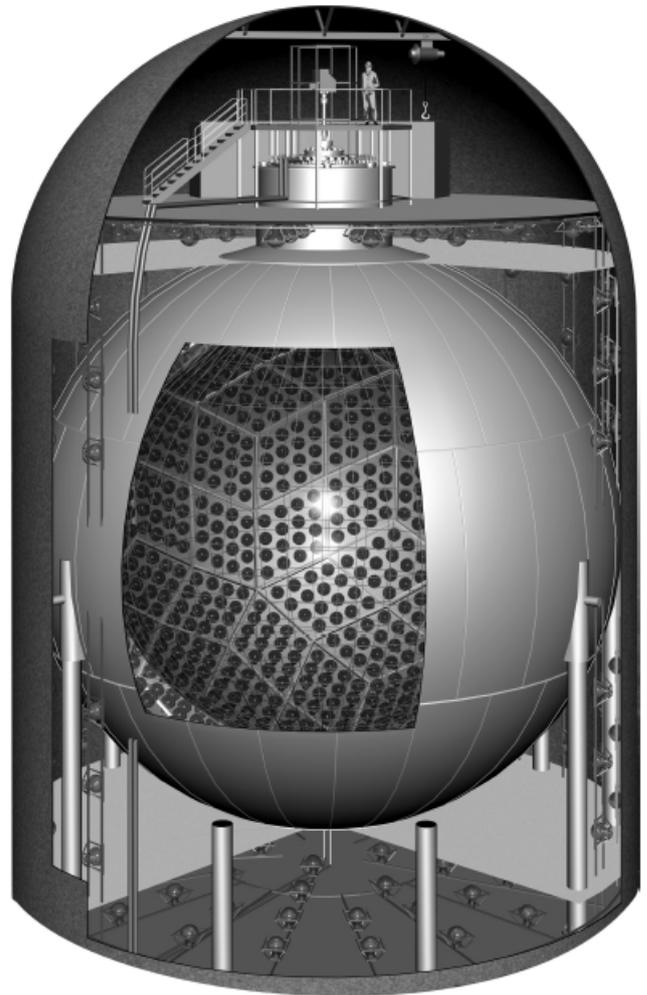


Рисунок 4: Детектор KamLAND с массой 1000 тонн в настоящее время регистрирует антинейтрино от реакторов большой тепловой мощности (1 ГВт) на расстоянии в сотни километров. В области, в которой нет других реакторов, он может обнаружить реакторы с малой тепловой мощностью (10 МВт) на расстоянии в 10 км. Фигура человека на рисунке характеризует размер детектора.

Обнаружение и исключение реактора в дальней зоне. Работу реактора с тепловой мощностью 10 МВт можно исключить в пределах радиуса в 800 км с водным черенковским детектором массой в 1 000 000 тонн. Детекторы, приближающиеся к этому размеру, такие, как тот, который строится для нейтринного эксперимента с длинной базой в США¹⁹ (LBNE, показан здесь), в настоящее время разрабатываются различными группами физиков во всем мире. Измеряемая интенсивность антинейтрино должна будет составлять приблизительно 5 событий в год. Интенсивность включает осцилляции нейтрино, которые следует учитывать на таком расстоянии. Дополнительные реакторы могут изменить уровни фона и повысить требования к размеру детектора.

Обнаружение ядерного взрыва в дальней зоне. Природа деления и приблизительная мощность 10-килотонного взрыва на расстоянии в 250 километров могут быть подтверждены водным черенковским детектором массой в 1 000 000 тонн. Детектор должен будет зарегистрировать 2 - 3 события в течение нескольких секунд после такого взрыва. Обнаружение реакторов и взрывов

в дальней зоне рассматриваются в разделе "Применения в дальней зоне: обнаружение реакторов и взрывов на расстоянии в 10 - 500 км".

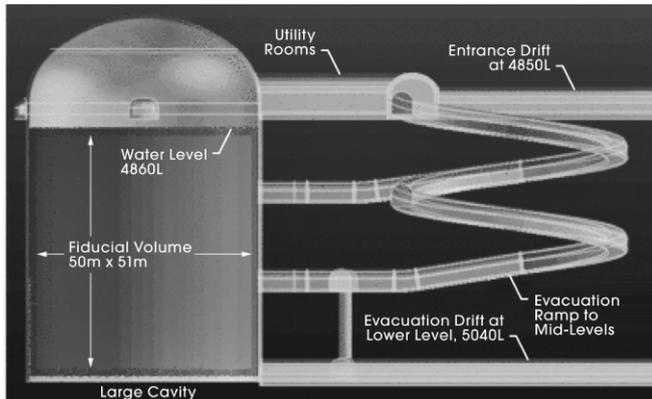


Рисунок 5: Схема водного черенковского детектора антинейтрино, разрабатываемого сейчас в Соединенных Штатах, с размерами, приближающимися к тем, которые требуются для обнаружения реактора на больших расстояниях. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 - вспомогательные помещения; 2 - входная штольня на глубине 1474 м; 3 - уровень воды на глубине 1477 м; 4 - референтный объем 50 м x 51 м; 5 - эвакуационный пандус для средних уровней; 6 - эвакуационная штольня на нижнем уровне на глубине 1532 м; 7 - большая полость.

Слежение за массой расщепляющихся материалов в ядерных реакторах с помощью антинейтрино

В этом разделе описано, как можно отслеживать тепловую мощность и запасы расщепляющихся материалов в действующих реакторах, используя измерения интенсивности и спектров антинейтрино, и представлено базовое введение в механизмы взаимодействия антинейтрино и технологию детекторов, а также многие исторические примеры развернутых детекторов антинейтрино. Эти детекторы - включая два детектора, построенных специально для испытания и демонстрации кооперативного мониторинга реакторов - предоставили ценную информацию о стоимости, ненавязчивости и простоте эксплуатации в контексте гарантий. Из-за исторически ограниченного бюджета МАГАТЭ эти практические соображения являются определяющими при рассмотрении принятия технологии в режиме гарантий МАГАТЭ.

Как обсуждалось ранее, как общая зарегистрированная интенсивность, так и энергетический спектр антинейтрино реактора изменяются со временем в соответствии с запасами топлива в активной зоне. Измерение каждой метрики в течение цикла реактора известно как "эффект выгорания". Эффект выгорания является важной особенностью в приложениях к мониторингу реактора в ближней зоне. Выгорание, измеряемое в гигаватт-днях на тонну тяжелого металла (ГВдн/ТМ), характеризует интегральный выход тепловой мощности топлива реактора на единицу массы топлива. Оно эффективно отслеживает полную нейтронную экспозицию топлива, и, соответственно, потребление урана и производство плутония в активной зоне. Мониторинг интенсивности антинейтрино или энергетического спектра измеряет степень выгорания, и таким образом предоставляет близкую к реальному времени оценку запасов расщепляющихся материалов и мощности действующего реактора.

Зарегистрированная зависящая от времени интенсивность антинейтрино в упрощенной форме может быть записана так:

$$N_{\bar{\nu}} = \gamma [1 + k(t)] W(t) \cdot P(R, E_{\bar{\nu}}) \quad (1)$$

Здесь $N_{\bar{\nu}}$ - зарегистрированная интенсивность антинейтрино, γ - константа, зависящая от расстояния до реактора и эффективности детектора, $W(t)$ - тепловая мощность реактора, и $k(t)$ - зависящая от времени переменная, которая включает изменение частоты деления для

каждого изотопа. Окончательный член, $P(R, E_{\bar{\nu}})$, зависит от энергии антинейтрино и расстояния до реактора, и учитывает осцилляции нейтрино. Его величина равна единице для антинейтрино реактора для расстояний в 500 м и менее, но на расстоянии в 1 км она может уменьшиться на несколько процентов. Известно, что в эксперименте эта величина равнялась приблизительно 0,6 (дефицит примерно в 40% по отношению к ожидаемому потоку) для реакторов на расстоянии примерно в 200 км²⁰. Прошлые и продолжающиеся эксперименты по осцилляции нейтрино, в которых была измерена или будет измерена эта коррекция на таком расстоянии и на больших расстояниях, будут рассмотрены в последнем разделе.

Величина эффекта выгорания в основном зависит от типа активной зоны, состава топлива и тепловой мощности реактора. Например, в стандартном полугодовом цикле эксплуатации реактора с водой под давлением с тепловой мощностью 3,6 ГВт суммарное уменьшение количества урана-235 на 1500 кг, и суммарное увеличение количества плутония-239 на 250 кг совместно приведут к уменьшению параметра $k(t)$ примерно на 10-12%. Условия эксплуатации и результаты двух экспериментов, демонстрирующих это поведение в реакторах с водой под давлением, описаны в следующем разделе. Этот результат специфичен для реактора с обычной водой и топливом из низкообогащенного урана (НОУ). Низкообогащенным называют уран, в котором содержится менее 20% урана-235. Другие типы реакторов, такие, как канадские дейтериево-урановые реакторы (КАНДУ), реакторы-размножители на быстрых нейтронах, реакторы с топливом со смешанными оксидами (МОХ), будут испытывать другие вариации интенсивности антинейтрино в течение топливного цикла.

За этим следует общее объяснение происхождения эффекта выгорания. Более подробный анализ можно найти в работах Климова (1994) и Бернштейна (2009). Эффект выгорания возникает из комбинации двух факторов: изменяющейся частоты деления каждого изотопа, и различия в детектируемом (по отношению к излученному) энергетическом спектре антинейтрино на акт деления от каждого изотопа.

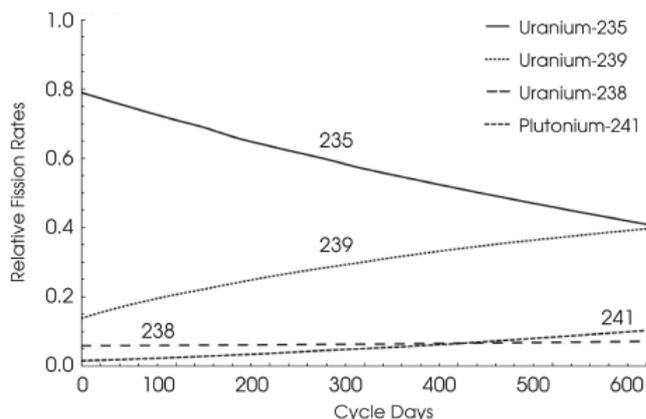


Рисунок 6: Доли частот деления для основных расщепляющихся изотопов в реакторе на обычной воде (по вертикали) в зависимости от дня цикла (по горизонтали). Легенда к рисунку (сверху вниз): 1 - уран-235; 2 - плутоний-239; 3 - уран-238; 4 - плутоний-241.

По мере того, как реактор на обычной воде проходит через свой цикл облучения, масса запасов каждого расщепляющегося изотопа изменяется. Вследствие этого относительные частоты деления изотопов значительно изменяются в течение цикла реактора, даже если мощность реактора поддерживается постоянной. Эти изменения показаны на рис. 6, графике изменений относительных частот в реакторе на обычной воде, работавшем на постоянной мощности в течение 600 суток. Основная часть делений происходит в уране-235 и плутонии-239. Хотя на уран-238 приходится большая часть массы активной зоны, в нем происходит только около 10% от общего числа делений в этом реакторе.

Второй фактор, влияющий на эффект выгорания,

является заметное изменение зарегистрированного энергетического спектра антинейтрино для различных изотопов. Хотя вариации происходят только при относительно высоких энергиях антинейтрино (выше приблизительно 2 МэВ), они оказывают заметное влияние на регистрируемую интенсивность и спектр антинейтрино реактора.

Излучение антинейтрино в ядерных реакторах происходит в результате β -распада нейтронно-избыточных осколков деления. Независимо от изотопа, каждое деление сопровождается образованием примерно шести антинейтрино, что соответствует среднему числу β -распадов, требующихся осколкам деления для достижения стабильности. Для типичного энергетического реактора выход тепловой мощности составляет около 3 ГВт, а выделение энергии при делении равняется примерно 200 МэВ. Поэтому число антинейтрино, излучаемых из активной зоны, равняется примерно 10^{21} за секунду. Они изотропно и без поглощения выходят из активной зоны.

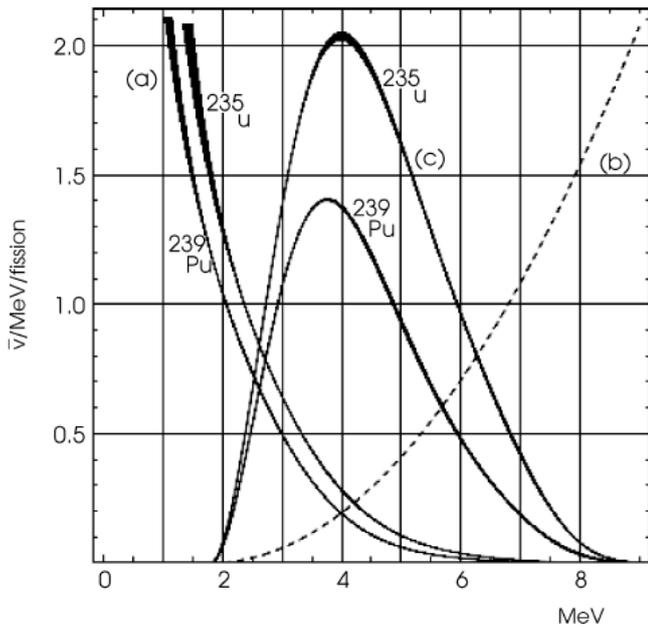


Рисунок 7: а) Спектр антинейтрино от урана-235 и плутония-239, измеряемый в антинейтрино на МэВ на деление. б) Поперечное сечение обратного бета-распада, проявляющее квадратичную зависимость от энергии. в) Спектр антинейтрино, измеряемый детектором, после конволюции с сечением обратного бета-распада, также измеряемый в антинейтрино на МэВ на деление. После приблизительно 3 МэВ, два спектра отличаются на 50%, или более. В реальном детекторе измеряется только суммарный спектр, взвешенный по индивидуальным частотам деления. Толщина линий излученного и обнаруженного спектров показывает неопределенности с отклонением $\pm 1\sigma$. Общая нормировка масштабирована для подгонки к кривым одного и того же графика. На горизонтальной оси отложена энергия антинейтрино в МэВ, на вертикальной оси показан энергетический спектр в антинейтрино на МэВ на деление.

Энергетическое распределение антинейтрино содержит вклады от десятков испытывающих бета-распад продуктов деления. Точные оценки распределения были определены по бета-спектрометрическим измерениям, и подтверждены в многих экспериментах на реакторах²¹. Кривая а) на рис. 7 показывает излучаемый энергетический спектр антинейтрино выше 1 МэВ для двух наиболее важных расщепляющихся элементов. Ширина кривых показывает комбинированную экспериментальную и теоретическую неопределенность энергетических спектров. По конкретному событию нельзя определить, какой расщепляющийся изотоп производит антинейтрино данной энергии. Однако, при высоких энергиях количество излученных разными изотопами антинейтрино заметно различается, и различие увеличивается с энергией.

Для того, чтобы быть зарегистрированным, антинейтрино должно испытать взаимодействие. Наиболее часто

используемым механизмом взаимодействия антинейтрино является обратный бета-распад:



Этот пороговый процесс происходит только тогда, когда у антинейтрино имеется достаточно энергии (1,8 МэВ или более) для того, чтобы преобразовать протон в нейтрон и одновременно образовать позитрон. Поскольку процесс квадратично зависит от энергии падающего антинейтрино, обратное бета-взаимодействие эффективно отбирает и усиливает высокоэнергичную часть спектра антинейтрино, которая наиболее чувствительна к изменениям изотопного состава расщепляющихся материалов в активной зоне. Кривая с) на рис. 7 показывает энергетический спектр антинейтрино после свертки с зависящим от энергии поперечным сечением обратного бета-распада. Квадратичная зависимость поперечного сечения показана на кривой б) рисунка. Регистрируемые спектры двух основных расщепляющихся изотопов отличаются на 50%, и более.

Регистрируемый спектр антинейтрино от реального реактора состоит из суммы индивидуальных спектров от каждого изотопа, взвешенных по частотам деления. Изменяющиеся вклады от деления различных изотопов, в совокупности с заметным различием регистрируемых энергетических спектров антинейтрино для наиболее важных изотопов, вызывают изменение регистрируемого спектра в течение цикла реактора.

Наряду с интенсивностью антинейтрино, измерение спектра из-за эволюции изотопного состава, было эмпирически измерено. Экспериментально измеренные спектры антинейтрино имели абсолютную точность около 2%, причем в ошибках доминировали неопределенности в предсказанном спектре излучения реактора²². Для топливных циклов стандартных реакторов на обычной воде продолжительностью в 500 - 600 суток разности в столбцах гистограммы между началом и концом цикла составляли от 6 до 20%, с наиболее заметным различием при высоких энергиях. Из-за того, что эти разности больше известных неопределенностей в 2%, они могут быть, и были определены экспериментально детекторами нейтрино с энергетическим разрешением.

Таким образом, оценки операционного статуса, тепловой мощности, и содержания плутония в реакторах могут быть определены с помощью измерения общей интенсивности или энергетического спектра антинейтрино. В следующих разделах описываются результаты, полученные на практических детекторах, демонстрирующих эти соотношения, и рассматривается, как эта информация может быть использована в применениях для гарантий реакторов.

Обнаружение антинейтрино реактора и отсеечение фона

Исторически органический жидкий сцинтиллятор был наиболее обычным выбором детектирующей среды для антинейтрино реактора. Он может быть получен в больших количествах по низкой стоимости, обладает высокой концентрацией свободных протонов для взаимодействия (2), и к нему может быть добавлена примесь различных поглощающих нейтроны элементов для увеличения чувствительности к нейтронам в конечном состоянии взаимодействия антинейтрино.

Детектирование жидким сцинтиллятором было стандартным в ядерной физике еще с первых экспериментов, приведших к открытию антинейтрино. Современные детекторы с жидким сцинтиллятором, такие, как Ровно²³, SONGS1²⁴, Chooz²⁵, и Пало Верде²⁶, имели массу в несколько тонн, и каждый из них работал в течение нескольких лет, полными относящимися к детектору систематическими ошибками абсолютной скорости счета антинейтрино до 3%. Эти детекторы обладали очень хорошей временной стабильностью и относительно умеренной опасностью для здоровья.

В обратном бета-процессе (2) как позитрон, так и нейтрон детектируются в близком временном совпадении по сравнению с другими фоновыми событиями. Позитрон и его аннигиляционные гамма-кванты производят сцин-

тилляционные сигналы в течение нескольких наносекунд от взаимодействия антинейтрино: они вместе называются мгновенным сцинтилляционным сигналом. За ним следует вторая, задержанная сцинтилляционная вспышка от каскада гамма-лучей, которые происходят от распада возбужденного ядерного состояния поглотившего нейтрон элемента после нейтронного захвата. Сцинтилляционный свет регистрируется фотоумножителями, а число сцинтилляционных фотонов пропорционально энергиям, выделенным при взаимодействиях электрона и позитрона, при этом записывается время каждого выделения энергии. Это время коррелированной пары выделений энергии на уровне МэВ, с мгновенным и задержанным сигналами, разделенными всего несколькими десятками или сотнями микросекунд, что позволяет эффективно исключать фон.

Нейтронный захват может происходить в водороде, при этом испускается гамма-квант с энергией 2,12 МэВ. Нередко используется присадка с большим поперечным сечением поглощения нейтронов для того, чтобы увеличить надежность сигнала. Это дает двойное преимущество сокращения времени захвата и увеличения энергии, высвобождающейся в гамма-каскаде после захвата, по сравнению с 2,2 МэВ для водорода. Например, концентрат гадолиния в 0,1%, который обладает самым большим сечением поглощения среди всех элементов, сокращает время захвата с примерно 200 микросекунд до десятков микросекунд по отношению к водороду, и увеличивает до 8 МэВ относящуюся к нейтрону энергию, доступную для выделения в детекторе (появляющуюся от гамма-лучей, высвечивающихся после нейтронного захвата).

Для относительно небольших детекторов, требующихся для гарантий реакторов в ближней зоне, возможно также использовать безопасные жидкие сцинтилляторы, блоки твердых пластических сцинтилляторов, покрытых поглощающими нейтроны веществами, водные черенковские детекторы с присадками, и другие подходы, которые могут улучшить простоту развертывания и использования системы. Для обнаружения в средней зоне могут быть использованы такие стратегии, как сегментация и улучшение идентификации частиц, для того, чтобы выполнить более жесткие требования к отсечению фона, накладываемые уменьшением доступного потока на расстояниях до 1 км. Для обнаружения реакторов (или ядерных взрывов) в дальней зоне представляется практическим только использование однородных жидких сцинтилляторов или водных черенковских детекторов с присадками. Детекторы с различным радиусом действия обсуждаются в разделе, описывающем применение в ближней, средней и дальней зонах.

Помимо эффекта осцилляций нейтрино, которые проявляются на очень больших расстояниях, интенсивность сигнала падает просто обратно пропорционально квадрату расстояния до реактора, или реакторов, без других эффектов поглощения даже на расстояниях порядка диаметра Земли. Однако, как будет обсуждаться позже, относительно малые систематические коррекции на эти осцилляции, на уровне нескольких процентов, могут быть выявлены в следующих поколениях экспериментов по осцилляциям нейтрино.

Фон зависит достаточно сложным образом от заглупления и от окружающих материалов. Фоновые события обычно подразделяются на "коррелированные" и "некоррелированные" типы. Коррелированными фоновыми событиями являются такие, для которых единый физический процесс отвечает за кажущиеся позитронные и нейтронные события, такие, как образуемые мюонами ядра лития-9, или многократное рассеяние нейтронов. Некоррелированные фоновые события возникают в двух независимых физических процессах, таких, как два случайных взаимодействия гамма-лучей, возникающих во временном окне, которое определяет сигнал антинейтрино.

Поток мюонов космических лучей, который является ответственным за большую часть коррелированного фона, экспоненциально уменьшается с заглуплением. Заглупление обычно выражается в метрах водного эквивалента (м.в.э.). На расстояниях, имеющих отношение к кооперативному мониторингу в ближней зоне, до приблизительно 1 км, заглупления в диапазоне от 10 до 300 м.в.э., как показано, обеспечивают достаточно хорошие

отношения для точных измерений потока антинейтрино, относящихся к применениям в мониторинге реакторов. Детектор KamLAND, в настоящее время являющийся единственным примером специального детектора антинейтрино реакторов в дальней зоне с чувствительностью к реакторам на расстоянии 200 км и более, находится на глубине около 2700 м.в.э. (или 1 км грунта).

При обнаружении как в ближней, так и в дальней зоне, часто используется активная мюонная антисовпадательная система в качестве временной метки прохождения мюона через главный детектор, или рядом с ним, что позволяет дальнейшее отсечение относящихся к мюонам фоновых событий. Эти системы могут состоять, например, из пластикового или жидкого сцинтиллятора, просматриваемого фотоумножителями, и также используются некоторые другие варианты.

В качестве пассивной защиты для уменьшения некоррелированного фона, который возникает от местных окружающих нейтронов и гамма-лучей, используются различные комбинации свинца и (или) стали для ослабления гамма-излучения, и полиэтилена, воды, или других материалов для ослабления нейтронов. Толщина такой защиты составляет 0,5 - 2 метра, в зависимости от величины сигнала и целевого отношения сигнала к шуму для конкретного эксперимента. Поскольку специально для кооперативного мониторинга было построено только несколько экспериментов, вполне возможна дальнейшая оптимизация защиты и заглупления в контексте экспериментов по кооперативному мониторингу.

Развертывания детекторов антинейтрино, относящихся к гарантиям реакторов

Как показано в табл. 1, события антинейтрино вблизи ядерных реакторов были успешно зарегистрированы во многих экспериментах. Эта богатая экспериментальная история была начата открытием взаимодействия антинейтрино на площадке Саванна Ривер в 1950-х годах, в котором использовалась та же самая технология органических сцинтилляторов, которая стала стандартной для современных экспериментов с антинейтрино реакторов²⁷.

После открытия антинейтрино большая часть этих экспериментов была построена для поиска осцилляций нейтрино, которые проявляются как отклонение зависимости потока антинейтрино от расстояния от обратной квадратичной. Поскольку было немного теоретических указаний на пространственную частоту осцилляции, эксперименты проводились в диапазоне различных расстояний. Большое количество экспериментов предоставило прочное основание для теории и эксперимента, которое может быть использовано в применениях в гарантиях. Возможно, наиболее важным для применений в ближней зоне было то, что эксперименты показали, что осцилляции не влияют на спектр или на обратно квадратичное поведение потока антинейтрино на расстояниях до приблизительно 1 км. Это отсутствие отклонения измерялось в различных экспериментах с абсолютной точностью по потоку антинейтрино реакторов и их спектру на уровне 2%. Сейчас строятся эксперименты, такие, как Дабл Чуз и Дайа Бэй, которые улучшат точность измерений потока и спектра в этом диапазоне расстояний. Кроме того, в многих из ранних экспериментов было четко продемонстрировано влияние изотопного состава на поток и спектр антинейтрино. В некоторых экспериментах, таких, как первый эксперимент Чуз, было успешно реконструировано направление антинейтрино²⁸.

Кроме экспериментов по осцилляциям, российская установка на комплексе Ровно в Украине и американская установка на атомной электростанции Сан Онофре в Южной Калифорнии были развернуты исключительно для демонстрации возможности практического мониторинга реакторов в контексте гарантий с относительно небольшими детекторами антинейтрино (размером в кубический метр). Результаты с этих установок приведены ниже²⁹.

Установки Ровно и SONGS1

По-видимому, российские физики впервые в мире распознали и использовали обнаружение антинейтрино в качестве средства мониторинга реактора³⁰. В течение

многих лет, начиная с 1982 года, были проведены многочисленные фундаментальные и прикладные эксперименты на атомной электростанции Ровно в Кузнецовске, Украина. Независимо, исследователи из Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса и Национальных лабораторий Сандия в течение 2 лет проводили успешное развертывание демонстрационного детектора для

гарантий на коммерческом реакторе с водой под давлением на атомной электростанции Сан Онофре в Южной Калифорнии. Эти эксперименты продемонстрировали уровень чувствительности, достижимый сейчас с относительно простыми детекторами, так же как и различные практические аспекты развертывания, относящиеся к гарантиям МАГАТЭ.

Таблица 1: Характеристики нескольких предыдущих экспериментов по обнаружению антинейтрино реактора. Колонка детектора включает используемый метод, вместе с указанием, была ли использована в электронике дискриминация по форме импульса (PSD).

Эксперимент	Мощность (ГВт)	Масса (тонн)	Расстояние (м)	Глубина (м.в.э.)	Детектор	Счет мюонов (1/с)	Мертвое время (%)
ILL ¹	0,057	0,32	8,76	7	Гелий-3, сцинтиллятор, PSD	250	8
Госген ²	2,8	0,32	38/46/65	9	Гелий-3, сцинтиллятор, PSD	260-340	8
Красноярск ³	1,6	0,46	57/231	600	Только гелий-3	-	-
Буги З ^{4,5}	2,8	1,67	15/40/95	23/15/23	Литий-6, сцинтиллятор, PSD	-	2
Саванна Ривер ⁶	2,2	0,25	18,2/23,8	~10	Гадолиний, сцинтиллятор, PSD	-	-
CHOOZ ⁷	4,4	5	1000	300	Гадолиний, сцинтиллятор	1	2
Пало Верде ⁸	11,6	11,3	800	32	Гадолиний, сцинтиллятор	2000	2
KamLAND ⁹	~80	408	~180000	2700	Гадолиний, сцинтиллятор	0,3	11
Ровно ¹⁰	1,4	0,43	18		Гадолиний, сцинтиллятор	350	7
SONGS1 ^{11,12}	3,4	0,64	24,5	10	Гадолиний, сцинтиллятор	600	10

¹H. Kwon et al., Phys. Rev. D. 24 1097 (1981). ²G. Zacek, 2621 (1986). ³G.S. Vidyakin et al., JETP Lett. 59, 25 (1994). ⁴M. Abbes (1996). ⁵B. Achkar et al., Nucl. Phys. B 434, 503 (1995). ⁶Z.D. Greenwood (1996). ⁷M. Apollonio (1999). ⁸F. Boehm (2000). ⁹Eguchi (2003). ¹⁰A.I.Afonin et al., Sov. J. Nucl. Phys. 46, 944 (1987). ¹¹N.Bowden (2007). ¹²N. Bowden et al., "Observation of the Isotopic Evolution of PWR Fuel Using an Antineutrino Detector" (2008) (<http://arxiv.org/abs/0808.0698v1>).

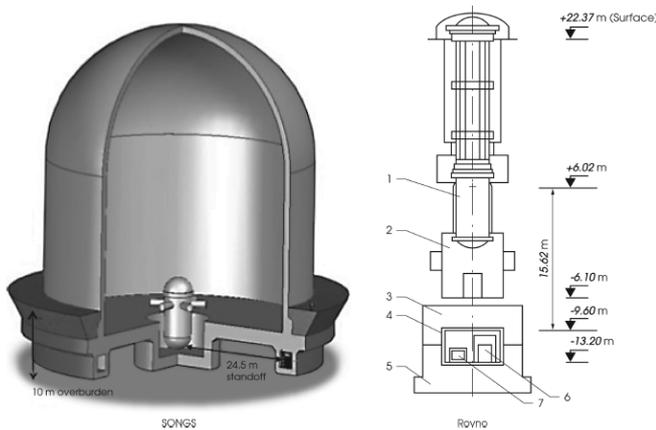


Рисунок 8: Слева: конфигурация развертывания детектора антинейтрино SONGS на атомной электростанции Сан Онофре в Калифорнии. Детектор расположен на расстоянии в 24,5 метра от центра активной зоны реактора, прямо под куполом защитной оболочки. Надписи на рисунке слева (сверху вниз): 1 - расстояние 24,5 м; 2 - заглубление 10 м. Справа: конфигурация развертывания детектора антинейтрино Ровно (из статьи V.A. Korovkin et al., Atomic Energy, 56 (1984):233–239). Детектор (позиция 6) располагается прямо под активной зоной реактора на расстоянии в 18 м от центра активной зоны и в 35 м от поверхности Земли.

В обоих детекторах SONGS1 и Ровно в качестве мишени для антинейтрино используется сцинтиллятор с присадкой гадолиния, водородсодержащая защита для удаления гамма-лучей и нейтронов, и считывание фотомножителями сцинтилляционного светового сигнала, индуцированного парой коррелированных во времени событий от позитрона и нейтрона. Реакторы также похожи: реакторы с водой под давлением и топливом с НОУ, и топливными циклами в 12 - 18 месяцев. Физические расположения обоих детекторов на площадках реакторов показаны на рис. 8. Детектор Ровно был развернут непосредственно под активной зоной реактора, предоставляя прекрасную защиту от мюонного фона и удобное расположение в 18 метрах от центра активной зоны. Детектор SONGS был развернут в "арматурной галерее" реактора, кольцевом помещении, которая располагается непосредственно под куполом защитной оболочки и обеспечивает доступ к стальным арматурным тросам, которые протянуты через конструкцию защитного купола. Галерея расположена в 25 метрах от центра активной зоны реактора.

Такие арматурные галереи есть у многих коммерческих реакторов. Они хорошо приспособлены для размещения детектора антинейтрино, поскольку в них имеется большое свободное пространство, туда редко заходит персонал реактора, и в них обеспечивается хорошая защита от мюонов из-за заглубления примерно в 10 м.в.э. грунта и бетона.

Основными результатами обоих экспериментов являются измерения операционного состояния, ежесуточной или еженедельной тепловой мощности и степени выгорания топлива через измерения скорости счета антинейтрино или спектральные измерения. Левый график на рис. 9 показывает, как выключение реактора отражается на ежечасных измерениях скорости счета антинейтрино, полученных детектором SONGS. Подтверждение изменения операционного состояния реактора на уровне достоверности в 99% достигается в течение 4 часов³¹.

На графиках справа на рис. 9 показаны гистограммы ежесуточных и еженедельных измерений скорости счета антинейтрино, полученных детектором SONGS, нормированные на среднюю ежесуточную скорость счета за предыдущие 4 недели. Эта метрика предоставляет относительную оценку мощности реактора с точностью до 3%. В контексте реальных гарантий влияние выгорания может быть исключено с использованием моделирования реактора. Помимо этого эффекта, который для этого детектора и реактора составляет менее 1% за месяц работы, основным ограничением точности измерения является статистика счета. Дальнейшее повышение точности может быть достигнуто применением больших или более эффективных детекторов, или более длинными временами накопления, при условии, что в течение такого периода мощность реактора была постоянной. Для сравнения, измерения тепловой мощности, делаемые на реакторах другими средствами, являются точными на уровне 0,5 - 2%, в зависимости от метода измерений.

На рис. 10 показаны измерения скорости счета антинейтрино в зависимости от дня цикла для экспериментов SONGS и Ровно. В обоих случаях проявляется зависящее от времени влияние степени выгорания на скорость счета.

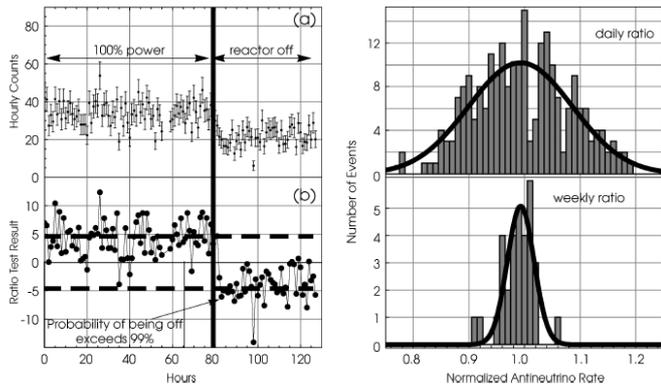


Рисунок 9: Слева: (а): часовое число событий, подобных антинейтрину, в зависимости от времени (в часах) в период выключения реактора. (б): значение статистики теста в зависимости от времени (в часах) в тот же период времени. На обоих графиках вертикальная линия показывает час, в который реактор был выключен. Штриховые линии на графике (б) являются значениями статистики теста на уровне достоверности 99%, известными как последовательное вероятностное отношение теста. Для этого набора данных эти значения получают только в течение соответствующего периода (включения или выключения), что означает, что не появляется ложных положительных или отрицательных значений. Надписи на рисунке (сверху вниз и слева направо): 1 - 100% мощности; 2 - реактор выключен; 3 - часовой счет; 4 - отношение результата теста; 5 - вероятность выключения превышает 99%; 6 - часы. Справа: Гистограммы скорости счета зарегистрированных нейтрино за сутки и за неделю, деленные на среднее значение соответствующей величины за предыдущие 4 недели. Нормированная должным образом, эта относительная метрика дает измерение тепловой мощности реактора с точностью 3% в течение месяца, что ограничивается только статистикой счета. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 - суточное отношение; 2 - число событий; 3 - недельное отношение.

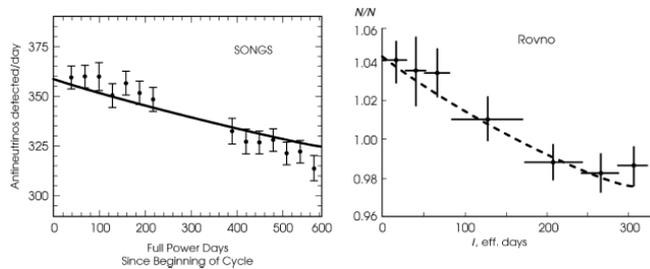


Рисунок 10: Два эксперимента, демонстрирующих существование влияния выгорания на скорость счета антинейтрину. Слева: Эксперимент SONGS1. Точки данных, со статистическими планками погрешностей, представляют собой счет антинейтрину за сутки за вычетом фоновых событий, усредненный за 30 суток, в зависимости от количества суток на полной мощности в цикле. В этом эксперименте предсказания и наблюдения показывают изменение скорости счета приблизительно на 12% в течение цикла в 600 суток. На горизонтальной оси отложено количество дней на полной мощности с начала цикла, на вертикальной оси показано число зарегистрированных за сутки антинейтрину. Справа: Эксперимент Rovno. Скорость счета антинейтрину, нормированная на среднее значение в течение цикла (по вертикальной оси), показано в зависимости от количества эффективных суток для эксперимента Rovno (по горизонтальной оси). Точки с планками погрешностей являются данными, кривая представляет предсказание, основанное на моделировании эволюции активной зоны реактора.

В эксперименте Rovno было также измерено изменение спектра антинейтрину в течение топливного цикла. На рис. 11 показано отношение реконструированного энергетического спектра антинейтрину в детекторе Rovno в начале и в конце топливного цикла. Изменение спектра

наиболее заметно при высоких энергиях, что соответствует предсказаниям, и оно вызвано совокупным потреблением 521 кг расщепляющихся материалов (как плутония, так и урана) в течение топливного цикла. Хотя погрешность этой величины, определенной по измерениям антинейтрину, непосредственно не сообщается, группа Rovno независимо оценила потребление топлива по записям тепловой мощности, определив значение в 525 ± 14 кг, близкое к значению, оцененному по изменению спектра антинейтрину.

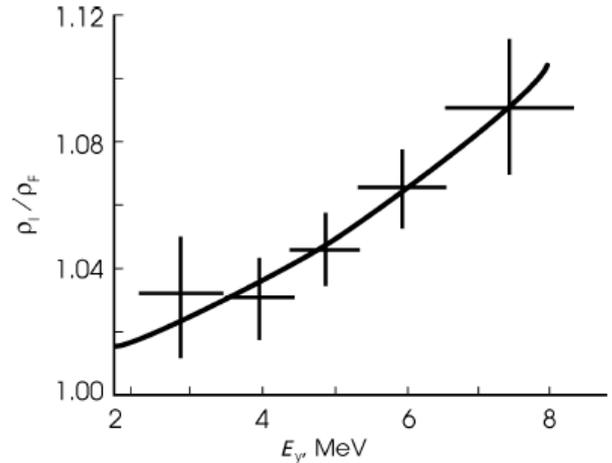


Рисунок 10: Отношение спектров антинейтрину в начале цикла и в конце цикла, измеренное на реакторе Rovno (по вертикальной оси) в зависимости от энергии нейтрину в МэВ (по горизонтальной оси). Точки с планками погрешностей являются данными, кривая - предсказанием, основанным на моделировании эволюции активной зоны реактора. Результат воспроизведен из работы Климова (1994). Рисунок предоставлен М.Д. Скорохватовым, РНЦ "Курчатовский институт", Москва, и печатается с разрешения.

В дополнение к демонстрации чувствительности к величинам, представляющим вероятный интерес для гарантий, эти два эксперимента предоставили важные примеры простоты и легкости эксплуатации детекторов антинейтрину. Оба они продемонстрировали длительную работу без посещения с простой конструкцией счетного детектора с малым количеством каналов, невмешательство в операции реакторной площадки на коммерческой электростанции в течение нескольких лет, и дистанционный и автоматический сбор данных об антинейтрину и состоянии детектора. Расположение детектора было полностью удалено от повседневных операций детектора, и не требовалось никакого обслуживания детектора персоналом площадки. Даже для этих не оптимизированных прототипов понадобилось лишь эпизодическое обслуживание детектора. Все эти особенности показывают потенциальную полезность детекторов антинейтрину для гарантий МАГАТЭ, для которых стоимость и простота эксплуатации являются важными соображениями.

Усилия по разработке детекторов антинейтрину для гарантий во всем мире

Через 25 лет после российских демонстраций в Rovno и через несколько лет после первого совещания экспертов МАГАТЭ по этой теме, во всем мире предпринимается немало усилий для исследования базирующихся на антинейтрину гарантий реакторов. Эти усилия включают программы в Бразилии, Франции, Японии, России, Тайване и Соединенных Штатах. Эволюция этих работ суммируется в повестках ежегодных рабочих совещаний по прикладной физике антинейтрину (AAP)³².

Направленность антинейтрину

Информацию о направлении антинейтрину получить трудно. Используя взаимодействие обратного бета-распада, группа Choоз успешно восстановила направление антинейтрину от известного реакторного источника с точностью определения направления приблизительно в

20 градусов³³. Однако, из-за стохастического отношения между направлением антинейтрино и измеряемыми величинами в детекторе для достижения такой точности определения требуются тысячи событий. Такое количество событий несовместимо с низкими скоростями счета событий, характерными для обнаружения небольших реакторов в применениях в средней и дальней зонах (на расстояниях от 1 до 500 км). Новые методы реконструкции направления антинейтрино в отдельных событиях являются ключевой областью интереса для применений на большом расстоянии.

Информацию о направлении можно получить также от детекторов, которые основаны на обнаружении черенковского излучения, таких детектор Супер-Камиоканде³⁴. Направление падающего антинейтрино восстанавливается по определению апекса и центрального угла реконструированного конуса черенковского излучения. Однако, такие детекторы используют рассеяние антинейтрино на электроны, которое, как уже обсуждалось, менее пригодно для применения в безопасности из-за своего меньшего поперечного сечения. Этот метод также требует большей статистики для того, чтобы восстановить направление на источник в среднем смысле.

Образование антинейтрино во взрывах от деления ядер

Вспышка антинейтрино при взрывах от деления ядер возникает от того же источника, что и антинейтрино реактора: цепочки из примерно шести бета-распадов, которые следуют за каждым делением. Несекретная картина вспышки антинейтрино может быть создана на базе нескольких простых предположений. Во-первых, в отличие от стационарных реакторов, все деления при взрыве происходят в течение 1 - 10 микросекунд. Так происходит потому, что критичность поддерживается в течение временного интервала примерно такого порядка. По той же самой причине расщепляющиеся нейтроны не могут термализоваться перед быстрой разборкой (взрывом) устройства. Поэтому популяция продуктов деления и энергии антинейтрино будут типичными для деления быстрыми нейтронами. Эти два факта позволяют грубо определить основные особенности вспышки: количество антинейтрино и их энергетическое и временное распределение.

Полное количество антинейтрино во вспышке прямо пропорционально энергии взрыва:

$$N_{\bar{\nu}} \cong 6 \cdot N_{fiss} \cdot Y \quad (3)$$

где N_{fiss} - число делений на килотонну, равное $1,45 \cdot 10^{23}$, а Y - энергия взрыва в килотоннах.

Энергетическое распределение антинейтрино создается спектром деления быстрыми нейтронами. Такой спектр был теоретически рассчитан Фогелем³⁵ (хотя он и не был измерен ни на реакторе, ни при взрыве). На рис. 12 показано энергетическое распределение нейтронов, излученных при взрыве от деления ядер, которое в этом простом предположении является тем, которое ожидается от реактора на быстрых нейтронах.

Временное распределение вспышки антинейтрино определяется периодами полураспада продуктов деления. Эти периоды сравнительно коротки, от нескольких миллисекунд до нескольких секунд; длинный "хвост" распределения связан с очень долгими периодами полураспада. На рис. 13 показано приблизительное временное распределение событий, основанное на известных наиболее вероятных продуктах деления. Среднее время жизни примерно равно 2,5 секунды.

Обнаружение антинейтрино от взрывов от деления ядер

Согласно основным характеристикам сигнала, детектор должен быть способен регистрировать события от антинейтрино с энергией до примерно 8 МэВ от вспышки, продолжающейся несколько секунд.

Учитывая пороговую энергию, количество событий в детекторе обратного бета-распада в зависимости от

энергии взрыва Y (в килотоннах), расстояния D (в сотнях километров) и массы детектора M (в миллионах тонн) будет равно:

$$N_{\bar{\nu}} = 2.25 \times \left(Y \times \frac{M}{10^6} \times \left(\frac{100}{D} \right)^2 \right) \quad (4)$$

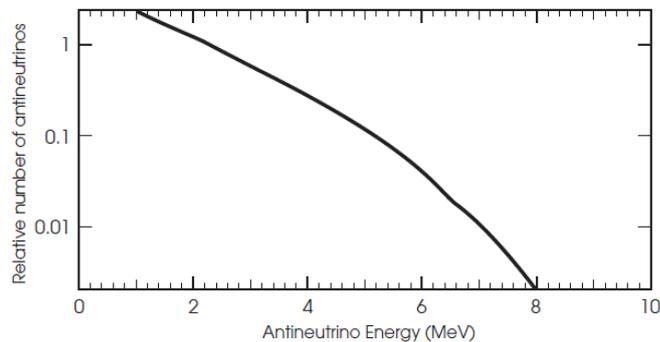


Рисунок 12: Приближенный энергетический спектр антинейтрино, образованных при взрыве с делением урана-235. На горизонтальной оси отложена энергия антинейтрино в МэВ, на вертикальной оси показано относительное число антинейтрино.

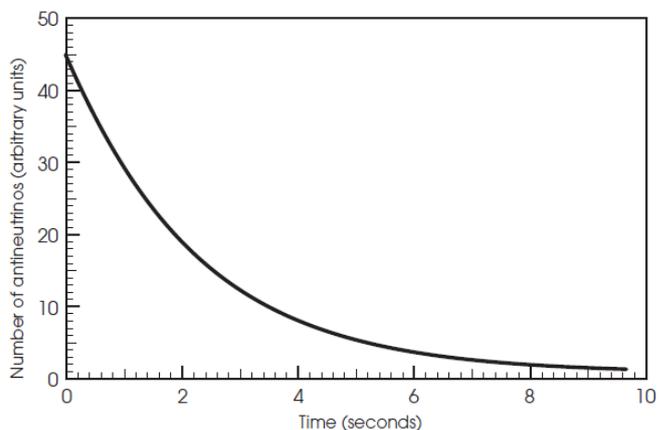


Рисунок 13: Приближенное временное распределение антинейтрино, образованных при взрыве с делением урана-235. На горизонтальной оси отложено время в секундах, на вертикальной оси показано число антинейтрино (произвольные единицы).

При оценке скорости счета предполагался детектор на базе воды. К сожалению, количество событий чрезвычайно мало. Уравнение (4) показывает, что в детекторе массой миллион тонн на расстоянии в 100 километров будет зарегистрировано только около 2 событий на килотонну.

Хотя количество событий довольно мало, их вспышечная природа позволяет эффективно уменьшить фон. Однако, из-за явного дефицита антинейтрино возможно только обнаружение, и, очевидно, только с очень большими усилиями. Вероятно, в любом реалистичном сценарии нельзя будет измерить никакого спектрального (или временного) распределения.

В предпоследнем разделе этой статьи мы обсудим перспективы и возможные преимущества дистанционного мониторинга ядерного взрыва с помощью антинейтрино; полное исследование можно найти в работе Бернштейна³⁶.

ПРИМЕНЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ: ГАРАНТИИ И КООПЕРАТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ

В этом разделе описаны цели и текущие протоколы и методы режима гарантий реакторов МАГАТЭ, а затем определяются возможные роли, которые антинейтрино может играть в этом режиме. Изучаются также операционные концепции кооперативного мониторинга за преде-

лами гарантий. Раздел завершается обсуждением потребностей НИР для будущих применений на основе антинейтрино в мониторинге в ближней зоне.

Текущие методы гарантий реакторов

Целью режима гарантий МАГАТЭ является "... своевременное обнаружение перевода существенных количеств расщепляющихся материалов из мирной ядерной деятельности в производство ядерного оружия ..."³⁷. Режим применяется ко всей гражданской ядерной инфраструктуре, включая коммерческие и исследовательские реакторы. Поскольку антинейтрино производятся в практически измеримых количествах только критическими или сверхкритическими системами, реакторы являются единственной частью режима гарантий МАГАТЭ, к которой обнаружение антинейтрино имеет потенциальное отношение.

"Своевременное обнаружение" и "существенное количество" являются важнейшими элементами режима гарантий МАГАТЭ. В табл. 2 показаны цели МАГАТЭ для своевременного обнаружения. Эти цели базируются на "времени преобразования", оценке времени, необходимого для того, чтобы преобразовать ядерный материал в данную форму в оружии. Существенное количество (СК) определяется как количество ядерного материала, для которого не исключается возможность изготовления ядерного взрывного устройства. В табл. 3 показано определение существенного количества МАГАТЭ.

Методы гарантий МАГАТЭ подразделяются на две категории:

1. **Учет ядерного материала:** подсчет, проверка и прямые измерения, которые подтверждают количество и продолжающуюся целостность объявленных ядерных материалов.
2. **Мероприятия по удержанию и наблюдению (У/Н):** мероприятия У/Н, такие, как видеозаписи, метки и печати, и подобные им методы, используемые для дополнения методов учета материала.

Таблица 2: Цели МАГАТЭ для своевременности обнаружения перевода ядерных материалов из реакторов.

Цель своевременности МАГАТЭ	Форма материала
Один месяц	Необлученный материал прямого использования (например, высокообогащенный уран (ВОУ) ¹ , выделенный плутоний, или топливо МОХ).
Три месяца	Облученный материал прямого использования (например, плутоний в отработанном топливе или топливе активной зоны).
Один год	Материал непрямого использования (например, НОУ).

¹ Уран со степенью обогащения ураном-235, большей 20%.

Таблица 3: Цели МАГАТЭ для своевременности обнаружения перевода ядерных материалов из реакторов.

Существенное количество МАГАТЭ	Изотопный состав
25 кг урана-235 в ВОУ	ВОУ определяется как уран с содержанием урана-235, большим 20%.
75 кг урана-235 в НОУ	НОУ определяется как уран с содержанием урана-235, меньшим 20%.
8 кг плутония	Любая изотопная смесь плутония, за исключением плутония с содержанием плутония-238, большим 20%.

¹ Уран со степенью обогащения ураном-235, большей 20%.

Деятельность по гарантиям реактора меняется в зависимости от типа реактора, хотя и обладает определенными общими особенностями. На всех реакторах гарантии начинаются с информационного вопроса по конструкции (ИВК), предоставляемого государством в МАГАТЭ. МАГАТЭ проводит первоначальный обзор и инспекцию площадки на основании информации в ИВК. Обзор заключается в сравнении проектной документации станции с действительной инфраструктурой станции, относящейся к гарантиям. В течение всего срока работы реактора МАГАТЭ ежегодно подтверждает ИВК, в осо-

бенности, когда государство сообщает о любых изменениях в операциях реактора.

После того, как реактор заработает, режим гарантий применяет мероприятия учета и удержания и наблюдения к свежему топливу, к топливу в активной зоне и к отработанному топливу. Важными методами учета являются аудиторские проверки эксплуатационных записей реактора, в которых проверяется согласованность записей и проводится сравнение с предыдущими отчетами.

МАГАТЭ подтверждает, что свежее топливо, перевозящееся с установки изготовителя, идентично тому, которое получается на реакторе, посредством сравнения серийных номеров на получаемом свежем топливе с записями поставок топлива с установки изготовителя топлива. Аналогичная процедура применяется к всем материалам, вывозящимся с площадки. Перевозки отработанного топлива тщательно отслеживаются. Если необходимо подтвердить целостность топлива и проверить серийные номера на контейнерах с отработанным топливом, вывозящимся с площадки, или перемещаемых в сухое хранилище на площадке, то проводятся дополнительные инспекционные посещения.

Помимо этих общих особенностей, мероприятия по учету и удержанию и наблюдению изменяются в зависимости от типа реактора.

Гарантии реакторов с обычной водой

Реакторы с обычной водой отличаются обогащением своего топлива (обычно НОУ с обогащением 3 - 5%) и перезаправкой топлива в периоды выключения. Эти факторы в основном определяют протоколы гарантий МАГАТЭ, относящиеся к реакторам с обычной водой. Перегрузка в периоды выключения означает, что расщепляющиеся материалы в реакторы доступны только в периоды выключения. Поэтому на эти периоды остановок направлена большая часть верификационной активности МАГАТЭ на реакторах с обычной водой.

Для свежего топлива в активной зоне и отработанного топлива МАГАТЭ должна будет каждые 3 месяца подтверждать, что не произошло никаких изъятий существенных количеств плутония в топливе активной зоны и отработанном топливе, каждый год подтверждать, что не произошло никаких изъятий существенных количеств НОУ в свежем топливе, топливе активной зоны и отработанном топливе. МАГАТЭ проводит инспекции промежуточной верификации запасов (ПВЗ) через трехмесячные интервалы, для того, чтобы выполнить свою цель по своевременности для плутония, и проводит физическую верификацию запасов (ФВЗ) на реакторе с обычной водой раз в год для того, чтобы выполнить свою цель по своевременности для НОУ. Во время ФВЗ МАГАТЭ подтверждает наличие всех расщепляющихся материалов на площадке, и все перевозки ядерных материалов на площадку и из нее. В течение года могут происходить другие инспекции для верификации перемещения отработанного топлива в мокрое или сухое хранилище на площадке.

Декларации тепловой мощности. В качестве части своего процесса инспекции МАГАТЭ получает от государства официальную декларацию полной тепловой мощности, выработанной станцией с последнего периода инспекции. МАГАТЭ использует историю мощности реактора для анализа производства плутония в активной зоне. Хотя системы мониторинга мощности реактора доступны и используются в режимах гарантий других реакторов (таких, как исследовательские реакторы, см. ниже), эти системы не были внедрены на реакторах с обычной водой, поскольку было обнаружено, что они навязчивы и сложны в обслуживании, дороги, и имеют немного преимуществ по сравнению с методами удержания и наблюдения³⁸. Из-за этих расходов и трудностей у МАГАТЭ нет прямого независимого подтверждения накопления плутония в активной зоне, помимо внутренней согласованности заявлений оператора.

Верификация свежего топлива и топлива в активной зоне. Во время ФВЗ МАГАТЭ подтверждает продолжающееся присутствие топлива в активной зоне, используя подводную телекамеру для проверки серийных номеров на топливных сборках. МАГАТЭ также подсчитывает количество позиций свежего топлива, подтверждает их серийные номера, и случайным образом проверяет коли-

чество топливных сборок для того, чтобы подтвердить, что они содержат уран, используя утвержденный план статистической выборки. Измеряется гамма-спектр, в котором идентифицируется линия урана-235 с энергией 185 кэВ, для того, чтобы подтвердить содержание урана в топливе. После того, как будет проверена активная зона реактора, МАГАТЭ будет зависеть от удержания и наблюдения, используя предписанную комбинацию печатей на стратегических люках и каналах в бассейне реактора и камеры наблюдения, чтобы повторно убедиться в том, что не произошло попытки вмешательства в топливо активной зоны до следующей ФВЗ.

Верификация отработанного топлива. МАГАТЭ также проверяет и поддерживает непрерывность знания (НЗ) отработанного топлива на реакторах с обычной водой. Отработанное топливо является наиболее привлекательным материалом с точки зрения распространения, поскольку оно содержит большую часть плутония, располагается вне реактора и поэтому оно наиболее уязвимо к изъятию. Во время каждого визита для ФВЗ МАГАТЭ подтверждает продолжающееся присутствие отработанного топлива в бассейне охлаждения, используя прибор ночного видения, настроенный на спектр черенковского излучения, выпускаемый отработанным топливом. Для старого топлива, или топлива с низкой степенью выгорания с пониженным выходом черенковского излучения позиции проверяются с помощью спектроскопических детекторов, которые регистрируют гамма-лучи с энергией 662 кэВ от цезия-137. После того, как бассейн с отработанным топливом будет проверен, МАГАТЭ поддерживает непрерывность знания с помощью камер наблюдения и, в некоторых случаях, запечатывания крышек над бассейном отработанного топлива.

Каждые 3 месяца МАГАТЭ проверяет отработанное топливо на своевременность, подтверждая функциональность и целостность оборудования наблюдения и печатей. Если в бассейне охлаждения не существует системы удержания и наблюдения, то МАГАТЭ обязано повторно проверять весь бассейн с отработанным топливом каждые 3 месяца, используя детекторы черенковского излучения или гамма-лучей.

Гарантии реакторов КАНДУ

На реакторах КАНДУ основной целью гарантий является учет отработанного топлива. Как и на реакторах с обычной водой, учетные записи проходят аудиторскую проверку в каждом визите и сравниваются с предыдущими отчетами для МАГАТЭ. Кроме того, на реакторах КАНДУ проводятся следующие мероприятия по гарантиям:

- Верификация топлива в активной зоне посредством непрерывного мониторинга разгрузки отработанного топлива с помощью монитора разгрузки отработанного топлива.
- Подсчет и мониторинг связок отработанного топлива по мере того, как они переносятся из камеры в отсек отработанного топлива с использованием счетчика связок отработанного топлива. Если потребуются, отслеживаются другие проникновения в камеру для того, чтобы подтвердить, что все отработанное топливо переносилось в отсек отработанного топлива по маршруту, включающему счетчики связок.
- Наблюдение за отсеком отработанного топлива. Кроме того, в дополнение к системе наблюдения на некоторых станциях топливные контейнеры с указателями вмешательства запечатываются печатями. На других станциях в качестве резерва системы наблюдения используются приборы неразрушающего контроля проб.

Поскольку перезагрузка топлива на реакторах КАНДУ происходит практически ежедневно, для непрерывного мониторинга и отслеживания перемещений отработанного топлива используются постоянно установленные приборы. Напротив, поскольку активные зоны реакторов с обычной водой обычно не открываются чаще одного раза в год, то, как правило, можно использовать гарантийные печати МАГАТЭ для подтверждения того, что головка реактора под давлением оставалась закры-

той в период между инспекциями МАГАТЭ.

Гарантии исследовательских реакторов

Практика гарантий на исследовательских реакторах весьма различна из-за разнообразия типов активных зон и эксплуатационных характеристик. Аудиторские проверки и мероприятия по удержанию и наблюдению в целом проводятся аналогично тем, которые делаются на реакторах КАНДУ и реакторах с обычной водой. Однако, существенным отличием в протоколах гарантий некоторых исследовательских реакторов является использование монитора мощности реактора (РЕРМ), который отслеживает уровни потока нейтронов, и усовершенствованного термогидравлического монитора мощности (АТРМ), который измеряет дифференциал потока и температуры в первичном контуре охлаждения для того, чтобы подтвердить тепловые характеристики активной зоны. Поскольку топливо в исследовательских реакторах легко перемещается и мишени устанавливаются без ведома МАГАТЭ, имеется потенциальная возможность скрытого производства плутония на крупных исследовательских реакторах (с тепловой мощностью более 25 МВт). Это привело к созданию упомянутых выше мониторов РЕРМ и АТРМ. Для функционирования систем АТРМ необходимо установить их в контуре охлаждения реактора.

Методы гарантий реакторов, основанные на антинейтринно

Протоколы, представленные выше, большей частью основаны на мероприятиях по удержанию и наблюдению, декларациях оператора и на так называемом "учете позиций", который в этом контексте относится к подсчету топливных сборок или топливных стержней. Напротив, обнаружение нейтринно относится к типу "массового учета" для прямой оценки количеств и скоростей потребления и производства расщепляющегося материала в активной зоне, способом, не вмешивающимся в операции реактора, расположенным вне зоны удержания, и под контролем агентства инспекции гарантий. Эти особенности предоставляют дополнительный набор возможностей, которые могут еще более усилить режим гарантий реактора.

Следующие примеры показывают, как из интенсивности и спектра антинейтринно могут быть определены операционное состояние, тепловая мощность, и запасы расщепляющегося материала в реакторе. Примеры являются предположительными, и не исчерпывают того, как эта информация может быть использована в контексте гарантий. На практике каждому из типов реакторов, с обычной водой, на быстрых нейтронах, КАНДУ, и прочим, потребуется специальный анализ гарантий для того, чтобы определить полезность детекторов антинейтринно в рамках конкретного протокола гарантий. Более того, полное преимущество метрик гарантий, основанных на антинейтринно, может быть реализовано только при их интеграции с существующими протоколами гарантий МАГАТЭ. Специфика этой интеграции, хотя она и важна, требует прямой оценки экспертов по гарантиям, и лежит за пределами тематики этой статьи.

Операционное состояние

Одной из причин слежения за мощностью реактора является подтверждение того, что реактор не останавливался и запускался с необычной частотой, или иным способом работая подозрительным образом. Например, частые выключения в начале топливного цикла могут указывать на попытки выгрузки топлива с низкой степенью выгорания, из которого легче извлечь плутоний. Изотопный состав такого плутония с низкой степенью выгорания также является несколько более благоприятным для конструкции бомбы. Это указывает на одно возможное преимущество измерений антинейтринно: они могут непрерывно и независимо подтверждать правильность деклараций оператора по истории эксплуатации реактора между периодами инспекции. Этот тип измерений особенно интересен для реакторов, перезагружаемых при выключении, таких, как реакторы с обычной водой, или многие исследовательские реакторы. Например, прототип детек-

тора SONGS1, развернутый на реакторе с обычной водой, показал, что выключения могут быть обнаружены с достоверностью 99% в течение 5 часов, и что 20%-ое изменение тепловой мощности может быть обнаружено в течение 15 часов³⁹. По чисто статистическим основаниям, при условии, что будут достигнуты аналогичные отношения сигнала к шуму, такая же чувствительность может быть использована для слежения за реакторами меньшей мощности. Например, чувствительность детектора SONGS может быть достигнута на реакторе с тепловой мощностью 140 МВт, при условии, что все условия детектора будут идентичными, но детектор будет установлен на расстоянии 5 метров от активной зоны реактора.

Мощность

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. A. Bernstein et al., *J. Appl. Phys.* 91 (2002); Y.V. Klimov et al., *Atomnaya Energiya*, 76 (1994).
2. International Atomic Energy Agency, Department of Safeguards <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>; Draft language for this treaty can be found at the Web site of The International Panel on Fissile Materials (http://www.fissilematerials.org/ipfm/pagesus_en/about/about/about.php).
3. A. Bernstein et al., *Science and Global Security* 9 (2001): 235–255.
4. A. Bernstein et al., “Nuclear Security Applications of Antineutrino Detectors: Current Capabilities and Future Prospects,” (2009) (<http://arxiv.org/abs/0908.4338>).
5. F. Reines et al., *Phys. Rev.* 92 (1953):83–831.
6. F. Boehm et al., *Phys. Rev. D* 62 (2000).
7. M. Apollonio et al., *Phys. Rev. Lett.* B 466 (1999).
8. M. Abbes et al., *NIMA* 374 (1996): 164.
9. Zacek, G. et al., *Phys. Rev. D.* 34(9), (1986): 2621–2636.
10. Z.D. Greenwood et al., *Phys. Rev. D* 53(1996) 6054.
11. Bernstein (2002); Klimov (1994).
12. Bernstein (2001).
13. Apollonio (1999); Boehm (2000); K. Eguchi et al., (KamLAND) *Phys. Rev. Lett.* 90 (2003).
14. Davis B. R. et al., *Phys. Rev. C*19, 2259(1979); P. Vogel et al., *Phys. Rev. C*24 (1981): 1534.
15. K. Schreckenbach et al., *Phys. Rev. Lett.* B160 (1985): 325; A.A. Hahn et al., *Phys. Rev. Lett.* B218(1989): 365.
16. I. C. Gauld, RNL/TM–2005/39 (2005).
17. M. Apollonio et al., *Phys. Rev. D*, 61(1999):1.
18. Eguchi. (2003).
19. The fiducial mass is defined as the fraction of the total detector mass within which valid antineutrino events are recorded. In the present context, the outermost thickness 190 Bernstein et al. of the total mass of the detector is used as a shield against external backgrounds to create a central fiducial region.
20. Eguchi, 021802–1 (2003).
21. Davis (1979); Vogel (1981); Y. Declais et al., *Phys. Rev. Lett.* B 338(1994): 383; G. Zacek, 2621(1986).
22. C. Bemporad et al., *Rev. Mod. Phys.*, 74(2002): 2.
23. Klimov (1994).
24. N. Bowden et al, NIM A572 985–998 (2007).
25. Apollonio, *Phys. Let. B.*, (1999).
26. Boehm (2000).
27. F. Reines (1953).
28. Ardelier et al., “Double Chooz, A Search for the Neutrino Mixing Angle theta-13” (2006) (<http://arxiv.org/abs/hep-ex/0606025v4>); Daya Bay Collaboration (<http://arxiv.org/abs/hep-ex/0701029>); Apollonio (1999).
29. Klimov (1994); Bowden (2007).
30. L. Mikaelyan, in: Proc. Intern. Conf. “Neutrino 77” 2 (1978), Nauka, Moscow 383.
31. A. Bernstein et al., *J. Appl. Phys.* 103, 074905 (2008).
32. Neutrino Sciences 2005, Honolulu, Hawaii, U.S.A. (<http://www.phys.hawaii.edu/sdye/hnsc.html>); Applied Antineutrino Physics 2006, Livermore, California, U.S.A. (<http://neutrinos.llnl.gov/workshop/aap2006.html>); Applied Antineutrino Physics 2007, Paris, France (<http://www.apc.univ-paris7.fr/AAP2007/index.phtml>); Applied

- Antineutrino Physics 2009, Rio de Janeiro, Brazil (<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confid=50498>); Applied Antineutrino Physics 2010, Sendai Japan (<http://www.awa.tohoku.ac.jp/AAP2010/>).
33. M. Apollonio et al. (CHOOZ), *Eur. Phys. J. C*27, 331 (2003).
34. Y. Fukuda et al. *Phys. Rev. Lett.* 81(6)(1998):1158–1162.
35. Vogel (1981).
36. Bernstein (2001).
37. INFCIRC/153 (corr.) (Vienna, Austria: IAEA, 1972).
38. Robert Fagerholm (Private Correspondence at IAEA, Vienna, Austria, October 2006).
39. Bernstein (2008).
40. Там же.
41. Bemporad (2002).
42. J. Djurcic et al. (arXiv:0808.0747v1 [hep-ex]).
43. V. Bulaevskaya et al., submitted for publication to *J. Appl. Phys.* (2010) (<http://arxiv.org/abs/1009.2123>).
44. S. Nakajima et al., NIM A569 837–844 (2006).
45. A. Bernstein et al., Proceedings of INMM 47th Annual Meeting, Nashville, TN, United States, July 16–20, 2006, UCRL-CONF-222067 (<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/334631.pdf>).
46. P. Huber et al., *Phys. Rev. D* 70 (2004).
47. Committee on International Security and Arms Control, *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, Reactor-Related Options, National Academy of Sciences* (Washington, D.C. National Academy Press, 1995).
48. Briefly, the logic of the Spent Fuel Standard is that converting separated military plutonium stockpiles into a form similar to spent fuel, which contains most of the world’s plutonium, is both necessary and sufficient after consideration of nonproliferation, cost, speed, and technical factors. A more resistant form would be too expensive and slow to produce; a less resistant form would be too attractive from the standpoint of a proliferator. Since no significant disposition of plutonium has taken place in the one and one half decades since the study was completed, choosing methods based on the estimated time to completion seems less important than was previously thought.
49. A. Hayes, presentation at Applied Antineutrino Physics Conference, Livermore California, Sept. (2006) (<http://neutrinos.llnl.gov/workshop/aap2006.html>).
50. Bernstein (2009).
51. Ardelier (2006).
52. S. Cormon et al., “Studies for the Determination of the Antineutrino Spectrum Emitted by Nuclear Power Plants and Their Potential use as Remote Monitors.” (<http://irfu.cea.fr/Sphn/nd2007/sitend2007/pdf1/758.html>).
53. P. Vogel, *Phys. Rev. C*,76, 025504 (2007).
54. Huber et al. (2004).
55. Neutrino Sciences (2005); Applied Antineutrino Physics (2006); Applied Antineutrino Physics (2007); Applied Antineutrino Physics (2009); Applied Antineutrino Physics (2010); S. Dazeley et al., (2007) “Transparency of 0.2% GdCl3 Doped Water in a Stainless Steel Test Environment” (<http://arxiv.org/abs/0805.1499v1>); P. Barbeau et al., “Large-Mass Ultra-Low Noise Germanium Detectors: Performance and Applications in Neutrino and Astroparticle Physics” (2007) (<http://arxiv.org/abs/nuclex/0701012>).
56. Bernstein (2009).
57. Apollonio (2003).
58. United Nations Institute for Disarmament Research, Disarmament Forum, *Open Forum* 3 (2000), 71. (<http://www.unidir.org/pdf/articles/pdf-art139.pdf>); D. Donahue, “Key Tools For Nuclear Inspections, Advances in Environmental Sampling Strengthen Safeguards, IAEA Bulletin (April 2002) (<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull442/article4.pdf>). Choe Sang-Hun, “U.N. Inspectors Confirm Shutdown of North Korean Reactor,” *New York Times*, July 17, 2007 (<http://www.nytimes.com/2007/07/17/world/asia/17korea.html?scp=1&sq=northpercent20korea%20reactor%20shutdown&st=cse>).
59. Eguchi (2003).
60. U.S. Department of Energy, Waste Isolation Pilot Plant, Carlsbad, New Mexico (<http://www.wipp.energy.gov/>).
61. M. Shaevitz, Presentation at the NuSAG Meeting, June 2005 ([http://braidwood.uchicago.edu/NuSAG June 05 submitted.ppt](http://braidwood.uchicago.edu/NuSAG%20June%2005%20submitted.ppt)).
62. Bernstein (2009).

63. Large Water Cherenkov neutrino detectors such as Superkamiokande must be modified to make them sensitive to the antineutrino signature.
64. Bernstein (2009).
65. K. Nakamura, *Int. J. Mod. Phys. A* 18 4053 (2003); M. Diwan et al. "Proposal for a Very Large Water Cherenkov Detector" (2007). (http://www.fnal.gov/directorate/Longrange/SteeringPublic/files/DUSEL-FNAL_final.pdf); D. Autiero et al., *JCAP* 0711:011 (2007).
66. Fukuda (1998).
67. S. Gujasu and A. Shenitzer. *The Mathematical Intelligencer*, 7(1985): 1; Highbom, J., *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 15(1974):417–426.
68. There are several multi-kiloton scale antineutrino detectors being proposed worldwide. Hano-hano is unique in that it is submersible rather than being deployed in a deep mine; J. Learned et al., "Hanohano: A Deep Ocean Anti-Neutrino Detector for Unique Neutrino Physics and Geophysics Studies," Proceedings of the Twelfth International Workshop on Neutrino Telescopes, Venice (2007) (<http://arxiv.org/abs/0810.4975>).
69. Fukuda (1998).
70. Nakamura (2003); Diwan (2007); Autiero (2007).
71. Beacom, J.F. et al., *PRL* 93(2004).
72. Dazeley S. et al., "Observation of Neutrons with a Gadolinium Doped Water Cherenkov Detector," submitted to *NIM A* (2008) (<http://arxiv.org/abs/0808.0219>)
73. S. Fukuda et al., *NIM A*, 501(2003):418–462.
74. Comprehensive Test Ban Treaty (<http://www.ctbto.org/the-treaty/>).
75. Bernstein (2001).
76. Ice Cube Telescope Information (<http://www.icecube.wisc.edu/>).
77. N. Sidro, "Search for MeV Electron Antineutrinos from Gamma-Ray Bursts and Development of a Corresponding MC Simulation" (<http://icecube.berkeley.edu/manuscripts/20030902xx-DiplomNu.pdf>).
78. Borexino Collaboration—G. Alimonti et al., *Astropart. Phys.* 16 (2002):205–234; SNO+ Collaboration—Christine Krauss et al., *Prog. Part. Nucl. Phys.* 57(1)(2006): 150–152.
79. Apollonio, (2003):33.
80. Bernstein (2009).
81. C.K. Jung, *AIP Conf. Proc.* 533 (2000) 29 (arXiv:hep-ex/0005046).
82. Hanohano, Hawaii Anti-Neutrino Observatory (<http://www.phys.hawaii.edu/sdye/hanohano.html>).
83. Wong H.T. et al., *J. Phys. Conf. Ser.* 39 266–268 (2005) (arXiv:hep-ex/0511001); P. S. Barbeau et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 50(5)(2003):1285; C. Hagmann et al., *IEEE Trans. Nucl.Sci* 512151 (2004).
84. 1.8 MeV.
85. H.T. Wong et al., *Phys. Rev. D* 75 012001 (2007); Darraktchieva Z. et al., *Physics Letters B* 615 (2005):153–159.
86. K.S. Hirata et al., *Phys. Rev. D* 38(1988):448–458; J. C. Van Der Velde et al. (IMB), *Nucl. Instrum. Meth.* A264(1988):28–31.
87. Nakamura (2003); Diwan (2007); Autiero (2007).
88. T. Araki et al., *Nature* 436 (2005):499–503.
89. M. Goodman, Proc. of the Neutrino Oscillation Workshop *Nucl. Phys. B—Proceedings Supplements.* 188 (2009):164.
90. T. Suzuki, "Multi-Megaton Water Cherenkov Detector for a Proton Decay Search," TITAND (arXiv:hep-ex/0110005v1); B.K. Lubandorzhiev, *NIM A* 553(2005):308; D. B. Cline, J.G. Learned, K. McDonald, F. *Sergiampietri*, *NIM A* 503(2003): 136–140.