

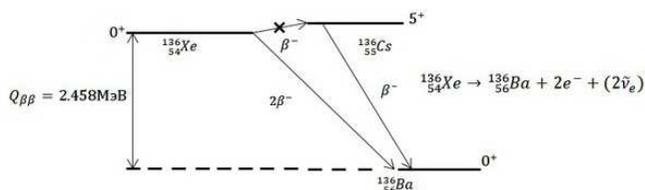
Изотоп ^{136}Xe . Эксперименты ECHO, NEXT, KamLAND-ZenМ. Д. Киселев^{1,2*}¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1 стр. 2

Данная статья посвящена одной из наиболее актуальных проблем современной ядерной физики, исследованию самой редкой моды радиоактивного распада — двойного бета-распада на примере изотопа ксенон-136. В статье описаны принципы экспериментального наблюдения этой моды распада в ведущих мировых экспериментах в этой области: ECHO, NEXT и KamLAND-Zen. Приведены схемы и описание основных частей экспериментальных установок. Также представлены результаты экспериментов и их сравнение.

PACS: 23.40.-s УДК: 539.169

Ключевые слова: двойной бета-распад, ксенон-136, эксперимент ECHO, эксперимент NEXT, эксперимент KamLAND-Zen.

ВВЕДЕНИЕ

Рис. 1: Общая схема двойного бета-распада изотопа ^{136}Xe по безнейтринной (двухнейтринной) моде

1. ЭКСПЕРИМЕНТ ECHO (THE ENRICHED XENON OBSERVATORY)

А. Введение

The Enriched Xenon Observatory (EXO) — эксперимент, в задачи которого входит поиск и исследование двойного безнейтринного $0\nu\beta\beta$ -распада ядра ^{136}Xe . Обнаружение такого вида распада поможет сделать выводы не только о строении ядра ^{136}Xe , но и о фундаментальных свойствах нейтрино. Эксперимент ECHO можно разделить на два эксперимента, в зависимости от способа регистрации события распада:

EXO-200 ставит задачу обнаружения распада по регистрации сцинтилляций и электрического сигнала [3], образующегося электронами ионизации в жидком ^{136}Xe . В этой части эксперимента проводятся измерения двухнейтринного канала двойного β -распада ^{136}Xe . Также здесь устанавливаются ограничения сверху и снизу на скорость безнейтринного двойного β -распада. ECHO-200 продолжает собирать данные для

того, чтобы сделать эти ограничения более точными, или потенциально обнаружить распад.

nEXO («next ECHO») — регистрация событий путем идентификации продукта распада ^{136}Xe (иона $^{136}\text{Ba}^{2+}$) с целью обнаружения двойного безнейтринного β -распада. Основная сложность заключается в поиске метода уменьшения всех типов фона.

Есть много преимуществ в использовании элементов благородной группы, в частности, ксеноновых. Например, сравнительно легко очищать жидкий ксенон (LXe, Liquid Xenon), что позволяет использовать его повторно в других детекторах. Изотоп ^{136}Xe может быть обогащен с использованием тех же методов центрифугирования, что используются для других делящихся ядерных изотопов. Энергия распада ^{136}Xe 2.48 МэВ [2], что выше многих гамма-линий урана. Гамма-лучи из естественно встречающихся радиоактивных изотопов являются фоном, который может создать большие трудности при поиске двойного бета-распада или вообще сделать интересующий нас распад недостижимым для обнаружения. Сжиженные благородные газы, такие как LXe, являются естественными радиационными детекторами, и поэтому в конструкции детектора не используются материалы, которые могли бы принести дополнительный радиоактивный фон. Кроме того, можно добиться большего энергетического разрешения путем детектирования как ионизационных электронов, так и сцинтилляционных фотонов от распада ксенона. Наконец, ксенон потенциально позволяет полностью избавиться от фона путем выделения сигнала, относящегося к рождению дочернего иона бария.

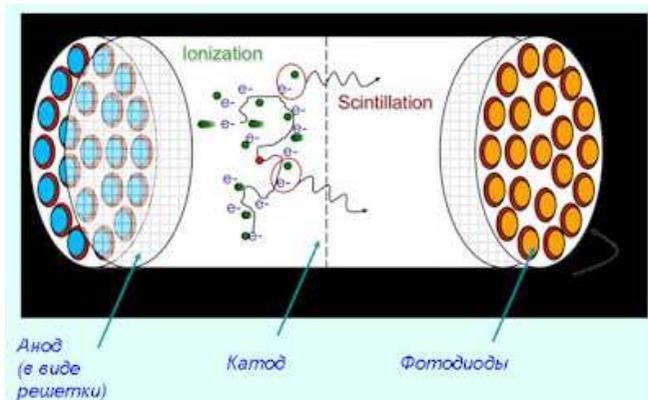
В. Описание установки ECHO-200

В этом эксперименте используется 200 кг сжиженного ксенона, обогащенного ^{136}Xe до 80%. Жидкий ^{136}Xe помещается в пластиковую цилиндрическую емкость. Эта емкость около 35 см в длину и 40 см в диаметре.

*E-mail: marlboroxxx@mail.ru

Таблица I: Характеристики изотопа $^{136}_{54}\text{Xe}$. Экспериментальные данные [1]

Xe – Хепон – Ксенон											
A	N	J^π	Распр-ть	$T_{1/2}$	Избыток массы Δ , МэВ	E , МэВ	ϵ , МэВ	B_n , МэВ	B_p , МэВ	Моды распада	Масса ядра, МэВ
136	82	0^+	8.857%	$> 2.4E+21$ лет	-86.425 ± 0.007	1141.897 ± 0.008	8.396	8.080	9.925	$2\beta^-$	126569.165

Рис. 2: Иллюстрация процесса ионизации и излучения атомов ^{136}Xe под действием электронов, образованных в результате двойного β -распада

Для регистрации электрического сигнала от ионизации ^{136}Xe необходимо наличие катода и анода. Катод находится в плоскости сечения, проходящей перпендикулярно оси цилиндрической емкости, на равном расстоянии от торцов. Катод представляет собой сетку из тонких проводков фосфористой бронзы. Аноды находятся на торцах. Они имеют вид решетки, сделанной, как и катод, из фосфористой бронзы. Катод в форме решетки необходим для выявления координаты электронов, образующих сигнал. Для создания внутреннего электрического поля детектора служат медные кольца, идущие по краю емкости с внешней стороны.

Процесс ионизации схематически изображен на рис. 2. Электроны, образующиеся в результате двойного β -распада приводят не только к ионизации атомов ^{136}Xe , но и, взаимодействуя с ними, вызывают излучение, которое тоже детектируется. Детектировать как электрические сигналы, так и сцинтилляции нужно для того, чтобы, во-первых, повысить разрешающую способность детектора, и, во-вторых, зафиксировать область, в которой произошел распад. Действительно, световой сигнал поступает на фотодиоды практически мгновенно, а электрический сигнал приходит с запаздыванием. Это запаздывание связано с процессом ионизации, который требует некоторого времени. Измерив разность времен поступления светового и электрического сигналов, можно вычислить пространственную область, в которой произошел распад.

Фотодиоды представляют собой круглые плоские пластинки диаметром 1.6 см, соединенные электрическим контактом по семь штук. Их количество с каждого торца детектора составляет по 234 штуки.

Емкость, заполненная ксеноном, погружается в жидком состоянии при давлении в 1.5 атм. и температуре 170 К, используется циркулирующая криогенная жидкость, заполняющая криостат. Помимо каналов, выводящих криогенную жидкость к холодильным установкам, есть каналы для вывода информации от датчиков электрических и световых сигналов. Для дополнительной термоизоляции криостата создана вакуумная прослойка между внутренней и внешней оболочками. С внешней стороны экспериментальную установку окружает слой свинца, толщиной в 25 см, для защиты от внешнего радиационного фона.

Экспериментальный комплекс установлен в соляной шахте на глубине 655 м в г. Карлсбад, штат Нью-Мехико. Важнейшей задачей эксперимента является стремление максимально уменьшить внешний радиационный фон. Именно поэтому комплекс установлен глубоко под землей. Кроме того, для создания деталей конструкции использовались материалы с самыми минимальными радиационными фонами. Также установка располагается в так называемых «чистых» комнатах, где выполняются строжайшие меры по соблюдению радиационной «чистоты».

С. Некоторые результаты эксперимента ЕХО

Первая фаза проекта ЕХО (ЕХО-200), является одним из самых чувствительных экспериментов. В эксперименте ЕХО-200 изучается канал двухнейтринного двойного β -распада ^{136}Xe . Что же касается безнейтринного канала, то заявлений об обнаружении данного распада коллаборацией ЕХО еще не поступало. Хотя при обработке данных наблюдаются сигналы, схожие по характеристикам с сигналами, которые должны получаться при детектировании $0\nu\beta\beta$ -распада ядра ^{136}Xe , их статистика все же очень мала для того, чтобы делать какие-либо выводы. На рис. 3 показана зависимость количества отсчетов для различных изучаемых каналов от энергии в логарифмическом масштабе для событий с высокой множественностью (MS) и единичной (SS). Видно, что события $0\nu\beta\beta$ очень малоин-

тенсивные, и находятся в «фоновой» области, поэтому нет смысла говорить о действительном обнаружении этого канала.

Для сравнения, обратимся к рис. 4, на котором изображены данные по измерению $2\nu\beta\beta$ -распада ядра ^{136}Xe . Очевидно, что такие события идут с интенсивностью, на несколько порядков превышающей интенсивность событий $0\nu\beta\beta$.

В результате обработки экспериментальных данных с детектора ECHO-200, было получено самое точное среди всех ядер измерение периода полураспада ядра ^{136}Xe по каналу $2\nu\beta\beta$ [5]:

$$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} = (2.165 \pm 0.016 (stat) \pm 0.059 (sys)) \cdot 10^{21} \text{ лет.}$$

Что же касается периода полураспада по каналу $0\nu\beta\beta$, то для него получена лишь оценка снизу [6]:

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.1 \cdot 10^{25} \text{ лет.}$$

2. ЭКСПЕРИМЕНТ NEXТ (NEUTRINO EXPERIMENT WITH A XENON TPC)

А. Введение

Neutrino Experiment with a Xenon TPC (NEXТ) — один из наиболее прецизионных экспериментов по изучению безнейтринного двойного β -распада с использованием время-проекционной камеры (TPC), содержащей радиационно чистый газообразный ксенон (~ 100 кг), обогащенный изотопом ^{136}Xe ($>90\%$). Детектор NEXТ-100 отличается очень хорошим разрешением по энергии ($<1\%$, [7,9]), низким уровнем фона и достаточно массивным рабочим телом. Конструкция NEXТ-100 оптимизирует энергетическое разрешение благодаря использованию пропорционального электролюминесцентного усиления, что обеспечивает высокий поток фотонов в качестве сигналов. Кроме того, детектор является сравнительно компактным, так как газообразный ксенон содержится в нем под большим давлением.

В. Описание TPC установки NEXТ-100

NEXТ является первым экспериментом, использующим газовую TPC под большим давлением (HPGXe TPC) с системой получения данных SOFT (Separated Optimized Functions). Конструкция содержит асимметричную TPC [9] с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ, PMTs) за прозрачным катодом и с позиционно-чувствительными силиконовыми ФЭУ (SiPMs) за анодом [8]. TPC установки NEXТ-100 заполнена 100 кг газообразного ксенона ($\rho \sim 50 \text{ кг/м}^3$) под давлением около 10 бар при комнатной температуре. TPC имеет цилиндрическую форму.

В состав TPC входят фотоэлектронные умножители (PMTs), обладающие линейностью, большим динамическим диапазоном детектирования и быстрым временем отклика. Они предназначены для измерения полной выделенной энергии в TPC и для детектирования первичного сцинтилляционного света (рис. 5). Их размер достаточно мал (~ 2.5 см), они устойчивы к высоким давлениям ($\sim 5\text{--}10$ бар), а также чувствительны к ультрафиолетовому излучению (фиксируют до 20% сигнала на длине волны 120 нм).

Силиконовые ФЭУ (SiPMs) служат для трекинга (отслеживания) частиц распада. SiPMs образуют сетку, которая является пространственно-детектирующим аналогом системы координат. Они расположены на расстоянии порядка 1 см друг от друга, создают низкую нагрузку на один канал и несут информацию о зарядах частиц, участвующих в распаде. Размер каждого SiPM около 1 мм^2 .

Как уже было упомянуто выше, установка NEXТ-100 содержит асимметричную TPC (рис. 6), т. е. торцевые приборы этой камеры выполняют принципиально различные функции и, соответственно, имеют различное устройство. В рассматриваемой TPC с одного конца расположен энергетический блок («energy plane»), с другого — трековый блок («tracking plane»).

Энергетический блок состоит из 60 PMT, расположенных за катодом TPC. Он предназначен для проведения калориметрических измерений и измерения t_0 — времени начала исследуемого события («start-of-event time»). Эти PMT помещены в индивидуальные резервуары с медными стенками и сапфировыми окошками для того, чтобы их собственная конструкция не была нарушена под действием высокого давления ксенона.

Трекинг же осуществляется плотной сеткой SiPM, описанных ранее, которые улавливают сигнал от вторичных сцинтилляций (рис. 5). Трековый блок расположен за анодом TPC в непосредственной близости от области, в которой происходит электролюминесценция ксенона (EL region), и используется для топологической реконструкции (пространственной визуализации) событий.

Эксперимент NEXТ располагается в Canfranc Underground Laboratory. Это научный объект подземного типа, который находится в бывшем железнодорожном тоннеле Somport под Monte Tobazo в Канфранке, Испания.

С. Некоторые результаты эксперимента NEXТ

Так же, как и в эксперименте ECHO, коллаборация NEXТ не заявляла об обнаружении $0\nu\beta\beta$ -распада ядра ^{136}Xe . До сих пор NEXТ удается лишь делать кое-какие прогнозы об ожидаемых результатах. Проводится очень большое количество моделирований в среде GEANT4 с целью поиска критериев выделения интересующего распада из достаточно интенсивного фона событий. На рис. 7 мы можем видеть, какие элемен-

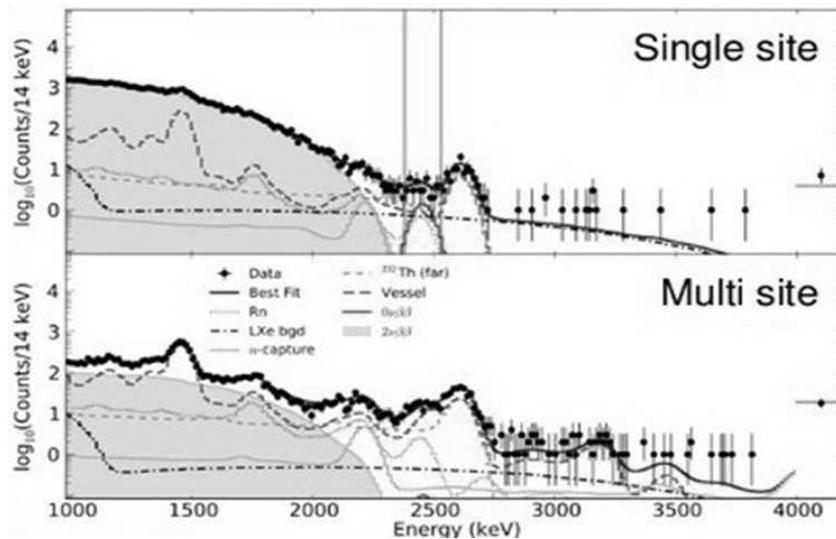


Рис. 3: Измерения различных каналов в эксперименте ЕХО, [6]. События, отвечающие характеристикам $0\nu\beta\beta$ -распада, выделены вертикальными линиями

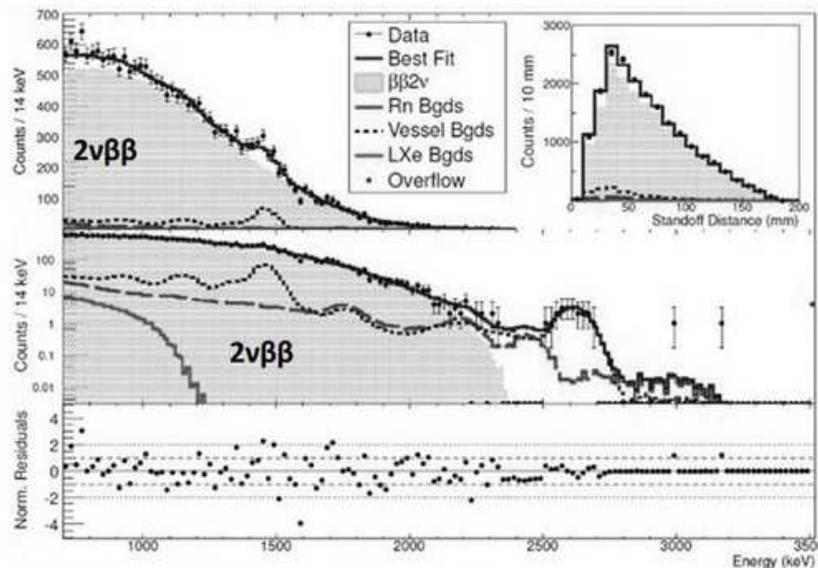


Рис. 4: Измерение канала $2\nu\beta\beta$ -распада в эксперименте ЕХО [5]

ты создают наибольший фон в эксперименте. Из распределения ясно, что в фоновом сигнале преобладают ^{214}Bi и ^{208}Tl .

Сигнал от $0\nu\beta\beta$ -события определяется пиком в спектре распада $2\nu\beta\beta$ (далее будем обозначать величину энергии этого пика $Q_{\beta\beta}$). С одной стороны, высокое разрешение по энергии в эксперименте исключает большинство событий с энергиями близкими, но отличными от $Q_{\beta\beta}$. С другой стороны, так как ^{136}Xe имеет достаточно большой период полураспада в исследуемой моде, оптимальная идентификация фона является обязательной для того, чтобы отобрать события, энергия которых попадает в разрешенное энергетическое окно максимально точно.

Для $2\nu\beta\beta$ -событий была получена следующая оценка:

$$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} = (2.21 \pm 0.11) \cdot 10^{21} \text{ лет.}$$

Величина $Q_{\beta\beta}$ для ^{136}Xe достаточно высока ($\sim 2458 \text{ кэВ}$), поэтому большая часть фона остается за пределами так называемой области интересов RoI (*Region of Interest*).

Анализ получаемых данных проводится с использованием нескольких последовательных критериев отбора:

- первоначально делается отсечка (или, как принято называть, «cut») по энергии с целью уменьше-

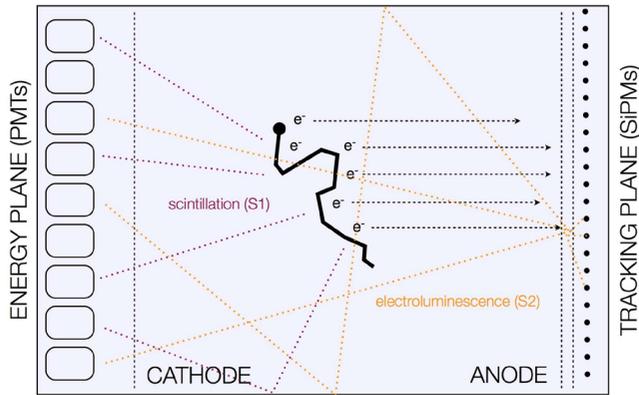


Рис. 5: Иллюстрация асимметричной SOFT TPC [8]

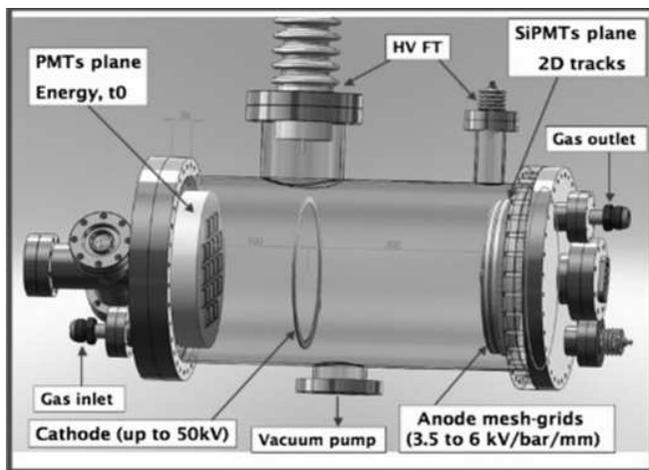


Рис. 6: Принципиальная схема устройства установки NEXT-100 [7]

ния объема данных, записанных в процессе предварительной обработки;

- отбираются события, полностью содержащиеся в рабочем объеме;
- энергия получившихся отобранных событий («истинные» события, «true» events) ушивается в соответствии с энергетическим разрешением установки;
- делается окончательный *cut* в энергетическом окне полученных в предыдущем пункте RoI;
- последним делается топологический анализ событий путем их вокселизации (от англ. *voxel* – 3D-аналог пикселя, который используется при пространственной реконструкции движения физических объектов). Отбор в этом случае делается по тем событиям, которые имеют топологию типа «one wire two blobs» (рис. 8).

Такой «топологический отбор» делается из следующих соображений. Средняя энергия, приходящаяся

на один электрон при двойном β -распаде, составляет около 1250 кэВ, а при давлении в 10 бар электрон может пройти в ксеноновой среде порядка 15 см. Траектория электрона в основном определяется многократным рассеянием в газе, поэтому может иметь произвольную форму в топологической реконструкции. Пролетая в ксеноне, каждый электрон теряет примерно 70 кэВ/см, тем самым оставляя за собой ионизационный трек, а по окончании своего движения теряет не менее 200 кэВ, колеблясь около одной точки (отсюда получаем «two blobs» в результате реконструкции). Но так как происходит двойной β -распад, то электроны должны образовываться в одной вершине, поэтому оба ионизационных трека соединяются в непрерывный трек-сигнал («one wire»).

С учетом всех вышеперечисленных критериев производился анализ полученных в ходе экспериментов данных. Была получена оценка периода полураспада изотопа ^{136}Xe по каналу $0\nu\beta\beta$ [10]:

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} \approx 1.1 \cdot 10^{26} \text{ лет.}$$

Эта величина отвечает эффективной массе двух нейтрино ~ 100 мэВ (имеются в виду нейтрино в спектре $2\nu\beta\beta$ -распада, для которого сигнал $0\nu\beta\beta$ является пиком распределения). Эта оценка получена после 5 лет набора экспериментальной статистики (экспозиция — 500 кг·год). Экспериментальное распределение можно увидеть на рис. 9.

Из рис. 9, б хорошо видно, что пик приходится на значение энергии, практически совпадающее с $Q_{\beta\beta} \sim 2458$ кэВ. Поэтому данные события являются очень серьезными претендентами на $0\nu\beta\beta$ -события.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ KAMLAND-ZEN (KAMIOKA LIQUID SCINTILLATOR ANTINEUTRINO DETECTOR — ZERO NEUTRINO DOUBLE BETA DECAY SEARCH).

А. Описание установки KamLAND-ZeN и результаты эксперимента

Kamioka Liquid scintillator AntiNeutrino Detector — Zero Neutrino double beta decay search (KamLAND-ZeN) — эксперимент в рамках проекта KamLAND, использующий детектор этого проекта, внутрь которого помещен баллон, заполненный ^{136}Xe . Эксперимент KamLAND-ZeN (рис. 10) начался летом 2011 г. В качестве источника двойного β -распада в жидкий сцинтиллятор KamLAND было помещено вначале 320 кг обогащенного изотопом ^{136}Xe газообразного ксенона, заключенного в прозрачный нейлоновый баллон меньшего диаметра. Позднее масса активной среды (ксенона) была увеличена до 383 кг.

Ход эксперимента KamLAND-ZeN осуществлялся в несколько фаз. Рассмотрим их. Фаза 1 началась в октябре 2011 г. и продолжалась вплоть до июня 2012 г.

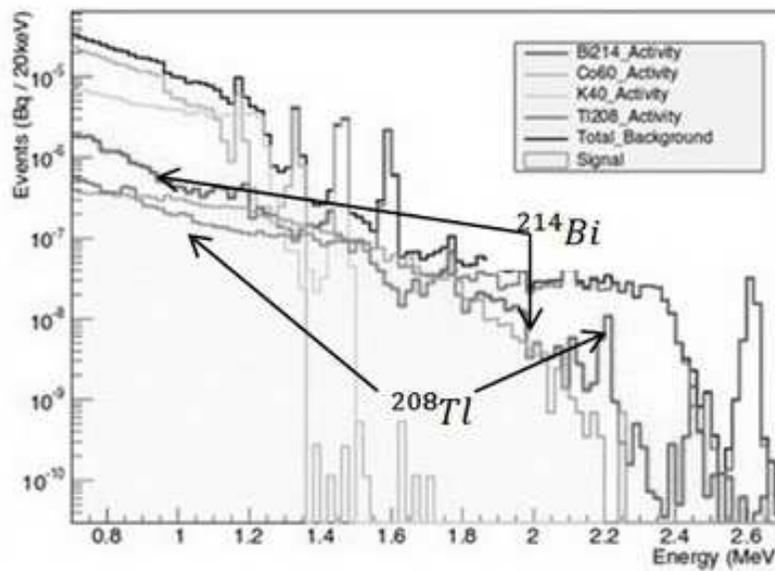


Рис. 7: Распределение вклада в общий фон различных элементов в эксперименте NEXT [10]

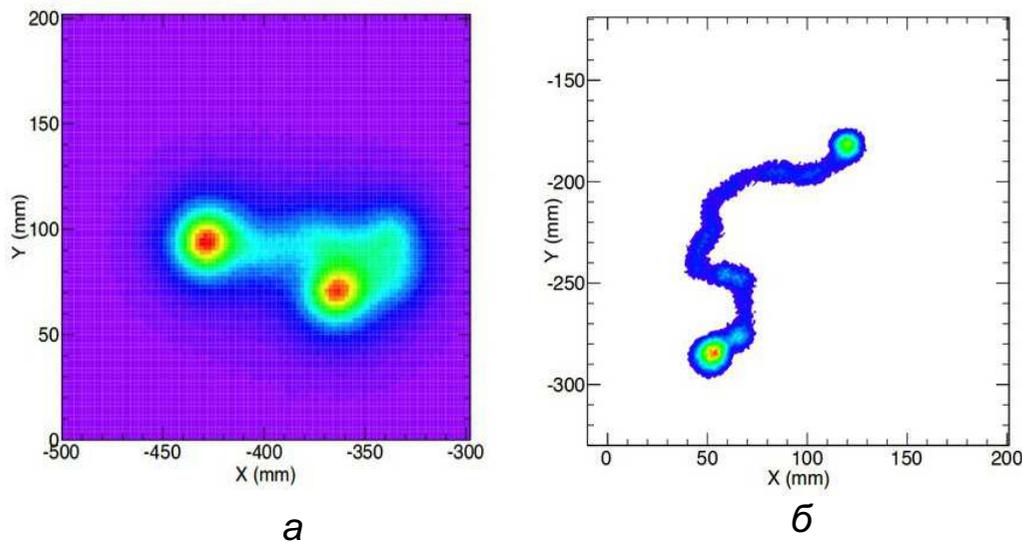


Рис. 8: Пример топологии типа «one wire two blobs» [10]

Чувствительность к поиску безнейтринного двойного β -распада ^{136}Xe была сильно ограничена тем, что в фоновых событиях был обнаружен достаточно большой пик от метастабильного состояния изотопа серебра ^{110m}Ag . С целью избавления от этой «помехи» сотрудники коллаборации KamLAND начали разработку методов очистки рабочего объема от ^{110m}Ag . В действие эти методы вступили при переходе от фазы 1 к фазе 2, поэтому их мы обсудим позже. Несмотря на то, что в рабочем объеме детектора образовывались эти «помехи», удалось сделать некоторые оценки периодов полураспада ^{136}Xe . А именно, [12]:

- по каналу $2\nu\beta\beta$:

$$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} = (2.30 \pm 0.02 (stat) \pm 0.12 (sys)) \cdot 10^{21} \text{ лет};$$

- для канала $0\nu\beta\beta$ получена оценка снизу:

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.9 \cdot 10^{25} \text{ лет}.$$

Как видим, даже с учетом наличия в рабочем объеме сопутствующих изотопов, которые усложняют задачу обработки, полученные после фазы 1 результаты находятся в достаточно хорошем согласии с результатами эксперимента EXO.

Рассмотрим схему метода очистки рабочего пространства ZeN-баллона от «помех» в виде ^{110m}Ag и, собственно, переход от фазы 1 к фазе 2. Суть разработанного метода очистки заключается в следующем. Из

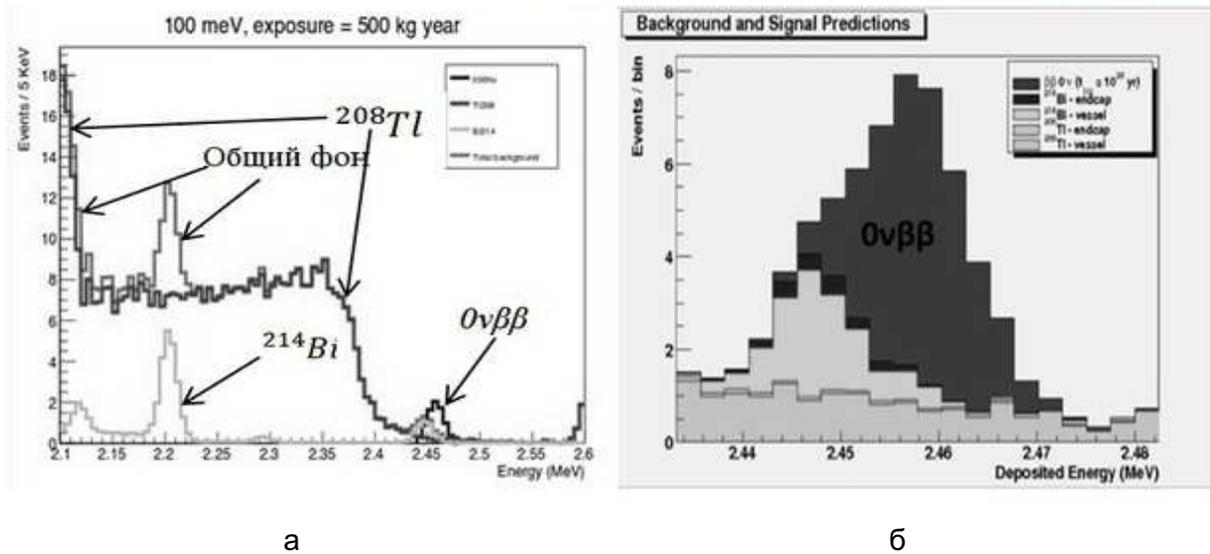


Рис. 9: [9,10]

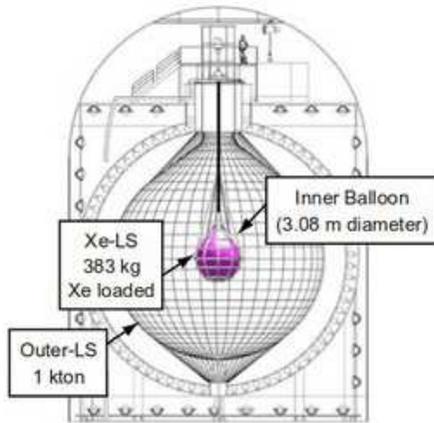


Рис. 10: Схематическое изображение эксперимента KamLAND-ZeN. Внешняя сфера (диаметр 13 м) — детектор KamLAND, цветом отмечен внутренний баллон (диаметр 3 м) эксперимента KamLAND-ZeN [14]

ZeN-баллона после фазы 1 откачивался весь ксенон в отдельную очистительную систему. Оставшийся рабочий объем содержал в себе, по сути, только ^{110m}Ag . Этот рабочий объем заменялся новым ZeN-баллоном, который после помещения в детектор KamLAND на свое прежнее место также соединялся со своей отдельной очистительной (дистиллирующей) системой. В ней новый ZeN-баллон претерпевал трехкратный цикл очистки, после чего заполнялся уже очищенным ксеноном, который был откачан из предыдущего рабочего объема и к этому моменту уже очищенный.

Помимо этого переход к фазе 2, которая началась в декабре 2013 г. и продолжалась до осени 2015 г., сопровождался увеличением массы рабочего вещества ^{136}Xe до 383 кг [14].

Таблица II:

Параметры баллона	
Диаметр, м	3.08
Объем, м ³	17
Толщина оболочки, мкм	25
Прочность оболочки, кг/см	3
Прочность соединительных частей, кг/см	2
Утечка ксенона кг/год	0.26
Прозрачность оболочки	99%
Содержание Th, г/г	$3 \cdot 10^{-12}$
Содержание ^{40}K г/г	$2 \cdot 10^{-12}$

Сравнивая распределения после проведения фазы 1 и фазы 2 (рис. 11 и рис. 12 соответственно), сразу можем увидеть, что фон от ^{110m}Ag в фазе 2 стал значительно меньше. Расчеты показали, что фон уменьшился почти на 2 порядка [13].

В новых условиях была вновь сделана оценка снизу для канала $0\nu\beta\beta$. Она оказалась следующей:

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.3 \cdot 10^{25} \text{ лет.}$$

По распределению, например на рис. 11, видно, что статистика $0\nu\beta\beta$ -событий для ^{136}Xe не позволяет заявлять об открытии, а лишь дает нам указание на то, что события, схожие по характеристикам с $0\nu\beta\beta$ -распадом, имеют место в данном эксперименте.

При детальном рассмотрении вопроса о появлении фона в виде ^{110m}Ag выяснилось, что метастабильное состояние серебра могло переместиться в рабочую область детектора с реактора Fukushima, а также получиться в результате воздействия высокоэнергетическо-

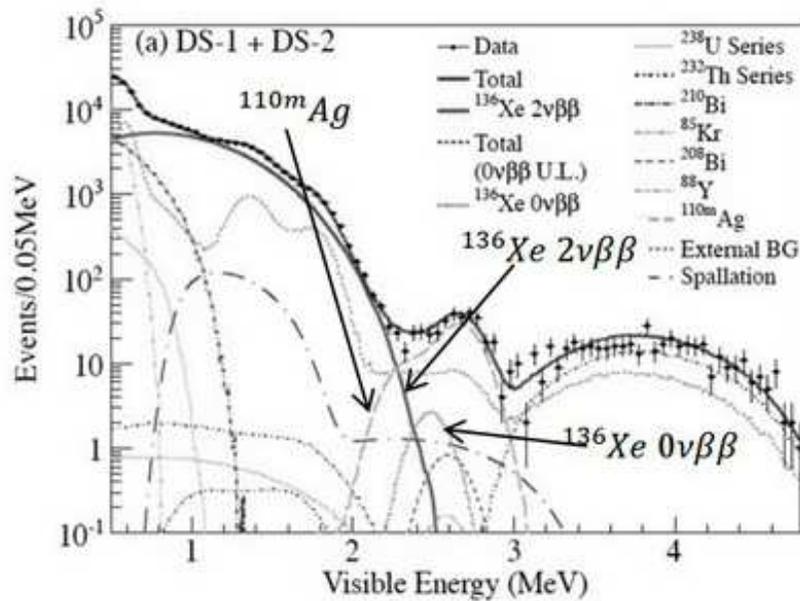


Рис. 11: Экспериментальное распределение по энергии различных изотопов, образовавшихся в ZeN-баллоне после фазы 1 [12]

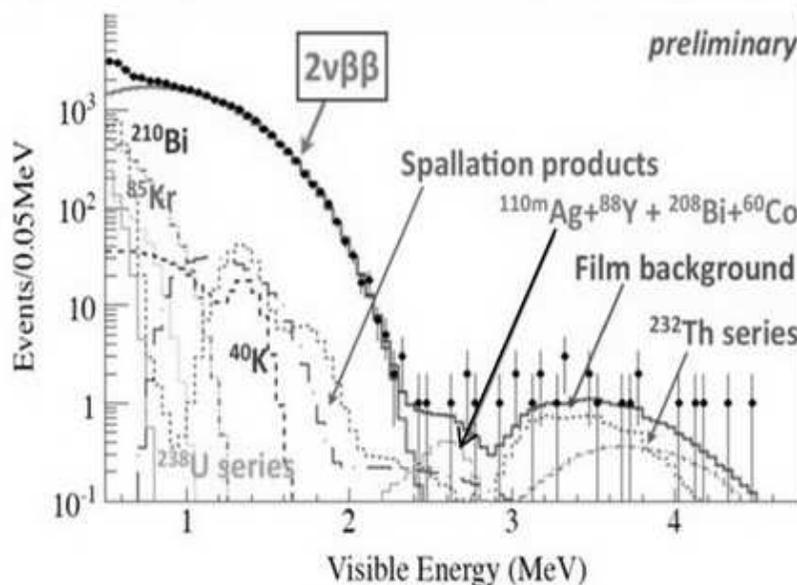


Рис. 12: Экспериментальное распределение по энергии различных изотопов, образовавшихся в ZeN-баллоне после фазы 2 [12]

го космического излучения на ядра ^{136}Xe . Небольшой вклад в образование ^{110m}Ag вносит также реакция взаимодействия ^{136}Xe с водородной мишенью (водород в некотором количестве неизбежно будет находиться в ZeN-баллоне). Но самым неожиданным для сотрудников коллаборации KamLAND-ZeN стал тот факт, что ^{110m}Ag ($T_{1/2} = 249.76$ дней) в большом количестве содержался в почве в районе Тохоку, где и были изготовлены ZeN-баллоны для эксперимента.

Следует отметить, что эксперимент KamLAND-ZeN в 2015 г. не прекратил свою работу, а лишь начал под-

готовку к новой фазе. Ожидается, что масса активной среды будет увеличена до 600–800 кг. Также участники коллаборации KamLAND занимаются разработкой новых методов уменьшения фона, которые могут способствовать набору большей статистики в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве заключения рассмотрены эксперименты по изучению двойного β -распада изотопа ^{136}Xe при-

ведем таблицу, в которой представлены основные результаты, полученные в ходе экспериментов:

Результаты изучения двойного β -распада изотопа ^{136}Xe .

Таблица III: Результаты изучения двойного β -распада изотопа ^{136}Xe

Эксперименты	$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta}, 10^{21}$	$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}, 10^{25}$
EXO	2.165 ± 0.075	> 1.1
NEXT	2.21 ± 0.11	≈ 1.1
KamLAND-ZeN	2.30 ± 0.14	> 1.3

Как видно из сравнения результатов трех экспериментов, оценки периода полураспада изотопа ^{136}Xe по $2\nu\beta\beta$ - моде в пределах погрешности находятся в достаточно хорошем согласии друг с другом, несмотря на то, что каждый эксперимент имеет свой уникальный подход к измерениям. А для $0\nu\beta\beta$ -моды распада, хотя и найдена только оценка снизу для периода полураспада, важно отметить, что во всех экспериментах получен один и тот же порядок величины $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$ ($\sim 10^{25}$ лет). При этом видно, что значащие числа также практически совпадают друг с другом.

- [1] База данных «Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ», <http://cdfc.sinp.msu.ru/>.
- [2] Searching for Double Beta Decay with the EXO Experiment. http://www-project.slac.stanford.edu/exo/Talks/ackerman_PPC2010.pdf.
- [3] *Lisa J. Kaufman* J. Phys.: Conf. Ser. **203**. 012067. (2010).
- [4] *K. O'Sullivan* J. Phys.: Conf. Ser. **120**. 052056. (2008).
- [5] *J. B. Albert et al.* (EXO Collaboration) Phys. Rev. C. **89**. 015502 (2014).
- [6] Nature **510**, P. 229 (12 June 2014).
- [7] NEXT Collaboration Web. <http://next.ific.uv.es/next/>.
- [8] *Lorca D., Martin-Albo J., Monrabal F.* on behalf of the NEXT Collaboration. The NEXT experiment: A high pressure xenon gas TPC for neutrinoless double beta decay searches. arXiv:1202.0721 [physics.ins-det].
- [9] [NEXT Collaboration] NEXT, a HPGXe TPC for neutrinoless double beta decay searches. arXiv:0907.4054v1 [hep-ex].
- [10] Searching for Double Beta Decay with the NEXT Experiment. http://next.ific.uv.es/DocDB/0000/000096/001/Miquel_ichep2014.pdf.
- [11] *Gando A. et al.* (KamLAND-ZeN Collaboration) Phys. Rev. C. **85**. 045504 (2012).
- [12] *Berger B.* (May 2015). KamLAND-ZeN-CIPANP-20150521.
- [13] *Koga M.* (July 2015). KamLAND-ZeN current result and future prospects. PPC2015.
- [14] *Asakura K. et al.* Results from KamLAND-ZeN. arXiv:1409.0077v1 [physics.ins-det].

The isotope ^{136}Xe . EXO, NEXT, KamLAND-ZeN experiments

M. D. Kiselev^{1,2}

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University Leninskie gory, Moscow 119991, Russia

E-mail: a

The article is dedicated to one of the most actual problems of modern nuclear physics — the study of the very rare decay mode known as double beta decay by the example of xenon-136 isotope. The article describes the principles of experimental observation of this decay mode with leading experiments in this field: EXO, NEXT and KamLAND-ZeN. There are schematics and description of the main parts of the experimental units. Also, the experimental results and their comparison are illustrated.

PACS: 23.40.-s.

Keywords: double beta-decay; xenon-136; EXO experiment; NEXT experiment; KamLAND-ZeN experiment.

Сведения об авторе

Киселев Максим Дмитриевич — студент кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ; тел.: (925) 150-05-32, e-mail: marlboroxxx@mail.ru.