

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Б.М. ПОНТЕКОРВО

Эксперименты по поиску двойного бета-распада: современное состояние и перспективы

А.С. Барабаш

Представлен обзор экспериментов по поиску двойного бета-распада. Обсуждаются результаты наиболее чувствительных экспериментов. Приведены современные значения периодов полураспада по двухнейтринному каналу и лучшие ограничения на безнейтринный двойной бета-распад и распад с испусканием майорона. Рассмотрены наиболее перспективные проекты экспериментов следующего поколения с чувствительностью к массе майорановского нейтрино $\sim 0,1 - 0,01$ эВ.

PACS numbers: 14.60.Pq, 23.40.-s

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201405f.0524

Содержание

1. Введение (524).
 2. Современные эксперименты (525).
 - 2.1. Эксперимент EXO-200. 2.2. Эксперимент KamLAND-Zen.
 - 2.3. Эксперимент GERDA-I.
 3. Планируемые эксперименты (527).
 - 3.1. Эксперимент CUORE. 3.2. Эксперимент GERDA. 3.3. Эксперимент Majorana. 3.4. Эксперимент EXO. 3.5. Эксперимент KamLAND-Zen-2. 3.6. Эксперимент SNO+. 3.7. Эксперимент SuperNEMO.
 4. Заключение (530).
- Список литературы (530).

1. Введение

В настоящее время интерес к безнейтринному двойному бета-распаду ($2\beta(0\nu)$) обусловлен тем, что сам факт существования этого процесса тесно связан со следующими фундаментальными аспектами физики элементарных частиц:

- несохранением лептонного числа;
- наличием у нейтрино массы и её природой;
- существованием правых токов в электрослабом взаимодействии;
- существованием майорона;
- структурой хиггсовского сектора;
- суперсимметрией;
- существованием лептокварков;
- существованием тяжёлого стерильного нейтрино;
- существованием составного нейтрино.

Все эти вопросы лежат вне рамок стандартной модели электрослабого взаимодействия, поэтому регистрация $2\beta(0\nu)$ -распада будет означать открытие "новой физики". Основной интерес к этому процессу, конечно, связан с проблемой массы нейтрино: если $2\beta(0\nu)$ -распад будет обнаружен, то по современным представлениям это автоматически будет означать, что масса покоя хотя бы одного нейтрино отлична от нуля и является массой майорановского типа. Кроме того, это будет означать нарушение закона сохранения лептонного числа.

Интерес к $2\beta(0\nu)$ -распаду существенно возрос в последнее время, когда из анализа результатов с атмосферными, солнечными, реакторными и ускорительными нейтрино был сделан вывод о существовании нейтринных осцилляций. Это означает, что нейтрино имеет массу. Однако осцилляционные эксперименты не чувствительны к природе массы нейтрино (дираковская или майорановская?) и не дают информации об абсолютной шкале масс нейтрино (так как измеряется Δm^2). Регистрация и изучение $2\beta(0\nu)$ -распада способны прояснить следующие вопросы физики нейтрино:

1. Природа массы нейтрино — дираковская или майорановская?
2. Абсолютная шкала массы нейтрино (измерение или установление предела m_1).
3. Тип иерархии (нормальная, обратная или квазивырожденная).
4. CP -нарушение в лептонном секторе (измерение майорановской CP -нечётной фазы).

Обычно рассматривают три основные моды 2β -распада:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}, \quad (1)$$

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-, \quad (2)$$

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + \chi^0, \quad (3)$$

А.С. Барабаш. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова,
ул. Б. Черёмушкинская 25, 117218 Москва, Российская Федерация
E-mail: barabash@itep.ru

Статья поступила 12 ноября 2013 г.

Таблица 1. Современные значения $T_{1/2}(2\nu)$. (Из работы [1].)

Изотоп	$T_{1/2}(2\nu)$, год
^{48}Ca	$4,4^{+0,6}_{-0,5} \times 10^{19}$
^{76}Ge	$1,60^{+0,13}_{-0,1} \times 10^{21}$
^{82}Se	$(0,92 \pm 0,07) \times 10^{20}$
^{96}Zr	$(2,3 \pm 0,2) \times 10^{19}$
^{100}Mo	$(7,1 \pm 0,4) \times 10^{18}$
$^{100}\text{Mo} - ^{100}\text{Ru}(0_1^+)$	$6,2^{+0,7}_{-0,5} \times 10^{20}$
^{116}Cd	$(2,85 \pm 0,15) \times 10^{19}$
^{128}Te	$(2,0 \pm 0,3) \times 10^{24}$
^{130}Te	$(6,9 \pm 1,3) \times 10^{20}$
^{136}Xe	$(2,20 \pm 0,06) \times 10^{21}$
^{150}Nd	$(8,2 \pm 0,9) \times 10^{18}$
$^{150}\text{Nd} - ^{150}\text{Sm}(0_1^+)$	$1,33^{+0,45}_{-0,26} \times 10^{20}$
^{238}U	$(2,0 \pm 0,6) \times 10^{21}$
^{130}Ba , ECEC(2ν)	$\sim 10^{21}$

A — атомный номер, Z — заряд ядра, e^- — электрон, $\bar{\nu}$ — антинейтрино, χ^0 — майорон.

$2\beta(2\nu)$ -распад (процесс (1)) является процессом второго порядка по слабому взаимодействию, и он не запрещён никакими законами сохранения. В настоящее время этот процесс зарегистрирован для 11 ядер (^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd , ^{238}U). Кроме того, зарегистрирован $2\beta(2\nu)$ -распад ^{100}Mo и ^{150}Nd на 0_1^+ -возбуждённые состояния дочерних ядер и ECEC(2ν)-процесс (процесс двойного электронного захвата (double electron capture) с испусканием двух нейтрино) в ^{130}Ba . В таблице 1 приведены средние и рекомендуемые современные значения периода полураспада $T_{1/2}(2\nu)$ из работы [1].

$2\beta(0\nu)$ -распад (процесс (2)) идёт с нарушением закона сохранения лептонного числа ($\Delta L = 2$) и требует существования у майорановского нейтрино отличной от нуля массы покоя либо примеси правых токов в электрослабом взаимодействии. Этот же процесс возникает и в некоторых суперсимметричных моделях, где $2\beta(0\nu)$ -распад инициируется обменом суперсимметричных частиц. Кроме того, указанный распад возникает в моделях с расширенным хиггсовским сектором в рамках теории электрослабого взаимодействия, а также в некоторых других случаях.

$2\beta(0\nu\chi^0)$ -распад (процесс (3)) требует существования майорона χ^0 — безмассового голдстоуновского бозона, возникающего при глобальном нарушении $B-L$ -симметрии, где B — барионное, L — лептонное квантовые числа. Майорон, если он существует, может играть достаточно серьёзную роль в истории ранней Вселенной и эволюции звёзд.

В настоящее время безнейтринный 2β -распад не зарегистрирован, однако экспериментальные данные позволяют устанавливать ограничения на массу майорановского нейтрино ($\langle m_\nu \rangle$), параметры примеси правых токов в электрослабом взаимодействии ($\langle \eta \rangle$ и $\langle \lambda \rangle$), константу связи майорона с нейтрино ($\langle g_{ee} \rangle$) и т.д. Надёжность и точность этих ограничений во многом опреде-

Таблица 2. Лучшие результаты по поиску $2\beta(0\nu)$ -распада. Все ограничения с доверительной вероятностью (д.в.) 90 %

Изотоп	$E_{2\beta}$, кэВ	$T_{1/2}$, год	$\langle m_\nu \rangle$, эВ
^{136}Xe	2458,7	$> 1,9 \times 10^{25}$ [2]	$< 0,13 - 0,35$
^{76}Ge	2039,0	$> 2,1 \times 10^{25}$ [3]	$< 0,19 - 0,66$
^{100}Mo	3034,4	$> 1,1 \times 10^{24}$ [4]	$< 0,29 - 0,70$
^{130}Te	2527,5	$> 2,8 \times 10^{24}$ [5]	$< 0,28 - 0,81$

Таблица 3. Лучшие результаты по поиску $2\beta(0\nu\chi^0)$ -распада ("стандартный" майорон). Все ограничения с 90 %-ной д.в.

Изотоп	$T_{1/2}$, год	$\langle g_{ee} \rangle$
^{136}Xe	$> 2,6 \times 10^{24}$ [6]	$< (0,8 - 1,6) \times 10^{-5}$
^{100}Mo	$> 2,7 \times 10^{22}$ [7]	$< (0,41 - 0,84) \times 10^{-4}$
^{82}Se	$> 1,5 \times 10^{22}$ [7]	$< (0,64 - 1,7) \times 10^{-4}$
^{76}Ge	$> 6,4 \times 10^{22}$ [8]	$< (0,79 - 2,3) \times 10^{-4}$

ляется качеством расчётов ядерных матричных элементов ($\text{ЯМЭ}(0\nu)$). В настоящее время точность этих расчётов недостаточно высока и значения $\text{ЯМЭ}(0\nu)$ различаются в вычислениях разных авторов в 1,5–2 раза. Тем не менее, используя наиболее консервативные оценки значений $\text{ЯМЭ}(0\nu)$, можно получить достаточно надёжные ограничения для всех указанных выше параметров. В таблицах 2 и 3 приведены лучшие современные результаты по поиску $2\beta(0\nu)$ - и $2\beta(0\nu\chi^0)$ -распадов соответственно. При вычислении ограничений на $\langle m_\nu \rangle$ и $\langle g_{ee} \rangle$ использовались расчётные значения ЯМЭ из работ [9–15]. Мы используем именно результаты этих расчётов, как наиболее тщательно выполненных и учитывающих теоретические достижения последних лет.

2. Современные эксперименты

Число кандидатов на возможный 2β -распад достаточно велико — это 35 ядер. Однако, поскольку вероятность 2β -распада сильно зависит от энергии перехода, наибольший интерес представляют ядра с энергией 2β -перехода $E_{2\beta} > 2$ МэВ. Мы рассмотрим в этом разделе наиболее чувствительные современные эксперименты.

2.1. Эксперимент EXO-200

Эксперимент EXO-200 (EXO — Enriched Xenon Observatory) проводится в подземной лаборатории WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) в США (глубина 1585 метров водяного эквивалента (м.в.э.)). Детектором служит времяпроекционная камера (Time Projection Chamber — TPC) на жидком ксеноне, которая окружена слоями пассивной и активной защиты. Энергия электронов от двойного бета-распада определяется с помощью одновременной регистрации ионизационного и сцинтилляционного сигналов — в этом случае энергетическое разрешение составляет 4 % от полной ширины на половине высоты (full width at half maximum — FWHM) при энергии 2,46 МэВ. TPC заполнена обогащённым ксеноном (содержание ^{136}Xe 80,6 %). В полезном объёме содержится 98,5 кг ксенона, т.е. 79,4 кг ^{136}Xe ($3,52 \times 10^{26}$ атомов). В 2011 г. в этом эксперименте впервые был зарегистрирован $2\beta(2\nu)$ -распад ^{136}Xe [16] и позднее было получено очень точное

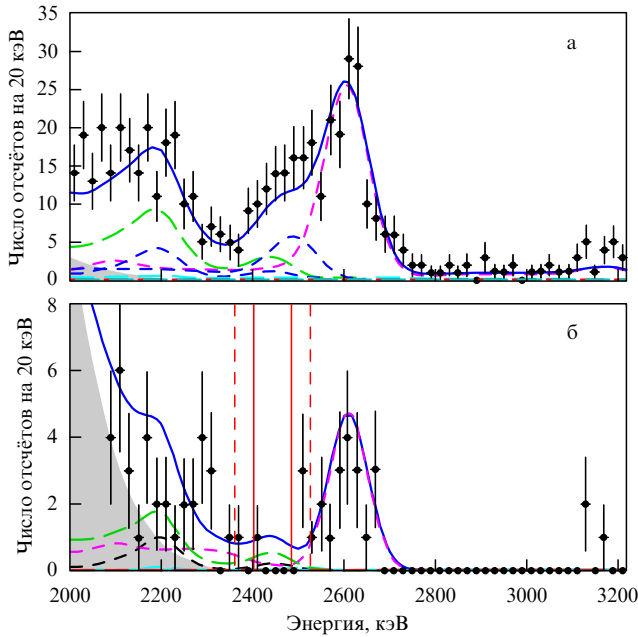


Рис. 1. Распределение по энергии событий в области $2\beta(0\nu)$ -распада ^{136}Xe для (а) многократных и (б) одиночных событий [18]. $1(2)\sigma$ -области вблизи значения энергии 2β -перехода $Q_{\beta\beta}$ отмечены сплошными (штриховыми) вертикальными прямыми. Сплошная кривая — результат фитирования, штриховые кривые — вклады различных источников фона. Затемнённые области — вклад от $2\beta(2\nu)$ -распада ^{136}Xe .

значение периода полураспада [17]:

$$T_{1/2}(2\nu, ^{136}\text{Xe}) = (2,172 \pm 0,017 (\text{стат.}) \pm 0,060 (\text{сист.})) \times 10^{21} \text{ лет.} \quad (4)$$

Индекс фона в области 0ν -распада составил $1,5 \times 10^{-3}$ отсчётов на 1 кэВ на 1 кг в год (рис. 1). В результате за 2896,6 ч измерений (полная статистика — 32,5 кг в год) получено ограничение [18]

$$T_{1/2}(0\nu, ^{136}\text{Xe}) > 1,6 \times 10^{25} \text{ лет (д.в. 90 \%)} \quad (5)$$

Это позволило установить предел $\langle m_\nu \rangle < 0,14\text{--}0,38$ эВ. Набор данных в эксперименте EXO-200 продолжается. При достигнутом уровне фона за пять лет измерений может быть получена чувствительность на уровне $\sim 4 \times 10^{25}$ лет ($\langle m_\nu \rangle < 0,09\text{--}0,24$ эВ).

EXO-200 является прототипом планируемого 5-тонного эксперимента, на втором этапе которого предполагается также регистрация иона ^{136}Ba , что позволит подавить все виды фона, за исключением вклада от 2ν -распада (см. раздел 3.4).

2.2. Эксперимент KamLAND-Zen

В эксперименте KamLAND-Zen (KamLAND Zero-Nu) используется детектор KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector) (рис. 2). Детектор представляет собой сферу диаметром 13 м из прозрачного материала толщиной 125 мкм (внешний "баллон"), окружённую водяной защитой (3200 т). Детектор содержит 1000 т жидкого сцинтиллятора (ЖС), который просматривается фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) — 1325 ФЭУ с диаметром фотокатода 17 дюймов

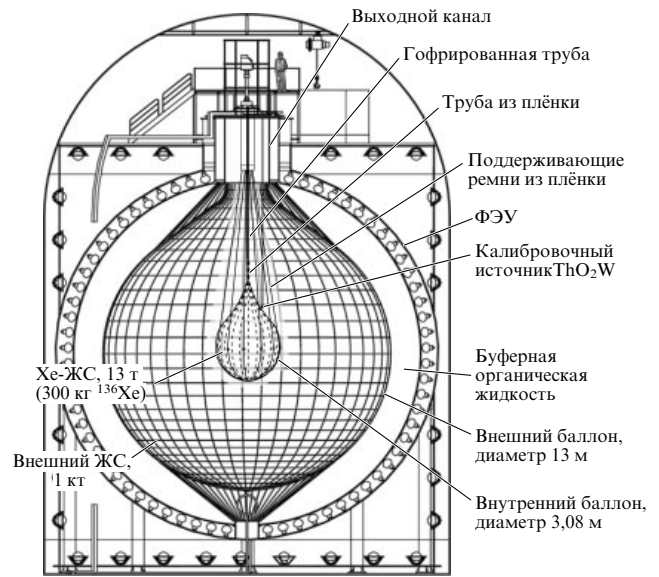


Рис. 2. Схема установки KamLAND-Zen [19].

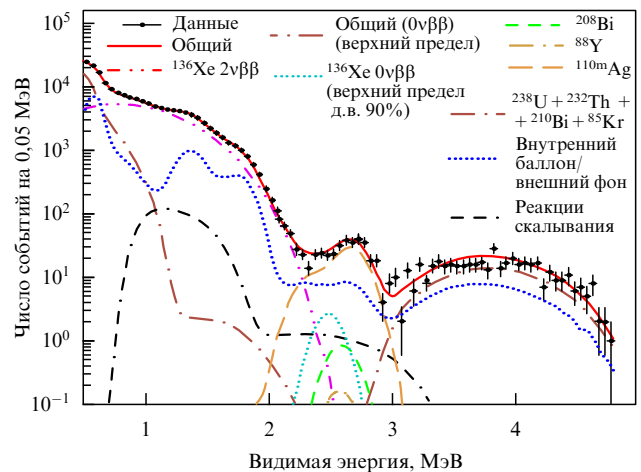


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Спектр событий-кандидатов вместе с результатами фитирования фона и $2\beta(2\nu)$ -распада [2]. Область фитирования 0,5–4,8 МэВ.

и 554 ФЭУ с диаметром фотокатода 20 дюймов. В центр детектора помещён дополнительный внутренний "баллон" диаметром 3,08 м, содержащий 13 т ЖС. В этом сцинтиляторе растворено 320 кг обогащённого ксенона (содержание ^{136}Xe 90,93 %). В чувствительном объёме (диаметр 2,7 м) содержится 179 кг ^{136}Xe . Сцинтилляционный свет регистрируется ФЭУ. Энергетическое разрешение составляет $\sigma = (6,6 \pm 0,3) \% / \sqrt{E [\text{МэВ}]}$, а пространственное разрешение — $\sigma = 15 \text{ см} / \sqrt{E [\text{МэВ}]}$.

Энергетический спектр событий, соответствующий экспозиции 89,5 кг год, показан на рис. 3. Набор данных начался осенью 2011 г. Уровень фона оказался примерно в 100 раз выше ожидаемого. Это связано с загрязнением поверхности внутреннего баллона радиоактивными изотопами, которые постепенно проникают в сцинтилятор. Авторы эксперимента считают, что этот фон является следствием аварии на атомной электростанции Фукусима. Тем не менее даже при таких неблагоприятных условиях был уверенно зарегистрирован $2\beta(2\nu)$ -распад [6, 19] и установлены жёсткие ограничения на распады

^{136}Xe $2\beta(0\nu)$ [2] и $2\beta(0\nu\chi^0)$ [6]:

$$T_{1/2}(2\nu, ^{136}\text{Xe}) = [2,30 \pm 0,02 (\text{стат.}) \pm 0,12 (\text{сист.})] \times 10^{21} \text{ лет}, \quad (6)$$

$$T_{1/2}(0\nu, ^{136}\text{Xe}) > 1,9 \times 10^{25} \text{ лет} \quad (\text{д.в. } 90\%), \quad (7)$$

$$T_{1/2}(0\nu\chi^0, ^{136}\text{Xe}) > 2,6 \times 10^{24} \text{ лет} \quad (\text{д.в. } 90\%). \quad (8)$$

Результат для $2\beta(2\nu)$ -распада хорошо согласуется с результатами эксперимента EXO [16, 17], а результаты ограничений на $2\beta(0\nu)$ - и $2\beta(0\nu\chi^0)$ -распады приводят к наиболее строгим на сегодня ограничениям на $\langle m_\nu \rangle$ и $\langle g_{ee} \rangle$: $\langle m_\nu \rangle < 0,13-0,35$ эВ, $\langle g_{ee} \rangle < (0,8-1,6) \times 10^{-5}$.

В настоящее время коллаборация EXO пытается снизить уровень фона посредством очистки сцинтиллятора от радиоактивных примесей. Кардинальной мерой может стать замена внутреннего "баллона". В принципе фон может быть уменьшен примерно в 100 раз. Если этого удастся достичь, то за три года измерений чувствительность эксперимента составит $\sim 2 \times 10^{26}$ лет, что соответствует чувствительности к эффективной массе майорановского нейтрино $\langle m_\nu \rangle < 0,04-0,11$ эВ. После этого планируется вторая фаза эксперимента с использованием 1000 кг ^{136}Xe (см. раздел 3.5).

2.3. Эксперимент GERDA-I

Эксперимент GERDA-I (GERmanium Detector Array I) — это низкофоновый эксперимент по поиску $2\beta(0\nu)$ -распада ^{76}Ge с использованием детекторов HPGe (High Purity Germanium), изготовленных из обогащённого германия-76 [3]. В этом эксперименте используется новый подход к организации пассивной и активной защиты. Во-первых, были предприняты серьёзные усилия по минимизации количества конструкционных материалов вокруг HPGe-детекторов. Во-вторых, с целью снижения уровня фона кристаллы германия помещались в сосуд с жидким аргоном, который находился в огромном баке с водой (диаметром и высотой 10 м) (рис. 4). Жидкий аргон и вода проходили специальную очистку от радиоактивных примесей. Полный вес HPGe-детекторов на первом этапе составил около 15 кг. Энергетическое разрешение детекторов $\approx 4-5$ кэВ в области энергии 2β -распада ^{76}Ge (2,039 МэВ).

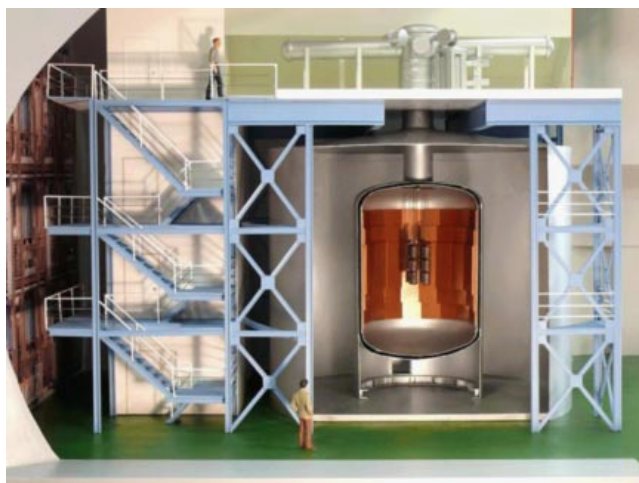


Рис. 4. Схема установки GERDA-I [20].

Интересно отметить, что в эксперименте в основном используются HPGe-детекторы, которые прежде применялись в экспериментах Гейдельберг–Москва и IGEX (International Germanium EXperiment). Вся установка размещена в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине 3500 м в.э. Эксперимент GERDA-I начал набор данных в ноябре 2011 г. и закончил измерения в мае 2013 г. Набраны данные для измерений 21,6 кг \times год. Спектры показаны на рис. 5 [3].

В результате был измерен период полураспада ^{76}Ge по 2ν -каналу [20]:

$$T_{1/2}(2\nu, ^{76}\text{Ge}) = 1,84_{-0,1}^{+0,14} \times 10^{21} \text{ лет}. \quad (9)$$

Этот результат согласуется с результатами предыдущих экспериментов.

При изучении 0ν -моды был применён "слепой" анализ, в ходе которого экспериментальные данные в области 0ν -распада были неизвестны до самого последнего момента. Данные были открыты в июне 2013 г. После применения всех методов отбора (включая отбор по форме импульса) фон в исследуемой области составил $\sim 0,1$ отсчёт на 1 кэВ на 1 кг в год. При ожидаемых 2,5 событиях от фона было зарегистрировано 3 реальных события (рис. 5). В результате на 90%-ном уровне достоверности был установлен предел $T_{1/2} > 2,1 \times 10^{25}$ лет ($\langle m_\nu \rangle < 0,2-0,4$ эВ).

Эксперимент GERDA-I стал новым этапом в развитии экспериментальной техники для поиска $\beta\beta 0\nu$ -распада ^{76}Ge . Предложенная методика показала свои работоспособность и эффективность, а достигнутый уровень фона оказался примерно на порядок ниже по сравнению с таковым в предыдущих экспериментах, Гейдельберг–Москва и IGEX. Запланирован следующий этап эксперимента — GERDA-II, в котором предполагается вдвое увеличить массу ^{76}Ge и существенно снизить уровень фона (см. раздел 3.2).

3. Планируемые эксперименты

В настоящее время существует около 30 предложений по поиску $2\beta(0\nu)$ -распада. Однако, по-видимому, не все они будут реализованы. Многие проекты существуют только на бумаге, многие находятся на начальном этапе исследований. В таблице 4 приведены параметры семи наиболее продвинутых экспериментов, которые с очень большой вероятностью будут реализованы в ближайшем будущем. Как видно из табл. 4, масса исследуемых изотопов в этих экспериментах достигнет нескольких сотен килограммов или даже нескольких тонн. Если эта программа будет реализована, то для четырёх изотопов чувствительность к параметру $\langle m_\nu \rangle$ достигнет уровня $10^{-2}-10^{-1}$ эВ, что позволит проверить схему с обратной иерархией нейтринных масс.

3.1. Эксперимент CUORE

Место проведения эксперимента CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events) — подземная лаборатория Гран Сассо (Италия, 3500 м.в.э.). Предполагается исследовать 760 кг природного TeO_2 , т.е. около 200 кг ^{130}Te . Будет изготовлено 1000 низкотемпературных ($T \approx 8$ мК) детекторов весом 760 г каждый, которые будут размещены в 19 башнях. Одна из главных проблем — это снижение уровня фона примерно в 20 раз по

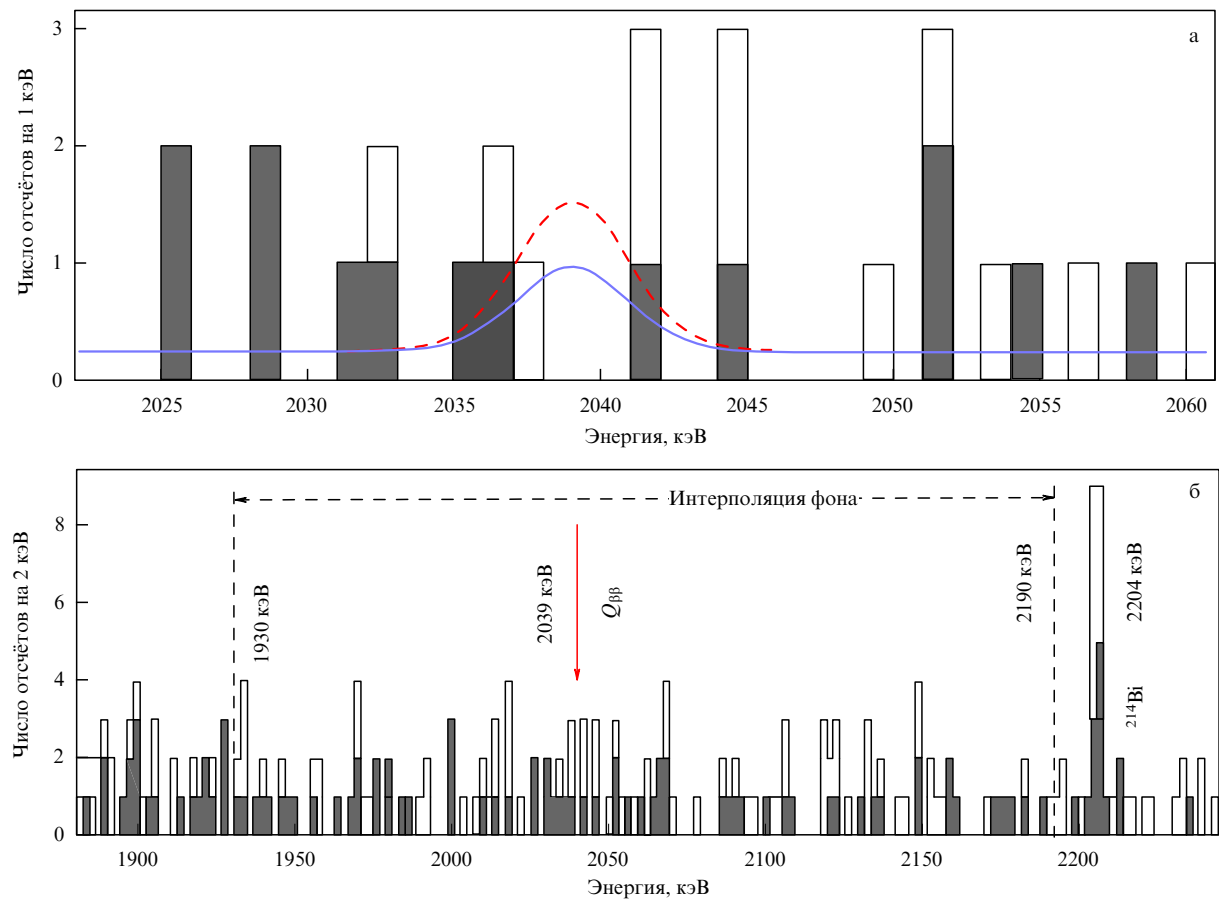


Рис. 5. (а) Суммарный спектр для всех детекторов в эксперименте GERDA-I [3] для всей исследуемой области; показан ожидаемый сигнал для $T_{1/2} = 2,1 \times 10^{25}$ лет (сплошная кривая) и $T_{1/2} = 1,2 \times 10^{25}$ лет (пунктирная кривая). (б) Часть спектра, которая использовалась для оценки среднего фона в исследуемой области. Тёмным цветом отмечены события, оставшиеся после проведения анализа по форме импульса.

Таблица 4. Наиболее перспективные планируемые эксперименты по 2β -распаду

Эксперимент	Исследуемый изотоп	Масса изотопа, кг	Чувствительность*, $T_{1/2}$, год	Чувствительность*, $\langle m_\nu \rangle$, эВ	Статус эксперимента
CUORE [21]	^{130}Te	200	10^{26}	0,05–0,13	Принят
GERDA [22]	^{76}Ge	40 1000	2×10^{26} 6×10^{27}	0,06–0,20 0,01–0,04	Идёт НИОКР**
Majorana [23]	^{76}Ge	30 1000	10^{26} 6×10^{27}	0,09–0,30 0,01–0,04	Принят НИОКР**
EXO [24]	^{136}Xe	200 5000	4×10^{25} 2×10^{27}	0,09–0,24 0,02–0,04	Идёт НИОКР**
KamLAND-Zen [25]	^{136}Xe	320 1000	2×10^{26} 6×10^{26}	0,04–0,11 0,02–0,06	Идёт Принят
SuperNEMO [26]	^{86}Se	100–200	$(1-2) \times 10^{26}$	0,04–0,10	НИОКР**, прототип принят
SNO+ [27]	^{130}Te	800 8000	10^{26} 10^{27}	0,05–0,13 0,015–0,045	Принят

* Чувствительность указана на 90%-ном уровне достоверности за три года (первые этапы экспериментов GERDA, Majorana, KamLAND-Zen), пять (CUORE, SuperNEMO (Super Neutrino Ettore Majorana Observatory), KamLAND-Zen-2, EXO, SNO+) и десять лет (полномасштабные эксперименты GERDA и Majorana) измерений.
** Научно-исследовательские и конструкторские работы.

сравнению с достигнутым уровнем фона на 62-кристальном детекторе Cuoricino. В случае достижения уровня фона 0,01 отсчёт на 1 кэВ кг в год чувствительность эксперимента к 0ν -распаду ^{130}Te составит $\sim 10^{26}$ лет ($\langle m_\nu \rangle \sim 0,05-0,13$ эВ). Эксперимент получил финанси-

рование и будет реализован. В настоящее время в лаборатории Гран Сассо идёт набор данных на детекторе COURE-0 — одной из башен детектора CUORE. Основная цель — убедиться в возможности снижения фона в эксперименте CUORE до требуемого уровня.

Начало набора данных в эксперименте CUORE планируется на 2015 г.

3.2. Эксперимент GERDA

GERDA — один из двух планируемых экспериментов с ^{76}Ge (другой эксперимент — Majorana — описан в разделе 3.3). Эксперимент проводится в подземной лаборатории Гран Сассо. Основная идея — поместить практически "голые" HPGe-детекторы в очень чистый жидкий аргон и использовать его как пассивную и активную (сцинтилляционный свет) защиту. В свою очередь дьюар с жидким аргоном помещается в бак со сверхчистой водой, которая также играет роль пассивной и активной (черенковское излучение) защиты.

Эксперимент состоит из трёх этапов. Первый этап GERDA-I уже завершён (см. раздел 2.3). На втором этапе будет исследоваться примерно 40 кг обогащённого германия (к уже работающим детекторам будет добавлено около 20 кг новых HPGe-детекторов с "точечным контактом"). На втором этапе планируется уменьшить индекс фона в области 0ν -распада до $\sim 10^{-3}$ отсчётов на 1 кэВ кг год. В этом случае за три года измерений чувствительность составит $T_{1/2} \sim 2 \times 10^{26}$ лет ($\langle m_\nu \rangle < 0,06 - 0,2$ эВ). Набор данных начнётся в 2014 г. На третьем этапе (видимо, это будет совместный эксперимент GERDA–Majorana) планируется исследовать 1 т ^{76}Ge . В этом случае чувствительность будет доведена до $T_{1/2} \sim 6 \times 10^{27}$ лет ($\langle m_\nu \rangle < 0,01 - 0,04$ эВ), что позволит проверить схему с обратной иерархией нейтринных масс.

3.3. Эксперимент Majorana

Установка Majorana будет содержать около 1000 HPGe-детекторов, изготовленных из обогащённого германия (обогащение более 87 %). Полная масса исследуемого ^{76}Ge составит 1000 кг. Будет использоваться отличная от схемы защиты эксперимента GERDA "классическая" схема пассивной защиты, состоящая из слоёв сверхчистой меди, свинца и полиэтилена. Вся установка будет размещена в подземной лаборатории. Использование HPGe-детекторов (с высоким энергетическим разрешением), проведение анализа сигналов по форме импульса, антисовпадений и применение низкофоновых конструктивных материалов позволят снизить уровень фона в области 0ν -распада до $2,5 \times 10^{-4}$ отсчётов на 1 кэВ кг в год. Это даст возможность достичь чувствительности $T_{1/2} \sim 6 \times 10^{27}$ лет ($\langle m_\nu \rangle < 0,01 - 0,04$ эВ). Чувствительность для 0ν -распада ^{76}Ge в 0_1^+ возбуждённое состояние ^{76}Se составит $T_{1/2} \sim 10^{27}$ лет.

На первом этапе будет исследоваться 40 кг HPGe-детекторов (30 кг обогащённого германия и 10 кг натурального германия). Для этого создаётся установка Majorana-Demonstrator, состоящая из двух криостатов, окружённых пассивной и активной защитой. Установка размещена в подземной лаборатории SURF (Sanford Underground Research Facility) (США). Планируемая чувствительность эксперимента за три года измерений составит $T_{1/2} \sim 10^{26}$ лет ($\langle m_\nu \rangle < 0,09 - 0,30$ эВ). Набор данных начнётся в 2014 г.

Коллаборации GERDA и Majorana объединили свои усилия для разработки полномасштабного эксперимента с 1 т ^{76}Ge . Окончательная схема этого эксперимента будет определена после завершения экспериментов Majorana-Demonstrator и GERDA-II.

3.4. Эксперимент EXO

В эксперименте EXO предполагается регистрировать как электроны ионизации, так и ионы Ba^+ , возникающие при 2β -распаде $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}^{++} + 2e^-$. В работе [24] предлагалось исследовать одну тонну ^{136}Xe . В настоящее время авторы эксперимента говорят о 5-тонном эксперименте (проект nEXO). Причём на первом этапе не будут регистрироваться ионы ^{136}Ba (т.е. это станет дальнейшим развитием эксперимента EXO-200). Для того чтобы избежать проблем с фоном от 2ν -распада, энергетическое разрешение должно быть не хуже 3,5 % (FWHM) при энергии 2,5 МэВ. Если исследовательская работа по регистрации ионов бария закончится успешно, то тогда будет реализован вариант с регистрацией ионов бария (что приведёт к существенно более низкому уровню фона).

Принципиальная возможность регистрации одиночных ионов бария была продемонстрирована уже давно. Однако основная проблема — это достижение высокой эффективности регистрации в реальном эксперименте. Для осуществления этой идеи эффективность регистрации должна быть не хуже 70 % (такая эффективность пока не достигнута).

Эксперимент планируется проводить в подземной лаборатории SNO (Sudbury Neutrino Observatory, 6000 м в.э.) в Канаде. Начало набора данных — после 2016 г.

3.5. Эксперимент KamLAND-Zen-2

Эксперимент KamLAND-Zen-2 является продолжением проводимого сейчас эксперимента KamLAND-Zen (см. раздел 2.2). На новом этапе предполагается исследовать 1000 кг ^{136}Xe . С этой целью будет использоваться внутренний "баллон" большего размера (≈ 4 м) с жидким сцинтиллятором, в котором и будет растворён обогащённый ксенон. Для улучшения энергетического разрешения предполагается увеличить число ФЭУ в два раза и использовать во внутреннем "баллоне" сцинтиллятор с большим световыходом. Планируемая чувствительность эксперимента за пять лет измерений составит $T_{1/2} \sim 6 \times 10^{26}$ лет ($\langle m_\nu \rangle < 0,02 - 0,06$ эВ). Набор данных начнётся, видимо, в 2016 г.

3.6. Эксперимент SNO+

Для эксперимента SNO+ модернизируется детектор SNO (Канада), использовавшийся для регистрации солнечных нейтрино. Для поиска двойного бета-распада детектор предполагается заполнить жидким сцинтиллятором с введённым в него исследуемым изотопом. Прежде всего предполагалось исследовать ^{150}Nd . Однако в начале 2013 г. коллаборация отказалась от неодима и решила исследовать ^{130}Te . Такая замена связана с тем, что теллур может быть легко и в больших количествах (0,3–3 %) введён в сцинтиллятор; теллур имеет высокую концентрацию ^{130}Te в естественной смеси (34,5 %) и низкую скорость распада по 2ν -каналу (что сильно снижает неустраняемый фон от двухнейтринного распада).

Заполнение детектора жидким сцинтиллятором планируется на 2014 г. На первом этапе в сцинтиллятор будет введено 0,3 % теллура (800 кг ^{130}Te), а на втором — 3 % теллура (8000 кг ^{130}Te). Планируемая чувствительность — $T_{1/2} \sim 10^{26}$ лет для первого этапа и $T_{1/2} \sim 10^{27}$ лет для второго. Таким образом, эксперимент SNO+ способен составить серьёзную конкуренцию эксперименту CUORE.

3.7. Эксперимент SuperNEMO

Коллаборация NEMO (Neutrino Ettore Majorana Observatory) рассматривает возможность проведения эксперимента со 100–200 кг ^{82}Se с целью достижения чувствительности к 0ν -распаду этого изотопа на уровне $\sim (1-2) \times 10^{26}$ лет за пять лет измерений (что соответствует чувствительности к массе нейтрино $\sim 0,04-0,1$ эВ). Для достижения этой цели предлагается использовать ту же экспериментальную методику, что и в эксперименте NEMO-3 [28]. Однако новый детектор будет иметь планарную геометрию и состоять из 20 идентичных секций. В центр секций помещается источник ^{82}Se с толщиной около 40 мг см $^{-2}$ и крайне низким содержанием радиоактивных примесей (7 кг ^{82}Se в каждой секции). Детектор будет регистрировать все характеристики 2β -распада: энергия электронов будет регистрироваться счётчиками на основе пластических сцинтилляторов ($\Delta E/E \approx 8\%$ при $E = 1$ МэВ), а треки будут восстанавливаться с помощью информации с гейгеровских счётчиков.

Эта же установка может быть использована и для исследования других изотопов (^{150}Nd , ^{48}Ca , ^{100}Mo , ^{116}Cd и ^{130}Te). Привлекательной особенностью данного эксперимента является применение уже проверенной экспериментальной техники. Установку предполагается разместить в новом помещении подземной лаборатории Фрежус (Fréjus) (глубина 4800 м.в.э.) во Франции.

На первом этапе будет запущен первый модуль (установка "Демонстратор"), содержащий 7 кг ^{82}Se . В настоящее время начата сборка установки и продолжается изготовление отдельных элементов детектора. "Демонстратор" размещается в существующем помещении лаборатории Фрежус. Запуск установки планируется на 2015 г.

4. Заключение

Итак, в настоящее время $2\beta(2\nu)$ -распад зарегистрирован уже для 11 ядер (^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd , ^{238}U). Кроме того, зарегистрирован $2\beta(2\nu)$ -распад ^{100}Mo и ^{150}Nd на 0_1^+ -возбуждённые состояния дочерних ядер и ЕСЕС(2ν)-процесс в ^{130}Ba (геохимический эксперимент).

Безнейтринный 2β -распад в настоящее время не зарегистрирован, а лучшие ограничения на эффективное значение массы майорановского нейтрино получены в экспериментах с ^{136}Xe , ^{76}Ge , ^{100}Mo и ^{130}Te . Принимая во внимание неопределённости в значениях ЯМЭ, можно установить консервативное ограничение $\langle m_\nu \rangle < 0,35$ эВ.

Можно надеяться, что в ближайшие несколько лет в экспериментах EXO-200, KamLAND-Zen, GERDA-II,

Majorana-Demonstrator и CUORE-0 чувствительность к массе нейтрино будет доведена до значений порядка 0,1–0,3 эВ. Эти эксперименты будут определять уровень исследований в области 2β -распада в течение нескольких ближайших лет.

Эксперименты следующего поколения, с массой исследуемых изотопов $\sim 100-5000$ кг, которые будут запущены примерно через 3–5 лет, позволят достичь чувствительности к $\langle m_\nu \rangle$ на уровне $10^{-1}-10^{-2}$ эВ, что позволит проверить справедливость схемы с обратной иерархией нейтринных масс. Для проверки схемы с нормальной иерархией ($\langle m_\nu \rangle \sim 0,003$ эВ) потребуются установки с массой исследуемых изотопов не менее чем 10 т и крайне низким уровнем фона [29].

Список литературы

1. Barabash A S, arXiv:1311.2421
2. Gando A et al. (KamLAND-Zen Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **110** 062502 (2013)
3. Agostini M et al. (GERDA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **111** 122503 (2013)
4. Barabash A S, Brudanin V B *ЯФ* **74** 330 (2011); *Phys. Atom. Nucl.* **74** 312 (2011)
5. Andreotti E et al. *Astropart. Phys.* **34** 822 (2011)
6. Gando A et al. (KamLAND-Zen Collab.) *Phys. Rev. C* **86** 021601(R) (2012)
7. Arnold R et al. (NEMO Collab.) *Nucl. Phys. A* **765** 483 (2006)
8. Klapdor-Kleingrothaus H V et al. *Eur. Phys. J. A* **12** 147 (2001)
9. Kortelainen M, Suhonen J *Phys. Rev. C* **75** 051303(R) (2007)
10. Kortelainen M, Suhonen J *Phys. Rev. C* **76** 024315 (2007)
11. Šimkovic F et al. *Phys. Rev. C* **87** 045501 (2013)
12. Barea J, Iachello F *Phys. Rev. C* **79** 044301 (2009)
13. Rath P K et al. *Phys. Rev. C* **82** 064310 (2010)
14. Rodríguez T R, Martínez-Pinedo G *Phys. Rev. Lett.* **105** 252503 (2010)
15. Caurier E et al. *Phys. Rev. Lett.* **100** 052503 (2008)
16. Ackerman N et al. (EXO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 212501 (2011)
17. Albert J B et al. (EXO Collab.) *Phys. Rev. C* **89** 015502 (2014); arXiv:1306.6106
18. Auger M et al. (EXO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **109** 032505 (2012)
19. Gando A et al. (KamLAND-Zen Collab.) *Phys. Rev. C* **85** 045504 (2012)
20. Agostini M et al. (The GERDA Collab.) *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* **40** 035110 (2013)
21. Pedretti M (CUORE Collab.) *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **235–236** 261 (2013)
22. Abt I et al., hep-ex/0404039
23. Abgrall N et al. (Majorana Collab.), arXiv:1308.1633
24. Danilov M et al. *Phys. Lett. B* **480** 12 (2000)
25. Shirai J *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **237–238** 28 (2013)
26. Barabash A S (for the SuperNemo Collab.) *J. Phys. Conf. Ser.* **375** 042012 (2012)
27. Peeters S J M *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **237–238** 98 (2013)
28. Arnold R et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **536** 79 (2005)
29. Barabash A S *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* **39** 085103 (2012)

Double beta decay experiments: current status and prospects

A.S. Barabash

Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics,
ul. B. Cheremushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russian Federation
E-mail: barabash@itep.ru

Double beta decay experiments are reviewed and the results of the most sensitive of them are examined. Current half-life values for two neutrino double beta decay are presented together with the best available limits on neutrinoless double beta decay and decay with Majoron emission. The most promising next generation experiments with a Majorana-neutrino mass sensitivity of 0,01–0,1 eV are described.

PACS numbers: 14.60.Pq, **23.40. –s**

Bibliography — 29 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **184** (5) 524–530 (2014)

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201405f.0524

Received 12 November 2013

Physics – Uspekhi **57** (5) (2014)