

2019 152004

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Гангапшев Альберт Мусаевич

**Поиск двойного бета-распада ^{136}Xe
с помощью медных пропорциональных
счетчиков высокого давления**

01.04.16 – ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

МОСКВА – 2005

Работа выполнена в лаборатории низкофоновых исследований Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН

Научный руководитель:
Кандидат физико-математических наук В.В. Кузьминов

Официальные оппоненты:
Доктор физико-математических наук В.Г. Егоров

Кандидат физико-математических наук И.Р. Барабанов

Ведущая организация:
ФГУП «Государственный научный центр РФ Институт теоретической и экспериментальной физики».

Защита состоится 10.11.2005 2005 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 Института ядерных исследований РАН (Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института ядерных исследований РАН

Автореферат разослан 03.10.2005 2005 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук Б.А. Тулупов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. 2β -распад – процесс, предсказанный более чем для тридцати ядер и обнаруженный у десяти из них (^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{150}Nd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{238}U). Для ^{136}Xe этот процесс не обнаружен, хотя его поиски начаты более 20 лет назад и на данный момент уже завершено шесть экспериментов по его поиску. В последнем эксперименте получен нижний предел на период $2\beta(2\nu)$ -распада ^{136}Xe на уровне 10^{22} лет, который выше большинства теоретических оценок и вплотную приблизился к верхним теоретическим оценкам на уровне $2 \cdot 10^{22}$ лет. Это самый высокий из ранее измеренных прямым способом периодов $2\beta(2\nu)$ -распада среди всех изотопов с энергией перехода больше 2МэВ, что само по себе является уникальным. Хотя уже известны периоды 2β -распада для десяти изотопов, на данный момент точность теоретических оценок периода $2\beta(2\nu)$ -распада составляет несколько порядков по величине для одного и того же изотопа. Это связано с большими сложностями вычисления ядерных матричных элементов, зависящих от модели ядра, поэтому знание периодов $2\beta(2\nu)$ -распада как можно большего числа различных ядер является необходимым условием для уточнения параметров моделей ядер.

Экспериментальные нижние ограничения на период $2\beta(0\nu)$ -распада ^{136}Xe находятся на уровне 10^{24} лет, что на

несколько порядков ниже теоретически предсказываемых $\sim 10^{26} - 10^{28}$ лет. Следует отметить, что $2\beta(0\nu)$ -распад – единственный процесс, существование или отсутствие которого даст ответ на вопрос о природе нейтрино: дираковское – в случае его отсутствия, или майорановское – если этот процесс существует. Так как точность вычисления ядерных матричных элементов $2\beta(0\nu)$ -распада составляет несколько сот процентов, здесь также необходимо знание периодов или нижних пределов на периоды $2\beta(0\nu)$ -распада как можно большего числа изотопов для точного определения величины майорановской массы нейтрино.

Таким образом, поиск $2\beta(2\nu)$ - и $2\beta(0\nu)$ -распада различных изотопов является одним из важнейших вопросов современной ядерной физики, физики элементарных частиц и астрофизики. Так как свойства нейтрино, в частности её масса, существенно влияют на процессы, происходящие в звездах и галактиках и на крупномасштабную структуру вселенной. Знание свойств нейтрино необходимо также для уточнения знаний о “темной” массе во вселенной.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное обнаружение 2β -распада ^{136}Xe с помощью низкофоновой установки на основе медных пропорциональных счетчиков (МПС). Эта задача включала в себя:

– Измерение спектра распадов ^{222}Rn и его дочерних продуктов в рабочей МПС, с целью дальнейшего исключения из фона обоих МПС событий связанных с ^{222}Rn и α -частицами из конструкционных материалов.

– Измерение фона двух МПС заполненных естественным ксеноном с извлеченными легкими изотопами и ксеноном, обогащенным по изотопу ^{136}Xe до 93%.

– Расчет периода $2\beta(2\nu)$ - и $2\beta(0\nu)$ -распада ^{136}Xe исходя из разности в фонах МПС при заполнении естественным и обогащенным изотопами.

Новизна работы. В настоящей работе получено наивысшее значение нижней границы периода $2\beta(2\nu)$ -распада ^{136}Xe для экспериментов разностного типа, в которых эффект ищется как разность спектров фона детектора при заполнении обогащенным и естественным ксеноном. Также получен нижний предел на период $2\beta(0\nu)$ -распада ^{136}Xe . Результаты эксперимента находится на уровне лучших экспериментальных ограничений, достигнутых на сегодняшний день. Из результатов измерения спектра распадов ^{222}Rn и его дочерних продуктов в рабочей области МПС получены значения коэффициентов рекомбинации в треках α -частиц в ксеноне при давлении 14,8ат и различном значении напряженности электрического поля в зависимости от ориентации трека относительно силовых линий электрического поля.

Научная и практическая значимость. Создана экспериментальная низкофоновая установка на основе двух МПС, заполняемых обогащенным и природным ксеноном. Полезный объем каждого МПС составляет 9,159л и давлением 14.8ат. С помощью созданной установки были проведены долговременные измерения фона обоих МПС заполненных обогащенным и природным ксеноном с целью поиска двухнейтринной и безнейтринной мод 2β -распада ^{136}Xe . В ходе измерений доказана стабильность работы обоих МПС в течение измерений длительностью более чем два года. Разработана методика обработки импульсов, позволившая разделить события от α -частиц и электронов в МПС. Это позволило оценить рекомбинационные эффекты в треках α -частиц и существенно снизить собственный фон детекторов до уровня нескольких событий за восемь тысяч часов живого времени измерения в области поиска $2\beta(0\nu)$ -распада.

Основные результаты выносимые на защиту:

– Создана низкофоновая экспериментальная установка глубокого залегания для исследования $2\beta(2\nu)$ - и ^{136}Xe $2\beta(0\nu)$ -распада ^{136}Xe . В регистрирующей схеме использованы цифровые осциллографы, позволившие записывать полную форму импульсов и их дальнейшую обработку с учетом особенностей их формы.

– Измерен спектр МПС заполненного естественным ксеноном с примесью ^{222}Rn до давления 14.8ат. Определены параметры импульсов от альфа-частиц, позволившие с высокой эффективностью отделить их от импульсов от электронов. Получены коэффициенты рекомбинации в треках альфа-частиц с энергией 5,45МэВ в зависимости от напряженности электрического поля и ориентации трека относительно силовых линий электрического поля. Коэффициенты рекомбинации меняются от 0,5 до 0,8 при изменении отношения {напряженность электрического поля}/{давления} от 0,015 до 0,006В/(см*мм р.ст.).

– Выполнены пять серий измерений с полным временем набора статистики ~15000 часов.

-- Проведен анализ данных за 8000часов живого времени измерений. Применена процедура исключения событий от альфа-частиц из фонов полученных на обоих образцах ксенона, что позволило значительно снизить фон в энергетической области 0,8÷2,5МэВ, в которой проводился поиск эффекта 2β -распада ^{136}Xe . Получены пределы на периоды $2\beta(2\nu)$ - и $2\beta(0\nu)$ -распада ^{136}Xe на уровне:

$$T_{1/2}(2\beta, 2\nu) \geq 8,5 * 10^{21} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

$$T_{1/2}(2\beta, 0\nu) \geq 3,1 * 10^{23} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Апробация работы: Результаты, изложенные в

диссертации докладывались на: семинарах Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики (п. Эльбрус, 2001 и 2003гг.), Школе-семинаре “Фундаментальные взаимодействия и космология” (ИЯИ РАН г. Москва, 2003г.), Международной школе “Частицы и космология” (п. Терскол, 2003 и 2005гг.), международной конференции “NANP 03” (г. Дубна, 2003г.), международной школе “ISAPP 2004” (Италия, г. Л’Аквила, 2004г.), международной конференции “NANP 05” (г. Дубна, 2003г.).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав основного текста и Заключения, содержит 118 страниц машинописного текста, в том числе 52 рисунка, 17 таблиц и список литературы из 132 наименований.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность решаемых в диссертации задач, а также дана краткая характеристика диссертации и формулируются основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе дано краткое изложение истории и современного состояния физики нейтрино на 2005г. Обсуждаются направления физики ориентированные на

исследования свойств нейтрино (Солнечные, атмосферные, реакторные и ускорительные нейтрино; β -распад трития; регистрация взрыва сверхновой звезды SN1987A; космологические нейтрино; 2β -распад) и роль 2β -распада в физике нейтрино.

Во второй главе кратко приведена история теоретических и экспериментальных исследований 2β -распада, теоретический аспект этого процесса. Изложены в виде таблицы характеристики всех известных изотопов – кандидатов на 2β -распад. Приведены изотопы, для которых экспериментально найден и измерен период $2\beta(2\nu)$ -распада в сравнении с теоретическими оценками. Даны сводные данные теоретических оценок величины периода $2\beta(2\nu)$ -распада и обзор завершенных экспериментальных работ и проектов по исследованию 2β -распада ^{136}Xe .

В третьей главе описывается принцип действия пропорциональных счетчиков, их основные характеристики и указаны основные факторы, влияющие на функцию отклика пропорциональных счетчиков и качество их работы. Рассматривается конструкция МПС, который представляет собой пропорциональный счетчик диаметром 14см с корпусом из меди и анодной нитью диаметром 10мкм из позолоченного вольфрама. Рабочая длина составляет 595мм. Съем сигнала производится с обоих концов анодной нити, что позволяет по

соотношению амплитуд двух импульсов определять координату события вдоль анодной нити. Для записи импульсов использовались цифровые осциллографы ЛАн-10М6. Запись полной формы импульсов позволяет определить при дальнейшей обработке временные и структурные параметры импульсов, заметно отличающиеся для ионизирующих частиц разного сорта. Что позволяет разделить сигналы от α -частиц и электронов. Рассмотрены свойства ксенона как рабочей среды пропорционального счетчика с рабочим давлением 14,8ат. Графически представлены коэффициент сжимаемости ксенона в зависимости от давления при температурах 290 и 300К, скорость дрейфа электронов в ксеноне при различных значениях отношения напряженности электрического поля к давлению. Дана зависимость энергетического разрешения МПС от энергии, определенная с помощью источников γ -квантов ^{22}Na (511 и 1275кэВ), ^{137}Cs (662кэВ) и ^{232}Th (1592кэВ). Приведены результаты вычисления эффективности регистрации электронов от 2β -распада ^{136}Xe в МПС в зависимости от их энергии.

В четвертой главе описана экспериментальная установка, состоящая из пассивной защиты (15см свинца+8см борированного полиэтилена+20см меди) и двух МПС. Установка размещена в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900м в.э., где поток мюонов космических лучей подавлен в 10^7 раз и составляет

$2,23 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Представлены коэффициенты поглощения энергии в зависимости от энергии γ -квантов, пространственно-энергетическое распределение нейтронов в зависимости от толщины полиэтилена и сечение захвата нейтронов ядром ^{10}B в зависимости от энергии. Описана система очистки ксенона от электроотрицательных примесей. Рассмотрены источники фона МПС и их характеристики. Дана примерная оценка вклада в фон МПС от нейтронов и показана его незначительность по сравнению с фоном от α -частиц и γ -квантов. Рассчитана активность космогенного изотопа ^{60}Co , образованного в корпусе МПС за время нахождения на поверхности. Показано, что вклад в фон излучений от распада этого изотопа является незначительным по сравнению с общим фоном. Средний темп счета МПС при энергиях больше 0,8 Мэв после исключения событий от альфа-частиц составил меньше одного события в час.

Измерения проводились в пять этапов примерно по 3000 часов живого времени измерений каждая. Один из счетчиков заполнялся ксеноном обогащенным по изотопу ^{136}Xe (93%), второй – природным ксеноном с извлеченными легкими изотопами (9,2% ^{136}Xe). Калибровка обоих МПС проводилась примерно каждые 2 недели для мониторинга их стабильности. После каждого этапа выполнялась процедура перезаполнения обоих МПС, в ходе которой газы менялись местами для устранения систематической ошибки связанной с возможными различиями в МПС №1 и МПС №2.

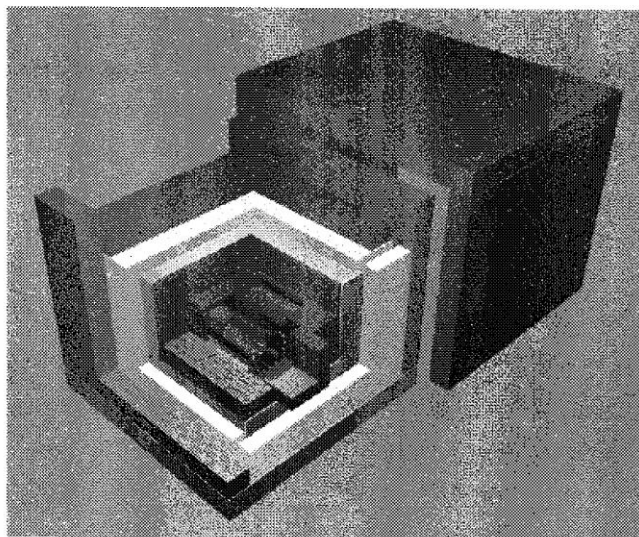


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по поиску 2β -распада ^{136}Xe

Эффект от 2β -распада определялся как разность спектров МПС, полученных при заполнении обогащенным и природным ксеноном в энергетическом диапазоне $0,8 \div 2,5$ МэВ для двухнейтринной моды и $2,317 \div 2,641$ МэВ для безнейтринной моды. Для этого использовались данные четного числа серий: 1, 2, 4 и 5. При получении результатов предварительно из фоновых спектров были исключены события от альфа-частиц.

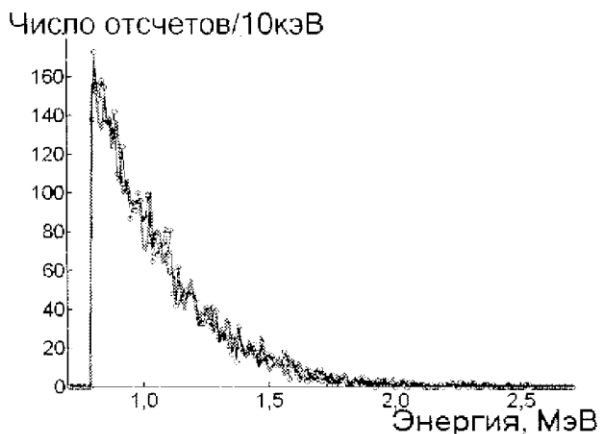


Рис. 2. Спектры фоновых событий в МПС за 8000ч измерений (тонкая линия с кружками – суммарный спектр МПС при заполнении природным ксеноном, толстая линия – суммарный спектр МПС при заполнении ксеноном, обогащенным по изотопу ^{136}Xe)

Получены пределы на периоды 2β -распада ^{136}Xe относительно двухнейтринной и безнейтринной мод:

$$T_{1/2}(2\beta, 2\nu) \geq 8,5 \cdot 10^{21} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

$$T_{1/2}(2\beta, 0\nu) \geq 3,1 \cdot 10^{25} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Таб. 4.5. Количество событий с энергией 0.8÷2.48МэВ, зарегистрированных в МПС №1 и МПС №2 за 2000час каждой серии.

№ серии	МПС №1	МПС №2
1	1681(¹³⁶ Xe)	1108(^{nat} Xe)
2	1734(^{nat} Xe)	1182(¹³⁶ Xe)
4	1316(^{nat} Xe)	783(¹³⁶ Xe)
5	1204(¹³⁶ Xe)	756(^{nat} Xe)

Таб.4.6. Количество событий с энергией 2317÷2641кэВ, зарегистрированных в МПС №1 и МПС №2 за 2000ч каждой серии.

№ серии	МПС №1	МПС №2
1	3 (¹³⁶ Xe)	3 (^{nat} Xe)
2	3 (^{nat} Xe)	1 (¹³⁶ Xe)
4	1 (^{nat} Xe)	0 (¹³⁶ Xe)
5	1 (¹³⁶ Xe)	0 (^{nat} Xe)

В заключении подведены итоги данной работы и кратко сформулированы основные результаты.

Основные результаты диссертации состоят в следующем:

1. Создана экспериментальная установка для исследования двойного бета-распада ^{136}Xe , состоящая из низкофоновой защиты 15см свинца+8см борированного полиэтилена+20см меди и двух медных пропорциональных счетчиков высокого давления (МПС). Все материалы защиты находятся в подземной лаборатории в течение ~20 лет, за это время существенно снизилась активность космогенных радиоактивных изотопов в материалах. В регистрирующую аппаратуру включены цифровые осциллографы, позволяющие записывать полную форму импульсов и проводить их дальнейшую обработку в "off line" режиме.
2. Достигнута чувствительность к регистрации $2\beta(2\nu)$ -распада ^{136}Xe на уровне $6,1 \cdot 10^{21}$ лет (90% у.д.) для одного года измерений. Что сравнимо с лучшими из выполненных на сегодняшний день экспериментов. Для экспериментов разностного типа достигнута наивысшая чувствительность.
3. Выполнены пять серий измерений с полным временем набора статистики ~15000 часов.
4. Проведены измерения и обработаны результаты за 8000 часов живого времени. Проведены серии калибровоч-

ных измерений с источниками ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{232}Th и ^{222}Rn для определения рабочих характеристик счетчиков.

5. На основе измерений с ^{222}Rn получены коэффициенты рекомбинации в треках альфа-частиц для различных значений отношения “напряженность электрического поля/давление” в ксеноне при давлении 14,8 ат.
6. Разработана и реализована специальная программа сбора и обработки информации. При расчете функции отклика счетчиков определены оптимальные области для регистрации эффекта при максимальном отношении “сигнал/фон”.
7. Из анализа данных следует, что основной вклад в фон МПС выше 1,0 МэВ дают распады ^{222}Rn , выходящего в рабочую газовую область счетчиков из конструкционных материалов.
8. Проведен анализ данных, полученных на МПС. Исходя из разности скоростей счета обоих МПС при заполнении ксеноном, обогащенным по изотопу ^{136}Xe до 93%, и природным ксеноном с извлеченными легкими изотопами получены нижние пределы на период полураспада для двухнейтринной и безнейтринной мод двойного бета-распада ^{136}Xe :

$$T_{1/2}(2\beta, 2\nu) \geq 8,5 \cdot 10^{21} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

$$T_{1/2}(2\beta, 0\nu) \geq 3,1 \cdot 10^{23} \text{ лет (90\% у.д.)}$$

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. А. М. Гангапшев, Фон больших медных пропорциональных счетчиков. Труды второй Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики, Нальчик 2001, стр.152.
2. A. Apshev, Ju. Gavriljuk, A. Gangapshev, V. Kuzminov, N. Osetrova, S. Panasenko, S. Ratkevich, A. Khokonov, Background of the copper proportional counters used for a new stage of search for the two neutrino double beta decay of Xe-136, proceedings of the XI-th international school "Particles and Cosmology", INR RAS, Moskow 2003, p. 96.
3. Ju. Gavriljuk, A. Gangapshev, V. Kuzminov, N. Osetrova, S. Panasenko, S. Ratkevich, Preliminary results of a search for the two-neutrino double beta decay of Xe-136 with high pressure copper proportional counter, proceedings of the XII-th international school "Particles and Cosmology", INR RAS, Moskow 2004, p. 29.
4. А.М. Гангапшев, Влияние фона альфа-частиц на результаты эксперимента по поиску двухнейтринного двойного бета-распада ^{136}Xe с помощью пропорциональных счетчиков, Труды четвертой Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики, Нальчик 2004, стр.128.

5. Ju. M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kuzminov, N.Ja. Osetrova, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, First results of a search for the two-neutrino double beta decay of ^{136}Xe with high pressure copper proportional counters, Ядерная Физика том 67, номер 11, стр. 2033 (2004г.).
6. Ju.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kuzminov, N.Ja. Osetrova, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, Analysis of a α -particle background events in a high pressure copper proportional counter, Ядерная Физика том 67, номер 11, стр. 2039 (2004г.).
7. Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.В. Кузьминов, Н.Я. Осетрова, С.И. Панасенко и С.С. Раткевич, "Результаты эксперимента по поиску двойного бета-распада ^{136}Xe с помощью пропорциональных счетчиков высокого давления", Препринт ИЯИ РАН № 1147/2005, Москва 2005г.

Всего по теме диссертации опубликовано 7 научных работ.

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,0 Зак. № 21550 Тираж 100 экз.

Бесплатно

Отпечатано на компьютерной издательской системе
Издательский отдел Института ядерных исследований
Российской академии наук
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а