

*На правах рукописи*

Текуева Джамиля Ануаровна

Поиск 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

**Научный руководитель:** *Ганганшев Альберт Мусаевич*, кандидат физико-математических наук, филиал Баксанская нейтринная обсерватория Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), лаборатория низкофоновых исследований (ЛНФИ), заведующий лабораторией.

**Официальные оппоненты:**

*Болоздыня Александр Иванович* — доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), межкафедральная лаборатория экспериментальной ядерной физики, заведующий научно-исследовательской лабораторией.

*Рыкалин Владимир Иванович* — доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики высоких энергий имени А.А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ), отделение экспериментальной физики, руководитель сектора сцинтилляционных и фотоэлектронных приборов.

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИЯИ РАН по адресу: <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.119.01  
кандидат физико-математических наук

Демидов С.В.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы диссертации**

Эксперименты по поиску  $2\beta$ -распада остаются актуальными и в настоящее время. Наибольший интерес представляет поиск  $2\beta(0\nu)$ -распада. На данный момент ведутся несколько международных экспериментов и планируются еще несколько, нацеленных на поиск этого процесса на различных изотопах.

Двойной двухнейтринный электронный захват наравне с  $2\beta$ -распадом — очень важный фундаментальный процесс. Экспериментальное измерение вероятности двухнейтринной моды распада позволяет провести прямую проверку различных моделей ядерной структуры и, следовательно, сравнить правильность расчетов ядерных матричных элементов, определяющих вероятность безнейтринной моды распада, вызывающего особый интерес. В отличие от  $2\beta$ -распада  $2K$ -захват в прямых экспериментальных исследованиях до 2019 г. не был обнаружен. Имеется только указание на уровне  $2.5\sigma$  в случае  $2K(2\nu)$ -моды распада в  $^{78}\text{Kr}$ .

Цель данной диссертации является поиск  $2K$ -захвата  $^{124}\text{Xe}$  с помощью медного пропорционального счетчика (МПС). Работа проводится в Институте ядерных исследований Российской академии наук. Экспериментальная установка расположена в низкофоновой лаборатории глубокого залегания — филиале Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований Российской академии наук (БНО ИЯИ РАН) на глубине 4900 м в.э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей подавлен в  $10^7$  раз по сравнению с поверхностью. Детектор представляет собой пропорциональный счетчик, окруженный низкофоновой защитой состоящей из 18 см меди, 15 см свинца и 8 см борированного полиэтилена. Для заполнения МПС используется образец ксенона, обогащенный до 21% по изотопу  $^{124}\text{Xe}$  (58.6 гр).

Ксенон в данном случае является одновременно и источником, и детектирующей средой. Простота процесса очистки ксенона от электроотрицательных примесей позволяет проводить эту процедуру периодически в течение эксперимента. Характеристики детектора позволяют выделить сигналы от 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  ( $2E_{\text{Kab}} = 63.6$  кэВ). Использование в качестве детектирующей среды и исследуемого образца одного и того же материала позволяет существенно снизить фон, а используемая методика обработки сигналов многократно повышает отношение эффект/фон.

В результате искомой реакции  $^{124}\text{Xe}(2e_{\text{K}}, 2\nu_e)^{124}\text{Te}$  с полной энергией перехода  $Q = 2866$  кэВ образуется атом  $^{124}\text{Te}^{**}$  с двумя вакансиями на К оболочке. Методика поиска этой реакции основана на том, что заполнение двойной К-вакансии в дочернем атоме  $^{124}\text{Te}^{**}$  в  $\sim 73.4\%$  случаев сопровождается вылетом двух характеристических фотонов К-серии и Оже-электронов, с суммарным энерговыделением 63.6 кэВ. В случае, когда оба характеристических фотона поглощаются в рабочем объеме счетчика, то полное энерговыделение будет распределено в трех локальных областях в объеме счетчика (трехточечное событие). Сигналы от таких событий обладают рядом особых характеристик и являются объектом исследования в данной работе.

Теоретические расчеты для 2е-захвата в рамках различных моделей дают возможные значения периода полураспада  $^{124}\text{Xe}$  относительно 2К-захвата в диапазоне  $10^{21}$ – $10^{23}$  лет.

Наблюдение 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  или установление более высокого предела на период полураспада является актуальной задачей. Результатом данной работы является установление нижнего предела на период полураспада  $^{124}\text{Xe}$  относительно 2К( $2\nu$ )-захвата на уровне  $T_{1/2} \geq 7.7 \times 10^{21}$  лет при 90% уровне достоверности (у.д.). Этот предел сопоставим с результатом, полученным в эксперименте XMASS, в котором нижний предел на период полураспада  $^{124}\text{Xe}$  относительно 2К( $2\nu$ )-захвата установлен на уровне  $T_{1/2} \geq 4.7 \times 10^{21}$  лет (90% у.д.). На данный момент XMASS провели поиск одновременного захвата

двух электронов с К-оболочки на ядрах  $^{124}\text{Xe}$  и  $^{126}\text{Xe}$  с испусканием двух нейтрино с использованием данных за 800 дней измерений на установке XMASS-I, искомые процессы не были обнаружены, поэтому были установлены нижние пределы периодов полураспада на уровне  $2.1 \times 10^{22}$  и  $1.9 \times 10^{22}$  лет для  $^{124}\text{Xe}$  и  $^{126}\text{Xe}$ , соответственно, с уровнем достоверности 90%.

## **Цель работы и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является:

- поиск 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  с помощью медного пропорционального счетчика (МПС);
- разработка методики разделения импульсов по параметру многоточечности и отбора событий имеющих уникальный набор признаков;

**Методы исследования.** Исследование выполнялась в низкофоновых условиях с помощью медного пропорционального счетчика.

Алгоритмы подавления шума и выбор необходимых сигналов для анализа выполнялись с использованием вейвлет-анализа. При обработке импульсов использовался метод дискриминации событий по длине анодной нити путем сравнения амплитуд импульса и первого послеимпульса.

## **Научная новизна**

Все положения, выносимые на защиту, содержат новые или содержащие элементы новизны, следующие пункты:

1. Модернизирована низкофоновая установка для поиска 2К-захвата.
2. Разработана методика разделение импульсов по уникальным признакам.
3. Получен новый предел на период полураспада 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$ .
4. Измерение сечения образования космогенных изотопов в образце Хе используемого в эксперименте.

## Теоретическая и практическая значимость

Экспериментальное измерение вероятности двухнейтринной ( $2\nu$ ) моды распада позволяет провести прямую проверку различных моделей ядерной структуры и, следовательно, проверить правильность расчетов ядерных матричных элементов, определяющих вероятность безнейтринной ( $0\nu$ ) моды  $2\beta$ -распада. В отличие от  $2\beta$ -распада  $2K$ -захват в прямых экспериментальных исследованиях до 2019 г. не был обнаружен. Имеется только указание на уровне  $2.5\sigma$  в случае  $2K(2\nu)$ -моды распада в  $^{78}\text{Kr}$ .

В процессе исследования была разработана методика очистки от шумов и разделение сигналов по уникальным признакам. Также разработан метод очистки газа от  $^{85}\text{Kr}$ .

### Положения выносимые на защиту:

1. Разработана методика разделения сигналов с МПС, заполненного ксеноном, по уникальным признакам.

2. Проведены измерения с МПС заполненным ксеноном, обогащённым по изотопу  $^{124}\text{Xe}$ :

На первом этапе эксперимента использовался образец ксенона объемом 12 л обогащенный по  $^{124}\text{Xe}$  до 63.3% (44 г  $^{124}\text{Xe}$ ).

На втором этапе эксперимента используется (измерения продолжаются) образец Xe объемом 50 л, обогащённый по  $^{124}\text{Xe}$  до 21% (58.6 г  $^{124}\text{Xe}$ ).

3. Получен новый предел на период полураспада  $^{124}\text{Xe}$  относительно  $2K$ -захвата на уровне:

$$T_{1/2} \geq 7.7 \times 10^{21} \text{ лет.}$$

4. Проведены результаты измерений с целью исследования процессов образования изотопа  $^{127}\text{Xe}$  по двум различным каналам:

а) скалывание нейтрона мюоном из ядра  $^{128}\text{Xe}$ ;

б) захват нейтрона ядром  $^{126}\text{Xe}$ .

Для первого канала получено ограничение на сечение ре-

акции образования изотопа  $^{127}\text{Xe}$ , на уровне  $\sigma \leq 0.07 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$  при 95% уровне достоверности. Для второго канала получено значение сечения реакции  $0 = (2.74 \pm 0.4) \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ , которое в пределах ошибок совпадает со справочными данными.

**Степень достоверности.** Все полученные данные не противоречат ни теоретическим, не другим экспериментальным данным.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались на следующих конференциях и семинарах:

XI Баксанская молодёжная школа экспериментальной и теоретической физики «БМШ ЭТФ–2010», Приэльбрусье, Кабардино-Балкария, 17–23 октября 2010 г.

XV International Baksan School “Particles and Cosmology-2011”. Moscow, Shishkin Les, May 26 – June 2, 2011 y.

Сессия-конференция Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук (СЯФ ОФН РАН), МИФИ Москва 17–21 ноября 2014 г.

Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике, Государственный научный центр РФ — Институт теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра (ГНЦ РФ ИТЭФ) НИЦ «Курчатовский институт» г. Москва, 29 ноября–01 декабря 2016 г.

Международная сессия-конференция Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук (ОФН РАН) «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, 6–8 июня 2017 г. КБГУ г. Нальчик.

Также по теме диссертации были проведены доклады на научных семинарах Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, из них 5 в рецензируемых журналах.

Часть работы выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, грант № 16-32-00018.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержит 101 страниц текста, 50 рис., 6 табл., список цитируемой литературы из 89 названий.

### **Личный вклад диссертанта**

Результаты, изложенные в диссертационной работе, были выполнены при непосредственном участии автора. Работа автора в основном заключалась в обслуживании экспериментальной установки (калибровка, очистка газа, проведение измерений) и частично обработке данных.

### **Содержание работы**

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

**Во введении** дается краткое описание  $2\beta(2\nu)$ -распада и обоснование актуальности изучения данного процесса.

**В первой главе** кратко представлены основы теории  $2\beta$ -распада со всевозможными модами перехода:  $2\beta^+$ -,  $2\beta^-$ -распад, электрон-позитронная конверсия ( $e\beta^+$ -конверсия),  $2e$ -захват.

**Во второй главе** приводится краткий обзор экспериментов, проводящихся в данное время по поиску  $2\beta$ -распада, а также последние результаты, полученные в этих экспериментах.

**В третьей главе** приводится описание экспериментальной установки по поиску  $2K$ -захвата  $^{124}\text{Xe}$ , а так же методика обработки сигналов полученных с медного пропорционального счетчика высокого давления.

Эксперимент по поиску  $2K$ -захвата в  $^{124}\text{Xe}$  проводится в низкофоновой лаборатории глубокого залегания Баксанской нейтринной

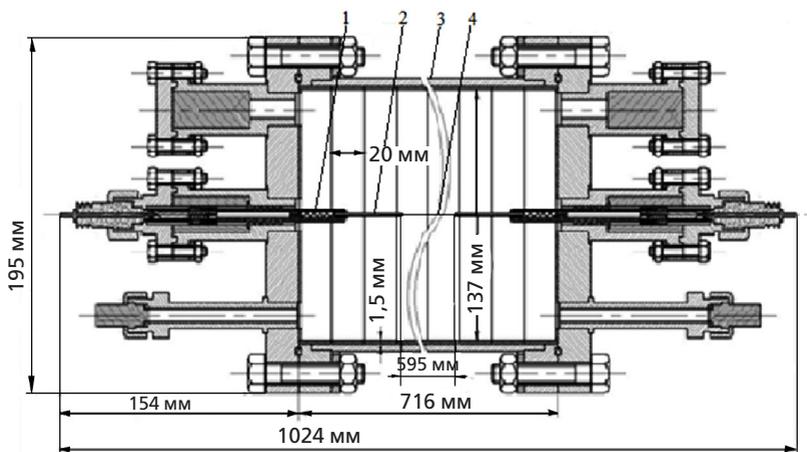


Рис. 1. Схематическое изображение МПС в разрезе вдоль анода.

// — медь, \ \ — сталь, ×× — изолятор; 1 — несущий изолятор, 2 — трубчатое утолщение анода, 3 — катод, 4 — анодная нить (собирающий электрод)

обсерватории ИЯИ РАН на глубине 4900 м в. э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей подавлен в  $\sim 10^7$  раз по сравнению с поверхностью и составляет  $(3.03 \pm 0.10) \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Экспериментальная установка представляет собой медный пропорциональный счетчик (МПС), окруженный низкофоновой защитой. Корпус МПС изготовлен из меди марки М1 и имеет классическую цилиндрическую форму (рис. 1.) со следующими размерами: общая длина 710 мм, рабочая длина 595 мм, внешний диаметр 140 мм, внутренний диаметр 137 мм. По оси цилиндра натянута анодная нить из позолоченного вольфрама диаметром 10 мкм. Анод с обеих сторон закреплён на керамических высоковольтных гермовводах, установленных на торцах фланца. Краевой эффект в МПС уменьшается за счет того, что торцевые участки анодной нити проходят через медные трубки диаметром 3 мм, длиной 38.5 мм, электрически соединенные с анодом. На данных участках газовое усиление отсутствует, поэтому сбор зарядов осуществляется в ионизационном режиме. Фланец отделяется от рабочей зоны фторопластовым изолятором

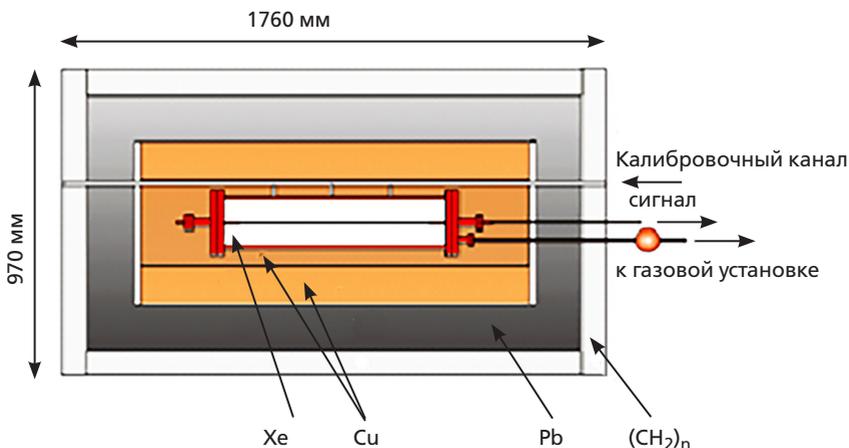


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной установки

длиной 70 мм. На анод подается напряжение 3000 В. Суммарная емкость счетчика и выходного изолятора составляет  $\sim 30.6$  пФ. Суммарное сопротивление анода и двух выходных электродов  $\sim 600$  Ом. Внутренние изоляторы изготовлены из фторопласта с минимальной толщиной для улучшения обезгаживания в процессе вакуумной подготовки счетчика и стабилизации рабочих характеристик в процессе измерений. Все разъемные соединения МПС герметизированы с помощью индиевой проволоки, а штуцерные соединения с помощью фторопластовых прокладок. Полный объем счетчика 10.37 л, рабочий объем 8.77 л. В качестве рабочего газа МПС используется ксенон ( $P=4.8$  атм) обогащенный по изотопу  $^{124}\text{Xe}$  до 21%. Масса  $^{124}\text{Xe}$  в рабочем объеме составляет 57 г. Перед заполнением, проводится очистка газа от электроотрицательных примесей ( $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ ) пропусканьем газа через Ti-реактор при температуре  $800^\circ\text{C}$ .

Процедура перезаполнения счетчика образцом газа происходит периодически примерно раз в 2 месяца.

МПС окружен пассивной защитой, которая состоит из меди марки М1 толщиной 18 см, 15 см свинца и 8 см борированного полиэтилена (см. рис. 2). Пассивная защита используется для снижения фона

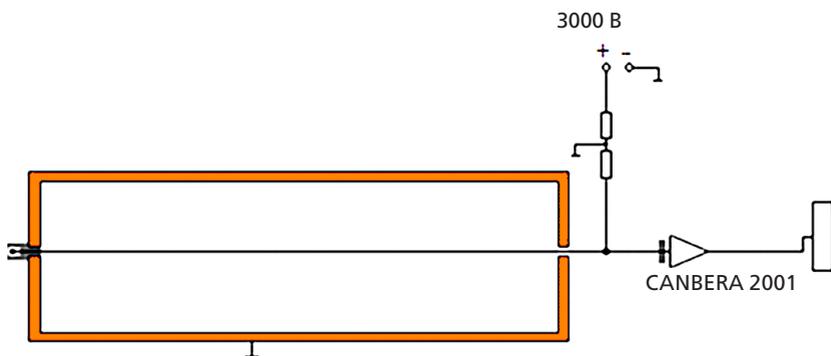


Рис. 3. Электрическая схема детектора: CANBERA 2001 — предусилитель, ЛА-н20-12РСІ

от окружающей установку среды; в частности, свинец и медь используются для снижения фона от ионизирующих частиц. Борированный полиэтилен используется для замедления и поглощения нейтронов. Содержание бора в борированном полиэтилене составляет 15% по массе.

Заключение о величине возможного эффекта формируется на основе результатов сравнительного анализа данных о фоне пропорционального счётчика, заполненного образцами чистого ксенона с различным содержанием исследуемого изотопа  $^{124}\text{Xe}$ . Предельная чувствительность установки к искомому эффекту зависит, в первую очередь, от величины собственного фона детектора и качества методов выделения полезного сигнала с заданным набором признаков.

Сигнал с МПС снимается зарядочувствительным предусилителем CANBERA 2001 с одной стороны анодной нити и записывается с помощью цифрового осциллографа ЛА-н20-12РСІ (рис.3). Частота оцифровки сигнала составляет 12.5 МГц. Форма импульса записывается на диск в память персонального компьютера для дальнейшей обработки.

Калибровка МПС осуществляется с помощью  $\gamma$ -источника  $^{109}\text{Cd}$ , с энергией гамма-квантов 88 кэВ и 22 кэВ. Так как источник распо-

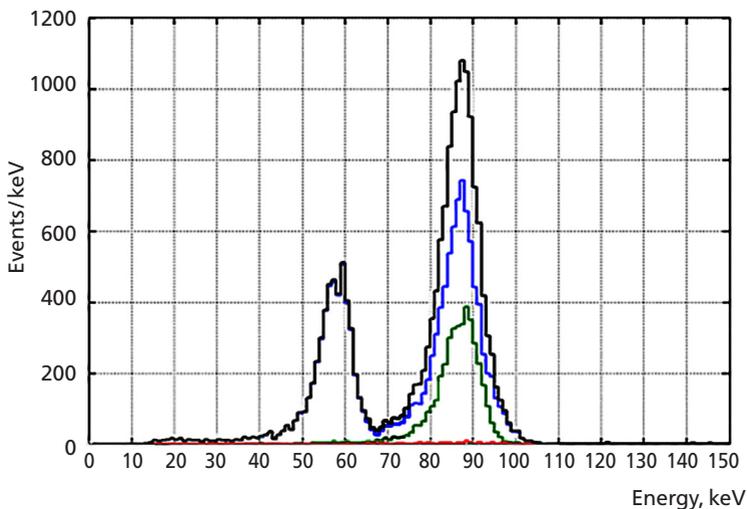


Рис. 4. Спектр калибровочного источника  $^{109}\text{Cd}$ , линия 88 кэВ:  
 черный — спектр всех событий; голубой — спектр одноточечных событий; зелёный —  
 спектр двухточечных событий; красный — спектр трехточечных событий

лагается на внешней поверхности корпуса счетчика, фотоны с энергией 22 кэВ практически полностью поглощаются в стенке счетчика. На рис.4. показан калибровочный спектр, и спектры, полученные после разделения событий на одно-, двух- и трехточечные. Количество “точек” определяется количеством пространственно разделенных областей ионизации в МПС в отдельно взятом событии. В случае 2К-распада  $^{124}\text{Xe}$  часть событий будут трехточечные так как образуются три области ионизации: 1-Оже электроны, 2-фотоэффект одного характеристического фотона, 3-фотоэффект второго характеристического фотона, при этом характеристические фотоны отлетают в разные стороны от места распада на некоторое расстояние.

Помимо основного пика полного поглощения на спектре присутствует пик вылета с энергией 58 кэВ. Его наличие обусловлено случаями, когда характеристический фотон, образовавшийся в результате фотоэффекта на электроны с К-оболочки Хе, излучаемый после заполнения вакансии на К-оболочке, покидает рабочую область счет-

чика, и в рабочей области остаются только Оже-электроны. Такие события являются одноточечными. Отсутствие пика вылета в спектрах многоточечных событий указывает на качество разделения событий по количеству “точек”.

Были проведены измерения сечения реакции образования космогенного изотопа  $^{127}\text{Xe}$  по двум различным каналам: а) скалывание нейтрона мюоном из ядра  $^{128}\text{Xe}$ , б) захват нейтрона ядром  $^{126}\text{Xe}$ . Для первого канала получено ограничение на сечения образования изотопа  $^{127}\text{Xe}$ , на уровне  $\sigma \leq 0.07 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$  (95% у.д.). Для второго канала получено значение  $\sigma = (2.74 \pm 0.4) \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ , которое в пределах ошибок совпадает со справочными данными.

На первом этапе эксперимента по поиску 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  использовался образец 12 л, обогащенный по  $^{124}\text{Xe}$  до 63.3% (44 гр). Было установлено ограничение на период полураспада  $^{124}\text{Xe}$   $T_{1/2}(0\nu + 2\nu, 2\text{K}) \geq 4.6 \cdot 10^{20}$  лет (90% у.д.) за 1130 часов измерения. На втором этапе используется образец Xe объемом 50 л, обогащённый по  $^{124}\text{Xe}$  до 21% (58.6 гр).

Предварительно из наборов данных были устранены события не ионизационного происхождения, к которым относятся наводки и микроразряды в высоковольтных цепях. Импульсы от наводок имеют различные формы, в целом существенно отличающиеся от формы полезных импульсов. Импульсы от микроразрядов похожи на полезные импульсы, но имеют короткий фронт и в них отсутствует послеимпульс.

Для дальнейшего анализа брались только трехточечные события. Каждое событие спектра характеризуется набором энерговыделений, распределённых в трех точечноподобных областях рабочего объёма счётчика. Рассортировав точечные энерговыделения этих событий по возрастанию, мы можем отобрать только те из них, которые содержат малую компоненту  $m_0$  в диапазоне энерговыделения 5–13 кэВ, а отношение двух других больше 0.7 ( $m_1/m_2 > 0.7$ ). Средняя и максимальная амплитуды создаются характеристическими К-фотонами

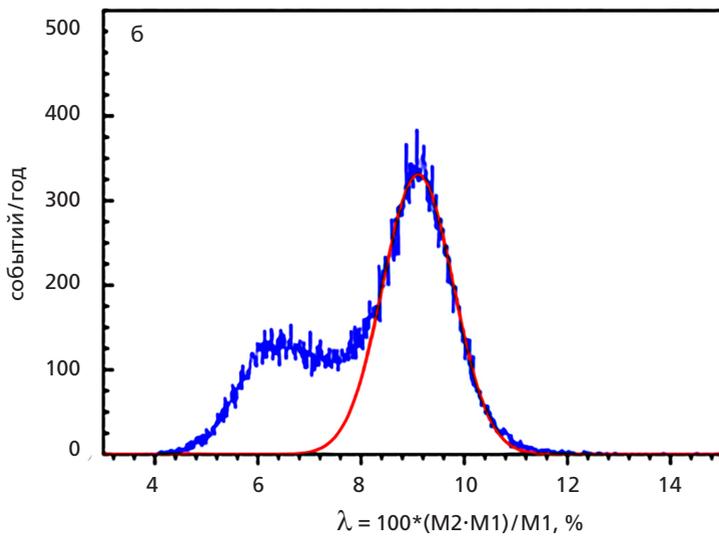
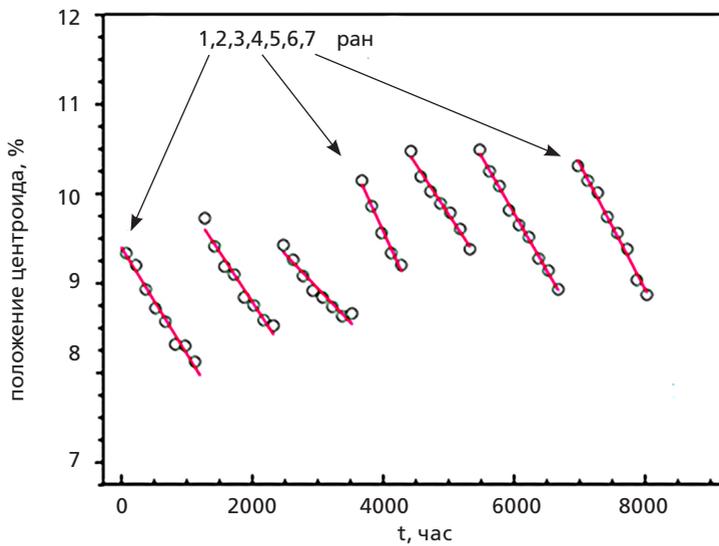


Рис. 5. На верхнем рисунке изображено изменение положения центроида второго пика в  $\lambda$ -распределении для 7-ми ранов. Нижний рисунок демонстрирует его для импульсов ЗЧУ с фронтом нарастания до 12 нс ( $\tau_f = t_{90} - t_{10}$ ,  $t_{10} - 10\%$  и  $t_{90} - 90\%$  от максимальной амплитуды импульса)

( $K_{\alpha 1} + K_{\alpha 1}$ ,  $K_{\alpha 1} + K_{\alpha 2}$ ,  $K_{\alpha 2} + K_{\alpha 2}$ ,  $K_{\alpha 1} + K_{\beta 1}$ ,  $K_{\alpha 1} + K_{\beta 2}$ ,  $K_{\alpha 2} + K_{\beta 1}$ ,  $K_{\alpha 2} + K_{\beta 2}$ )  $Te^{**}$ . Доля перечисленных комбинаций двух квантов ( $\alpha_k$ ), регистрируемых в составе трёхточечного события, составляет величину  $\alpha_k = 0.985$  от полного числа возможных комбинаций. Таким образом, отбор трёхточечных событий по этому критерию позволяет дополнительно снизить фон в области энергий ожидаемого пика и получить общее представление о форме спектра в широкой области энергий. Спектр отобранных событий изображены на *рис. 8*, искомый пик от 2К-захвата находится в пределах энергий от  $64.46 - 13 = 51.46$  до  $64.46 + 13 = 77.46$  кэВ.

Поскольку во время длительного набора данных в пропорциональном счетчике происходит постепенное изменение спектротрических характеристик рабочего газа, то необходимо вносить корректировку во времени таких параметров для каждого рана (набора данных между двумя чистками газа). Для этого каждые две недели проводились калибровочные измерения с внешним источником и по их данным определялись временные зависимости параметров опорных импульсов: как энергетическая цена канала  $dE(t) = f(t)$ ; диапазон фитирования  $t_{fit}(t) = f(t)$ ; параметр  $\lambda(t) = f(t)$ .

На *рис. 5* показаны изменения во времени центроида второго пика в  $\lambda$ -распределение (а) и вариации длительности первичных импульсов тока (b) в каждом из семи ранов за 15427 часов.

Из графика на *рис. 5* можно определить коэффициент коррекции для  $\lambda$ -распределения в каждом ране, что позволяет нам получить реконструированное  $\lambda$ -распределение.

После коррекции параметров импульсов во времени мы можем построить амплитудные спектры событий с параметром  $4 < \lambda < 12$ . Это позволяет нам произвести внутреннюю энергетическую калибровку отдельно для одноточечных и двух-, и трёхточечных событий (см. *рис. 6*).

На *рис. 7* хорошо видна К — линия после фотоэффекта на Хе с разрешением 17%.

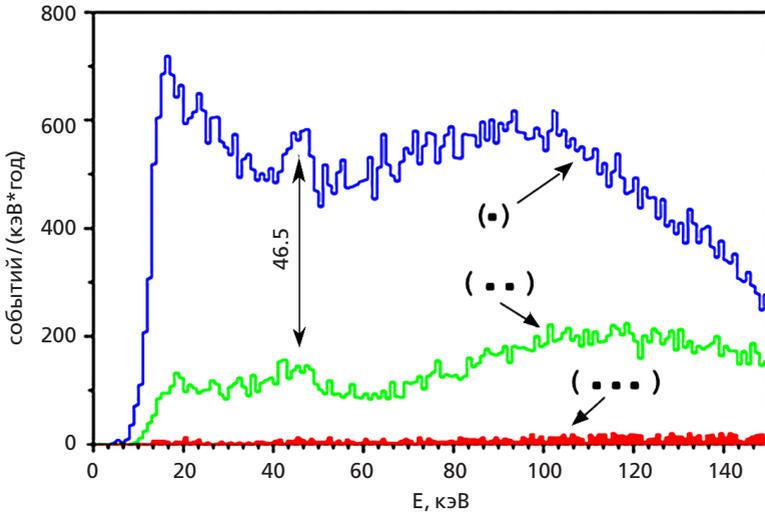


Рис. 6. Амплитудные спектры фона МПС за 15427 часов: (.) (..) (...) — спектры одно-, двух- и трёхточечных событий, соответственно

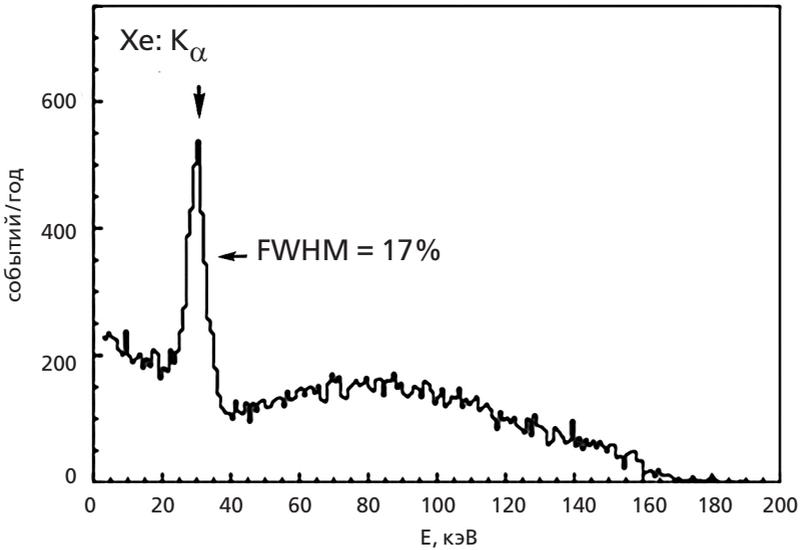


Рис. 7. Фоновый спектр отдельной компоненты, в двухточечных событиях нормированный на один год измерений с параметром  $8 < \lambda < 12$

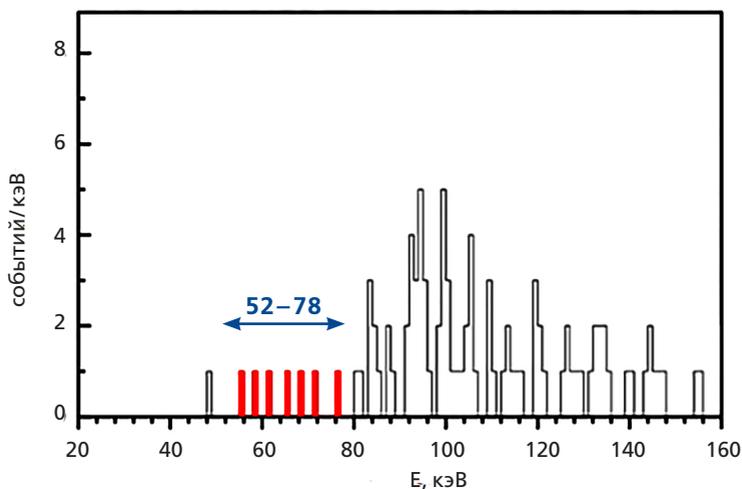


Рис. 8. Спектр трехточечных событий нормированных

В К-пик входят следующие линии:

$$K_{\alpha 1} = 29.779 \text{ 100\%}, K_{\alpha 2} = 29.458 \text{ 54\%}$$

$$K_{\beta 3} = 33.562 \text{ 9\%}, K_{\beta 1} = 33.624 \text{ 18\%}, K_{\beta 2} = 34.415 \text{ 5\%}.$$

Ожидаемое энерговыделение, согласно работе D.A.Nesterenko, должно быть равно 64.457 кэВ. Соответственно, область интересов, в которой происходит поиск искомого процесса 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$ , выбирается в интервале энергий: от  $64.46 - 13 = 51.46(52)$  до  $64.46 + 13 = 77.46(78)$ . На рис.8 представлен спектр трехточечных событий, «выживших» после применения процедуры отбора, со следующими параметрами:  $8 < \lambda < 12$ ,  $m_1/m_2 > 0.7$  и  $5 \text{ кэВ} < m_0 < 13 \text{ кэВ}$ . За 15000 часов измерений в область интересов попадают 7 событий. Так как эти события могут быть как фоновыми, так и эффектом, мы даем нижний предел на период полураспада  $^{124}\text{Xe}$  относительно 2К-захвата, согласно рекомендациям данным в работе.

Для  $n_{\text{exp}} = 7$  за  $t_{\text{meas}} = 1.76$  лет (37.7 кг × дней)

$$T_{1/2} \geq \ln 2 \times N_a \times t_{\text{meas}} (\eta/n_{\text{exp}}) \geq 7.7 \times 10^{21} \text{ лет},$$

где  $N_a = 2.85 \times 10^{23}$  полное число атомов  $^{124}\text{Xe}$ ,

$$\eta = \omega_{2K} \varepsilon_p \varepsilon_3 \alpha_k k_\lambda ,$$

$\eta_{2K} = \omega_H \times \omega_S = 0.772$ , выход флюоресценции при 2К-захвате;

$\varepsilon_p = 0.809$ , вероятность абсорбции двух КХ-лучей;

$\varepsilon_3 = 0.51 \pm 0.05$ , коэффициент выделения трехточечных событий;

$\alpha_k = 0.985 \pm 0.005$ , коэффициент регистрации 2К-фотонов

и Оже-электронов как трехточечные события;

$k_\lambda = 0.89 \pm 0.01$  — коэффициент учитывающий отбор по параметру  $\lambda$ .

$t_e = 1.76$  лет время экспозиции.

**В Заключение** сформулированы основные результаты работы по поиску 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$ .

**Результаты по теме диссертации опубликованы в следующих статьях:**

1. Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.В. Казалов, В.В. Кузьминов, С.И. Панасенко, С.С. Раткеевич, Д.А. Текуева, С.П. Якименко. Эксперимент по поиску 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  // Труды 11-ой Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики, Нальчик 2011.
2. Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.В. Казалов, В.В. Кузьминов, С.И. Панасенко, С.С. Раткеевич, Д.А. Текуева, С.П. Якименко. Методика поиска 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$  с помощью медного пропорционального счетчика // Ядерная физика и инженеринг. 2014. Т.5, №11–12. С.935. DOI: 10.1134/S2079562914080120.
3. Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenکو, S.S. Ratkevich, D.A. Tekueva, S.P. Yakimenko. First Result of the Experimental Search for the 2K-capture of  $^{124}\text{Xe}$  with the Copper Proportional Counter // Physics of Particles and Nuclei. 2015. 46 (2). P.147–151. DOI: 10.1134/S1063779615020082.
4. Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenکو, S.S. Ratkevich, D.A. Tekueva, S.P. Yakimenko. The origin of the background radioactive isotope  $^{127}\text{Xe}$  in the sample of Xe

enriched in  $^{124}\text{Xe}$  // arXiv:1507.04181v1 [nucl-ex]; Ядерная физика и инженеринг. 2016. Т. 47, вып 6 С.1935–1942.

5. Yu.M. Gavriilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, D.A. Tekueva, S.P. Yakimenko. Search for  $2\text{K}(2\nu)$ -capture of  $^{124}\text{Xe}$ . // arXiv:1507.04520v1 [nucl-ex].
6. Yu.M. Gavriilyuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, D.A. Tekueva, S.P. Yakimenko. A technique for searching for the  $2\text{K}(2\nu)$ -capture in  $^{124}\text{Xe}$  with the Copper Proportional Counter // Physics of Atimics Nuclei. 2015. V.78, no. 13. P. 1563–1566. ISSN 1063-7788.
7. Yu.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, D.A. Tekuev.  $2\text{K}$ -Capture in  $^{124}\text{Xe}$ : Results of Data Processing for an Exposure of 37.7 kg day // Physics of Particles and Nuclei July 2018 // V. 49, Issue 4. P. 563–568.

Научное издание  
Текуева Джамия Ануаровна  
Поиск 2К-захвата  $^{124}\text{Xe}$

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 0,8 Зак. № 22457 Тираж 80 экз. Бесплатно  
Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел  
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а