

На правах рукописи

Хромов Александр Владимирович

**Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 для исследования упругого
когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона**

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), г.Москва.

Научный руководитель:

Болоздыня Александр Иванович,
доктор физико-математических наук,
заведующий межкафедральной лабораторией
экспериментальной ядерной физики,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

Бузулуцков Алексей Фёдорович,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории 3-3,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск

Ляшук Владимир Иванович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
гамма-астрономии и реакторных нейтрино,
Институт ядерных исследований РАН, г. Москва

Ведущая организация:

Национальный исследовательский центр
«Курчатовский Институт», г. Москва

Защита состоится « » _____ 2019 г в « » на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ по адресу: 117218, г. Москва, ул. Большая Черёмушкинская, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и экспериментальной физики НИЦ «КИ» и на сайте института www.iter.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2019 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. физ.-мат. наук

Васильев В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. С момента первого экспериментального обнаружения нейтрино прошло более 50 лет. Однако до сих пор нейтрино остается одной из самых загадочных элементарных частиц. Например, наличие ненулевой массы нейтрино, подтвержденное в осцилляционных экспериментах, является прямым указанием на тот факт, что Стандартная Модель является неполной и требует расширения. Необходимость более глубокого понимания свойств нейтрино стимулирует новые эксперименты, проводимые в десятках лабораторий по всему миру. Одним из важных фундаментальных процессов, который на сегодняшний день мало изучен, и может быть использован как «пробник» новой физики, является упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядре (УКРН).

Процесс УКРН, предсказанный около 45 лет назад, заключается в том, что нейтрино (антинейтрино) путем обмена виртуальным Z_0 -бозоном упруго рассеивается на ансамбле нуклонов ядра, передавая ему часть своей энергии^{1, 2}. Вследствие соотношения неопределенности Гейзенберга нейтрино низких энергий могут одновременно взаимодействовать со всеми нуклонами ядра при упругом рассеянии. Это происходит при достаточно малой величине передаваемого ядру импульса q , так, что характерный размер области взаимодействия превышает размеры ядра R ($q^2 \leq 1/R^2$). Процесс УКРН должен идти эффективно при энергиях нейтрино < 50 МэВ, когда условие когерентности выполняется для всех углов рассеяния. В качестве источника нейтрино таких энергий можно использовать ядерные реакторы или сильноточные ускорители с выведенным пучком, сбрасываемым в мишень полного поглощения.

В рамках Стандартной Модели, по аналогии с упругим рассеянием нейтрино на протоне, дифференциальное сечение процесса УКРН на атомном ядре описывается как:

$$\frac{d\sigma}{dT_{coh}} = \frac{G_F^2 M}{2\pi} \left[(G_V + G_A)^2 + (G_V - G_A)^2 \left(1 - \frac{T}{E_\nu}\right)^2 - (G_V^2 - G_A^2) \frac{MT}{E_\nu^2} \right] \quad (1)$$

$$G_V = (g_V^p Z + g_V^n N) F_{nucl}^V(Q^2) \quad (2)$$

$$G_A = (g_A^p (Z_+ - Z_-) + g_A^n (N_+ - N_-)) F_{nucl}^A(Q^2), \quad (3)$$

¹ Копелиович В Б, Франкфурт Л Л. Изотопическая и киральная структура нейтрального тока, Письма в ЖЭТФ 19 236, 1974.

² Freedman D Z. Coherent effects of a weak neutral current, Phys. Rev. D 9 1389, 1974.

где G_F - константа Ферми, M - масса ядра, T - энергия ядра отдачи, E_ν - энергия нейтрино, $g_V^{n,p}$ и $g_A^{n,p}$ - векторные и аксиально-векторные константы связи нейтронов и протонов с Z -бозоном, соответственно, Z и N - количество протонов и нейтронов в ядре, Z_\pm и N_\pm - число протонов и нейтронов с противоположными спинами, Q – переданный четырех-импульс, $F_{\text{nucl}}^V(Q^2)$ и $F_{\text{nucl}}^A(Q^2)$ - векторный и аксиальный форм-факторы ядра, близкие по величине к 1 для малых значений Q^2 ($Q^2 \ll M^2$). Векторные константы g_V^n и g_V^p определяются как:

$$g_V^p = \rho_{\nu N}^{NC} \left(\frac{1}{2} - 2\hat{k}_{\nu N} \sin^2 \theta_W \right) + 2\lambda^{uL} + 2\lambda^{uR} + \lambda^{dL} + \lambda^{dR} \quad (4)$$

$$g_V^n = -\frac{1}{2}\rho_{\nu N}^{NC} + \lambda^{uL} + \lambda^{uR} + 2\lambda^{dL} + 2\lambda^{dR}, \quad (5)$$

где θ_W – угол электрослабого смешивания, $\rho_{\nu N}^{NC}$, $\hat{k}_{\nu N}$ - электрослабые параметры, λ^{uL} , λ^{uR} , λ^{dL} , λ^{dR} – радиационные поправки. Вклад аксиальной составляющей очень мал для тяжелых ядер, т.к. в него входят только непарные протоны и нейтроны, которых относительно немного по сравнению с полным числом нуклонов. Для ядер с нулевым спином он равен нулю.

Если вкладом аксиальной составляющей пренебречь, то при $T \ll E_\nu$:

$$\frac{d\sigma}{dT_{coh}} = \frac{G_F^2}{4\pi} M Q_W^2 \left(1 - \frac{MT}{2E_\nu^2} \right) F_{\text{nucl}}^2(Q^2), \quad (6)$$

где $Q_W = [Z(1 - 4\sin^2 \theta_W) - N]$ – слабый заряд ядра. Т.к. $\sin^2 \theta_W \sim 0,25$, то и $\frac{d\sigma}{dT_{coh}} \sim N^2$. Таким

образом, сечение взаимодействия УКРН значительно возрастает по сравнению с взаимодействием с отдельными нуклонами, примерно как квадрат числа нейтронов в ядре.

В приближенном виде полное сечение взаимодействия может быть представлено как:

$$\sigma \sim 4,2 \times 10^{-45} N^2 (E_\nu / \text{МэВ})^2 \text{ см}^2 \quad (7)$$

Благодаря фактору N^2 сечение процесса УКРН для мишеней с $N=50-60$ превосходит сечение реакции обратного бета-распада на протонах и упругого рассеяния на электронах, обычно используемых в современных детекторах нейтрино, на 2-3 порядка. Процесс УКРН свойственен всем типам нейтрино.

Процесс УКРН имеет фундаментальное значение для описания процессов формирования Вселенной и эволюции звёзд. Отклонения измеренного сечения

взаимодействия УКРН от предсказаний Стандартной Модели могут быть использованы для поиска явлений за ее пределами. Кроме того, процесс УКРН можно использовать для изучения ядерных форм-факторов и магнитного момента нейтрино. Упругое когерентное рассеяние солнечных и атмосферных нейтрино является фоном для следующего поколения экспериментов по прямому поиску темной материи в виде массивных слабовазаимодействующих частиц вимпов (от англ. WIMP – Weakly Interacting Massive Particle), поэтому экспериментальная информация о величине сечения УКРН поможет увеличить чувствительность этих экспериментов. Процесс УКРН может также использоваться для создания новой генерации относительно компактных детекторов для мониторинга состояния активной зоны ядерных реакторов.

Процесс УКРН впервые наблюдался в 2017 году в международном эксперименте COHERENT на ускорительном комплексе Spallation Neutron Source (SNS) в Окриджской национальной лаборатории США при участии сотрудников межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики³ НИЯУ МИФИ в потоке нейтрино трёх различных типов (мюонных нейтрино и антинейтрино, и электронных нейтрино) с помощью 14,6 кг сцинтилляционного детектора на основе кристалла CsI[Na]⁴. Более детальное изучение процесса УКРН требует его исследования на источниках нейтрино одного типа, например, электронных антинейтрино на ядерном реакторе. Для проверки теоретических моделей необходимо исследование УКРН в различных энергетических диапазонах, а также зависимости величины сечения от атомного номера мишени и, в этом смысле использование детекторов с различным элементным составом рабочей среды, представляет особый интерес.

Зависимость сечения процесса УКРН как N^2 делает привлекательным применение мишеней на тяжелых ядрах с большим числом нейтронов. В процессе УКРН нейтрино регистрируется по энерговыделению в рабочей среде детектора от ядра отдачи. Так как максимальная энергия ядра отдачи равна:

$$T_{\max} = 2E_\nu^2 / (M + 2E_\nu) \approx 2E_\nu^2 / M, \quad (8)$$

то при регистрации процесса УКРН на реакторных антинейтрино с $E_\nu < 10$ МэВ, энергия, передаваемая тяжелому ядру, не превышает 1 кэВ. Поэтому для регистрации

³ <http://enpl.mephi.ru/>

⁴ Akimov D et al. Observation of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering. Science 357 1123, 2017.

процесса УКРН в таких условиях необходим детектор с экстремально низким порогом регистрации.

На сегодняшний день известно около десяти экспериментов, направленных на исследование УКРН при помощи различных детекторных технологий: германиевые детекторы с «точечным» контактом ⁵, низкотемпературные болометры ⁶, сцинтилляционные детекторы ⁷, детекторы на основе ПЗС-матриц ⁸. Несмотря на многообразие существующих экспериментальных программ, с точки зрения исследования УКРН, требующего массивного низкопорогового детектора, наиболее перспективным выглядит использование двухфазных эмиссионных детекторов на сжиженных благородных газах, обладающих высокой чувствительностью к событиям с малым ионизационным выходом (вплоть до одиночных электронов).

Эмиссионный метод регистрации частиц был предложен в МИФИ более 40 лет назад и вначале рассматривался для визуализации треков частиц в плотной среде в физике высоких энергий. В основе работы детектора лежит явление эмиссии электронов ионизации из плотной конденсированной фазы в газовую под действием электрического поля большего ~ 2 кВ/см. Использования усиления электронного сигнала за счет электролюминесценции газовой фазы при дрейфе через неё эмитировавших электронов в достаточно сильном поле > 1 кВ/см·атм было предложено в 1995 году для поиска редких событий с малым ионизационным выходом ⁹. Регистрация сцинтилляции S1 и электролюминесценции S2 позволяет создавать так называемые детекторы «без стенок». В настоящее время этот тип детекторов нашел широкое применение в экспериментах по поиску частиц темной материи в форме вимпов (XENON, ZEPLIN, LUX, PANDA, LZ), которые ставятся в низкофоновых подземных лабораториях. В качестве рабочего вещества таких детекторов чаще всего используется жидкий ксенон. Стоит также отметить, что все последние рекордные результаты по ограничению сечения рассеяния вимпов на барионной материи были получены именно с помощью двухфазных эмиссионных детекторов на жидком ксеноне.

В качестве рабочего вещества двухфазного эмиссионного детектора для исследования упругого когерентного рассеяния нейтрино наиболее целесообразно использовать жидкий ксенон из-за его уникальных детектирующих свойств:

⁵ vGen, CONUS, TEXONO, COHERENT

⁶ MINER, RICOCHET, v-cleus

⁷ COHERENT

⁸ CONNIE

⁹ Bolozdynya A., Egorov V., Rodionov B., Miroshnichenko V. Emission detectors. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 42, No. 4, 1995.

1) большой величины сечения взаимодействия УКРН за счет большой атомной массы $A=131$;

2) эффективной «самозранировке» за счет относительно большой плотности $\rho=3$ г/см³ и высокого атомного номера $Z=54$, что необходимо для подавления фона от γ -квантов и нейтронов;

3) отсутствию долгоживущих радиоактивных изотопов.

Все существующие двухфазные эмиссионные жидко-ксеноновые детекторы темной материи экспонируются в лабораториях с низким уровнем фона от космических мюонов, поэтому для постановки опыта по регистрации УКРН вблизи интенсивного нейтринного источника необходим новый детектор, адаптированный к работе в условиях практически наземной лаборатории.

В НИЯУ МИФИ для исследования УКРН на средства мегагранта по постановлению Правительства РФ № 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные организации высшего образования» (договор № 11.G34.31.0049 от 19.10.2011 г.) в 2012 году была создана межкафедральная лаборатория экспериментальной ядерной физики, в которой при участии НИЦ «Курчатовский Институт» — ИТЭФ и НИЦ «Курчатовский Институт» разработан и построен двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 (Российский Эмиссионный Детектор), содержащий в качестве рабочего вещества 200 кг жидкого ксенона. Описанию этой уникальной установки и ее детектирующих характеристик посвящена данная диссертационная работа.

Цель диссертационной работы. Целью работы является создание двухфазного эмиссионного жидко-ксенонового детектора для исследования упругого когерентного рассеяния нейтрино на тяжелых ядрах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Разработан и испытан двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100, а также конструктивные элементы, обеспечивающие его функционирование;
- Исследованы характеристики установки РЭД-100 и показана ее способность регистрировать слабоионизирующие события вплоть до одиночных электронов ионизации;
- Проведен анализ, демонстрирующий возможность постановки опыта по регистрации упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино с помощью детектора РЭД-100 на Калининской Атомной Электростанции (г. Удомля, Россия).

Научная новизна.

1. Создан двухфазный эмиссионный жидко-ксеноновый детектор РЭД-100 для исследования процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядре, в котором:

1.1. Впервые реализована система питания фотоэлектронных умножителей, позволяющая блокировать электролюминесцентные сигналы на время дрейфа ионизационных электронов, образованных от взаимодействий космических мюонов с рабочим веществом детектора, с целью защиты ФЭУ от интенсивной засветки, вызванной фоном космических мюонов при эксплуатации детектора на поверхности Земли. Данная система позволяет уменьшить величину среднего анодного тока от космических мюонов более чем на три порядка, что позволяет ФЭУ работать в линейном режиме без ухудшения их квантовой эффективности в течение нескольких лет.

1.2. Впервые разработан и реализован электронный затвор для разгрузки поверхности жидкого ксенона от незмитированных электронов ионизации от фоновых событий, позволяющий понизить в 3 раза шум от спонтанной эмиссии одиночных электронов ионизации, который является доминирующим фоном при регистрации процесса упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино.

2. Детектор РЭД-100, способный проводить спектрометрию одиночных электронов ионизации, может позволить впервые наблюдать процесс упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино на ядре ксенона в условиях АЭС с чувствительностью, превосходящей более чем на порядок чувствительность всех существующих на сегодняшний день детекторов, разработанных для исследования данного процесса.

Практическая значимость. Помимо важного фундаментального значения, отработка методики регистрации УКРН от ядерного реактора с помощью РЭД-100 может послужить началом развития нового направления применения компактных жидко-ксеноновых детекторов для нейтринной диагностики АЭС в интересах госкорпорации Росатом и МАГАТЭ. Кроме этого, на этапе разработки детектора РЭД-100 было решено несколько технологических проблем. В частности, была применена оригинальная процедура очистки ксенона, прошедшего изотопическую модификацию на газовых центрифугах и загрязненного высокомолекулярными электроотрицательными примесями. Эта процедура, включающая в себя комбинацию электроискрового метода очистки ксенона и циркуляционную технологию очистки внутренних поверхностей детектора и жидкого ксенона с помощью горячего металлического геттера, может быть успешно применена в экспериментах следующего поколения по поиску темной материи или двойного безнейтринного бета-распада с массой рабочего вещества несколько тонн, где вероятно широкое использование изотопически модифицированного ксенона. Разработанный и реализованный комплекс мер, позволяющий эксплуатировать РЭД-100 в условиях высокого уровня фона от космических мюонов, может быть

применен в других двухфазных эмиссионных детекторах. При конструировании криостата для РЭД-100 были разработаны оригинальные технические решения, направленные на повышение его эффективности.

Положения, выносимые на защиту.

- Двухфазный эмиссионный жидко-ксеноновый детектор РЭД-100 для исследования упругого когерентного рассеяния нейтрино, а также конструктивные элементы, обеспечивающие его функционирование;
- Характеристики установки РЭД-100, полученные в результате физических испытаний;
- Анализ возможности постановки эксперимента с помощью детектора РЭД-100 по исследованию процесса упругого когерентного рассеяния электронных антинейтрино на ядре ксенона от ядерного реактора на Калининской АЭС.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными испытаниями в межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ, проведенными с использованием современных измерительных приборов и программного обеспечения; использованием общепринятых программ моделирования и обработки данных; апробацией их на конференциях и публикациями в печати; соответствием результатам, полученным другими авторами.

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в диссертационной работе были получены непосредственно автором или при его активном участии, включая:

- Разработку двухфазного эмиссионного жидко-ксенонового детектора РЭД-100, а также конструктивных элементов, обеспечивающих его функционирование;
- Проведение физических испытаний детектора РЭД-100 и обработку полученных экспериментальных данных;
- Анализ возможности постановки эксперимента с помощью детектора РЭД-100 по исследованию процесса упругого когерентного рассеяния электронных антинейтрино на ядре ксенона от ядерного реактора на Калининской АЭС.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на международной конференции Наука Будущего (Санкт-Петербург 2014, Казань 2016), международной конференции по физике частиц и астрофизике ICPPA (Москва, 2015-2018), международном симпозиуме по физике низких энергий LEPP (Москва, 2015), Научной Сессии НИЯУ МИФИ (2014, 2015).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 работ, входящих в перечень ВАК и проиндексированных в базах данных Web of Science и Scopus. Также в результате работ по теме диссертации получено 2 патента на полезную модель РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и заключения. Она изложена на 115 страницах печатного текста и содержит 61 рисунок, 7 таблиц, а также список литературы из 105 наименований.

Содержание работы

Во **введении** дается описание процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядре. Излагается важность исследования рассматриваемого процесса на тяжелых ядрах в расширенном энергетическом диапазоне для различных нейтринных источников. Обосновывается эффективность применения для регистрации УКРН двухфазного эмиссионного жидко-ксенонового детектора РЭД-100. Изложена актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Сформулированы цели и задачи, а также обоснована научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** представлено устройство и принцип работы (Рис.1а) разработанного двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100, предназначенного для исследования УКРН. Детектор находится внутри титанового криостата, а его работа обеспечивается несколькими системами, объединенными в единую установку РЭД-100.

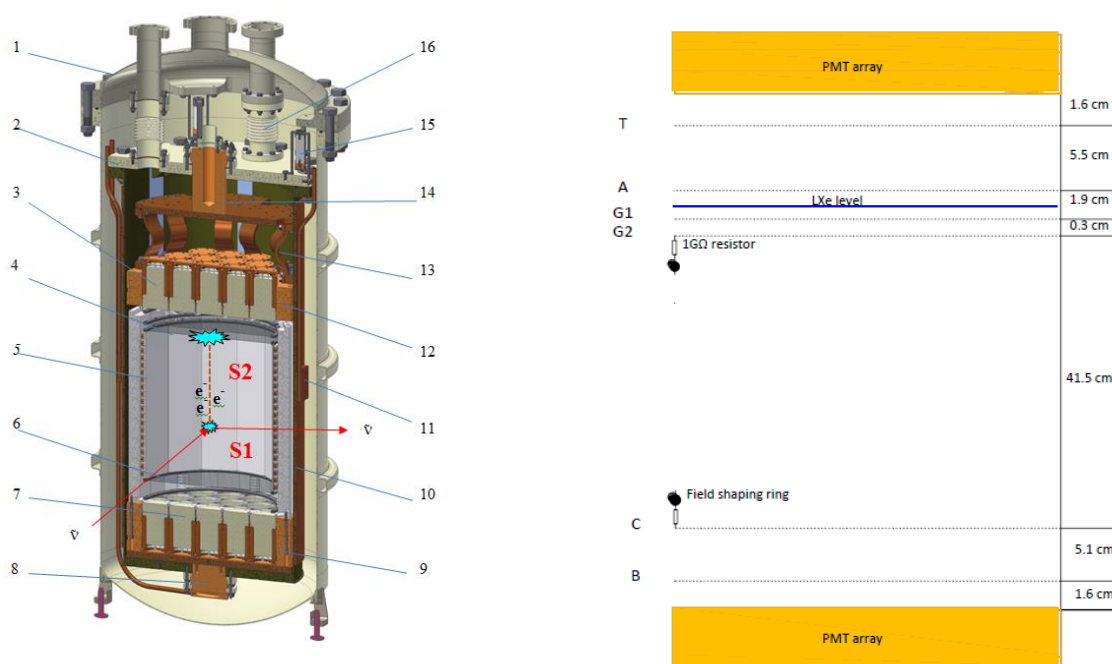


Рис.1. Принцип работы и устройство детектора РЭД-100 (а): 1 – внешний сосуд титанового криостата, 2 – внутренний сосуд титанового криостата, 3 – верхняя матрица из девятнадцати ФЭУ типа Hamamatsu R11410-20, 4 – сетчатый анод и электронный затвор, 5 – рабочий объем, окруженный тefлоновым отражателем со встроенными полезадающими

электродами, 6 – сетчатый катод, 7 – нижняя матрица из девятнадцати ФЭУ, 8 – нижний центральный теплосъемник с термосифоном, 9 – медная обойма для нижней матрицы ФЭУ, 10 – медный кожух холодного сосуда криостата, 11 – один из двух боковых теплосъемников с термосифонами, 12 – медная обойма верхней матрицы ФЭУ, 13 – гибкий тепловой мост, 14 – верхний центральный теплосъемник с медным диском, на котором конденсируется ксенон, 15 – теплоизолирующий подвес на основе материала Vespel®, 16 – сифонная тепловая развязка для вывода кабелей; e^- – электроны ионизации, $\bar{\nu}$ - антинейтрино, передающее энергию ионизирующему ядру отдачи, S1 – сцинтилляционная вспышка, S2 – электролюминесцентная вспышка; схема электродной системы (б): PMT – верхняя и нижняя матрицы ФЭУ, Т-верхняя экранирующая сетка, А - анод, G1 и G2 - верхняя и нижняя сетки электронного затвора, С - катод, В - нижняя экранирующая сетка.

Детектор содержит 200 кг жидкого ксенона (100 кг в FV¹⁰), находящегося в дрейфовом объеме, который формируется с помощью полезадающей электродной структуры (Рис.1б), расположенной внутри тefлоновой светособирающей конструкции. Нейтрино (антинейтрино) при упругом рассеянии на ядре ксенона передает ему часть своей энергии, которая идет на возбуждение атомов жидкого ксенона и ионизацию. Переход возбужденных атомов ксенона в основное состояние приводит к генерации сцинтилляции S1. Образовавшиеся в результате ионизации электроны вытягиваются электрическим полем в газовую фазу. При дрейфе в газе при достаточно сильном электрическом поле (более ~1 кВ/см·атм) электроны возбуждают атомы среды, что приводит к генерации электролюминесценции S2. Регистрация световых сигналов S1 и S2 с длиной волны ~175 нм осуществляется с помощью двух матриц по 19 штук криогенных УФ-чувствительных ФЭУ Hamamatsu R11410-20.

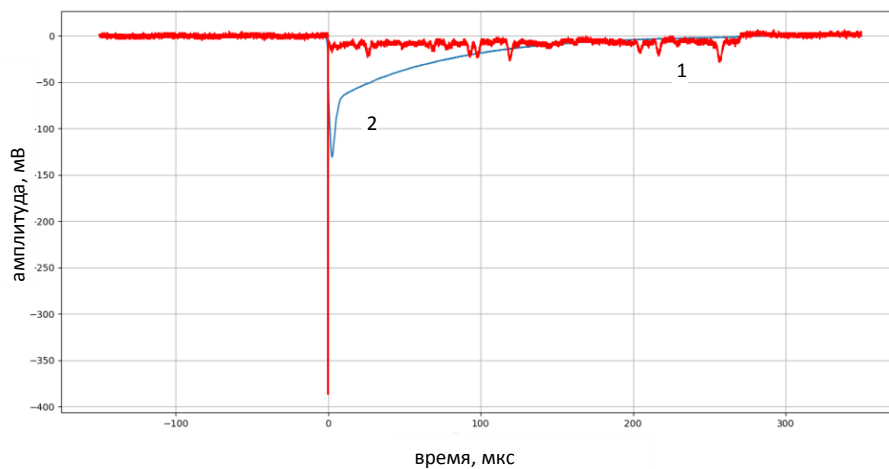
Электроны ионизации дрейфуют под действием электрического поля, создаваемого между катодом С, расположенным в жидкости, и анодом А, находящимся в газе. Электронный затвор G1/G2 располагается непосредственно под поверхностью раздела фаз. Уровень жидкости устанавливается посередине между сеткой G1 и анодом А. Вытягивание электронов ионизации из жидкой в газовую фазу и последующая электролюминесценция обеспечиваются разностью потенциалов ~10 кВ между сеткой G1 и анодом А.

В детекторе РЭД-100, работающем в больших потоках космических мюонов, установлен электронный затвор, необходимый для уменьшения уровня одноэлектронного

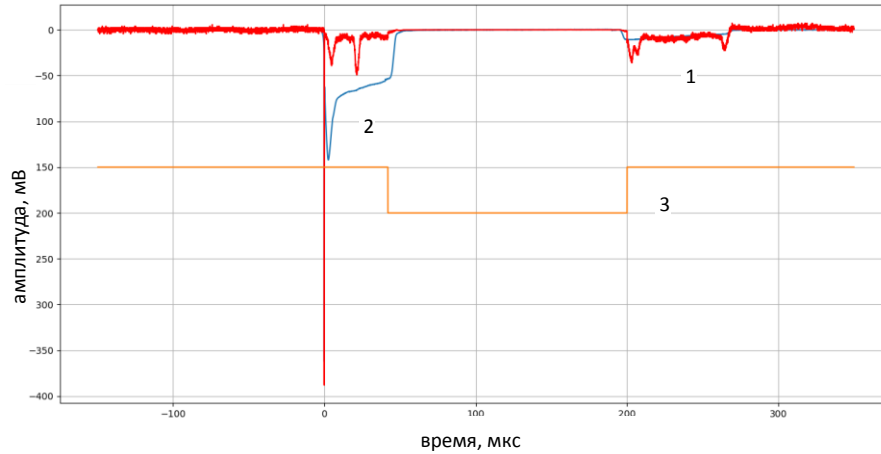
¹⁰ От англ. Fiducial Volume

шума, имитирующего сигналы от УКРН и главным образом связанного со спонтанной эмиссией электронов ионизации, накопившихся под поверхностью раздела фаз в жидком ксеноне. Электронный затвор представляет собой два электрически изолированных параллельных сетчатых электрода G1 и G2, находящихся друг от друга на расстоянии 3 мм. Путем подачи положительного блокировочного импульса ~300 В на сетку G2 дрейфующие из объема электроны ионизации от фоновых сигналов не доходят до поверхности жидкости, что приводит к снижению числа накопленных под поверхностью раздела фаз неэмитированных электронов. Длительность блокирующего импульса составляет порядка полного времени дрейфа электронов в рабочем объеме детектора ~ 250 мкс. Триггер на блокировку вырабатывается при достижении заданного порога по величине мюонного сигнала S1.

Экспериментальное исследование прозрачности затвора в жидкости было проведено по эффективности подавления мюонного сигнала. Пример работы электронного затвора в РЭД-100 для следующих напряжений: на аноде $U_a=+4,5$ кВ, на сетке G1 $U_{g1}= -3,5$ кВ, на сетке G2 $U_{g2}= -3,55$ кВ, на катоде $U_c=-12,5$ кВ представлен на Рис.2. Коэффициент прозрачности затвора рассчитывался как отношение площадей усредненных сигналов по 100000 мюонов в окне, соответствующем времени блокировки. На Рис.3. приведена измеренная и модельная зависимость коэффициента прозрачности затвора в жидком ксеноне от разности напряжений между сетками G1 и G2 (величины запирающего импульса), демонстрирующая, что для 100 % запираения электронов необходимо, чтобы потенциал на сетке G2 по крайней мере был на +250 В выше относительно потенциала на сетке G1.



(a)



(б)

Рис.2. Осциллограммы мюонных сигналов, демонстрирующие эффективность запираания электронов. 1 - сигнал с верхней матрицы ФЭУ; 2 - усредненный по 100000 событиям сигнал 1; 3 – блокировочный импульс длительностью 150 мкс. Электронный затвор открыт (а); электронный затвор закрыт импульсом напряжения амплитудой +300 В и длительностью 150 мкс с задержкой 40 мкс после сцинтилляционного триггера (б).

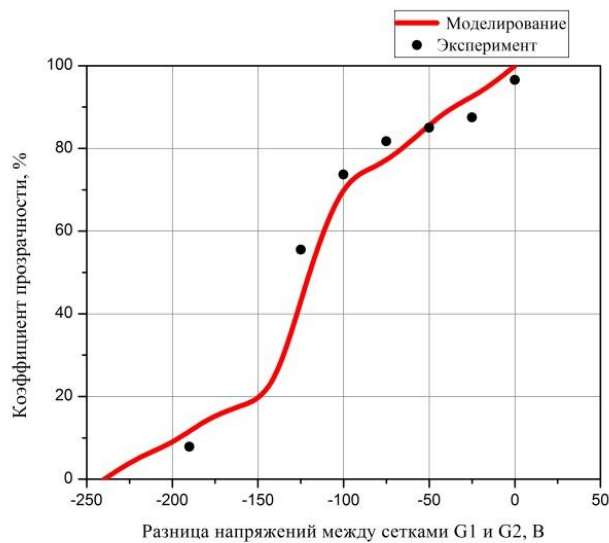


Рис.3. Измеренный и модельный коэффициент прозрачности электронного затвора в жидком ксеноне в зависимости от разности напряжения между сетками G1 и G2.

Вторая глава посвящена регистрирующей системе детектора на базе фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R11410-20, специально разработанных для работы в низкофоновом жидко-ксеноновом детекторе.

Для всех ФЭУ были разработаны индивидуальные делители напряжения с общим сопротивлением 20 МОм, выполненные на плате из полиимидного материала Cirlex®. В делителях с таким сопротивлением суммарно на всех ФЭУ выделяется ~5 Вт, что позволяет предотвратить кипение жидкого ксенона, при этом ФЭУ обладает линейностью, позволяющей регистрировать, как короткие слабые сигналы S1, так и длинные интенсивные сигналы S2 в широком диапазоне от 1 ф.э. до 2×10^4 ф.э.

Эксплуатация РЭД-100 в больших потоках космических мюонов приводит к облучению фотокатода большим интегральным количеством света, что может привести к ухудшению его квантовой эффективности. Проведенные расчеты показывают, что количества света в пересчете в единицы приведенного заряда к аноду дает за время работы детектора 1 месяц ~10 Кл/см², при критическом значении 1 Кл/см².^{11,12} Кроме этого, высокая нагрузка от мюонов приводит к большой величине среднего анодного тока ~100 мкА, сравнимой с величиной тока делителя, что приводит к нелинейности отклика ФЭУ. Для решения данных проблем была разработана система, позволяющая блокировать работу ФЭУ на время дрейфа ионизационных электронов от взаимодействия мюона с рабочим веществом детектора. Сигналы с ФЭУ, демонстрирующие ее работу приведены на Рис.4.

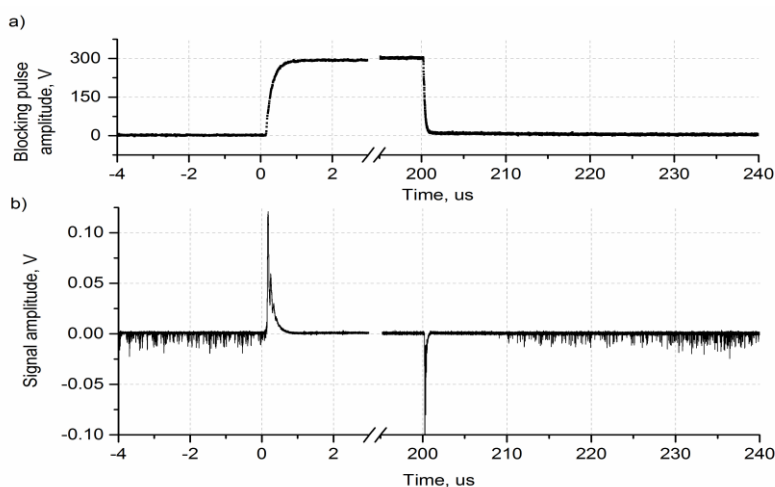


Рис.4.Осциллограмма запирающего ФЭУ импульса напряжения (а); осциллограмма сигнала с ФЭУ при подаче запирающего импульса (б).

Разработанная система обеспечивает запираение электронов в промежутке между фотокатодом и первым динодом путем подачи на фотокатод положительного импульса

¹¹ Jinno, T., Mori, T., Ohshima, T., Arita, Y., Inami, K., Ihara, T., Nishizawa, H., and Sasaki, T. Lifetime-Extended MCP-PMT. Nucl. Instrum. Meth. A 629, 111, 2010.

¹² M Yu Barnyakov and A V Mironov .Photocathode aging in MCP PMT, Journal of Instrumentation, Volume 6, 2011.

напряжения от внешнего источника величиной ~ 300 В, что позволяет работать ФЭУ без ухудшения квантовой эффективности фотокатода на протяжении нескольких лет. Кроме этого, вклад в средний анодный ток от мюонов при работающей блокировке составляет $\lesssim 0.2$ мкА, что обеспечивает работу ФЭУ в линейном режиме.

Для всех использующихся в детекторе РЭД-100 ФЭУ Hamamatsu R11410-20 были получены однофотозлектронные спектры в зависимости от напряжения питания. По полученной зависимости была подобрана величина питания каждого ФЭУ, позволяющая получить одинаковый отклик ФЭУ. Также для каждого ФЭУ были исследованы шумовые характеристики. Проведенные измерения позволили наиболее оптимальным образом расположить ФЭУ в матрицах.

Разработанная для РЭД-100 система сбора данных позволяет регистрировать события в нескольких режимах: ожидаемые сигналы от УКРН на уровне нескольких электронов ионизации, что соответствует менее 1 кэВ; гамма-кванты от калибровочных источников в диапазоне 1-2 МэВ; проходящие через детектор космические мюоны ~ 200 -300 МэВ. Для работа в различных режимах триггерная схема реализована на базе цифрового модуля программируемой логики CAEN V1495. Для записи форм сигналов используются модули АЦП прямого преобразования CAEN V1730В. Для считывания и записи сигналов с детектора используется специализированная программа, позволяющая напрямую сохранять данные в виде файлов в формате среды ROOT для дальнейшего оффлайн анализа.

В **третьей главе** описывается термосифонная криогенная система РЭД-100, позволяющая с точностью $\pm 0,2$ К и градиентом температуры по высоте детектора < 1 К/м поддерживать детектор при температуре жидкого ксенона в диапазоне 165-175 К. Система выполнена на базе технологии криогенного двухфазного трубчатого термосифона (гравитационно-управляемой тепловой трубки)¹³, и применяется в России впервые для термостабилизации криогенного детектора. В качестве внешнего холодильника используется специально сконструированный дьюар со свободно-кипящим жидким азотом, а термосифон заполнен газообразным азотом. Для предотвращения конвективных потоков и создания равномерного температурного градиента вдоль вертикального и радиального направления в детекторе используется четыре термосифона: верхний и нижний, а также два боковых, обеспечивающие суммарную мощность не менее 400 Вт. Для термостабилизации детектора РЭД-100 применяется динамический метод, основанный на регулировании массы газообразного азота в тепловой трубке.

¹³ G.S.H. Lock, The Tubular Thermosyphon, Oxford: Oxford Univ. Press, 1992.

С помощью разработанной системы РЭД-100 охлаждается и термостабилизируется при температуре $T = -105\text{ }^{\circ}\text{C}$ (168 К), соответствующей давлению насыщенных паров $p = 1,3$ атм за характерное время ~ 40 часов. Скорость конденсации ксенона в детекторе при максимальной мощности охлаждения термосифона составляет 3,3 кг/ч. Детектор с 200 кг жидкого ксенона стабильно поддерживается при давлении $p = 1,30 \pm 0,02$ атм в режиме циркуляции ксенона при скорости ~ 10 л/мин на протяжении всего времени эксперимента.

Четвертая глава посвящена подготовке ксенона к использованию в РЭД-100, требующего высокой степени его очистки от электроотрицательных и молекулярных примесей на уровне 1 ppb (10^{-9} отн. ед.). Степень чистоты ксенона определяется временем жизни дрейфующих электронов ионизации до захвата их электроотрицательными примесями, которое описывается как:

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_e), \quad (9)$$

где N_0 - число первоначальных электронов ионизации, образовавшихся при взаимодействии, а τ_e - время жизни электронов.

Популярный метод удаления нежелательных примесей из ксенона с помощью горячих металлических геттеров оказался неэффективным для очистки используемого в РЭД-100 изотопически модифицированного ксенона, загрязненного высокомолекулярными электроотрицательными примесями. Для решения задачи по предварительной очистке ксенона была использована установка электроискровой очистки «Мойдодыр»¹⁴. Электроискровой метод заключается в генерации активно поглощающей электроотрицательные примеси нанодисперсной пыли титана, а также жесткого УФ-излучения, которое разлагает сложные органические молекулы. Проведенная электроискровая очистка сильнозагрязненного ксенона массой ~ 200 кг позволила получить $\tau_e \sim 100$ мкс. Время жизни электронов было определено с помощью анализа форм токовых сигналов от рентгеновского излучения в ионизационной камере «Мойдодыра».

Из-за постоянной десорбции молекулярных и электроотрицательных примесей, диффундирующих из объема конструкционных материалов детектора, очистка жидкого ксенона производится на протяжении всего эксперимента с помощью циркуляции, которая включает в себя испарение жидкости, прохождение газа через горячие металлические геттеры и его последующей конденсации обратно в детекторе. Время жизни электронов до их захвата электроотрицательными примесями в жидком ксеноне в

¹⁴ Анисимов С.Н., Барабаш А.С., Болоздыня А.И., Стеханов В.Н. Установка для очистки жидких благородных газов объемом до 100 литров электроискровым методом. Препринт ИТЭФ №106., М.: ЦНИИАтоминформ, 1987.

детекторе РЭД-100 измеряется по форме сигналов от космических мюонов. Кроме этого, время жизни было дополнительно определено по затуханию с глубиной сигналов от гамма-источников ^{22}Na и ^{60}Co .

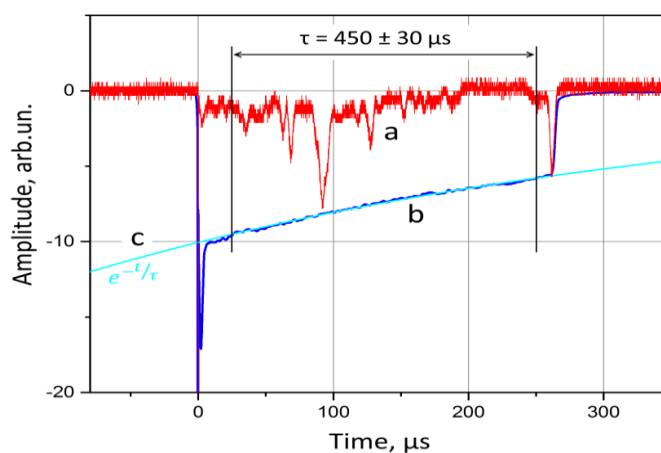


Рис.5. Оциллограмма мюонного сигнала в РЭД-100. Типичный сигнал от одиночного мюона (а), пересекшего весь чувствительный объем детектора РЭД-100. Усредненный сигнал по 10000 событий такого типа (b). Сигнал состоит из двух компонент: быстрой сцинтилляции S1 (узкий пик вблизи 0 мкс), и последующей спадающей электролюминесценции S2, генерируемой электронами с мюонного трека дрейфующими в газовой фазе (спадающая ступенька от ~10 мкс до ~260 мкс). Для определения времени жизни дрейфующих электронов до захвата электроотрицательными примесями τ_e усредненный электролюминесцентный сигнал фитируется экспонентой $\sim \exp(-t/\tau)$ (с).

За время проведения эксперимента в течение 1 месяца работы детектора РЭД-100 при непрерывной циркуляции ксенона со скоростью ~3 кг/час через геттер было достигнуто время жизни электронов >2 мс, соответствующее длине дрейфа электронов до захвата электроотрицательными примесями $L > 3$ м. Такой уровень чистоты позволяет собирать электроны ионизации со всего рабочего объема детектора.

В пятой главе приводятся основные характеристики детектора РЭД-100, полученные во время его физических испытаний, включающие проверку технических характеристик (криогеника, очистка ксенона), а также регистрацию одиночных электронов ионизации, гамма-квантов от радиоактивных источников и космических мюонов.

В ходе экспериментальных сеансов было показано, что в основном режиме работы детектора при циркуляционной очистке, благодаря экономичной системе термостабилизации и теплообменнику, расход жидкого азота составляет не более 2 л/ч, а $\tau_e \sim 250$ мкс, необходимое для набора физических данных, достигается за 2-3 недели эксплуатации детектора.

Для регистраций событий с малым энерговыделением (< 1 кэВ), ожидаемых от упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино, была продемонстрирована способность детектора регистрировать сигналы от одиночных электронов ионизации. На Рис.6а приведен типичный сигнал от одного ионизационного электрона, вышедшего в газовую фазу, который представляет собой кластер однофотозлектронных сигналов с различных ФЭУ общей длительностью ~ 2 мкс. Для каждого из кластеров подсчитывается количество однофотозлектронных импульсов, входящих в него, их распределение по каналам, а также длительность. Для кластеров с характерной длительностью одноэлектронных сигналов была получена величина удельного светового выхода (количество фотоэлектронов на один электрон ионизации) в зависимости от напряженности электрического поля в электролюминесцентном зазоре. Максимальное среднее значение равное 25 ф.э./электрон было получено при $E=6,55$ кВ/см (Рис.6б). Для одноэлектронных событий также было получено пространственное распределение в плоскости XY.

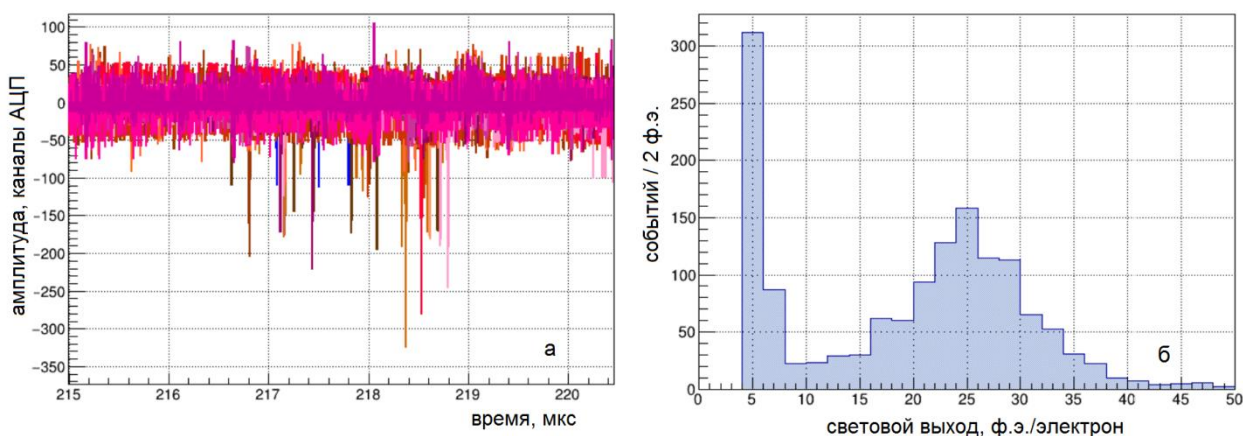


Рис.6. Осциллограмма одноэлектронного кластера сигналов со всех ФЭУ верхней матрицы (а); пример распределения SPE/SE при напряжённости поля в газе 6,55 кВ/см (б).

Подсчитанная по количеству кластеров на осциллограмме частота SE сигналов при отсутствии электронного затвора находится на уровне > 250 кГц. При включенном электронном затворе с запирающим потенциалом +300 В частота SE сигналов составляет ~ 80 кГц. Таким образом, электронный затвор позволяет в 3 раза понизить частоту одноэлектронного шума.

Для демонстрации возможности регистрации гамма-квантов с энергией 0,5 -1,5 МэВ детектор калибровался гамма-источниками ^{22}Na и ^{60}Co . По распределению площадей сигналов S1 и S2 с учетом их антикорреляции были получены энергетические спектры, а также проведена калибровка энергетической шкалы. Полученное энергетическое

разрешение (σ/E) составило для ^{22}Na : 5,5% (0,511 МэВ), для ^{60}Co : 4,9 % (1,17 МэВ) и 4,4 % (1,33 МэВ).

В **шестой главе** представлен планируемый эксперимент по регистрации упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино на ядре ксенона.

Для реакторного эксперимента планируется установить детектор РЭД-100 на Калининской Атомной Электростанции (КАЭС), г. Удомля. Для размещения РЭД-100 на Калининской АЭС рассматривается помещение на 3-ем энергоблоке станции, находящееся непосредственно под реактором на расстоянии 19 м от центра его активной зоны. Конструкционные элементы энергоблока обеспечивают защиту ~ 50 м.в.э., что позволяет подавить поток космических мюонов в ~ 5 раз. Ожидаемый поток антинейтрино в данном месте составляет $1,35 \cdot 10^{13}$ $\nu/\text{см}^2 \times \text{с}$.

Для предполагаемого места расположения РЭД-100 в пакете GEANT4 было произведено компьютерное моделирование отклика детектора. На Рис.7 представлен полученный энергетический спектр ядер отдачи, лежащий в области энергий менее 1 кэВ.

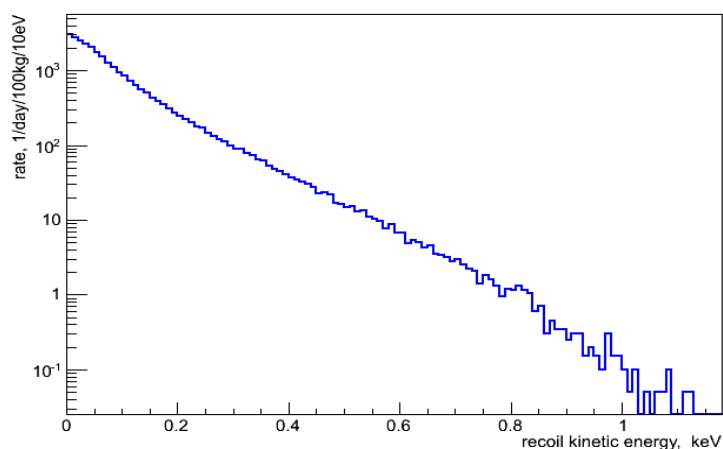


Рис.7. Скорость счета событий в детекторе в зависимости от энергии ядра отдачи на КАЭС.

С учетом величины удельного ионизационного выхода для данной области энергий равного $6 \text{ e}^-/\text{кэВ}$ был получен отклик детектора, показанный на Рис.8. В 100 кг жидкого ксенона ожидается ~ 38000 взаимодействий от УКРН в день. Осциллирующее поведение кривой отражает детектирование отдельных (одного, двух и т. д.) ионизационных электронов, извлеченных в газовую фазу. Ожидается, что скорость счета событий, имеющих более трех электронов ($N \geq 3$), составит 1700 событий в день. Такой критерий отбора событий УКРН позволяет значительно подавить фон, вызванный случайным

совпадением событий одноэлектронного шума. С учетом отбора событий $N \geq 3$ по пространственному положению в плоскости XY и фактора подавления мюонов ~ 5 , оценка фона от случайных совпадений одиночных электронов находится по порядку величины на уровне сигнала.

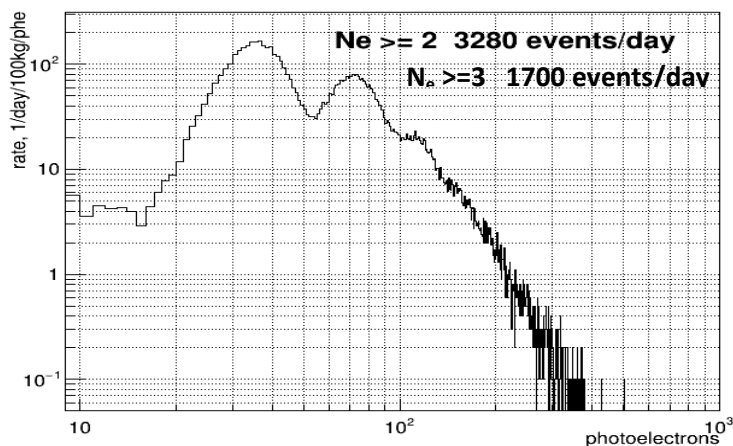


Рис.8. Расчётный спектр событий УКРН, на предполагаемом месте установки детектора РЭД-100 на Калининской АЭС.

Одним из основных источников фона являются нейтроны и гамма-кванты. Измерения фонов на реакторе проведенные коллаборацией DANSS показали, что спектры гамма-квантов, а также поток нейтронов в диапазоне энергий от тепловых до 1 МэВ схожи с измеренными в наземной лаборатории¹⁵. Суммарный фон от гамма-квантов и нейтронов в детекторе РЭД-100 с минимальной защитой из 10 см свинца и 15 см воды ожидается на уровне эффекта от УКРН, таким образом эксперимент может быть поставлен в режиме сравнения скорости счета событий при включенном и выключенном реакторе.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Создан двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 на основе жидкого ксенона с массой рабочего вещества 200 кг, а также конструктивные элементы, обеспечивающие его функционирование с целью исследования процесса упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино на тяжелых ядрах ксенона, включающие:
 - систему термостабилизации низкофонового титанового криостата детектора РЭД-100 на базе термосифонной технологии с мощностью охлаждения в стационарном режиме 400 Вт;

¹⁵ I. Alekseev et al. DANSS: Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid Scintillator. Journal of Instrumentation, Volume 11, P11011, 2016.

- систему циркуляционной очистки газообразного и жидкого ксенона, для обеспечения собирания электронов ионизации из рабочего объема детектора с длиной дрейфа, превышающей линейные размеры рабочего объема детектора;
- систему питания криогенных фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R11410-20, которая позволяет блокировать электролюминесцентные сигналы на время дрейфа ионизационных электронов, образованных от взаимодействий космических мюонов с рабочим веществом детектора, с целью защиты ФЭУ от интенсивной засветки, вызванной фоном космических мюонов при эксплуатации детектора на поверхности Земли;
- электронный затвор для разгрузки поверхности жидкого ксенона от незмитированных электронов ионизации от фоновых событий.

2. Проведены испытания установки РЭД-100, которые продемонстрировали, что

- система термосифонного криостатирования позволяет поддерживать жидкий ксенон в детекторе РЭД-100 при температуре 168 К с точностью $\pm 0,2$ К и градиентом температуры по высоте детектора < 1 К/м при уровне потребления жидкого азота не более 2 л/ч в режиме непрерывной циркуляционной очистки жидкого ксенона;
- система циркуляционной очистки газообразного и жидкого ксенона позволяет собирать электроны ионизации из всего рабочего объема детектора при длине дрейфа до захвата электроотрицательными примесями > 3 м;
- детектор РЭД-100 позволяет проводить спектрометрию одиночных электронов ионизации в области энергий < 1 кэВ с величиной удельного светового выхода 25 ± 1 ф.э./электрон;
- система питания криогенных фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R11410-20, позволяет уменьшить величину среднего анодного тока от космических мюонов более, чем на три порядка, что позволяет ФЭУ работать в линейном режиме без ухудшения их квантовой эффективности в течение нескольких лет;
- электронный затвор позволяет понизить в 3 раза шум от спонтанной эмиссии одиночных электронов ионизации, который является доминирующим фоном при регистрации процесса упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино.

3. Проведен анализ возможности постановки эксперимента с помощью детектора РЭД-100 с достигнутыми характеристиками по исследованию процесса упругого когерентного рассеяния электронных антинейтрино на расстоянии 19 м от активной зоны ядерного реактора на Калининской АЭС с тепловой мощностью 3 ГВт, который показал, что скорость счета полезных событий может составить 1700 соб/сут при отборе сигналов, состоящих из ≥ 3 электронов ионизации. Таким образом, согласно расчетам создан детектор с рекордной чувствительностью к реакторным антинейтрино, который может

позволить впервые наблюдать эффект упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на тяжелых ядрах ксенона.

В заключение хочу выразить глубокую благодарность моему научному руководителю и заведующему межкафедральной лабораторией экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ А.И. Болоздыне за предоставленную возможность участвовать в эксперименте мирового уровня, а также неоценимый вклад в организацию работы и постоянную поддержку.

Я также признателен Ю.В. Ефременко, благодаря которому была создана межкафедральная лаборатория экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ в рамках мегагранта №11.G34.31.0049 от 19.10.2011 г. и осуществлявшему руководство проектом с 2011 г. по 2016 г.

Хотелось бы также поблагодарить всех сотрудников межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ, без помощи которых данная работа была бы невозможна. Особенную благодарность хочу выразить Акимову Д. Ю., Сосновцеву В. В., Белову В. А., Этенко А. В., Кумпану А. В., Шакирову А. В., Меликяну Ю. А., Коновалову А. М., Рудику Д. Г., Симакову Г. Е., Козловой Е. С., Разуваевой О. Е.

Публикации по теме диссертации:

- 1) D. Yu. Akimov, ... , A.V. Khromov et al. Prospects for observation of neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase Xenon emission detector. 2013, Journal of Instrumentation 8(10).
- 2) A I Bolozdynya, ... , A. V. Khromov et al. The two-phase closed tubular cryogenic thermosyphon. 2015, International Journal of Heat and Mass Transfer 80:159–162.
- 3) D. Akimov, ..., A. V. Khromov et al. Observation of light emission from Hamamatsu R11410-20 photomultiplier tubes. 2015, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment 794.
- 4) V.V. Ananiev, ..., A. V. Khromov et al. Thermal stabilization system for the RED-100 liquid-xenon emission detector. 2015, Instruments and Experimental Techniques Volume 58 issue 4 pp. 581-586.
- 5) D. Yu. Akimov, ..., A. V. Khromov et al. Search for Elastic Coherent Neutrino Scattering off Atomic Nuclei at the Kalinin Nuclear Power Plant. 2015, Physics Procedia 74: pp. 423-430.
- 6) Bolozdynya A. I., ..., A. V. Khromov et al. Thermostabilization system based on two-phase closed cryogenic thermosyphon for RED100 Detector. 2015, Physics Procedia 74: pp. 431- 434.
- 7) D Yu Akimov ., ..., A. V. Khromov et al. Investigation of Coherent Neutrino Scattering at the Spallation Neutron Source. 2015, Physics Procedia 74: pp. 411-415.

- 8) D. Yu. Akimov , ..., A. V. Khromov et al. RED-100 detector for the first observation of the elastic coherent neutrino scattering off xenon nuclei. 2016, Journal of Physics Conference Series 675(1):012016.
- 9) D. Yu. Akimov ,..., A. V. Khromov et al. Characterization of the low-background Hamamatsu R11410- 20 cryogenic PMTs for the RED100 detector. 2016, Journal of Physics Conference Series 675(1):012022.
- 10) D. Yu. Akimov ,..., A. V. Khromov et al. Peculiarities of the Hamamatsu R11410-20 photomultiplier tubes. 2016, Proceedings of Science Volume 252.
- 11) D. Akimov, ..., A. Khromov et. al. Performance of Hamamatsu R11410-20 PMTs under intense illumination in a two-phase cryogenic emission detector. 2016, JINST volume 11.
- 12) A. I. Bolozdynya , ... , A. V. Khromov et al. Thermostatting of the RED-100 Liquid-Xenon Emission Detector. 2017, Instruments and Experimental Techniques Volume 59, Issue 3, pp 483-486.
- 13) D. Yu. Akimov ,..., A. V. Khromov et al. The RED-100 two-phase emission detector. 2017, Instruments and Experimental Techniques Volume 60, Issue 2, pp 175-181.
- 14) D.Yu. Akimov ,..., A. V. Khromov et al. et. al. Status of the RED-100 experiment,2017, Journal of Instrumentation, Volume 12.
- 15) Патент на полезную модель №178641 Российская Федерация. МПК F25D 3/00. Криостат для охлаждения и поддержания при заданной температуре массивных устройств. Акимов Д.Ю.,Болоздыня А. И., Сосновцев В.В., Хромов А. В., Шакиров А.В. заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). - № 2017135914; заявл. 09.10.2017; опубл. 16.04.2018, Бюл. №11.
- 16) Патент на полезную модель №184222 Российская Федерация, МПК G01T 1/00. Двухфазный эмиссионный низкофоновый детектор. Акимов Д.Ю., Болоздыня А. И., Коновалов А.М., Кумпан А.В., Меликян Ю.А.,Рудик Д.Г., Сосновцев В.В., Хромов А. В., Шакиров А. В.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). - № 2018124350; заявл. 03.07.2018; опубл. 18.10.2018, Бюл. № 29

Хромов Александр Владимирович

**Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 для исследования упругого
когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук