# $\mathbf{b}$

### НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ имени А.И. АЛИХАНОВА

на правах рукописи

Хромов Александр Владимирович

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

Специальность: 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

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

Болоздыня Александр Иванович,

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

Официальные оппоненты:

Научный руководитель:

#### Бузулуцков Алексей Фёдорович,

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории 3-3, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

#### Ляшук Владимир Иванович,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории гамма-астрономии и реакторных нейтрино, ИЯИ РАН, г. Москва

Ведущая организация:

НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ, г. Протвино

Защита состоится «10» декабря 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 НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ и на сайте института www.itep.ru.

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_2019 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,

канд. физ-мат. наук

В.В. Васильев

#### Общая характеристика работы

С темы. Актуальность момента первого экспериментального обнаружения нейтрино прошло более 60 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<sub>0</sub>-бозоном упруго рассеивается на ансамбле нуклонов ядра, передавая ему часть своей энергии<sup>1,2</sup>. 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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Копелиович В Б, Франкфурт Л Л. Изотопическая и киральная структура нейтрального тока, Письма в ЖЭТФ, (1974) 19 236.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Freedman D Z. Coherent effects of a weak neutral current, Phys. Rev. D, (1974) 9 1389.

взаимодействия превышает размеры ядра R ( $q^2 \le 1/R^2$ ). 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:

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

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

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

где  $G_F$  - константа Ферми, M - масса ядра, T - энергия ядра отдачи,  $E_v$  - 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,  $F_{nucl}^v(Q^2)$  и  $F_{nucl}^A(Q^2)$ - векторный и аксиальный форм-факторы ядра, близкие по величине к единице для малых значений  $Q^2$  ( $Q^2 \ll M^2$ ). Векторные константы  $g_V^n$  и  $g_V^p$ определяются как:

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

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

где  $\Theta_W$  – угол электрослабого смешивания,  $\rho_W^{NC}$ ,  $\hat{k}_W$  – электрослабые параметры,  $\lambda^{uL}$ ,  $\lambda^{uR}$ ,  $\lambda^{dL}$ ,  $\lambda^{dR}$  – 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  $T \ll E_v$ :

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

где  $Q_W = [Z(1-4\sin^2\theta_W) - N] - слабый заряд ядра. Т.к. <math>\sin^2\theta_W \sim 0.25$ , 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:

$$\sigma \sim 4.2 \times 10^{-45} N^2 (E_{\nu}/M_{\odot}B)^2 cm^2$$
 (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 УРКН 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 слабовзаимодействующих 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 физики<sup>3</sup> 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]<sup>4</sup>. Более детальное изучение процесса УКРН требует его исследования на источниках нейтрино одного типа, например, электронных антинейтрино от ядерного реактора. Для теоретических моделей необходимо исследование УКРН в проверки 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:

$$T_{max} = 2E_v^2 / (M + 2E_v) \approx 2E_v^2 / M, \qquad (8)$$

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> http://enpl.mephi.ru/

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Akimov D et al. Observation of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering. Science, (2017) 357 1123.

то при регистрации процесса УКРН на реакторных антинейтрино с  $E_v < 10$  МэВ энергия, передаваемая тяжелому ядру, не превышает 1 кэВ. Поэтому для регистрации процесса УКРН в таких условиях необходим детектор с экстремально низким порогом регистрации.

Ha сегодняшний день известно около экспериментов, десяти направленных на исследование УКРН при помощи различных детекторных контактом 5. технологий: германиевые детекторы с «точечным» низкотемпературные болометры<sup>6</sup>, сцинтилляционные детекторы<sup>7</sup>, детекторы ПЗС-матриц<sup>8</sup>. Несмотря многообразие существующих основе на на зрения УКРН, экспериментальных программ, С точки исследования 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 около 50-ти 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 действием электрического большего ~2 кВ/см. газовую под поля Использование 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 <sup>9</sup>. Регистрация сигналов от

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> vGen, CONUS, TEXONO, COHERENT

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> MINER, RICOCHET, v-cleus

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> COHERENT

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> CONNIE

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Bolozdynya A., Egorov V., Rodionov B., Miroshnichenko V. Emission detectors. IEEE Transactions on Nuclear Science, (1995) Vol. 42, No. 4.

сцинтилляции S1 и электролюминесценции S2 позволяет создавать так называемые детекторы «без стенок», которые обеспечивают трехмерную позиционную чувствительность, позволяющую выделить внутри детектора объем - в иностранной литературе называемый fiducial volume (FV). 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:

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

2) эффективной «самоэкранировке» за счет относительно большой плотности  $\rho=3$  г/см<sup>3</sup>, высокого атомного номера Z=54 и трехмерной позиционной чувствительности, что необходимо для подавления фона от  $\gamma$ -квантов и нейтронов;

3) отсутствия долгоживущих радиоактивных изотопов.

Все существующие двухфазные эмиссионные жидко-ксеноновые детекторы темной материи экспонируются в подземных лабораториях с низким уровнем фона от космических лучей, 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 российские образовательные ученых в организации высшего образования» (договор № 11.G34.31.0049 от 19.10.2011 г.) в 2011 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 жидко-ксеноновый детектор РЭД-100;

 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. Впервые создан двухфазный эмиссионный жидко-ксеноновый детектор РЭД-100 для исследования процесса упругого когерентного рассеяния

нейтрино на ядре, в котором:

1.1. Впервые применена методика блокировки электролюминесцентных сигналов на время дрейфа ионизационных электронов, образованных от взаимодействий космических мюонов с рабочим веществом детектора, с целью защиты ФЭУ от интенсивной засветки. Данная методика позволяет уменьшить вклад от взаимодействий космических мюонов в величину среднего анодного тока фотоэлектронных умножителей более чем на три порядка, что позволяет ФЭУ эксплуатироваться в линейном режиме без ухудшения их квантовой эффективности в течение нескольких лет.

1.2. Впервые разработана и реализована методика, позволяющая с помощью электронного затвора уменьшить уровень шума, связанного со спонтанной эмиссией неэмитировавших одиночных электронов ионизации от взаимодействий космических мюонов, который является доминирующим фоном при регистрации процесса упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино.

2. Показано, что детектор РЭД-100 с достигнутыми характеристиками 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 состоит в создании детектора РЭД-100, который является единственным в мире двухфазным эмиссионным жидкоксеноновым детектором для исследования процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино. Отработка методики регистрации упругого когерентного рассеяния антинейтрино 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. Разработанные и реализованные методики, позволяющие эксплуатировать РЭД-100 в условиях высокого уровня фона от космических мюонов вблизи интенсивного источника нейтрино, могут быть применены в других экспериментах. Кроме того, в конструкции детектора заложены оригинальные технические решения, защищенные патентами на полезную модель РФ №178641 и №184222.

#### Положения, выносимые на защиту.

• Двухфазный эмиссионный жидко-ксеноновый детектор РЭД-100 для исследования упругого когерентного рассеяния нейтрино, включающий конструктивные элементы, обеспечивающие его функционирование;

• Методики, позволяющие эксплуатировать РЭД-100 в условиях высокого уровня фона от космических мюонов;

• 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 подтверждена экспериментальными испытаниями, проведенными С использованием современных измерительных приборов И программного обеспечения; использованием общепринятых программ моделирования и обработки данных; 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 и создание двухфазного эмиссионного жидко-ксенонового детектора РЭД-100 для исследования упругого когерентного рассеяния

нейтрино;

• Разработку и реализацию методики блокировки электролюминесцентных сигналов на время дрейфа ионизационных электронов, образованных от взаимодействия космических мюонов с рабочим веществом детектора;

 Разработку и реализацию методики, позволяющей уменьшить уровень фона, связанного со спонтанной эмиссией неэмитировавших электронов ионизации от космических мюонов;

• Проведение физических испытаний детектора РЭД-100 и обработку полученных экспериментальных данных;

• Проведение расчетов, демонстрирующих возможность 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 9 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-ти глав и Заключения. Она изложена на 115 страницах печатного текста и содержит 65 рисунков, 7 таблиц, а также список литературы из 107 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 для регистрации УКРН двухфазного эмиссионного жидкоприменения РЭД-100. Изложена ксенонового детектора 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 [1,2]. Детектор находится внутри титанового криостата [3], 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 тефлоновым 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 – сильфонная кабелей; е – электроны ионизации, тепловая развязка вывода ДЛЯ  $\overline{\nu}$  - антинейтрино, передающее энергию ионизирующему ядру отдачи, S1 – сцинтилляционная вспышка, S2 – электролюминесцентная вспышка; схема электродной системы (б): РМТ – 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 FV), находящегося в дрейфовом объеме, который формируется с помощью полезадающей (Рис.1б), расположенной электродной структуры внутри тефлоновой 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 кB/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, газе. Электронный G1/G2находящимся В затвор располагается поверхностью раздела фаз. Уровень непосредственно под жидкости устанавливается посередине между сеткой G1 и анодом А. Вытягивание жидкой в фазу и последующая электронов ионизации ИЗ газовую электролюминесценция обеспечиваются разностью потенциалов ~10 кВ между сеткой G1 и анодом А.

B детекторе РЭД-100, работающем в больших потоках космических мюонов, установлен электронный затвор, необходимый для уменьшения уровня одноэлектронного шума, имитирующего сигналы от УКРН и, главным со спонтанной эмиссией ионизации, образом, связанного электронов накопившихся под поверхностью раздела фаз В жидком ксеноне [4]. Электронный затвор представляет собой два электрически изолированных параллельных сетчатых электрода G1 и G2, находящихся расстоянии 3 мм. Путем подачи положительного друга на друг OT блокировочного импульса ~300 В на сетку G2 дрейфующие из объема электроны ионизации от фоновых событий не доходят до поверхности жидкости, что приводит к снижению числа накопленных под поверхностью фаз неэмитировавших электронов. Длительность блокирующего раздела импульса составляет порядка полного дрейфа времени электронов В рабочем объеме детектора ~ 250 мкс. Триггер на блокировку вырабатывается при превышении заданного порога амплитуды сигнала S1 от взаимодействия мюона.

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 кB, на сетке G1  $U_{g1}$ = -3,5 кB, на сетке G2  $U_{g2}$ = -3,55 кB, на катоде  $U_c$ =-12,5 кB - представлен на Рис.2.





(б)

Рис.2. Осциллограммы мюонных сигналов, демонстрирующие эффективность запирания 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).

Коэффициент прозрачности затвора рассчитывался отношение как площадей усредненных сигналов по 100000 мюонов в окне, соответствующем времени блокировки. Ha 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 запирания электронов необходимо, чтобы потенциал на сетке G2 по крайней мере был на +250 В выше относительно потенциала на сетке G1.



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  $2 \times 10^4$  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 количество света в пересчете в единицы приведенного заряда к аноду дает за время работы детектора 1 месяц ~10 Кл/см<sup>2</sup> при критическом значении 1 Кл/см<sup>2</sup>.<sup>10,11</sup> Кроме этого, высокая загрузка 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 базе системы питания фотоэлектронных методика на умножителей, позволяющая блокировать работу ФЭУ на время дрейфа ионизационных электронов от взаимодействия мюона с рабочим веществом детектора [5]. Сигналы с ФЭУ, демонстрирующие работу системы, приведены на Рис.4.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Jinno, T., Mori, T., Ohshima, T., Arita, Y., Inami, K., Ihara, T., Nishizawa, H., and Sasaki, T. Lifetime-Extended MCP-PMT. Nucl. Instrum. Meth. (2010) A 629, 111.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>M Yu Barnyakov and A V Mironov .Photocathode aging in MCP PMT, Journal of Instrumentation, (2011) Vol. 6.



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

Разработанная система обеспечивает запирание электронов в промежутке между фотокатодом и первым динодом путем подачи на фотокатод положительного импульса 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 ≲0.2 мкА, что обеспечивает работу ФЭУ в линейном режиме.

Для всех использующихся в детекторе РЭД-100 ФЭУ Hamamatsu R11410-20 были получены однофотоэлектронные спектры в зависимости от напряжения питания [6,7]. 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 РЭД-100 сбора для система данных позволяет регистрировать события в нескольких режимах: ожидаемые сигналы от УКРН на уровне нескольких электронов ионизации, что соответствует менее 1 кэВ; калибровочных источников В диапазоне 1-2 MэB: гамма-кванты ОТ

проходящие через детектор космические мюоны ~200-300 МэВ. Для работы в различных режимах триггерная схема реализована на базе цифрового модуля программируемой логики CAEN V1495. Для записи форм сигналов используются модули АЦП прямого преобразования CAEN V1730B. 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, с точностью ±0,2 К и градиентом температуры по высоте позволяющая 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)<sup>12</sup> и применяется в России впервые для термостабилизации криогенного детектора. В качестве внешнего холодильника используется специально сконструированный дьюар со свободно-кипящим жидким азотом, термосифон заполнен газообразным азотом. Для предотвращения а конвективных потоков и создания равномерного температурного градиента вдоль вертикального и радиального направления в детекторе используется термосифона: верхний боковых, четыре И нижний, а также два обеспечивающие 400 Вт. Для суммарную мощность не менее термостабилизации детектора РЭД-100 применяется динамический метод, основанный на регулировании массы газообразного азота в тепловой трубке [8,9].

С помощью разработанной системы РЭД-100 охлаждается и термостабилизируется при температуре T=-103 <sup>о</sup>С (170 K), соответствующей давлению насыщенных паров p=1,3 атм за характерное время ~40 часов.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> G.S.H. Lock, The Tubular Thermosyphon, Oxford: Oxford Univ. Press, (1992).

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±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<sup>-9</sup> отн. ед.). Степень чистоты ксенона определяется временем жизни дрейфующих электронов ионизации до захвата их электроотрицательными примесями, которое описывается как:

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

где  $N_0$  - число первоначальных электронов ионизации, образовавшихся при взаимодействии, а  $\tau_e$  - 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»<sup>13</sup>. Электроискровой метод заключается в генерации активно поглощающей электроотрицательные нанодисперсной пыли титана, а также жесткого УФ-излучения, примеси органические молекулы. Проведенная которое разлагает сложные электроискровая очистка сильнозагрязненного ксенона массой ~200 кг позволила получить  $\tau_e \sim 100$  мкс. Время жизни электронов было определено с

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> 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 No106., М.: ЦНИИатоминформ, (1987).

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 [10]. Время жизни электронов до их захвата электроотрицательными примесями в жидком ксеноне в детекторе РЭД-100 измеряется по форме сигналов от космических мюонов (Рис.5). Кроме этого, время жизни дополнительно определяется по затуханию с глубиной сигналов от гамма-источников  $^{22}$ Na и  $^{60}$ Co.



Рис.5. Осциллограмма 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  $\tau_e$  усредненный электролюминесцентный сигнал фитируется экспонентой  $\sim \exp(-t/\tau)$  (c).

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 параметров (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.

событий Для регистрации 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 однофотоэлектронных сигналов с различных ФЭУ общей длительностью ~2 мкс. Для каждого из кластеров подсчитывается количество однофотоэлектронных импульсов, входящих В него. ИХ распределение по каналам, а также длительность. Для кластеров с характерной

была получена длительностью одноэлектронных сигналов величина удельного светового выхода (количество фотоэлектронов на один электрон ионизации) в зависимости от напряженности электрического поля в электролюминесцентном зазоре. Максимальное среднее значение, равное E=6,55 25 ф.э./электрон, было получено при кВ/см (Рис.6б). Для событий одноэлектронных также было получено пространственное распределение в плоскости ХҮ.



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

Подсчитанная по количеству кластеров на осциллограмме частота сигналов от одиночных электронов при выключенном электронном затворе находится на уровне > 250 кГц. При включенном электронном затворе с запирающим потенциалом +300 В частота одиночных электронов составляет ~80 кГц. Таким образом, разработанная методика 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 <sup>22</sup>Na и <sup>60</sup>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 ( $\sigma$ /E) составило для <sup>22</sup>Na : 5,5% (0,511 МэВ), для <sup>60</sup>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 [11]. Для размещения РЭД-100 на КАЭС 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\*10<sup>13</sup> v/см<sup>2</sup>×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 УКРН в детекторе в зависимости от энергии ядра отдачи на КАЭС.

С учетом величины удельного ионизационного выхода для данной области энергий, равного 6 е/кэв, был получен отклик детектора, показанный на Рис.8. В 100 кг жидкого ксенона ожидается ~38000 взаимодействий от УКРН день. Осциллирующее поведение в 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 ≥ 3 по пространственному положению в плоскости XY и фактора подавления мюонов ~5 фон 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 КАЭС.

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 лаборатории<sup>14</sup>. 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.

Кроме опыта по исследованию реакторных антинейтрино представлены и другие эксперименты, которые могут быть поставлены с помощью детектора РЭД-100. В частности рассмотрена возможность эксперимента по регистрации УКРН на импульсном ускорителе и поиска двойного позитронного безнейтринного бета-распада изотопов <sup>124</sup>Хе и <sup>78</sup>Kr.

В Заключении приведены основные результаты работы:

1. Создан двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 на основе жидкого ксенона с массой рабочего вещества 200 кг, включающий оригинальные конструктивные элементы, обеспечивающие его функционирование с целью исследования процесса упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино на тяжелых ядрах ксенона:

- систему термостабилизации низкофонового титанового криостата детектора
 РЭД-100 на базе термосифонной технологии с мощностью охлаждения в стационарном режиме до 400 Вт;

 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

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> I. Alekseev et al. DANSS: Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid Scintillator. Journal of Instrumentation, (2016) Vol. 11, P11011.

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 неэмитировавших 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 170 К с точностью ±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 neutrinonuclear neutral current coherent scattering with two-phase Xenon emission detector. Journal of Instrumentation. — 2013. — Vol. 8, issue 10, P10023. (Scopus, WoS, перечень ВАК)

2) Д.Ю. Акимов, ..., А. В. Хромов и др. Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100. Приборы и техника эксперимента. —2017. — Номер 2, с. 22-28. (Scopus, WoS, перечень ВАК)

3) 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 A. B., A.B. патентообладатель Шакиров заявитель И 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.

4) 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 автономное федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). - № 2018124350; заявл. 03.07.2018; опубл. 18.10.2018, Бюл. № 29

5) D. Akimov, ..., A. Khromov et. al. Performance of Hamamatsu R11410-20 PMTs under intense illumination in a two-phase cryogenic emission detector. Journal of Instrumentation. — 2016. —Vol. 11, P12005. (Scopus, WoS, перечень BAK)

6) Акимов Д. Ю.,..., Хромов А.В. Шумовые характеристики низкофоновых фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R11410-20. Приборы и техника эксперимента. —2015. — Номер 3, с. 97-101. (Scopus, WoS, перечень ВАК)

7) D. Akimov,..., A. V. Khromov et al. Observation of light emission from Hamamatsu R11410-20 photomultiplier tubes. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2015 — Vol. 794, pp 1-2. (Scopus, WoS, перечень BAK)

8) A I Bolozdynya, ..., A. V. Khromov et al. The two-phase closed tubular cryogenic thermosyphon. International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015.— Vol. 80, pp. 159–162. (Scopus, WoS, перечень ВАК)

9) Болоздыня А.И., ..., Хромов А.В. и др. Термостатирование жидкоксенонового эмиссионного детектора РЭД-100. Приборы и техника эксперимента. —2016. — Номер 3, с. 149-152. (Scopus, WoS, перечень ВАК)

 Д.Ю. Акимов, ..., А. В. Хромов и др. Комплексный метод подготовки ксенона для использования в качестве рабочей среды двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100. Приборы и техника эксперимента. — 2019. — Номер 4, с. 5-11. (Scopus, WoS, перечень ВАК)

11) D.Yu. Akimov ,..., A. V. Khromov et al. et. al. Status of the RED-100 experiment. Journal of Instrumentation. —2017.—Vol. 12, C06018. (Scopus, WoS, перечень ВАК)