

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

На правах рукописи



Козлова Екатерина Сергеевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО И  
ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ОТКЛИКОВ  
ДЕТЕКТОРОВ НА СЖИЖЕННЫХ БЛАГОРОДНЫХ  
ГАЗАХ**

Специальность 1.3.2 —

«Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном институте "МИФИ"

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Акимов Дмитрий Юрьевич**

Официальные оппоненты: **Кузьминов Валерий Васильевич**,  
доктор физико-математических наук,  
Баксанская нейтринная обсерватория Института  
ядерных исследований РАН,  
главный научный сотрудник

**Бузулуцков Алексей Федорович**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.  
Будкера Сибирского отделения Российской акаде-  
мии наук (ИЯФ СО РАН),  
главный научный сотрудник

**Чепурнов Александр Сергеевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
Отдел электромагнитных процессов и взаимодей-  
ствия атомных ядер НИИЯФ имени Д.В. Скобель-  
цына МГУ имени М.В. Ломоносова,  
старший научный сотрудник

Защита состоится 26 апреля 2023 г. в 15 часов на заседании диссертацион-  
ного совета МИФИ.1.05 на базе Национального исследовательского ядерного  
университета «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
<https://ds.mephi.ru/> Национального исследовательского ядерного уни-  
верситета «МИФИ».

Автореферат разослан .

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
МИФИ.1.05, д.ф.-м.н.



Улин Сергей Евгеньевич

## Общая характеристика работы

Данная работа планировалась как комплексное исследование поведения сцинтилляционного и ионизационного отклика благородных газов (аргона и ксенона) для различных частиц при различных конструкциях и параметрах детектора на сжиженном благородном газе (температура и давление в рабочем объёме, ширина газового зазора, величина дрейфового поля и т.д.) и возможности применения полученных алгоритмов для моделирования процессов в существующих детекторах.

**Актуальность темы.** Современная физика элементарных частиц нуждается во всё более и более сложных исследованиях, как, например, изучение редких или сложнонаблюдаемых событий (поиск небарионной тёмной материи, безнейтринный двойной бета-распад, упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядре). Для развития данной области исследований, в первую очередь, требуется развитие методов детектирования. Одним из таких методов является регистрация событий с использованием сжиженных благородных газов - аргона или ксенона. Данная категория детекторов обладает рядом преимуществ:

1. Возможностью регистрации низкоэнергетических редких событий;
2. Возможностью получения информации о координатах и времени события;
3. Возможностью создания большого чувствительного объёма.

Несмотря на то, что технология использования благородных газов в качестве рабочего вещества детекторов была разработана ещё 50 лет назад [1], полноценной теории, покрывающей собой все аспекты взаимодействия частиц с благородными газами, особенно в области кэВных энергий, не существует до сих пор. Большая часть теоретических и полуэмпирических моделей поведения частиц в благородных элементах (например, модель Линдхарда [2] или модель Мэя [3]) не всегда согласуются с реальными новейшими результатами – например, с результатами Ливерморской национальной лаборатории [4] или с результатами Агнеса [5] и Хитачи [6] для альфа-частиц.

С учётом того, что подобный класс детекторов часто используется для регистрации и исследований редких событий, таких как упругое когерентное рассеяние нейтрино (коллаборации COHERENT и RED), поиски тёмной материи (коллаборации LZ, XENON, DarkSide и т.д.) и двойного безнейтринного

бета-распада, и т.д. [7; 8], моделирование отклика детектора на полезный сигнал и фон является актуальной задачей.

**Цель работы:** Разработка и создание нового инструментария для корректного описания и предсказания отклика детекторов на основе благородных газов ксенона и аргона для частиц различного сорта и применение его для описания и предсказания отклика детекторов для регистрации упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре CENNS-10 и РЭД-100. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка новой модели взаимодействия (модели среднего световых выхода и среднего ионизационного выхода, модель флуктуации) гамма и бета излучения с жидким аргоном в зависимости от энергии излучения при различных дрейфовых полях.
2. Разработка новой модели взаимодействия альфа-частиц с жидким аргоном в зависимости от энергии излучения при различных дрейфовых полях, учитывающей аномалии, характерные исключительно для взаимодействия альфа-частиц с аргоном.
3. Моделирование отклика жидкоаргонового детектора CENNS-10 при его калибровке изотопами  $^{83m}Kr$  и  $^{57}Co$  с целью оценки линейности отклика детектора в кэВ-ном диапазоне энергий.
4. Анализ экспериментальных данных в кэВ-ной области энергий, полученных в ходе калибровки детектора CENNS-10 при помощи распределенного по объему детектора источника  $^{83m}Kr$ , с целью оценки линейности отклика детектора.
5. Коррекция и модернизация моделей взаимодействия ядер отдачи с жидким ксеноном при различной напряжённости дрейфового поля.
6. Моделирование отклика жидкоксенонового детектора РЭД-100 на различные типы частиц.

**Научная новизна:**

1. Впервые разработан и экспериментально апробирован единый алгоритм моделирования, учитывающий новейшие экспериментальные данные и описывающий зависимости светового и ионизационного выхода для электронов отдачи в жидком аргоне в энергетическом диапазоне 0.2 кэВ – 1 МэВ. Низкоэнергетическая часть этого диапазона является областью интереса для поиска частиц тёмной мате-

рии (WIMP) и изучения процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН).

2. Впервые разработан единый алгоритм моделирования, описывающий зависимости светового и ионизационного выхода для альфа-частиц в жидком аргоне, впервые учитывающий экспериментально доказанную аномалию светового выхода при некоторых значениях приложенного электрического поля. Данный алгоритм превосходит по точности иные существующие подходы, не учитывающие данной аномалии (согласуется с экспериментальными данными с точностью лучше одного стандартного отклонения).
3. Впервые было произведено разделение линий с энергиями 9.4 и 32.1 кэВ от радиоизотопа  $^{83m}Kr$  в жидком аргоне и получены значения для их сцинтилляционного выхода, которые могут быть использованы для оценки ожидаемого отклика детектора в диапазоне поиска УКРН и WIMP.

**Практическая значимость** Разработанные в диссертации подходы и методы могут быть использованы при проектировании и проведении экспериментов на жидких благородных газах. Полученные в диссертации результаты используются в рамках анализа данных с экспериментов CENNS-10 и РЭД-100. Методы, разработанные в данной диссертации в рамках пакета NEST, используются в таких экспериментах с детекторами на жидком ксеноне, как LZ, Panda-X, XENONnT, направленных на поиск тёмной материи и исследования редких процессов. Данные результаты будут применяться и для моделирования ожидаемого отклика жидкоаргоновых детекторов для поиска тёмной материи.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработаны эмпирические модели для получения отклика детекторов при взаимодействии электронов низких энергий и альфа-частиц с жидким аргоном и модернизирована модель для взаимодействия ядер отдачи с жидким ксеноном при различной напряжённости дрейфового поля, учитывающие новейшие результаты экспериментов.

2. Разработан метод выделения линии 9.4 кэВ  $^{83m}\text{Kr}$  и определения сцинтилляционного выхода для нее с целью проверки созданной модели в этой области энергий.
3. При помощи этих моделей предсказан отклик детекторов CENNS-10 (на жидком аргоне) на электроны от  $^{83m}\text{Kr}$  и РЭД-100 (на жидком ксеноне) на ядра отдачи от взаимодействия нейтрино с атомным ядром ксенона.

В результате диссертационной работы была решена следующая задача: разработана методика моделирования сцинтилляционного и ионизационного отклика двухфазных эмиссионных детекторов в экспериментах по поиску УКРН и WIMP сигналов; в частности, была предсказана величина сигнала в детекторе РЭД-100, испытанном на Калининской АЭС в 2021-2022 гг.

Достоверность подтверждается совпадением результатов численных расчётов моделей с экспериментальными результатами как и экспериментов CENNS-10 и РЭД-100, так и с результатами коллабораций LZ, Panda-X, XENON.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на различных международных конференциях, таких как ICPPA2018 и ICPPA2020, LIDINE2019, Magnificent CEvNS 2020 и 2021, 19 Ломоносовская конференция по физике частиц, XeSAT2018, а так же на семинарах НИЯУ МИФИ и ИТЭФ и рабочих совещаниях коллабораций РЭД, NEST и COHERENT. Так же результаты работы используются в пакете NEST [9], широко применяющимся среди коллабораций, нацеленных на изучение низкоэнергетических процессов, в частности, изучение нестандартных нейтринных взаимодействий и поиск тёмной материи. Автор выступала в роли научного руководителя студента НИЯУ МИФИ, защитившего диплом бакалавра по разработке моделей скорости дрейфа электронов в жидком аргоне.

Личный вклад. Автор принимала активное участие в работе эксперимента РЭД-100 с 2016 года, в разработке NEST с 2017 года и в работе эксперимента COHERENT с 2018 года, занималась анализом данных и моделированием отклика детекторов, принимала участие в сеансах набора данных. Результаты работы автора учтены в отчетах по грантам РФФИ 18-32-00910

мола и 20-02-00670 А, а также в комплексе лабораторных работ ЛЭЯФ НИЯУ МИФИ (ISBN 978-5-7262-2908-9).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

## Содержание работы

Во **введении** даётся краткий обзор современных задач низкофоновой физики, очерчивается область применимости детекторов на благородных газах различного типа, излагается важность моделирования процессов в детекторах подобного класса. Обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена обзору применения благородных газов в низкофоновой физике и обоснованию популярности детекторов на благородных газах в современной науке:

1. Возможность создания большого чувствительного объёма (что особенно важно для исследования ТМ).
2. Возможность регистрировать низкоэнергетические события (вплоть до единиц кэВ).
3. Возможность масштабировать детектор (методика работы с детектором не изменится при увеличении его размеров при модернизации).

Также в этой главе дано описание технологии регистрации частиц при помощи однофазных (только жидкая фаза) и двухфазных эмиссионных детекторов (жидкая и газообразная фаза) и приведено теоретическое описание процессов взаимодействия жидких благородных газов с различными типами излучения, описаны возможные каналы регистрации частицы при помощи детекторов на благородных газах (рис. 1).

Также проведён обзор существующих моделей взаимодействия частиц с веществом (модель Линдхарда и её вариации), описывающих распределение энергии на сцинтилляционный и электролюминесцентный каналы в зависимости от типа частицы, обсуждены их достоинства и недостатки (в частно-

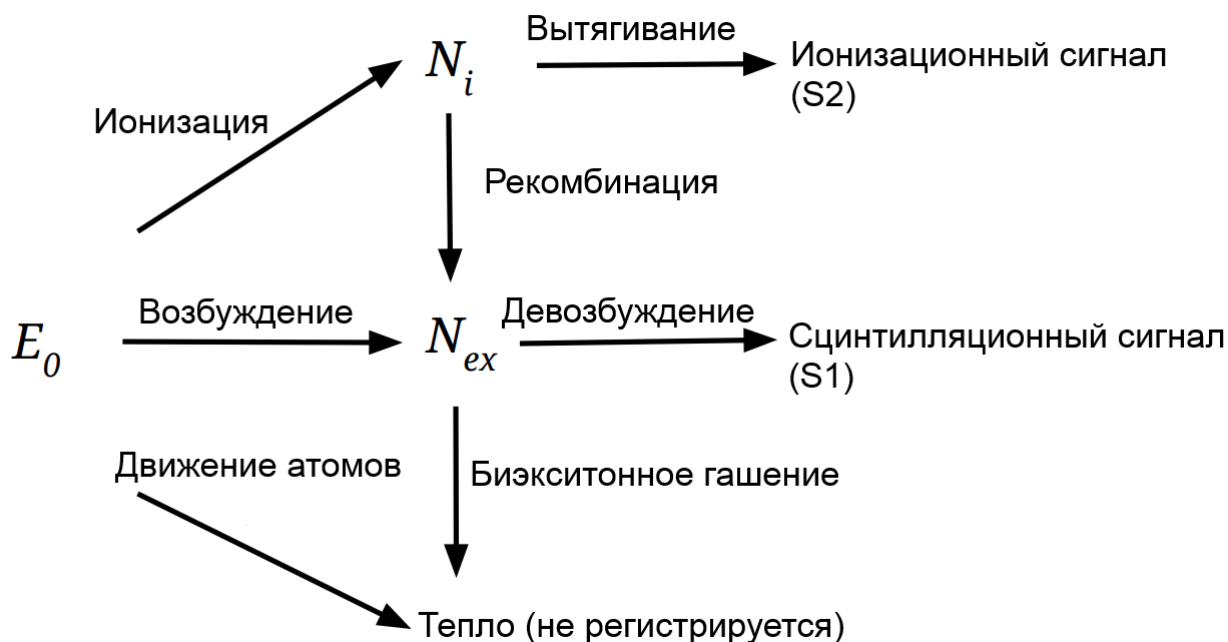


Рис. 1 — Схема процессов в двухфазном детекторе на благородном газе. Из работы [10]

сти, необходимость использовать эмпирические коэффициенты и поправки в изначально теоретической модели). Освещена проблема отсутствия общей теории, описывающей зависимость доли рекомбинации от энергии и приложенного электрического поля и необходимость использовать связку моделей Томаса-Аймеля [11] (низкие энергии) и Доке-Биркса [12] (высокие энергии) для корректного описания зависимости количества сцинтилляционных фотонов и электронов ионизации в зависимости от энергии взаимодействующей с веществом детектора частицы.

В конце главы сформулированы выводы, показывающие важность разработки моделей взаимодействия частиц с рабочим веществом детектора в зависимости от типа и энергии частицы, а так же от условий рабочего режима детектора (приложенное электрическое поле, геометрия детектора, и.т.д.). Сформулированы основные задачи и цели исследования:

- Необходимость разработки единых (т.е. не требующих "переключения" с алгоритма на алгоритм при разных энергетических диапазонах) моделей взаимодействия жидкого аргона и ксенона с различными частицами в широком диапазоне энергий при различной напряжённости дрейфового поля.



- Проверка работоспособностей моделей на экспериментальных данных с аргоновых (CENNS-10) и ксеноновых (РЭД-100) детекторов и их применение для анализа данных.
- Дополнение моделей полученными новыми экспериментальными данными.

**Вторая глава** посвящена пакету NEST (Noble Element Simulation Technique), представляющему собой программное обеспечение для моделирования процессов в детекторах на благородных элементах (аргоне и ксеноне).

В пункте 2.1.1 описана причина разработки NEST: самый распространённый инструментарий для Монте-Карло моделирования в физике частиц, GEANT4, не удовлетворяют требованиям для низкофоновой физики.

К примеру, класс G4Scintillation (отвечающий за сцинтилляционные процессы в GEANT) не учитывает критически важного факта для любого детектора на благородном газе - зависимости светового выхода от энергии и типа частицы, и принимает световой выход за константу. Подобное допущение не оказывает особого влияния на иные сцинтилляторы (хотя известны наблюдения отклонения светового выхода от константы и для кристалла NaI(Tl)), но для благородных газов оно является критичным по двум причинам: необходимости точных предсказаний в связи с малым количеством фотонов от низкоэнергетичных частиц и большой разницы в световом выходе в зависимости от энергий (вплоть до разницы в 5-7 раз для частицы с энергией в 5 и 100 кэВ, см. рис 2):

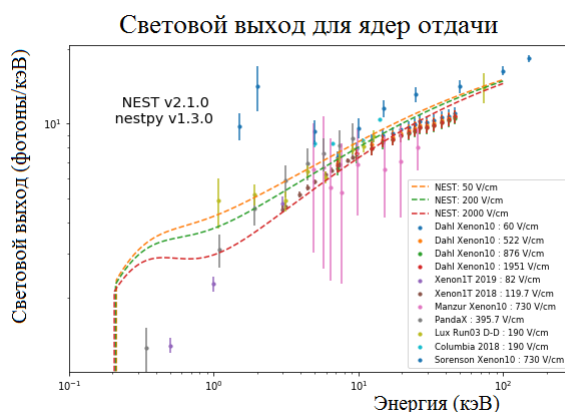


Рис. 2 — Зависимость светового выхода (в фотонах/кэВ) для ядер отдачи для жидкого ксенона в зависимости от энергии

Для моделирования низкофоновых детекторов на сжиженных благородных газах, работающих в области низких энергий, "чистый" GEANT не

подходит по фундаментальным причинам - пакет не представляет возможность корректного моделирования даже базовых физических процессов внутри подобного рабочего вещества, не говоря уже о "дополнительных" элементах вроде зависимости скорости дрейфа электронов от напряжённости приложенного электрического поля при различных условиях внутри рабочей области детектора (так же необходимых для полноценного симулирования отклика).

В пункте 2.1.2 описана первая версия NEST, базирующаяся на теоретических моделях - вариациях модели Линдхарда для определения доли энергии, идущей на образование электронов ионизации или возбуждённых атомов, и связке моделей Томаса-Аймеля и Доке-Биркса для определения процента рекомбинации в зависимости от энергии и приложенного поля. Отличием NESTv1 от сугубо теоретического подхода являлось использование в моделях эмпирических коэффициентов, полученных при аппроксимации массива опубликованных экспериментальных данных, полученных на существовавших на тот момент детекторах на благородных газах.

В разделе 2.2 описан процесс разработки NEST v2, включающей в себя модели, разработанные автором в рамках диссертации. Данная версия имеет ряд принципиальных отличий от предыдущей:

- Новая версия существует не только в виде библиотеки GEANT4, но и в качестве отдельного программного пакета на C++/Python, что позволяет производить быстрое предварительное моделирование без использования дополнительных пакетов и построения модели детектора в GEANT.
- В новой версии произведена замена моделей светового выхода и зарядового выхода на полностью эмпирические (сигмоидо-подобные зависимости, описывающие весь энергетический диапазон целиком без необходимости замены формы модели в зависимости от длины трека), но не противоречащие теоретическим результатам.
- Так же обновлены модели скоростей дрейфа электронов в жидкости и газе, модели рекомбинационных флуктуаций, и т.д.
- Добавлены дополнительные возможности (полноценное моделирование отклика от альфа-частиц и тяжёлых ионов, разделение моделей

для электронов отдачи на модели взаимодействия гамма и бета излучения с ксеноном и др).

Самым важным изменением является переход от большей частью теоретических моделей, предсказывающих количество экситонов и ионов и на основе их уже дававших оценку количества фотонов и электронов, на полуэмпирические модели, изначально предсказывающие среднее первичное количество сцинтилляционных фотонов и электронов ионизации, на основе которых уже происходит определение количества фотонов в сигнале S1 и S2 (учёт рекомбинации, флуктуаций и т.д.).

В пунктах раздела 2.2 описаны различные модели для ядер и электронов отдачи в NESTv2 для жидкого аргона и ксенона, освещены методы их разработки (необходимые статистические алгоритмы, согласование с теоретическими моделями, методики отбора экспериментальных данных для моделей).

В пункте 2.2.2 описана модель электронов отдачи для жидкого аргона (рис. 3), базирующаяся на модели жидкого ксенона. Подобная преемственность связана с физическим принципом: и ксенон, и аргон являются благородными газами, и взаимодействие частиц с ними должно подчиняться одним и тем же принципам.

Полученная модель корректно описывает поведение светового и зарядового выхода в зависимости от энергии частицы и приложенного поля. В этом же пункте предложены варианты её модернизации, основанные на теории Доке-Биркса.

В пункте 2.2.3 описаны модели ядер отдачи для жидкого аргона и ксенона. Проведено их сравнение с теоретическими моделями и иными эмпирическими моделями. Продемонстрирован учёт данных Ливерморской национальной лаборатории [4] для зарядового выхода в сверхнизких энергиях (1-10 кэВ), демонстрирующих наличие нарушения антикорреляции в данном диапазоне между световым и зарядовым выходом, что не учитывалось какими-либо теоретическими или эмпирическими моделями ранее.

Освещён метод определения параметров для модели ядер отдачи в жидком ксеноне не только по среднему световому выходу, но и по величине как и сцинтилляционного (S1), так и электролюминесцентного сигнала (S2), а так же по их отношению. Подобный подход позволяет получить коррект-

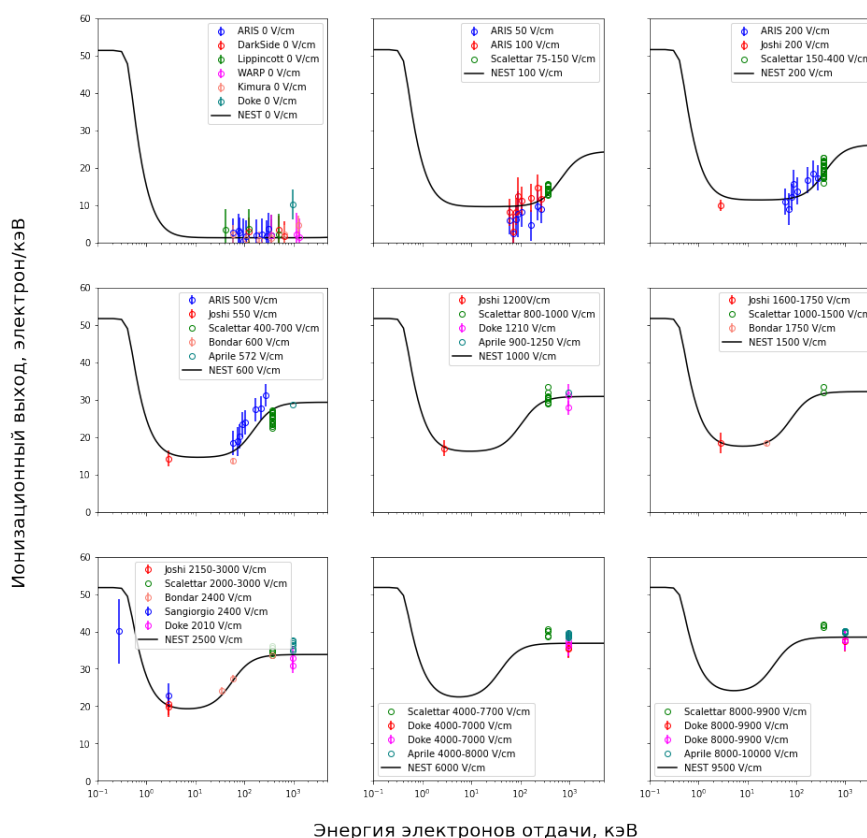


Рис. 3 — Модель NEST для зарядового выхода в жидком аргоне от электронов отдачи в зависимости от энергии и приложенного электрического поля.

ную оценку во всём энергетическом диапазоне, а не только в области средних энергий, как происходит с моделями, основанными только на данных о среднем световом выходе (см. табл. 1, "ручная" и "минимизационная" модели представляют собой разные статистические подходы, но на базе одних и тех же данных только о среднем световом выходе). Принятая в качестве итоговой модель демонстрирует корректное описание зависимости светового и зарядового выхода от энергии частицы и приложенного поля.

Эксперимент	Модель	$\chi^2$
LUX	Оригинальная модель	2.57
LUX	"Ручная" модель (через средний световыход)	11.14
LUX	Минимизационная модель (через средний световыход)	7.48
Xenon10	Оригинальная модель	2.33
Xenon10	"Ручная" модель (через средний световыход)	9.47
Xenon10	Минимизационная модель (через средний световыход)	11.23

Таблица 1 — Результаты сравнения различных вариаций моделей для ядер отдачи с экспериментальными данными

В пункте 2.2.4 описана разработка модели взаимодействия альфа-частиц с жидким аргоном. Для альфа-частиц модели для ксенона и аргона отличаются сильнее, чем для электронов и ядер отдачи (где различия в целом заключаются только в численном значении коэффициентов). Причина этого заключается не только в фактическом отсутствии данных по альфа-частицам в жидком аргоне, но и в возможной некоторой физической разнице между взаимодействием альфа-частиц в аргоне и ксеноне - в аргоне существует "пик" световыхода в области средних полей, что нехарактерно для ксенона [5; 6]). Подобный феномен может объясняться следующими причинами: треки ионизации в ксеноне гораздо плотнее, чем в аргоне (особенно для таких высокоэнергетических частиц, как альфа), и не исключено, что поля в аргоне могут "выталкивать" электроны из менее плотных треков в области с более низкой плотностью ионизации, где вероятность биэкситонного "гашения" (квенчинга) у образовавшегося в результате рекомбинации экситона меньше. Новая модель, учитывающая данный эффект, отражена на рис. 4.

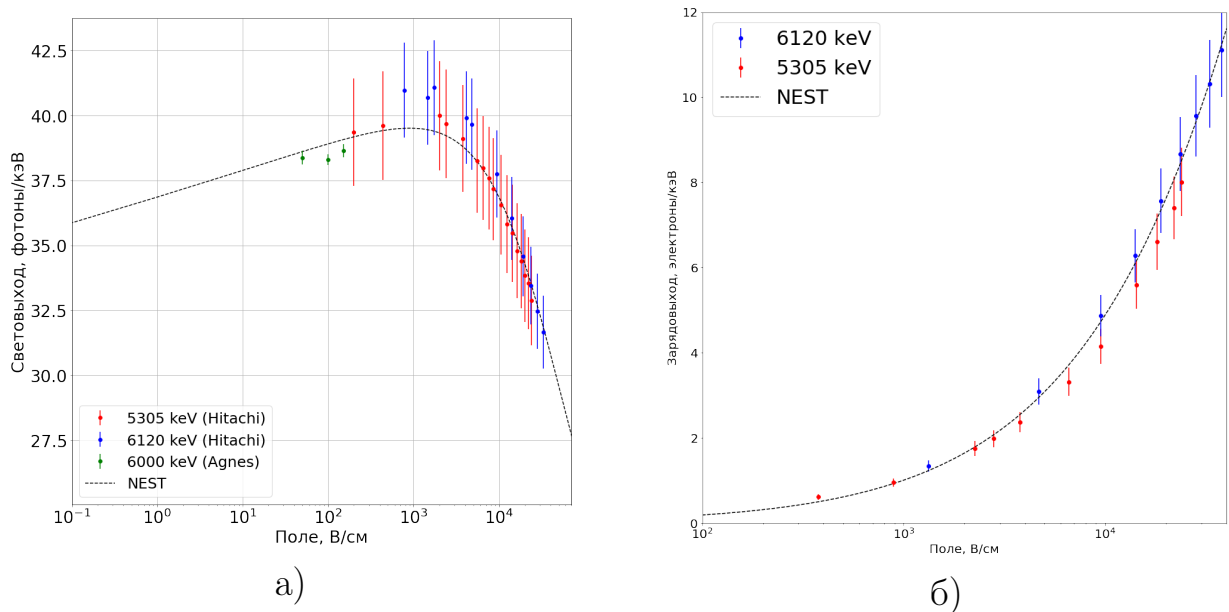


Рис. 4 — Модель NEST для светового выхода (а) и зарядового выхода (б) для альфа-частиц в жидком аргоне.

**Третья глава** посвящена исследованиям взаимодействия электронов отдачи с жидким аргоном в области низких энергий на примере данных с эксперимента CENNS-10. В разделе 3.1 описывается жидкоаргоновый детектор CENNS-10 (раздел 3.1), цели его работы (изучению упругого когерентного рассеяния нейтрино), а так же калибровки детектора при помощи источника

$^{83m}\text{Kr}$  (раздел 3.2) и методика разделения линий криптона 9.4 и 32.1 кэВ (раздел 3.3).

В пункте 3.3.1 описана предобработка данных при помощи пакета REDOffline (разработанного коллаборацией RED для экспериментов подобного класса) и базовые ограничения для анализа данных  $^{83m}\text{Kr}$  для учёта несовершенства распределения света в детекторе.

В пункте 3.3.2 описана суть задачи разделения линий 9.4 и 32.1 кэВ от  $^{83m}\text{Kr}$ : из-за наложения пиков от быстрых компонент 32.1 и 32.1+9.4 и принципиальной невозможности их полного разделения в силу вероятностного распределения процесса появления линии 9.4 кэВ был разработан метод, базирующийся на следующих основных положениях:

- Полные площади сигналов (в ФЭ) для 9.4 и 32.1 кэВ можно определить из площадей (положении пиков в фотоэлектронах) за первые 90 нс для сигналов, соответствующих 9.4 и 32.1 и известного отношения площади сигнала за первые 90 нс к полной площади сигнала для разных энергий (см. выше).
- Площади сигнала за первые 90 нс для можно определить из экспериментальных данных для 32.1 кэВ и 32.1+9.4 кэВ, площадь для 9.4 кэВ получается отсюда вычитанием.
- Полученные значения площадей сигнала за первые 90 нс для 9.4 и 32.1 кэВ являются приближенными. Уточненные значения данных величин можно получить итерационным методом вычисления, используя эти значения в качестве начальных, а также известное отношение площади сигнала за первые 90 нс к полной площади сигнала для разных энергий и полную площадь сигнала для 32.1+9.4 кэВ, известную из измерения.

Для определения значений величин сигналов отдельно для 9.4 и 32.1 кэВ из имеющегося набора данных были применены методы, описанные в следующих пунктах.

В пункте 3.3.3 описан "наивный" метод разделения линий 9.4 и 32.1 кэВ, основанный на предположении, что распределение площадей сигнала в течение первых 90 нс (т.н. F90) от быстрых компонент 32.1 и 32.1+9.4 кэВ представляют собой распределение Гаусса. На самом деле пик от 32.1+9.4 кэВ имеет потери и поэтому не представляет собой ни Гаусс, ни его смещён-

ные варианты, ни какое-либо иное классическое распределение либо специальную функцию на основе Гаусса (рис 5). Несмотря на то, что для приближённой оценки можно было бы воспользоваться и "наивным" подходом с двумя гауссоподобными функциями, результаты, полученные подобным методом, являются неудовлетворительными для итерационного метода и приводят к расхождению результатов. Таким образом, появляется необходимость в разработке более комплексного метода.

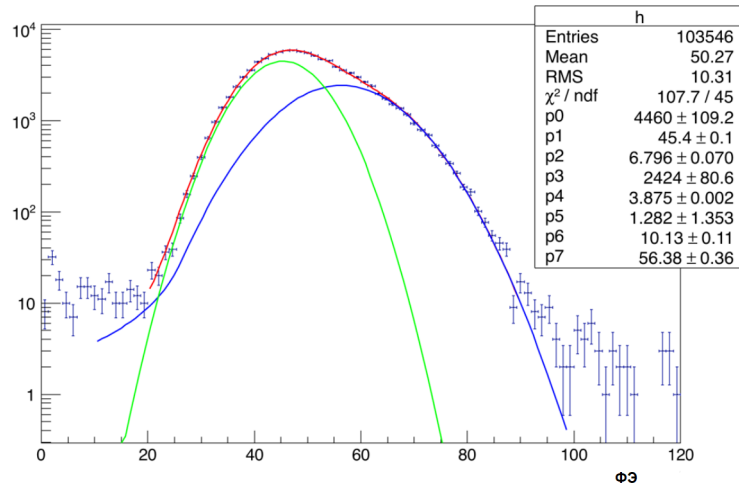


Рис. 5 — Пример аппроксимации суммарного пика  $32.1 + 9.4$  кэВ в диапазоне первых 90 нс свёрткой из Гаусса (зелёная линия, 32.1 кэВ) и специальной функцией CrystalBall [13](синяя линия, 32.1+9.4 кэВ).

$$\text{Полученный } \chi^2 = 2.4$$

В пункте 3.3.4 описаны принципы получения ограничений для более комплексного метода. Для уменьшения потерь можно выбрать такой диапазон, где эти потери будут незначительными. Было получено, что таким диапазоном является отрезок 0-55 нс, в котором потери составляют  $\sim 0.7\%$  для быстрой компоненты и  $\sim 2.3\%$  для медленной компоненты, что является допустимым в рамках данного анализа.

Для отбора событий, в которых линия 9.4 кэВ появляется в течение 55 нс после появления линии 32.1 кэВ, было построено распределение F35:F55 (площади сигнала в первые 35 и 55нс соответственно). Для лучшего понимания поведения распределения оно было промоделировано методом toy MC, позволяющим задавать время появления линии 9.4 кэВ (рис. 6). События, которые находятся на основной линии корреляции, не могут быть использованы для анализа из-за ограниченной разрешающей способности детек-

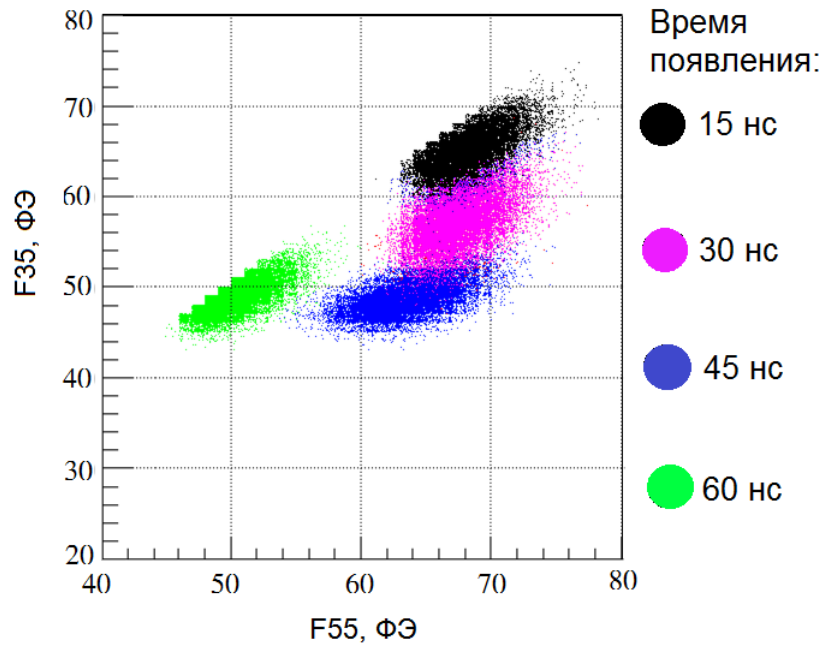


Рис. 6 — Модельное распределение площадей F35:F55 для линии 9.4 кэВ. Цветом отмечено время появления быстрой компоненты от линии 9.4 кэВ.

тора, поэтому для анализа были отобраны события, лежащие ниже основной линии корреляции. Для этого данное распределение было спроецировано на новую ось, которая определялась как перпендикуляр к профилю распределения площадей F35:F55. Ось задавалась уравнением как  $rotated\ axis = F35 * \cos(\alpha) - F55 * \sin(\alpha)$ , где  $\alpha$  — угол, равный  $37.5^\circ$ , полученный из линейной аппроксимации профиля.

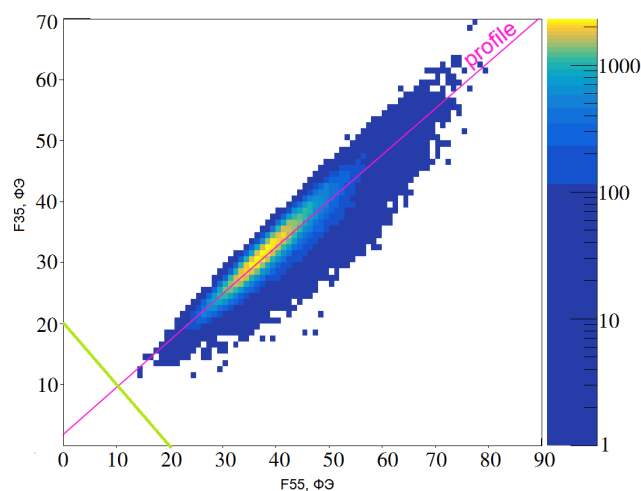


Рис. 7 — Реальное распределение площадей F35:F55 с полученными профилем (розовая линия)



Спроецированное распределение было аппроксимировано двумя распределениями Гаусса, на основании которых было выбрано ограничение для пика 32.1+9.4 кэВ, при котором пик 32.1 кэВ подавлялся в тысячу раз (рис.8). Обратная логика (т.е. выбрать ограничение слева, чтобы подавить события от 32.1+9.4 в тысячу раз) не приносит необходимого результата из-за малости количества событий 32.1 кэВ при таком отборе.

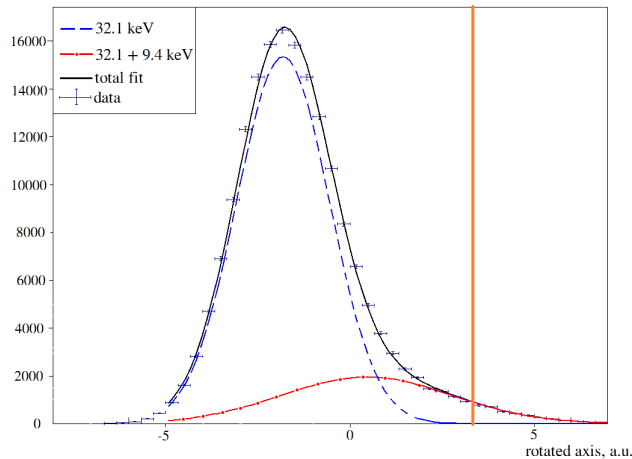


Рис. 8 — Спроецированное распределение F35:F55, ограничение отмечено оранжевой линией

Также для отбора событий применялся дополнительный отбор по отношению площади в течение 90 нс к суммарной площади сигнала. Ограничение по этому параметру базировалось на отношении  $\frac{signal}{\sqrt{(signal+background)}}$ , где фоном считался пик 32.1 + 9.4 кэВ. Подобный усложнённый метод получения ограничения потребовался из-за того, что если принять положения ограничения по пересечению пиков, то пик 32.1 кэВ теряет больше 15% от площади, что оказывает заметное влияние на распределение.

После применения всех ограничений были получены предварительные значения для быстрых компонент от линий 9.4 кэВ и 32.1 кэВ (и их суммы), значение которых представлено в таблице 2 (значение для 9.4 кэВ было получено методом вычитания). Данные значения служат в качестве начальных точек для итеративного метода.

В пункте 3.3.5 описана реализация итеративного метода, представленная в пункте 3.3.2. Сам итеративный метод основан на следующем предположении: прямое вычитание (т.е. получение значения пика 9.4 кэВ через вычитание из значения пика 32.1+9.4 кэВ значения пика 32.1 кэВ) и расчеты через функцию  $f_{90}$  (функция отношения площади за первые 90 нс, получен-

Энергия (кэВ)	Метод	ФЭ за 90 нс (ФЭ)
9.4	Вычитание	$17.35 \pm 0.21$
32.15	Прямое значение из пика	$45.22 \pm 0.6$
41.5	Прямое значение из пика	$62.57 \pm 1.08$

Таблица 2 — Результаты разделения линий

ная из данных  $^{57}\text{Co}$ : для  $^{57}\text{Co}$  и  $^{83\text{m}}\text{Kr}$  данные функции будут идентичными, т.к. у  $^{57}\text{Co}$  одна мода распада и тип сигнала и там и там - электроны отдачи) должны давать одинаковые результаты, поскольку их физический смысл одинаков.

Для апробации данного метода использовались два подхода для вычисления световыходов: упрощенный итерационный расчет и итерационный расчет по системе уравнений (для решения системы использовался Mathcad Prime с алгоритмом Левенберга–Марквардта [14; 15]):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{FastLY_{32.1}}{f90(TotalLY_{32.1_i})} = TotalLY_{32.1_i} \\ \frac{FastLY_{9.4_i}}{f90(TotalLY_{9.4_i})} = TotalLY_{9.4_i} \\ TotalLY_{32.1+9.4} - TotalLY_{32.1_i} = TotalLY_{9.4_{(i+1)}} \\ TotalLY_{32.1+9.4} - TotalLY_{9.4_i} = TotalLY_{32.1_{(i+1)}} \\ FastLY_{32.1+9.4} - FastLY_{32.1} = FastLY_{9.4_i}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $FastLY_{32.1+9.4}$  — положение пика для 32.1+9.4 кэВ в первые 90 нс,  $TotalLY_{32.1+9.4}$  — положение пика за весь временной диапазон для этих энергий, аналогично для  $TotalLY_{9.4}$ ,  $FastLY_{9.4}$  и  $TotalLY_{32.1}$ ,  $FastLY_{32.1}$ .

Упрощенный итерационный процесс принимал одно из значений  $TotalLY_{32.1}$  или  $TotalLY_{9.4}$  в качестве уже известного значения, а вторую величину - как переменную (т.е без решения системы уравнений с обеими из них в качестве переменных - принципиальное отличие от предыдущего метода).

Итоговые результаты для различных методов представлены в таблице 3.

В разделе 3.4 приведено сравнение результатов предсказаний модели NEST для взаимодействия электронов отдачи с жидким аргоном с полученными результатами анализа В, описанного в пункте 3.2 и 3.3, и альтернативного анализа А из работы [16]. Оба анализа согласуются с предсказаниями NEST

Энергия (кэВ)	Метод	Световойход (ФЭ/кэВ)
9.4	Упрощённый (старт. точка 9.4 кэВ)	$4.98 \pm 0.55$
32.15	Упрощённый (старт. точка 9.4 кэВ)	$4.60 \pm 0.28$
9.4	Упрощённый (старт. точка 32.1 кэВ)	$4.98 \pm 1.36$
32.15	Упрощённый (старт. точка 32.1 кэВ)	$4.63 \pm 0.33$
9.4	Полный	$4.76 \pm 0.30$
32.15	Полный	$4.65 \pm 0.47$

Таблица 3 — Результаты определения величины пиков различными методами

(рис 9). Полученные результаты анализа В так же были использованы для уточнения модели NEST.

Так же в данном разделе приведены планы по полноценной интеграции NEST в уже существующую Монте-Карло модель CENNS-10 для возможности проведения моделирования различных процессов в CENNS-10.

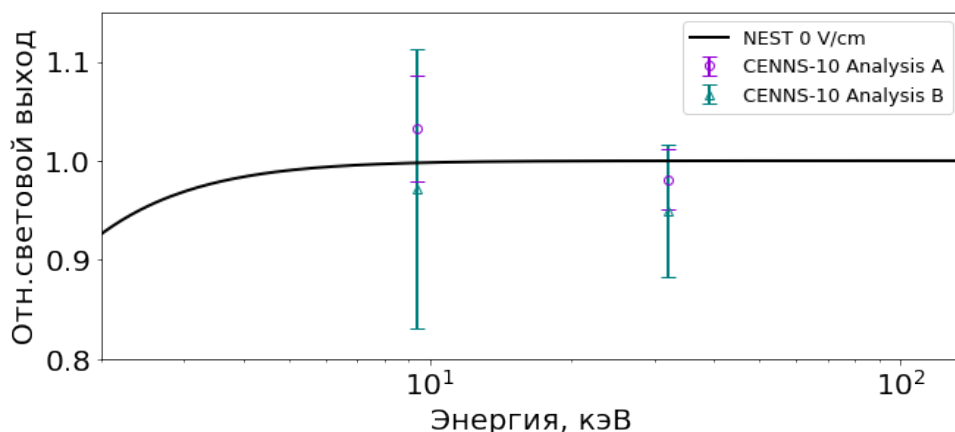


Рис. 9 — Сравнение экспериментальных значений светового выхода от линий  $^{83m}\text{Kr}$  с предсказаниями NEST. Анализ В - анализ, описанный в данной работе, анализ А - параллельный анализ другой группы

**Четвёртая глава** посвящена применению NEST для ксенонового эксперимента по поиску УКРН РЭД-100. В разделе 4.1 описано устройство детектора и цели его работы. Раздел 4.2 посвящён условиям его работы и сенсам набора данных. В разделе 4.3 освещается методика построения модели детектора РЭД-100 в NEST.

Для оценки сигнала от УКРН в РЭД-100 необходимо с высокой точностью знать как и количество одиночных электронов ионизации от полезного сигнала, так и количество фотонов от одиночного электрона ионизации. NEST даёт итоговую оценку в  $790 \pm 70$  фотонов/SE для сигнала S2 для одно-

го электрона ионизации. Количество электронов (рис. 10) было необходимо

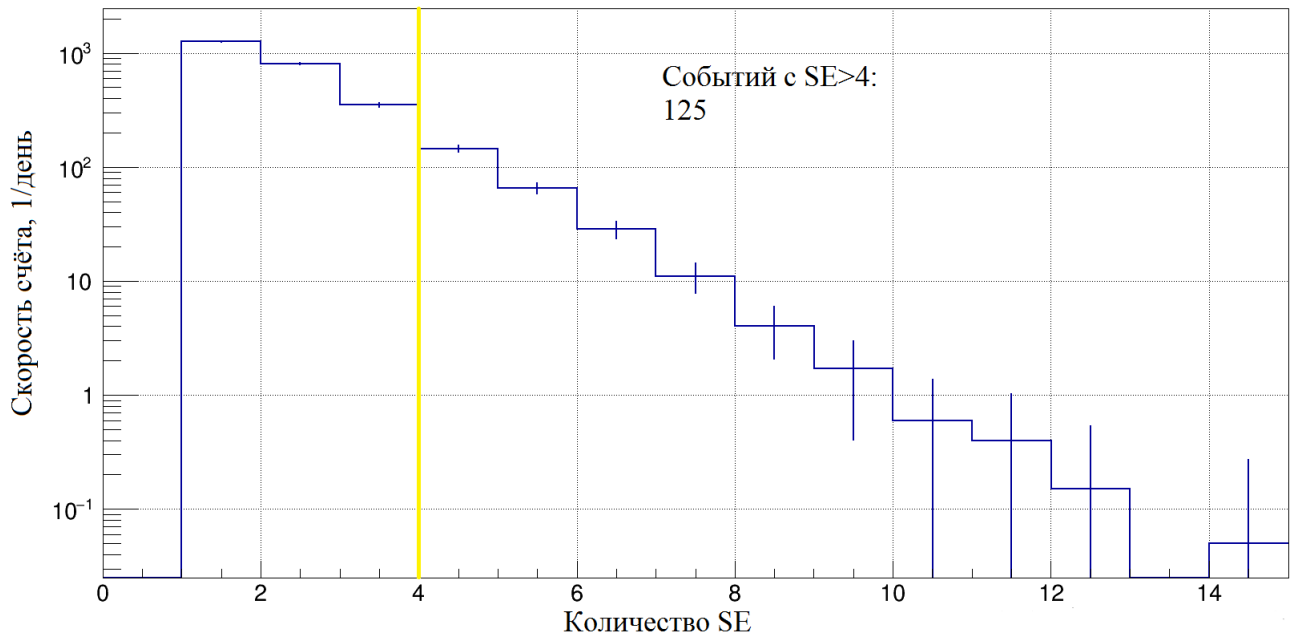


Рис. 10 — Количество одиночных электронов от УКРН с учётом коэффициента экстракции

для понимания установки положения порога по множественности для отсе- чения низкоэнергетического фона. В области 1-2 SE фон сильно превышает полезный сигнал и регистрация явления в данном диапазоне невозможна. По этой причине область интереса для регистрации УКРН располагается в регионе  $>4$  SE (рис. 10). Среднее ожидаемое количество событий в данном диапазоне составляет 125 событий/день.

В дальнейшем с целью оценки временного распределения фотонов от электролюминесценции от УКРН и от возможного шумового фона моделиро- валось время дрейфа электронов ионизации. NEST представляет такую воз- можность, используя для расчёта скоростей дрейфа в жидкости и газе эмпи- рические модели, использующие в качестве входных параметров температуру, давление и напряжённость приложенного поля в детекторе. Результаты рабо- ты моделей показаны на рис.11. Полученная оценка 1.56 мм/мкс совпадает с экспериментальным значением  $1.57 \pm 0.12$  мм/мкс. В качестве следующего этапа оценки для корректного моделирования времён прихода электронов от различных событий (УКРН/фон) к полученному времени дрейфа добавля- лось "размытие" (параметр, отвечающий за величину разницы между вре- менами дрейфа электронов от одного события), связанное с существованием

продольной компоненты диффузии электронов, в зависимости от глубины события в детекторе (рис. 12).

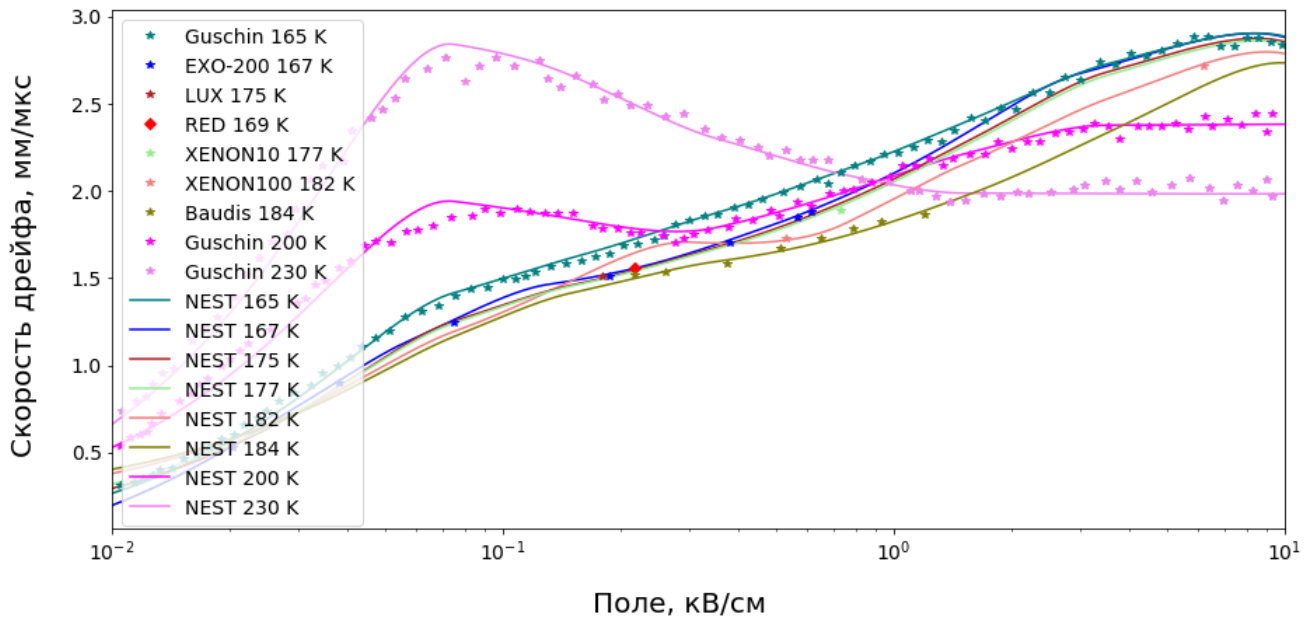


Рис. 11 — Скорость дрейфа при различных температурах и приложенных электрических полях в NEST

Имея полную картину поведения электронов ионизации (количество фотонов в электролюминесцентной вспышке от одного электрона ионизации, скорость дрейфа, оценка величины диффузии электронов), можно использовать полученные параметры в дальнейшем моделировании. В эксперименте РЭД-100 они использовались в качестве входных параметров для оптической модели детектора РЭД-100 на базе ANTS [17]. Подобное моделирование даёт возможность оценить порог регистрации УКРН (т.е. порог, после которого сигнал от УКРН будет выше, чем от фона) [18].

Также при помощи NEST производилось моделирование сигнала от калибровочных источников  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{22}\text{Na}$  с целью оценки ожидаемого светового выхода и линейности отклика детектора. Полученные результаты так же использовались как и для обработки калибровочных экспериментальных данных для получения LRF и последующей коррекции светосбора для повышения разрешающей способности детектора [18], так и для получения коэффициента эмиссии электронов [19]. Была показана линейность отклика детектора в данном энергетическом диапазоне.

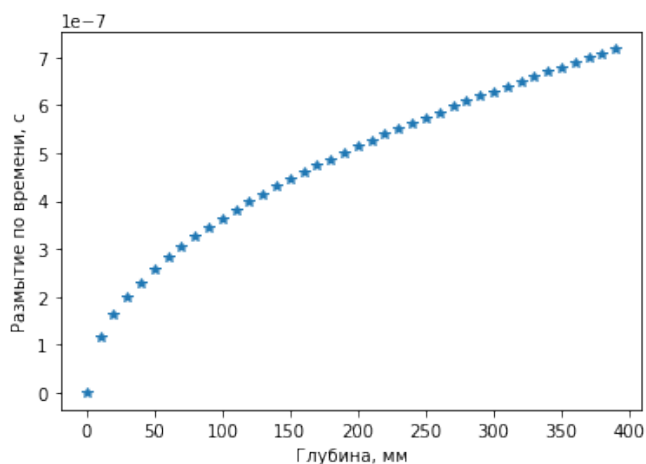


Рис. 12 — Величина размытия времён дрейфа электронов в зависимости от глубины события в детекторе.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Были разработаны модели взаимодействия гамма и бета излучения с жидким аргоном в зависимости от энергии излучения при различных дрейфовых полях.
2. Была разработана модель взаимодействия альфа-излучения с жидким аргоном в зависимости от энергии излучения при различных дрейфовых полях. Была показана особенность поведения световых выходов в средних полях и предложен метод модельного описания данного феномена.
3. Был разработан метод разделения линий 9.4 и 32.1 кэВ от распределенного по объему детектора CENNS-10 источника  $^{83m}\text{Kr}$  в жидком аргоне. Продемонстрировано, что разделение линий возможно не только на принципиальном уровне, но и с целью использования для калибровки детектора в низких энергиях.
4. Было проведено моделирование отклика детектора CENNS-10 при помощи пакета NEST при калибровке его изотопами  $^{83m}\text{Kr}$  и  $^{57}\text{Co}$ . Результаты моделирования согласуются с реальными экспериментальными данными.
5. Был оценён вклад величины светового выхода для ядер отдачи высоких энергий в жидком ксеноне, что было учтено в модели ядер отдачи в жидком ксеноне для NEST.

6. Были получены базовые оценки светового и зарядового выхода от фоновых, калибровочных и полезных событий в жидком ксеноне для детектора РЭД-100, которые использовались для дальнейшего моделирования и для анализа реального отклика РЭД-100 на соответствующие частицы.

Подходы, разработанные в настоящей работе, будут использованы для дальнейшего усовершенствования моделирования процессов в детекторах CENNS-10 и РЭД-100 (и их дальнейших модернизаций), которое будет применяться для более модернизированного анализа в данных экспериментах (в частности, для поиска УКРН и других низкоэнергетических нейтринных процессов). Так же разработанные методы могут быть использованы в иных будущих низкофоновых экспериментах на жидких благородных газах, посвящённых поиску и исследованию редких процессов.

## Публикации автора по теме диссертации

1. The RED-100 experiment / D. Y. Akimov [и др.] // JINST. — 2022. — т. 17, № 11. — T11011. — DOI: [10.1088/1748-0221/17/11/T11011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/11/T11011). — arXiv: [2209.15516](https://arxiv.org/abs/2209.15516) [physics.ins-det].
2. Development of a  $^{83m}\text{Kr}$  source for the calibration of the CENNS-10 liquid argon detector / D. Akimov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — апр. — т. 16, № 04. — P04002. — DOI: [10.1088/1748-0221/16/04/p04002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/04/p04002).
3. A Review of Basic Energy Reconstruction Techniques in Liquid Xenon and Argon Detectors for Dark Matter and Neutrino Physics Using NEST / M. Szydagis [и др.] // Instruments. — 2021. — т. 5, № 1. — DOI: [10.3390/instruments5010013](https://doi.org/10.3390/instruments5010013).
4. First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100 / D. Akimov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — февр. — т. 15, № 02. — P02020—P02020. — DOI: [10.1088/1748-0221/15/02/p02020](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/p02020).

## Список литературы

1. . . . . Новый метод регистрации следов ионизирующих частиц в конденсированном веществе // Письма в ЖЭТФ. — 1970. — т. 11. — с. 513—516.
2. *J. Lindhard M. S., Schiott H.* Range concepts and heavy ion ranges // *Matt. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* — 1963. — т. 33, № 14.
3. A model of nuclear recoil scintillation efficiency in noble liquids / D.-M. Mei [и др.] // *Astroparticle Physics.* — 2008. — авг. — т. 30, № 1. — с. 12—17. — DOI: [10.1016/j.astropartphys.2008.06.001](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.06.001). — URL: <https://doi.org/10.1016%2Fj.astropartphys.2008.06.001>.
4. Measurement of the ionization yield from nuclear recoils in liquid xenon between 0.3 – 6 keV with single-ionization-electron sensitivity / B. Lenardo [и др.]. — 2019. — DOI: [10.48550/ARXIV.1908.00518](https://doi.org/10.48550/ARXIV.1908.00518).
5. Effect of low electric fields on alpha scintillation light yield in liquid argon / P. Agnes [и др.] // *Journal of Instrumentation.* — 2017. — янв. — т. 12, № 01. — P01021—P01021. — DOI: [10.1088/1748-0221/12/01/p01021](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/p01021).
6. *Hitachi A., LaVerne J. A., Doke T.* Effect of an electric field on luminescence quenching in liquid argon // *Phys. Rev. B.* — 1992. — июль. — т. 46, вып. 1. — с. 540—543. — DOI: [10.1103/PhysRevB.46.540](https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.46.540). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.46.540>.
7. The LUX-ZEPLIN (LZ) experiment / D. Akerib [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2020. — февр. — т. 953. — с. 163047. — DOI: [10.1016/j.nima.2019.163047](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163047).
8. Search for Neutrinoless Double-Beta Decay in  $^{136}\text{Xe}$  with EXO-200 / M. Auger [и др.] // *Physical Review Letters.* — 2012. — июль. — т. 109, № 3. — DOI: [10.1103/physrevlett.109.032505](https://doi.org/10.1103/physrevlett.109.032505).
9. Noble Element Simulation Technique v2.0 / M. Szydagis [и др.]. — вер. v2.0.0. — 07.2018. — DOI: [10.5281/zenodo.1314669](https://doi.org/10.5281/zenodo.1314669). — URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1314669>.



10. A Global Analysis of Light and Charge Yields in Liquid Xenon / B. Lenardo [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2015. — дек. — т. 62, № 6. — с. 3387—3396. — DOI: [10.1109/tns.2015.2481322](https://doi.org/10.1109/tns.2015.2481322).
11. *Thomas J., Imel D. A.* Recombination of electron-ion pairs in liquid argon and liquid xenon // Phys. Rev. A. — 1987. — июль. — т. 36, вып. 2. — с. 614—616. — DOI: [10.1103/PhysRevA.36.614](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.36.614).
12. *Birks J. B.* The Theory and Practice of Scintillation Counting. — Pergamon Press, 1964. — 684 p.
13. *Gaiser J. E.* Charmonium Spectroscopy From Radiative Decays of the  $J/\psi$  and  $\psi'$  : Other thesis / Gaiser John Erthal. — 08.1982.
14. *LEVENBERG K.* A METHOD FOR THE SOLUTION OF CERTAIN NON-LINEAR PROBLEMS IN LEAST SQUARES // Quarterly of Applied Mathematics. — 1944. — т. 2, № 2. — с. 164—168. — (дата обр. 06.05.2022).
15. *Marquardt D. W.* An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. — 1963. — т. 11, № 2. — с. 431—441. — (дата обр. 06.05.2022).
16. Development of a  $^{83m}Kr$  source for the calibration of the CENNS-10 liquid argon detector / D. Akimov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — апр. — т. 16, № 04. — P04002. — DOI: [10.1088/1748-0221/16/04/p04002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/04/p04002).
17. ANTS2 package: simulation and experimental data processing for Anger camera type detectors / A. Morozov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2016. — апр. — т. 11, № 04. — P04022—P04022. — DOI: [10.1088/1748-0221/11/04/p04022](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/04/p04022). — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/04/p04022>.
18. First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100 / D. Akimov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — февр. — т. 15, № 02. — P02020—P02020. — DOI: [10.1088/1748-0221/15/02/p02020](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/p02020).
19. The RED-100 experiment / D. Y. Akimov [и др.] // JINST. — 2022. — т. 17, № 11. — T11011. — DOI: [10.1088/1748-0221/17/11/T11011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/11/T11011). — arXiv: [2209.15516](https://arxiv.org/abs/2209.15516) [physics.ins-det].