


Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи 

Коновалов Алексей Михайлович

**Обнаружение процесса упругого когерентного  
рассеяния нейтрино на атомном ядре и  
определение его сечения на ядрах Cs и I**

Специальность 1.3.15 — «Физика атомных ядер и элементарных  
частиц, физика высоких энергий»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023



## Общая характеристика работы

Упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядре атома (УКРН) — следствие нейтрального тока слабого взаимодействия. Существование этого процесса было теоретически обосновано в 1974 году [1; 2]. Суть УКРН состоит в интерференции амплитуд рассеяния нейтрино на нуклонах ядра при достаточно малом переданном импульсе. Такая интерференция характерна для нейтрино с энергией менее 50 МэВ. Её следствием является увеличение сечения рассеяния на ядре по сравнению с суммой сечений рассеяния на каждом из его нуклонов. Эффективно полное сечение УКРН пропорционально квадрату числа нейтронов в ядре [3]. Это наиболее вероятный канал взаимодействия нейтрино низких энергий с веществом, состоящим из атомов средних и тяжёлых элементов [4]. Важной особенностью этого процесса является малость переданной ядру энергии [1]. Максимальная энергия ядра отдачи при рассеянии реакторных антинейтрино — от сотен электронвольт до нескольких килоэлектронвольт [5]. При УКРН нейтрино и антинейтрино, рождённых в распаде покоящихся пионов на ускорителях, она может достигать нескольких десятков килоэлектронвольт [6]. Сложность регистрации ядра отдачи низкой энергии при общей малости сечения обусловила отсутствие экспериментального подтверждения УКРН вплоть до 2017 года [4].

**Актуальность темы.** Регистрация УКРН и сравнение измеренных параметров этого процесса с предсказанием Стандартной модели интересны с точки зрения поиска *Новой физики*, особенно наличия нестандартного вклада во взаимодействия нейтрино с кварками [3; 7; 8] и аномальных электромагнитных свойств нейтрино [9; 10]. УКРН может служить инструментом измерения электрослабого угла смешивания  $\sin^2\theta_W$  в области переданного импульса порядка нескольких десятков мегаэлектронвольт [11], а также ядерного форм-фактора — меры пространственного распределения нуклонов внутри ядра [12; 13]. Для подземных экспериментов по поиску гипотетических частиц тёмной материи когерентное рассеяние солнечных, атмосферных и галактических нейтрино является фоном [14]. Независимое измерение сечения УКРН позволило бы сократить соответствующую систематическую неопределённость в будущих экспериментах. Аналогичную роль играет УКРН и при поиске лёгких частиц тёмной материи на ускорителях [15]. В силу относительно большого сечения УКРН может использоваться как основа регистрации

нейтрино компактными детекторами. Такие детекторы могут найти применение в экспериментах по поиску стерильных нейтрино на короткой базе [16–18], а также служить прикладным целям. Например, мониторингу состава топлива в активной зоне ядерного реактора [19–21].

**Целью** данной работы является регистрация процесса УКРН и измерение его сечения на ядрах атомов CsI. Здесь и далее под “сечением УКРН на ядрах атомов CsI” имеется в виду усредненное сечение УКРН на близких по количеству нейтронов ядрах  $^{133}\text{Cs}$  (78) и  $^{127}\text{I}$  (74). Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Зарегистрировать УКРН при помощи детектора CsI[Na] на ускорителе Spallation Neutron Source (SNS) на основе данных 2015–2017 годов.
2. Уточнить отклик сцинтиллятора CsI[Na] на ядра отдачи с энергией от 5 до 30 кэВ для сокращения неопределённости ожидаемой скорости счёта событий УКРН.
3. Измерить сечение УКРН на ядрах атомов CsI на полном наборе данных CsI[Na] 2015–2019 годов.

**Основные результаты, выносимые на защиту:**

1. Первая в мире регистрация УКРН на ядре атома. Значимость результата составила  $7\sigma$ .
2. Измерение усреднённого по спектру энергий нейтрино SNS сечения УКРН на ядрах атомов CsI:  $\langle\sigma\rangle_{\Phi} = (165^{+30}_{-25}) \times 10^{-40} \text{ см}^2$ .

**Научная новизна:**

1. Была произведена первая в мире регистрация процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядре атома.
2. Впервые измерено сечение УКРН на ядрах атомов CsI. Полученное значение сечения — наиболее точное из измерений УКРН.

**Теоретическая и практическая значимость.** Регистрация процесса УКРН с сечением, не противоречащим Стандартной модели, позволяет вычислить ограничения на потенциальный вклад *Новой физики* во взаимодействие нейтрино с кварками [3; 7; 8]. Обнаружение УКРН подтверждает представления о его роли в природе, в частности — в переносе энергии при звездном коллапсе [1; 22–24]. Кроме того, УКРН может быть использован в качестве инструмента физических исследований: в экспериментах по изме-

рению слабого ядерного форм-фактора [12; 13], величины угла электрослабого смешивания на масштабе нескольких десятков мегаэлектронвольт [11], а также поиска стерильных нейтрино [8; 16; 18]. Наблюдение предсказанного эффекта на ускорителе подтверждает принципиальную возможность использования УКРН для мониторинга состояния ядерных реакторов [19–21].

**Достоверность** обнаружения эффекта УКРН на данных детектора CsI[Na] 2015–2017 годов подтверждается совпадением выводов двух групп анализа: группы из США и группы из России, в которой ведущую роль играл автор диссертации. Значимость регистрации УКРН на основе анализа группы из США составила  $6.7\sigma$ , российской группы —  $7.2\sigma$ . Результаты обеих групп не противоречат УКРН Стандартной модели. С увеличением массива данных (2015–2019 гг.) значимость регистрации выросла до  $\sim 12\sigma$ . Кроме того, произведённое в 2020 году коллаборацией COHERENT измерение УКРН на ядре аргона [25] подтвердило существование этого процесса и соответствие его сечения предсказанию Стандартной модели. Результаты измерений отклика сцинтиллятора CsI[Na] на ядра отдачи с энергией от 5 до 30 кэВ методом *меченых нейтронов* были подтверждены в измерении методом *конечной точки*. Процедуры восстановления характеристик событий как для данных с SNS, так и калибровочных данных из Triangle Universities Nuclear Laboratory (TUNL), были верифицированы путём их проверки на искусственно созданных формах сигнала с известными характеристиками.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на международных и российских конференциях Lomonosov–2017, ICSSRA–2017, Magnificent CEvNS 2019 и 2020, ICHEP–2020, МКТЭФ–2020, Recontres de Moriond 2021. Они были представлены на семинарах ИЯФиТ НИЯУ МИФИ (2017, 2022 г.) и НИЦ КИ – ИТЭФ (2017 г.), Лаборатории Кавендиша в Кембриджском университете (2017 г.), рабочих совещаниях коллаборации COHERENT (2016–2022 гг.). Результаты работы автора вошли в отчёты по гранту РФФИ 17-02-01077\_А и проекту Министерства образования РФ «Фундаментальные свойства элементарных частиц и космология» №0723-2020-0041. В 2017 году автор диссертации получил в составе научной группы премию И.В. Курчатова НИЦ “Курчатовский институт” за работу “Первое наблюдение процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре”.

**Личный вклад.** Автор является членом коллаборации COHERENT с 2016 года. Он лично провёл обработку и анализ данных детектора CsI[Na] за 2015–2017 годы в рамках утверждённого коллаборацией подхода — “параллельного анализа” с группой из США. Эта работа включала в себя обработку записанных АЦП установки форм сигнала, калибровку светового выхода кристалла и его стабильности. Кроме того, были введены и оптимизированы отборы, позволяющие выделить сигнал от УКРН, а также оценена эффективность этих отборов относительно сигнала. Автор лично получил экспериментальные распределения характеристик сигналов CsI[Na], позволившие сделать заключение о первом в мире наблюдении УКРН. Автор лично провёл обработку и анализ данных калибровок кристалла CsI[Na] нейтронным пучком, а также подтвердил линейность отклика использованного фотоумножителя в этом измерении. Автор лично провёл обработку и анализ полного массива данных CsI[Na] за 2015–2019 годы и получил экспериментальные распределения характеристик сигналов CsI[Na], позволившие измерить сечение процесса УКРН на ядрах атомов CsI.

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

## Содержание работы

Во **введении** приводится краткий обзор особенностей процесса, которому посвящена диссертация, — упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре. В нём обсуждается мотивация исследования УКРН, формулируется цель исследования и задачи, решаемые в рамках диссертационной работы. Также во введении сформулирована научная новизна и значимость исследования и его результатов.

**В первой главе** обсуждается суть процесса УКРН. В ней описываются предпосылки его теоретического предсказания в 1974 году [1; 2], роль этого процесса в природе, а также причины отсутствия его экспериментального наблюдения вплоть до 2017 года. В ней отмечено, что сечение УКРН выше, чем сечение взаимодействия нейтрино с ядрами посредством слабого заряженного тока и сечение рассеяния нейтрино на электронах (рисунок 1). В этой главе обсуждается, чем наблюдение УКРН и исследование его ха-

рактических характеристик интересно с точки зрения научных и прикладных исследований. Также в ней описываются характеристики перспективных с точки зрения изучения УКРН источников нейтрино, и приведён обзор экспериментов по поиску этого процесса.

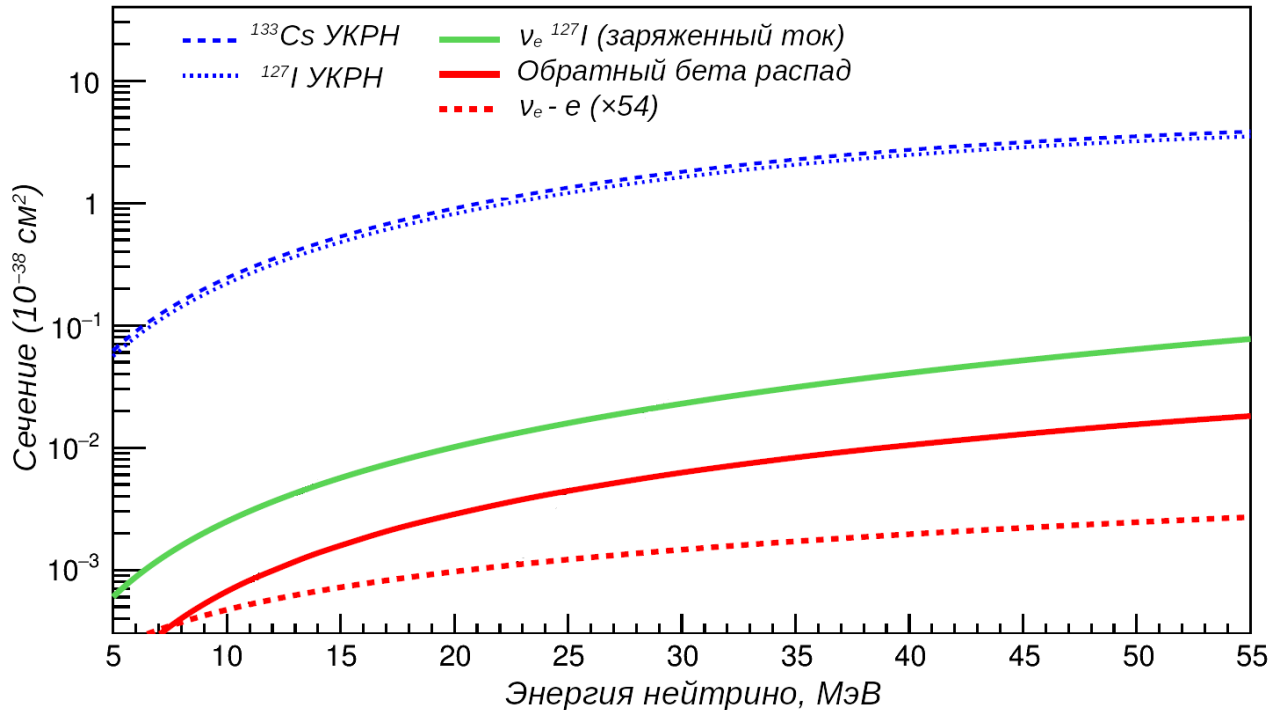


Рис. 1 — Зависимость сечения УКРН на ядрах  $^{127}\text{I}$  и  $^{133}\text{Cs}$  от энергии в сравнении с заряженным током слабого взаимодействия на  $^{127}\text{I}$  и рассеянием на среднем числе электронов атома в молекуле CsI. Сечение обратного бета-распада приведено на один протон. Рисунок аналогичен приведённому в работе [4].

**Вторая глава** посвящена коллаборации COHERENT и её экспериментальной программе. В **первом параграфе второй главы** описывается ускоритель Spallation Neutron Source (SNS) в Ок-Риджской национальной лаборатории (ORNL) США. В процессе работы этого ускорителя сгустки протонов с энергией 1 ГэВ сбрасываются с частотой 60 Гц на жидкую ртутную мишень. При взаимодействии протонов с ядрами ртути рождаются  $\pi^\pm$ -мезоны, они останавливаются внутри мишени за счёт ионизационных потерь. Отрицательные  $\pi$ -мезоны захватываются ядрами и не участвуют в рождении нейтрино,  $\pi^+$  распадаются с образованием  $\nu_\mu$  и  $\mu^+$ . Положительные мюоны распадаются с характерным временем 2.2 мкс с образованием  $\bar{\nu}_\mu$  и  $\nu_e$ . Механизм возникновения нейтрино на SNS проиллюстрирован на рисунке 2, а характеристики нейтринного потока SNS приведены на рисунке 3. Во **втором параграфе второй главы** обсуждаются детекторы

COHERENT, целью которых является исследование УКРН и реакций заряженного тока на различных ядрах. Среди них — сцинтилляционный детектор на жидком аргоне, массивы кристаллов NaI[Tl] и германиевых детекторов, а также детектор черенковского излучения на основе тяжёлой воды.

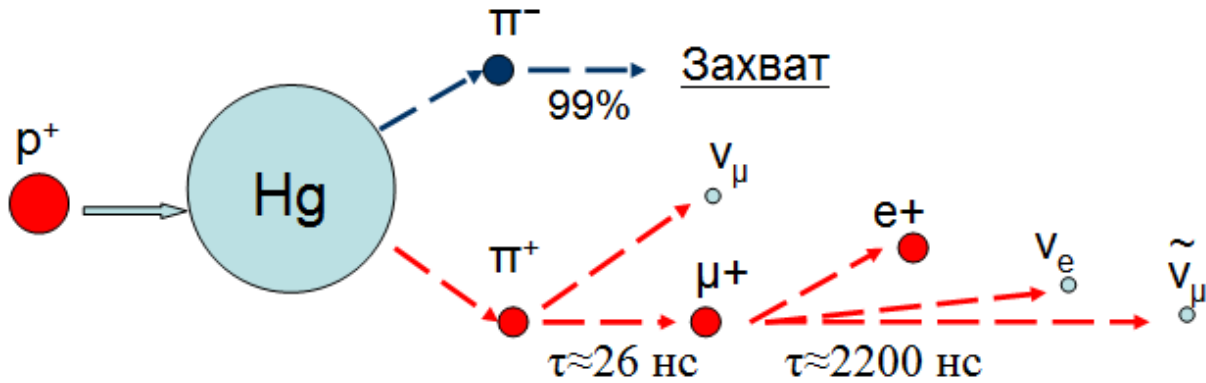


Рис. 2 — Иллюстрация рождения нейтрино в распадах пионов и мюонов на SNS.

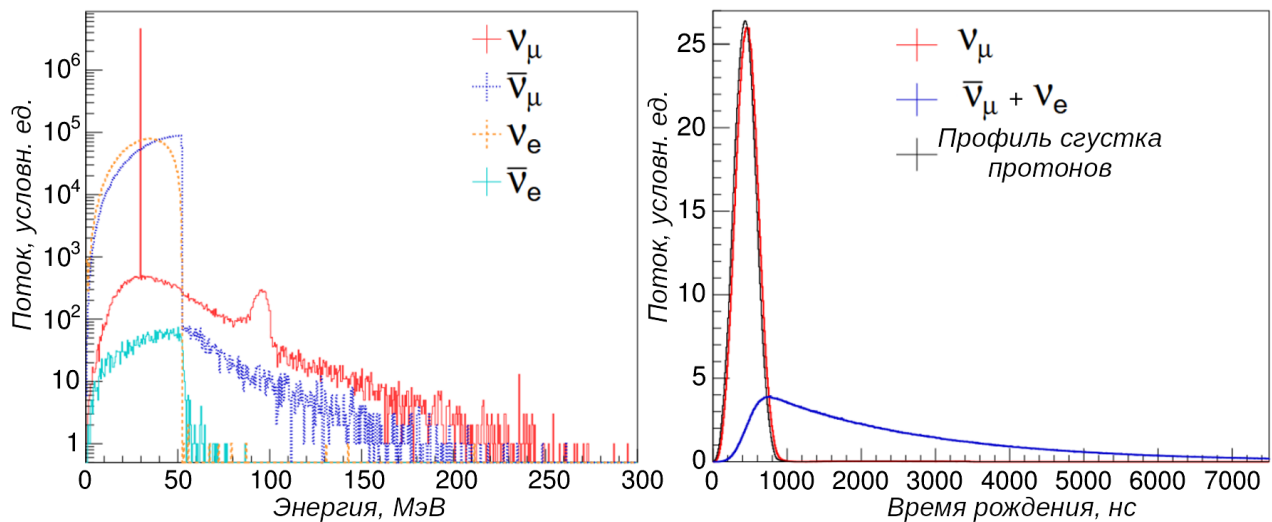


Рис. 3 — Слева: энергетический спектр нейтрино на SNS; справа: временное распределение рождения нейтрино на SNS. Из работы [26].

**Третья глава** посвящена детектору CsI[Na] на SNS. В ней описывается устройство установки и калибровка кристалла источниками  $^{241}Am$  и  $^{133}Ba$ . В **первом параграфе третьей главы** описывается кристалл CsI[Na], а также пассивная защита, в которую он помещён. Эта защита состоит из последовательных слоёв воды (9 см), свинца (10 см), низкофонового свинца (5 см) и 7.6 см слоя полиэтилена высокой плотности (рисунок 4). Между алюминиевыми формами, наполненными водой, и внешним слоем свинца расположены панели мюонного вето. В этом параграфе также приводится схема электро-



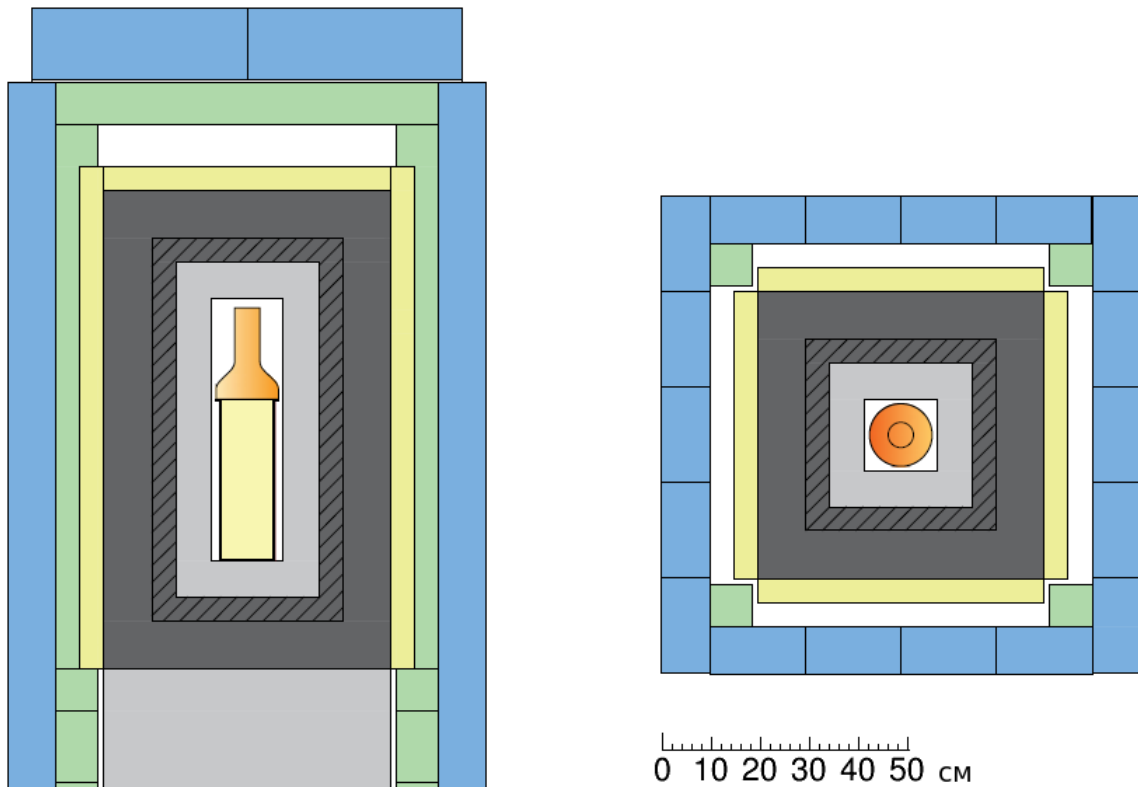


Рис. 4 — Схема детектора CsI[Na], окруженного защитой, в разрезе. Левый рисунок — вид сбоку, правый — вид сверху. Масштаб размеров составляющих соблюден. Элементы защиты: полиэтилен высокой плотности (светло-серый), низкофоновый свинец (серый, штриховка), свинец (серый), панели мюонного вето (жёлтый), алюминиевая рама (зелёный), алюминиевые формы, наполненные водой (голубой).

ники установки и обсуждается система сбора данных. Триггер установки связан с синхроимпульсом SNS, совпадающим по времени со сбросом протонов на ртутную мишень. Для каждого синхроимпульса АЦП установки записывает 70 мкс форму сигнала ФЭУ CsI[Na] и логического сигнала вето-панелей. Во втором параграфе третьей главы обсуждается калибровка светового выхода кристалла CsI[Na] при помощи линии 59.5 кэВ  $^{241}\text{Am}$ , а также однородность светосбора по длине кристалла. Абсолютное значение световыхода составляет 13.34 ф.э./кэВ при однородности в 3%. В этом параграфе также обсуждается подход к определению характерного однофотонного заряда ФЭУ кристалла CsI[Na]. В третьем параграфе третьей главы описана особая калибровка кристалла CsI[Na] при помощи комптоновского рассеяния гамма-квантов  $^{133}\text{Ba}$  на малые углы. Эта калибровка использовалась для определения эффективности накладываемых при анализе ограничений относительно малых сигналов CsI[Na].

В четвертой главе описывается анализ данных, полученных детектором CsI[Na] при экспозиции на SNS в 2015–2017 годах. В первом параграфе четвёртой главы обсуждается подтверждение временной привязки триггера установки. Оно было осуществлено при анализе времени появления сигналов мюонного вето в рамках записанных АЦП форм сигнала. Соответствующее распределение приведено на рисунке 5. На нём за-

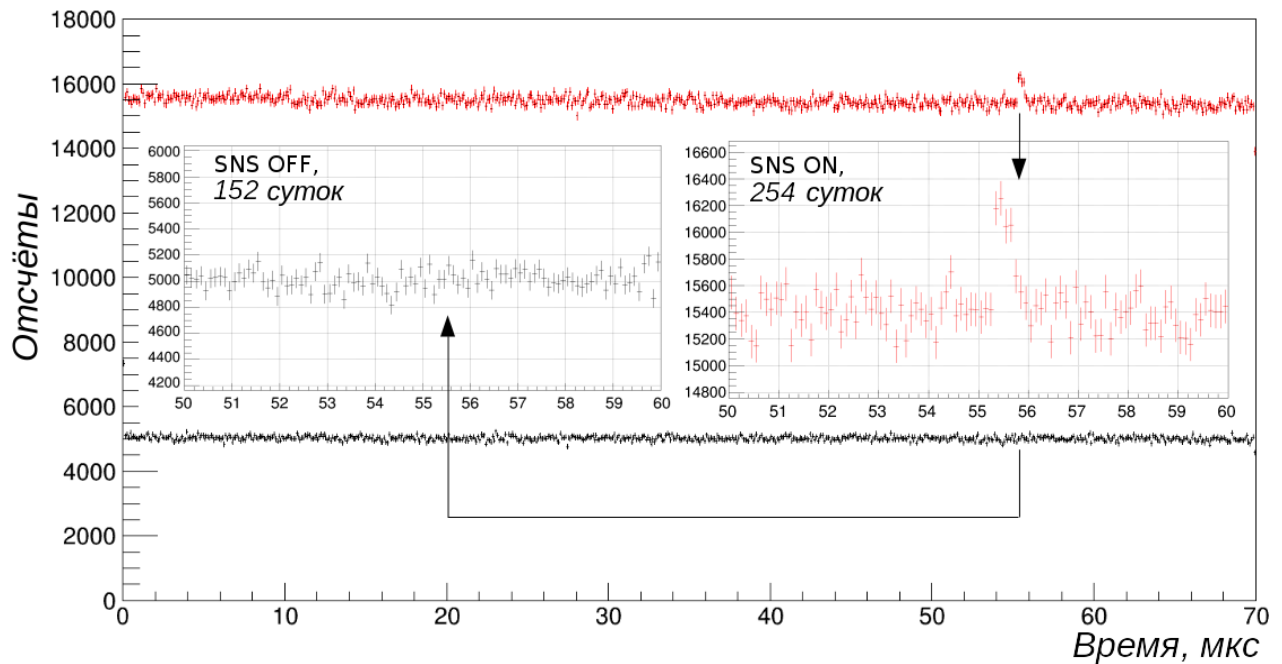


Рис. 5 — Распределение сигналов вето-системы по времени в рамках записанных АЦП форм. Красный — гистограмма для периодов работы ускорителя (254 номинальных дня набора данных), чёрный — для периодов простоя (152 дня набора). На врезках — увеличенные части распределения в области внешнего триггера (54.95 мкс).

метно повышенное число отсчётов в области около 55.5 мкс отметки — такой сигнал ожидается от взаимодействия нейтронов SNS в вето-системе установки. Он подтверждает номинальную привязку триггера АЦП по синхроимпульсу SNS. Во втором параграфе четвёртой главы приведены результаты верификации светового выхода CsI[Na] *in situ* при помощи нейтронного источника  $^{252}\text{Cf}$ , а также верификации стабильности светового выхода по линиям  $^{214}\text{Pb}$ . Результаты калибровок на SNS согласуются с результатом калибровки при помощи  $^{241}\text{Am}$  в лаборатории Чикагского университета (рисунок 6). Стабильность светового выхода в процессе набора данных на SNS, определённая по линиям  $^{214}\text{Pb}$ , составила 1.4%.

В третьем параграфе четвёртой главы обсуждаются ограничения на качество данных, полученных на SNS. В нём описаны следующие

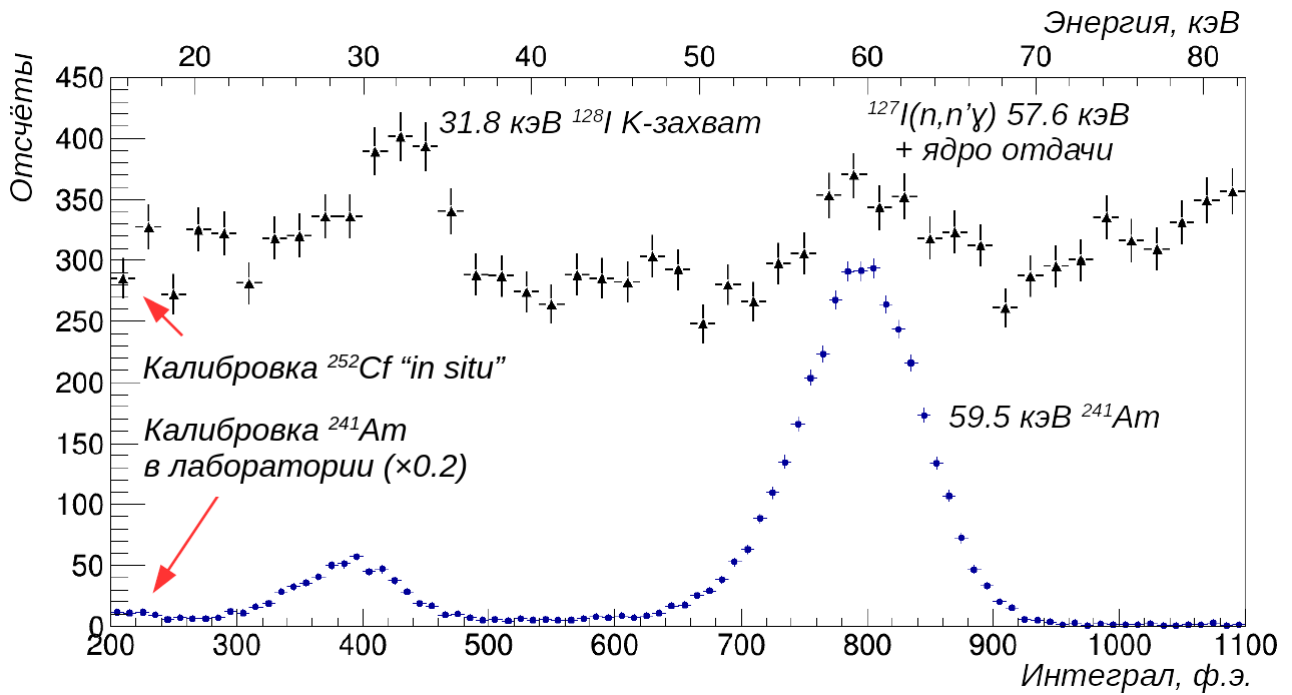


Рис. 6 — Сравнение спектров энерговыделений в CsI[Na] при калибровке  $^{241}\text{Am}$  в лаборатории Чикагского университета (синие точки) и при калибровке  $^{252}\text{Cf}$  на SNS (чёрные точки). Верхняя шкала энергий соответствует калибровке 59.5 кэВ.

причины для исключения триггера из анализа: выход сигнала за пределы диапазона оцифровки АЦП, блокировка части формы сигнала схемой линейных ворот, а также наличие импульсов вето-системы в рамках формы сигнала. **В четвёртом параграфе четвёртой главы** описан подход к анализу данных с точки зрения поиска событий УКРН. В частности в нём приводится определение областей интереса на записанных формах сигнала. Начало области  $C ROI$  совпадает с синхроимпульсом SNS, в ней ожидается сигнал от УКРН. Область  $AC ROI$  предшествует появлению синхроимпульса и позволяет оценить уровень фона. Каждой из  $ROI$  областей предшествовала соответствующая  $PT$  область, позволяющая ограничить вклад остаточной фосфоресценции кристалла в  $ROI$ . Разбиение записанных форм сигнала CsI[Na] на области проиллюстрировано на рисунке 7. **В пятом параграфе четвёртой главы** описываются отборы, позволяющие выделить события УКРН. Один из них — отбор на число импульсов ФЭУ в  $PT$ , позволяющий подавить вклад от случайного совпадения импульсов фосфоресценции. Второй — отбор на число импульсов в 3 мкс окне интегрирования в рамках  $ROI$ . В этом параграфе также обсуждается оптимизация отборов с целью увеличения чувствительности эксперимента к УКРН.

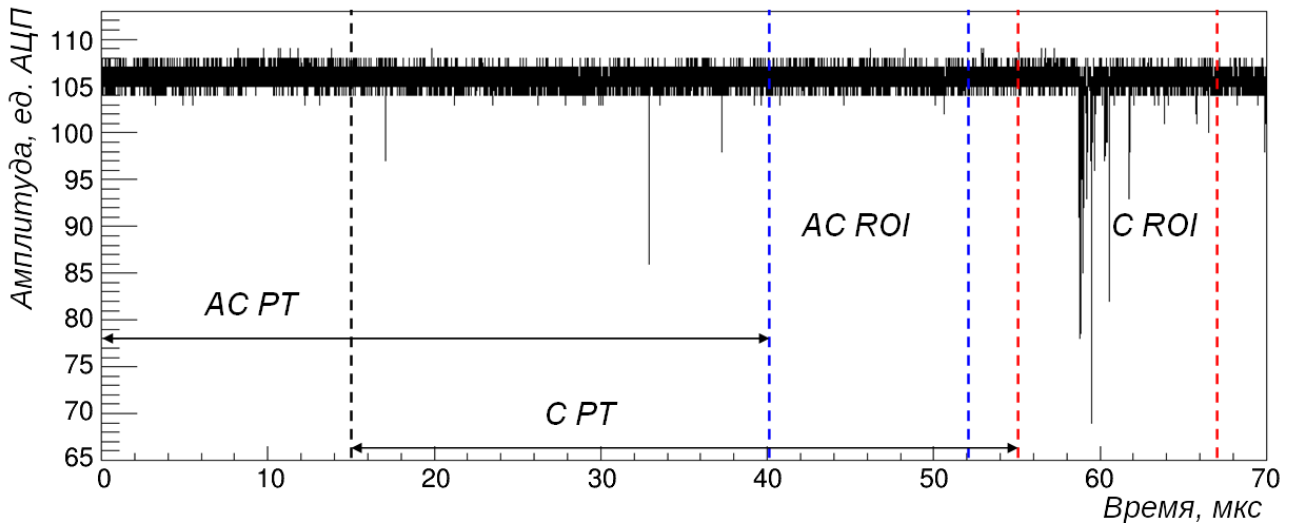


Рис. 7 — Пример записанной формы сигнала CsI[Na] на SNS. Синими и красными прерывистыми линиями обозначены границы областей  $AC ROI$  и  $C ROI$  соответственно. Стрелками указаны границы областей  $AC PT$  и  $C PT$ .

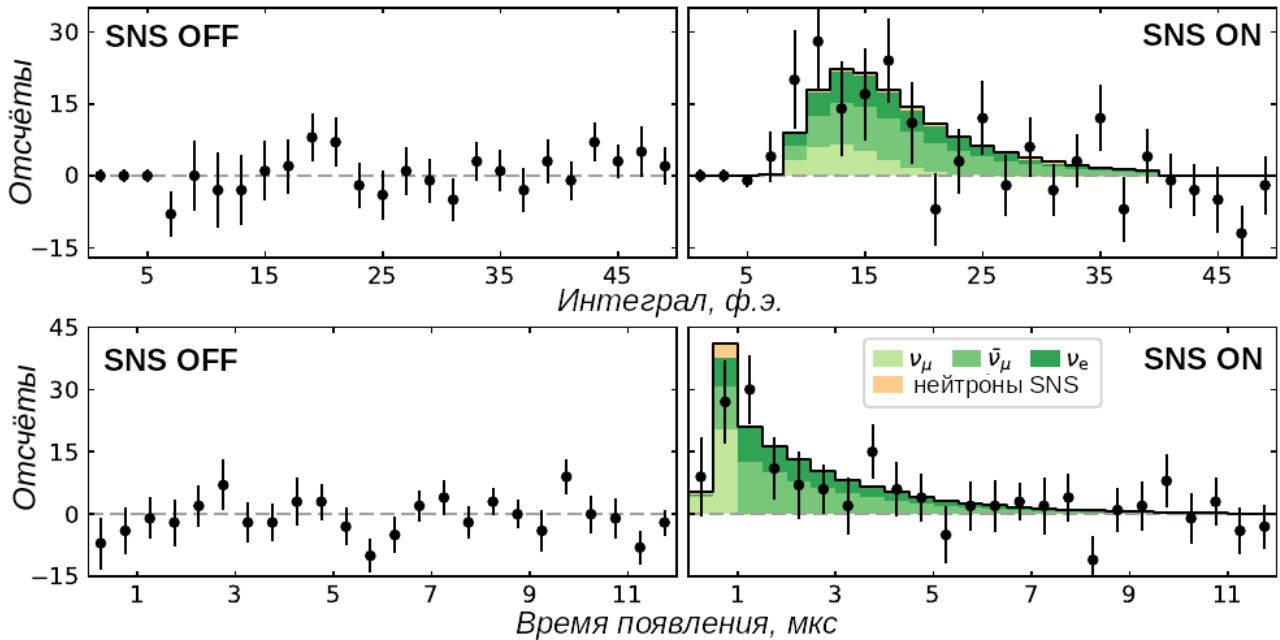


Рис. 8 — Разностные распределения для значений интегралов и времён появления сигналов в периоды работы и простоя SNS, полученные российской группой анализа.

Наконец, в шестом параграфе четвёртой главы приведены результаты анализа данных CsI[Na] на SNS в 2015–2017 годах. Спектры разности времени появления сигналов в  $C ROI$  и  $AC ROI$  и их интеграла, полученные российской группой анализа, приведены на рисунке 8. На разностных спектрах, соответствующих периодам работы SNS, заметно превышение, соответствующее сигналу от УКРН. Статистический анализ результатов российской группы показал, что лучшая оценка наблюдаемого числа событий УКРН составила  $132 \pm 22$ , она согласуется с оценкой скорости счёта на ос-

нове Стандартной модели —  $152 \pm 43$ . Значимость наблюдения, вычисленная на основе результатов российской группы, составила  $7.2\sigma$ . На спектрах, соответствующих простому ускорителю, такого превышения числа отсчётов в  $C ROI$  над  $AC ROI$  не наблюдается. Эти результаты, в совокупности с результатами группы из США, позволили сделать заключение о первом в мире экспериментальном наблюдении УКРН.

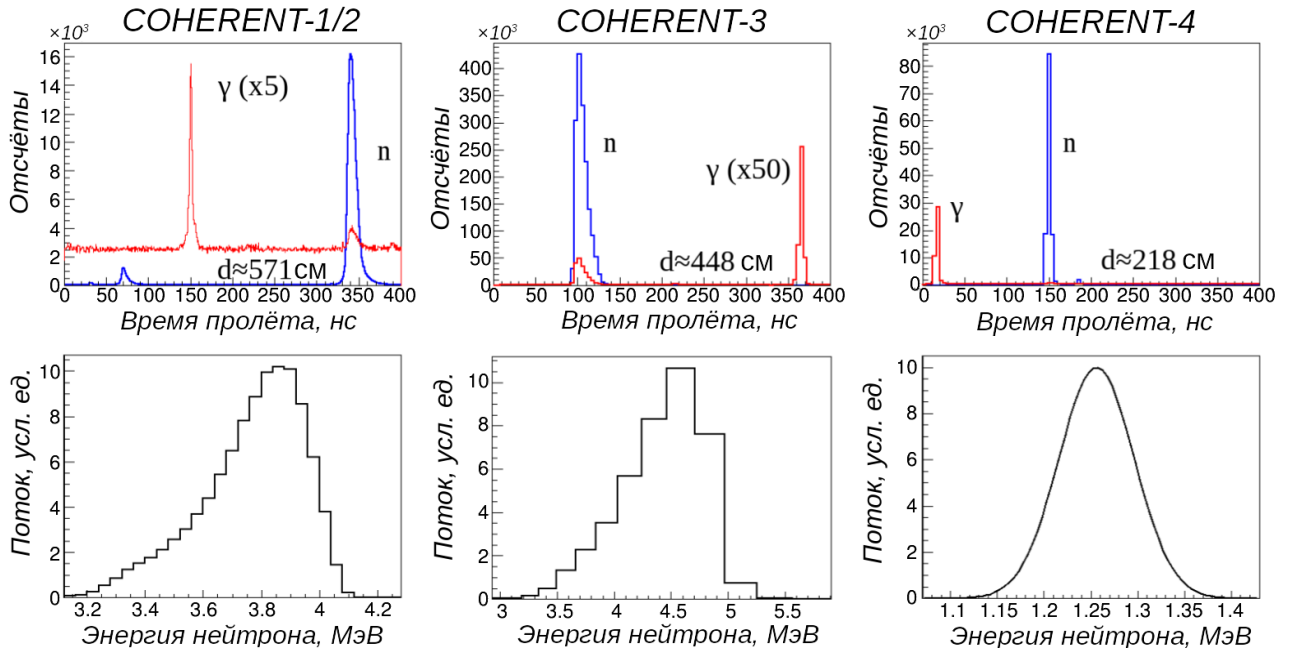


Рис. 9 — Распределения времени пролёта и энергий нейтронов в измерениях отклика CsI[Na] на ядра отдачи. Верхний ряд — время пролёта, определённое относительно синхроимпульса пучка. Красный — сигналы от гамма-квантов, синий — от нейтронов, “d” — расстояние от источника нейтронов до детектора EJ-309. Нижний ряд — распределения энергий нейтронов в измерениях COHERENT.

**Пятая глава** посвящена уточнению отклика CsI[Na] на ядра отдачи с энергией от 3 до 63 кэВ. Именно его неопределённость обусловила доминирующий 25% вклад в неопределённость предсказания числа событий УКРН в данных 2015–2017 годов. В **первом параграфе пятой главы** обсуждаются нейтронные пучки Triangle University Nuclear Laboratory (TUNL), использовавшиеся для калибровок небольшого ( $14.5 \text{ см}^3$ ) кристалла CsI[Na] в 2016–2018 годах. Именно при таких калибровках определяется отклик кристалла на ядра отдачи, возникающие при рассеянии нейтронов пучка. Верификация энергии нейтронов была проведена на основе их времени пролёта до ячейки с жидким органическим сцинтиллятором. Результат определения характеристик нейтронов в каждом из четырёх измерений приведён на рисунке 9. Во **втором параграфе пятой главы** обсуждаются экспери-

ментальные установки, использованные в каждой из четырёх калибровок, а в третьем параграфе пятой главы описана калибровка энергетической шкалы кристалла CsI[Na] при помощи гамма-квантов 59.5 кэВ  $^{241}\text{Am}$  и её верификация по 57.6 кэВ гамма-линии от  $^{127}\text{I}(n,n'\gamma)$ .

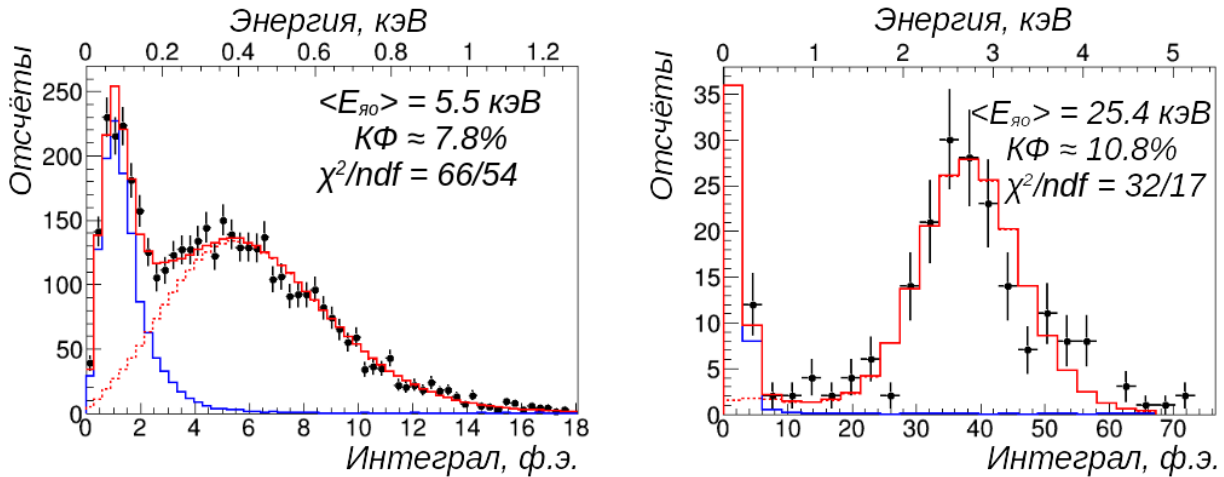


Рис. 10 — Отклик CsI[Na] на ядра отдачи в измерении СОHERENT-1 и результат аппроксимации (красная сплошная линия). Вклады ядер отдачи и фона в модель обозначены штрихованными красной и синей линиями соответственно. Слева — спектр, соответствующий углу рассеяния нейтронов 25.1°, справа — углу 55.8°.

Четвёртый и пятый параграфы пятой главы описывают повторный анализ измерений СОHERENT-1 и СОHERENT-2. Эти измерения были проведены в 2016 году, первая версия анализа каждого из них представлена в работах членов коллаборации [27; 28]. Расхождение между результатами первого анализа СОHERENT-1 и СОHERENT-2 составило около 30% в области от 3 до 17 кэВ. Автор данной диссертации провёл повторный анализ этих измерений. Оригинальный результат СОHERENT-1 был воспроизведён в повторном анализе, а результат СОHERENT-2 не удалось воспроизвести. Результат обновлённого анализа СОHERENT-2 отличался от СОHERENT-1 лишь на 10%. Пример отклика CsI[Na] на ядра отдачи, полученный при повторном анализе данных СОHERENT-1, приведён на рисунке 10. С целью дальнейшего уточнения отклика CsI[Na] на ядра отдачи было проведено измерение СОHERENT-3, оно обсуждается в шестом параграфе пятой главы. Энергия ядер отдачи в нём — 17 кэВ, близка максимальной энергии ядер отдачи, для которой есть данные и СОHERENT-1, и СОHERENT-2. Результаты СОHERENT-3 подтвердили результат СОHERENT-1. Наконец, в седьмом параграфе пятой главы

описывается измерение COHERENT-4. Если в измерениях COHERENT-1/2/3 угол рассеяния нейтрона позволял фиксировать энергию ядра отдачи из кинематических соображений, в COHERENT-4 измерялся полный спектр ядер отдачи — результат рассеяния нейтронов на все возможные углы. Этот спектр аппроксимировался различными моделями зависимости отклика CsI[Na] на ядра отдачи от энергии. Три рассматриваемые модели этой зависимости: модель на основе COHERENT-1, модель на основе измерений из работы [29], а также модель на основе оригинального анализа данных COHERENT-2 [27]. Именно модель на основе COHERENT-1 показала лучшее соответствие данным COHERENT-4.

В восьмом параграфе пятой главы подробно обсуждается аппроксимация доступных данных об отклике CsI[Na] на ядра отдачи [29–32] (рисунок 11). Результат аппроксимации зависимости этого отклика от энергии ядра отдачи описывается полиномом четвёртой степени:

$$E_{\text{вид}}(E_{\text{яо}}) = 0.05546 \times E_{\text{яо}} + 4.307 \times E_{\text{яо}}^2 - 111.7 \times E_{\text{яо}}^3 + 840.4 \times E_{\text{яо}}^4, \quad (1)$$

где  $E_{\text{вид}}$  — видимый отклик кристалла в единицах МэВ эквивалента электронов отдачи, а  $E_{\text{яо}}$  — энергия ядра отдачи в мегаэлектронвольтах. Неопределённость определения сечения УКРН на CsI, связанная с неопределённостью результата аппроксимации, составила 4%. Это гораздо меньше, чем 25% в 2017 году, и меньше, чем статистическая погрешность результата измерения сечения на полном наборе данных CsI[Na]. В девятом параграфе пятой главы обсуждается публикация данных измерений отклика CsI[Na] на ядра отдачи [33;34], подготовленная автором данной диссертации. Она позволяет обеспечить верифицируемость результата.

В шестой главе обсуждается измерение сечения УКРН на ядрах CsI на основе полной экспозиции детектора CsI[Na] на SNS в 2015–2019 годах. В первом параграфе шестой главы рассматриваются изменения, внесённые в процедуру анализа, и причины этих изменений. Среди этих изменений: корректировка порога отбора импульсов ФЭУ, корректировка базы данных мощности работы ускорителя, дополнение модели разрешения CsI[Na] в области низких энергий, определение временной эффективности процедуры анализа. Кроме того, в этой части обсуждаются дополнительные ограничения, позволяющие исключить вклады в  $ROI$  сигналов, про-

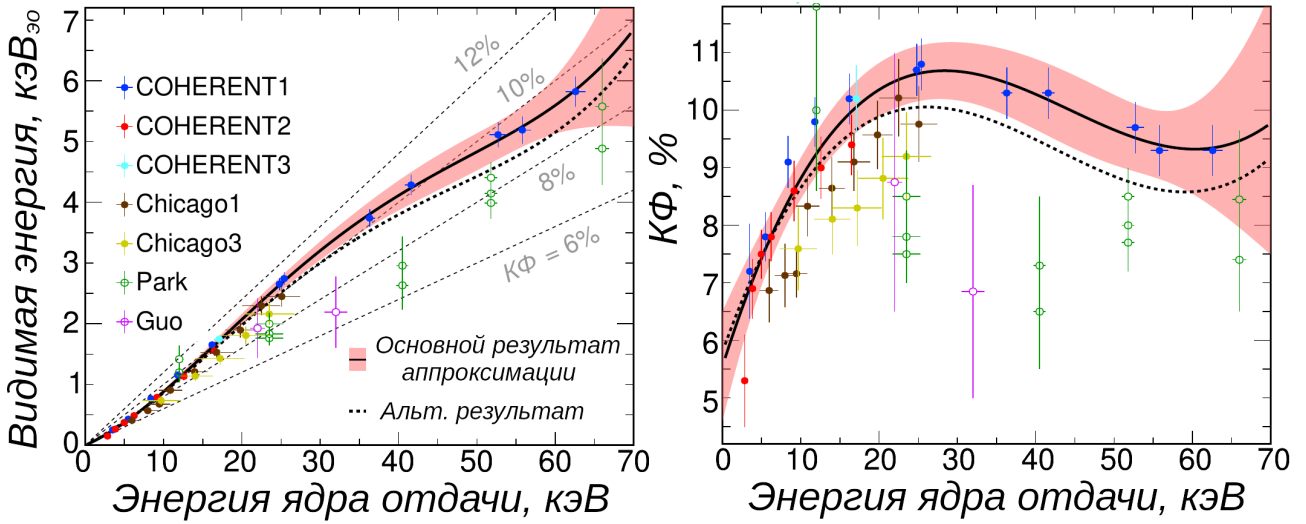


Рис. 11 — Результаты измерений отклика CsI[Na] на ядра отдачи с результатом аппроксимации и доверительным интервалом. Мы описываем кривую видимой энергии (слева), а также приводим эквивалентную зависимость для квенчинг фактора (справа). Результаты с выколотыми точками не были использованы при аппроксимации. Жирная штрихованная линия соответствует альтернативному подходу к аппроксимации, включающему данные [30; 31] и 3% неопределённость  $E_{яо}$  в данных из работы [29].

исходящих в конце  $PT$  и сигналов, отвечающих случайным совпадениям импульсов остаточной фосфоресценции в рамках окна интегрирования. Во **втором параграфе шестой главы** проговаривается процедура аппроксимации экспериментальных спектров из  $C ROI$  моделью на основе данных из  $ACROI$ . Наконец, в **третьем параграфе шестой главы** приводится результат анализа данных полной статистики CsI[Na] на SNS (рисунок 12). Из-

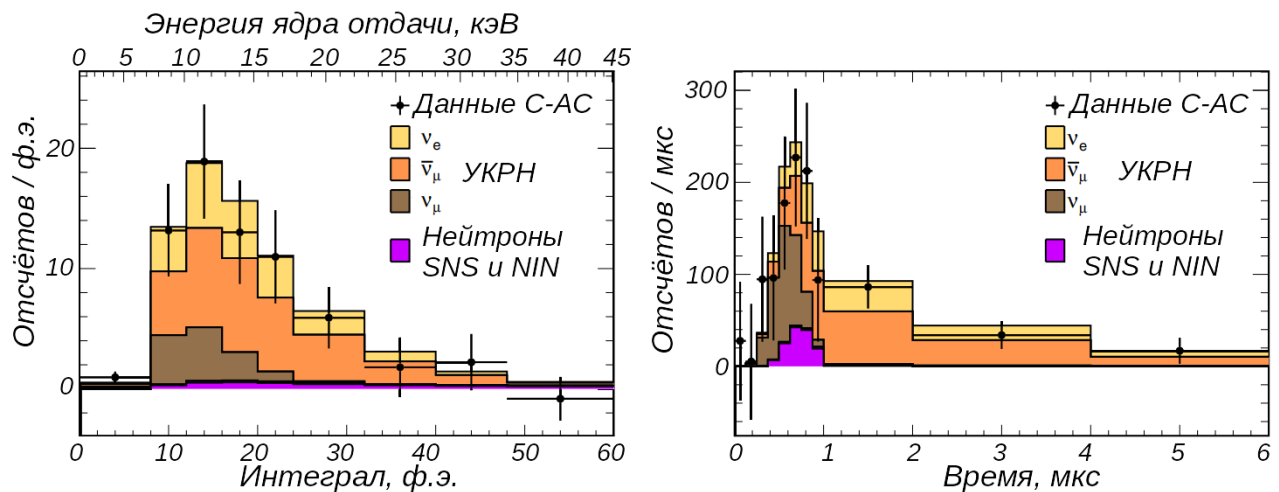


Рис. 12 — Сравнение результата аппроксимации двумерного распределения сигналов из  $CROI$  (вклад постоянного фона вычтен) с эмпирической разностью  $C - AC$  для сигналов с интегралом менее 60 ф.э. и временем начала менее 6 мкс.

меренное число наблюдаемых событий УКРН равно  $306 \pm 20$ , оно согласуется



с оценкой ожидаемого на основе Стандартной модели числа —  $341 \pm 43$ . Измеренная величина сечения УКРН, усреднённого по вкладу ядер  $Cs$  и  $I$  —  $(165_{-25}^{+30}) \times 10^{-40} \text{ см}^2$ . Оно также согласуется с предсказанием Стандартной модели  $(189 \pm 6) \times 10^{-40} \text{ см}^2$  (рисунок 13). Значимость наблюдения УКРН составила  $11.6\sigma$ . На момент подготовки диссертации это измерение является наиболее точным в мире и единственным со значимостью выше  $5\sigma$ .

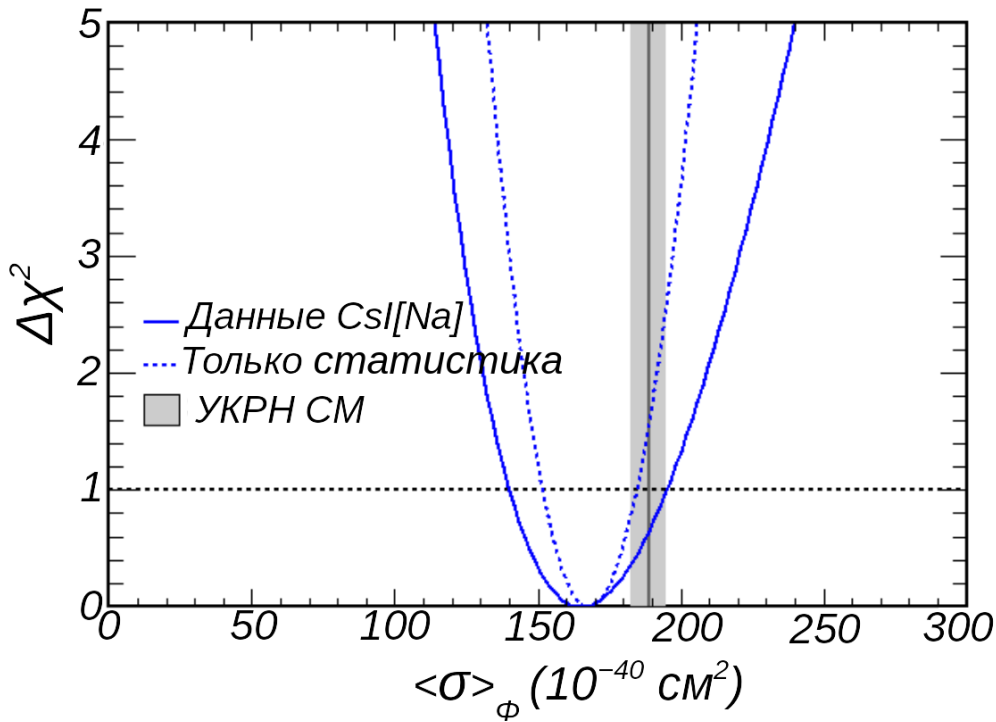


Рис. 13 — Профили  $\Delta\chi^2$  для значения усреднённого по потоку SNS сечения, полученные в процессе аппроксимации. Предсказание Стандартной модели с неопределённостью, связанной со значением ядерного форм-фактора, отмечено серым цветом.

В **заключении** перечислены основные результаты работы:

1. На основе обработки и анализа данных, полученных детектором CsI[Na] на SNS в 2015-2017 годах, было сделано заключение о первой в мире регистрации УКРН на ядре атома. Значимость результата составила  $7\sigma$ .
2. На основе обработки и анализа полного набора данных, полученного детектором CsI[Na] на SNS в 2015–2019 годах, было определено усреднённое по энергии нейтрино SNS сечение УКРН на ядрах CsI. Его величина составила  $(165_{-25}^{+30}) \times 10^{-40} \text{ см}^2$ .

В **Приложение А** вынесено описание алгоритма поиска и параметризации импульсов ФЭУ на записанных формах сигнала CsI[Na].

В Приложении Б обсуждается измерение нейтронного фона, коррелированного со сбросом пучка на SNS, и ограничение вклада этого фона в область *C ROI*. Приложение В посвящено некоторым методологическим вопросам измерения отклика CsI[Na] на ядра отдачи низких энергий. В Приложении Г рассматривается вопрос о линейности отклика ФЭУ H11934-200 в экспериментах COHERENT-1/2/3/4. Тесты, проведённые в НИЯУ МИФИ при участии автора диссертации, подтвердили линейность отклика этого ФЭУ на масштабе светового сигнала CsI[Na] от 59.5 кэВ гамма-квантов  $^{241}\text{Am}$ . Тем самым была опровергнута гипотеза о влиянии нелинейности ФЭУ на результаты измерения отклика CsI[Na] на ядра отдачи, предложенная в работе [29]. Приложение Д посвящено анализу влияния модели однофотоэлектронного спектра ФЭУ на оценку величины абсолютного светового выхода кристалла. В нём показано, что модель на основе распределения Гаусса в ряде случаев может приводить к смещению оценки светового выхода, а зависимость этой оценки от напряжения питания ФЭУ не должна использоваться для определения линейности фотоумножителя.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *Akimov, D., Konovalov A. et al.* Measurement of scintillation response of CsI[Na] to low-energy nuclear recoils by COHERENT // *JINST.* — 2022 — Vol. 17, P10034  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/10/P10034>
2. *Akimov, D., Konovalov A. et al.* Measurement of the Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering Cross Section on CsI by COHERENT // *Physical Review Letters* — 2022 — Vol. 129, 081801 <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.129.081801>
3. *Akimov, D.Yu., Konovalov A. M. et al.* Coherent elastic neutrino scattering on atomic nucleus: recently discovered type of low-energy neutrino interaction // *Physics-Uspekhi* — 2019 — Vol. 62, p. 166-178  
<https://ufn.ru/ru/articles/2019/2/c/>
4. *Akimov, D., Konovalov A. et al.* Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering // *Science.* — 2017 — Vol. 357, p.1123-1126  
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aao0990>

## Список литературы

1. *Friedman D.* Coherent effects of a weak neutral current // *Physical Review D.* — 1974. — Vol. 9, no. 5. — Pp. 1389–1392.  
<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.9.1389>.
2. *Копелиович В.Б. и Франкфурт Л.Л.* Изотопическая и киральная структура нейтрального тока // *Письма в ЖЭТФ.* — 1974. — Т. 19. — С. 236. [http://jetpletters.ru/ps/1776/article\\_27044.shtml](http://jetpletters.ru/ps/1776/article_27044.shtml).
3. *Lindner M. et al.* Coherent neutrino-nucleus scattering and new neutrino interactions // *Journal of High Energy Physics.* — 2017.  
[https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP03\(2017\)097](https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP03(2017)097).
4. *Akimov D., Konovalov A. et al.* Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering // *Science.* — 2017. — Vol. 357.  
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aao0990>.
5. *Akimov D.Yu., Konovalov A.M. et al.* Coherent elastic neutrino scattering on atomic nucleus: recently discovered type of low-energy neutrino interaction // *Physics-Uspexhi.* — 2019. — Vol. 62.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.3367/UFNe.2018.05.038356>.
6. *Akimov D. et al.* COHERENT 2018 at the Spallation Neutron Source // *arXiv.* — 2018. <https://arxiv.org/abs/1803.09183>.
7. *Barranco J. et al.* Probing new physics with coherent neutrino scattering off nuclei // *Journal of High Energy Physics.* — 2005. — Vol. 2005. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1126-6708/2005/12/021>.
8. *Dutta B. et al.* Sensitivity to Z-prime and nonstandard neutrino interactions from ultralow threshold neutrino-nucleus coherent scattering // *Physical Review D.* — 2016. — Vol. 93. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.93.013015>.
9. *Kosmas T.S. et al.* Probing neutrino magnetic moments at the Spallation Neutron Source facility // *Physical Review D.* — 2015. — Vol. 92. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.92.013011>.

10. *Giunti C., Studenikin A.* Neutrino electromagnetic interactions: A window to new physics // *Reviews of Modern Physics*. — 2015. — Vol. 87. <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.87.531>.
11. *Krauss L.M.* Low-energy neutrino detection and precision tests of the standard model // *Physics Letters B*. — 1991. — Vol. 269. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/037026939190192S>.
12. *Amanik P.S., C. McLaughlin G.* Nuclear neutron form factor from neutrino–nucleus coherent elastic scattering // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2009. — Vol. 36, no. 1. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/36/1/015105>.
13. *Patton K. et al.* Neutrino-nucleus coherent scattering as a probe of neutron density distributions // *Physical Review C*. — 2012. — Vol. 86. <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.86.024612>.
14. *Billard J.* Implication of neutrino backgrounds on the reach of next generation dark matter direct detection experiments // *Physical Review D*. — 2014. — Vol. 89. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.89.023524>.
15. *Akimov D. et al.* Sensitivity of the COHERENT experiment to accelerator-produced dark matter // *Physical Review D*. — 2020. — Vol. 102.
16. *Anderson A.J. et al.* Measuring active-to-sterile neutrino oscillations with neutral current coherent neutrino-nucleus scattering // *Physical Review D*. — 2012. — Vol. 86. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.86.013004>.
17. *Dutta B. et al.* Sensitivity to oscillation with a sterile fourth generation neutrino from ultralow threshold neutrino-nucleus coherent scattering // *Physical Review D*. — 2016. — Vol. 94. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.94.093002>.
18. *Kosmas T.S. et al.* Probing light sterile neutrino signatures at reactor and Spallation Neutron Source neutrino experiments // *Physical Review D*. —

2017. — Vol. 96. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.96.063013>.
19. *Barbue P.S. et al.* Towards coherent neutrino detection using low background micropattern gas detectors // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. — 2003. — Vol. 50. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1237112>.
  20. *Hagmann C. u Bernstein A.* Two-phase emission detector for measuring coherent neutrino-nucleus scattering // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. — 2004. — Vol. 51. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1344300>.
  21. *Bernstein A. et al.* Colloquium: Neutrino detectors as tools for nuclear security // *Reviews of Modern Physics*. — 2020. — Vol. 92. <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.92.011003>.
  22. *Friedman D. et al.* The weak neutral current and its effects in stellar collapse // *Annual Review of Nuclear Science*. — 1977. — Vol. 27. — Pp. 167–207. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.ns.27.120177.001123>.
  23. *Bethe H.A.* Supernova mechanisms // *Reviews of modern physics*. — 1990. — Vol. 62. — Pp. 801–866. <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.62.801>.
  24. *Balasi K.G. et al.* Neutrino–nucleus reactions and their role for supernova dynamics and nucleosynthesis // *Progress in particle and nuclear physics*. — 2015. — Vol. 85. — Pp. 33–81. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0146641015000654>.
  25. *Akimov D. et al.* First Measurement of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering on Argon // *Physical Review Letters*. — 2021. — Vol. 126. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.126.012002>.
  26. *Akimov D. et al.* The COHERENT Experimental Program // *arXiv*. — 2022. <https://arxiv.org/abs/2204.04575>.

27. *Shcolz B.J.* First observation of neutrino coherent elastic neutrino-nucleus scattering. — 2017. <https://www.springer.com/us/book/9783319997469>.
28. *Rich G.C.* Measurement of low-energy nuclear-recoil quenching factors in CsI[Na] and statistical analysis of the first observation of coherent, elastic neutrino-nucleus scattering. — 2017. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017PhDT.....132R>.
29. *Collar J. I. et al.* Response of CsI[Na] to nuclear recoils: Impact on coherent elastic neutrino-nucleus scattering // *Physical Review D*. — 2019. — Vol. 100. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.100.033003>.
30. *Park H. et al.* Neutron beam test of CsI crystal for dark matter search // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. — 2002. — Vol. 491. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900202012743>.
31. *Guo C. et al.* Neutron beam tests of  $CsI(Na)$  and  $CaF_2(Eu)$  crystals for dark matter direct search // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. — 2016. — Vol. 818. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216002047>.
32. *Akimov D., Konovalov A. et al.* Measurement of scintillation response of CsI[Na] to low-energy nuclear recoils by COHERENT // *JINST*. — 2022. — Vol. 17. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/10/P10034>.
33. *Newby J., Konovalov A.* COHERENT Collaboration data release from the measurements of CsI[Na] response to nuclear recoils. — 2023. <https://doi.ccs.ornl.gov/ui/doi/426>.
34. *Akimov D., Konovalov A. et al.* COHERENT Collaboration data release from the measurements of CsI[Na] response to nuclear recoils // *arXiv*. — 2023. <https://arxiv.org/abs/2307.10208>.