

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН, профессора Сереброва Анатолия Павловича на диссертацию Коновалова Алексея Михайловича «Обнаружение процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре и определение его сечения на ядрах Cs и I», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Диссертационная работа Коновалова А.М. посвящена экспериментальному наблюдению упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН) на ядрах кристалла CsI, используемого в эксперименте для детектирования. В принципе, эффект когерентного рассеяния представляется возможным, но для нейтрино ранее не наблюдался и впервые обсуждался в 1974 году. Суть эффекта усиления сечения рассеяния состоит в когерентном сложении амплитуд рассеяния на отдельных нуклонах и тем самым проявляется в квадратичной зависимости сечения от числа (в основном) нейтронов в ядре. Сложность наблюдения упругого когерентного рассеяния нейтрино связана с малостью переданной ядру энергии, что в значительной степени сдерживало экспериментальное наблюдение эффекта упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. В диссертационной работе Коновалова А.М. представлено наблюдение эффекта упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах, которое было сделано впервые. Успех был достигнут благодаря достаточно большой энергии нейтрино, которые были получены на ускорителях в распадах пионов и мюонов, а также благодаря импульсному режиму процесса измерений. Актуальность эксперимента определяется в первую очередь задачей продемонстрировать упругое когерентное рассеяние нейтрино и затем при достижении достаточной точности пытаться проводить сравнение измеренных параметров этого процесса с теоретическими предсказаниями. В этом состоит перспектива фундаментальной значимости исследования данного явления для физики. В принципе, имеются также перспективы применения упругого когерентного рассеяния нейтрино в реакторных задачах прикладного характера в случае развития экспериментальных методик. В этой связи тема диссертационной работы Коновалова А.М. является актуальной и имеет фундаментальное и практическое значение.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, пяти приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 169 страниц, в ней имеется 87 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 194 наименования.

**Введение** содержит краткий обзор процесса, упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре. Обсуждается: проблема экспериментального исследования УКРН, актуальность темы, цель данной работы, основные результаты, выносимые на защиту, научная новизна, апробация работы, личный вклад, публикации. Большинство из этих положений представлены также в заключении.

**Первая глава** посвящена упругому когерентному рассеянию нейтрино на ядре.

Дается анализ теоретической формулы для сечения УКРН. Проводится сравнение сечения УКРН на ядрах от энергии нейтрино с сечением обратного бета-распада на протоне и сечением рассеяния на электронах. Демонстрируется, что сечение УКРН приблизительно на два-три порядка величины превышает вышеупомянутые сечения. Обсуждаются исторические этапы развития представлений об УКРН.

Актуальность исследований обсуждается как с точки зрения возможности поиска новой физики, так и прикладных применений. Сравнительный анализ реакторных и ускорительных источников нейтрино необходим для выбора оптимальной схемы эксперимента на ускорителе.

Представлен обзор экспериментов по поиску УКРН, который позволяет судить о широте различных попыток обнаружить УКРН и большую конкуренцию в решении этой экспериментальной задачи.

**Вторая глава** посвящена эксперименту COHERENT и коллаборации COHERENT, в рамках которой была выполнена данная работа. В коллаборацию входит двадцать одна организация. Из них семнадцать представляют США, две — Россию (НИЯУ “МИФИ”, ККТЭФ НИЦ КИ), по одной — Южную Корею и Канаду.

Данная глава необходима для полного представления о условиях проведения эксперимента и возможностях всего экспериментального комплекса начиная от описания процесса производства нейтрино на ускорителе до целой серии экспериментов по поиску УКРН. Без подробного описания структуры нейтринного импульса ускорительного комплекса SNS дальнейшее изложение эксперимента является невозможным и этому вопросу уделено достаточное внимание. В результате в диссертации представлен энергетический спектр нейтрино на SNS и распределение времени рождения нейтрино на SNS относительно начала сброса пучка протонов на мишень.

Детектор CsI[Na], которому посвящена диссертационная работа, является одним из шести экспериментов по поиску УКРН на ускорителе SNS. В этой главе диссертации дано краткое описание других экспериментальных установок, которое позволяет получить более полное представление о всей программе исследований по поиску УКРН и о соотношении скорости счёта и энергии отдачи в различных экспериментах.

**Третья глава** диссертации посвящена детектору CsI[Na]. Эта часть диссертации и последующие главы заслуживают особого внимания, т.к. отражают непосредственное участие А.М. Коновалова в коллаборации COHERENT, членом которой он является.

В третьей главе представлено описание основных элементов установки, общей схемы и характеристик отдельных частей. Значительная часть этой главы посвящена энергетической калибровке детектора и исследованию его временных характеристик. Энергетическая калибровка проводилась при помощи источника  $^{241}\text{Am}$  по энергетической линии 59.5 кэВ. Такое детальное исследование детектора позволяет с достаточным пониманием происходящих процессов переходить к его использованию в эксперименте по поиску когерентного рассеяния нейтрино.

**В четвертой главе** описывается первая регистрация УКРН на SNS.

Важнейшей частью эксперимента является синхронизация работы установки с временным режимом работы ускорителя. Наблюдение сигнала от нейтронов в вето-панелях позволило



подтвердить совпадение времени прихода синхроимпульса SNS на АЦП и момента сброса протонов на мишень.

Проверка абсолютного значения светового выхода была выполнена при помощи источника нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ . Для калибровки использовалась неупругая реакция ( $n, n'\gamma$ ) на  $^{127}\text{I}$  с энергией гамма-кванта 57.6 кэВ, которая близка к линии 59.5 кэВ от  $^{241}\text{Am}$ . Отклик детектора на 57.6 кэВ хорошо согласуется с откликом на 59.5 кэВ по  $^{241}\text{Am}$ , измеренному при лабораторной калибровке. Стабильность светового выхода кристалла детектора была проверена по линиям гамма-квантов с энергиями 242, 295 и 352 кэВ свинца  $^{214}\text{Pb}$  из радоновой цепочки распада.

В этой главе обсуждаются критерии качества при отборе данных. В целом ограничения исключают из анализа 2–3% триггеров. Подход к анализу данных и оптимизация отбора событий обсуждаются прежде, чем переходить к наиболее важной части - результатам измерений. Сравнение результатов измерений с включённым и выключенным ускорителем позволило выделить искомый эффект упругого когерентного рассеяния нейтрино. Далее был проделан статистический анализ данных: как энергетических спектров, так и времён появления сигналов. Именно, на этом этапе удалось выделить эффект УКРН.

**Пятая глава** диссертации посвящена измерению квенчинг фактора ядер отдачи в CsI[Na]. Дело в том, что световой выход сцинтиллятора зависит от энергии и типа частицы, которая регистрируется. Калибровка детектора была сделана по гамма квантам, а сигнал УКРН регистрируется по ядрам отдачи. Поэтому была проделана тщательная работа по измерению квенчинг фактора ядер отдачи в CsI[Na], используя эффект отдачи при рассеянии нейтронов. Спектры гамма квантов  $^{241}\text{Am}$  и при облучении кристалла нейтронным пучком сравнивались. Проводились измерения зависимости квенчинг фактора от энергии ядра отдачи. В этой главе представлен сравнительный анализ результатов измерений в целом ряде экспериментов: COHERENT-1/2/3/4. Наиболее точные и в наиболее широком энергетическом диапазоне измерения были проведены в эксперименте COHERENT-1. Исследование энергетической зависимости квенчинг фактора явилось очень важным для корректного восстановления спектра УКРН.

**Шестая глава** посвящена обработке и анализу полной статистики эксперимента. Важно отметить, что анализ был проведён на основе разработок российской группы. Результатом этой работы стало измерение сечения УКРН на ядрах Cs и I.

Эта глава содержит целый набор подробных обсуждений обработки данных и завершается анализом результатов. Анализ полученных результатов являются наиболее важной частью работы и заслуживает пристального внимания. Эти результаты показаны в таблице 6.2 и на рис. 6.16. Без наглядного представления результатов в отзыве и их только словесное обсуждение было бы недостаточным, поэтому ниже показана таблица и рисунок из диссертационной работы. В данном случае задача оппонента состоит в признании наблюдения упругого когерентного рассеяния нейтрино и подтверждении уровня достоверности наблюдаемого явления.

Наблюдаемый эффект упругого рассеяния представлен энергетическим и временным спектром, что является обязательным для полного описания данного явления. Задача

эксперимента состояла в выделении очень слабого сигнала от ядра отдачи при рассеянии нейтрино при фоне, многократно превышающим ожидаемый эффект. Соотношение эффект – фон составляет 25%, а энергия ядер отдачи составляет всего 10 – 30 кэВ. Таблица 6.2 и рис. 6.16. демонстрируют то, что данная задача успешно решена и эффект упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах наблюден. В шестой главе диссертации формулируется, что значимость наблюдения УКРН для полной статистики составила  $11.6\sigma$ , а наблюдаемое число событий УКРН  $306 \pm 20$  не противоречит расчётам:  $341 \pm 11$ (теор.)  $\pm 41$ (эксп). Таким образом, заключение о первой в мире регистрации УКРН на ядре атома, сделанное на основе данных, полученных детектором CsI[Na] на SNS в 2015-2017 годах, было подтверждено при анализе более чем в 2 раза большей статистики эксперимента. Значимость регистрации возросла с увеличением статистики.

Таблица 6.2

Результаты измерения УКРН на полной статистике CsI[Na].

Тип событий	Ожидание	Результат аппроксимации
Постоянный фон	$1286 \pm 27$	$1273 \pm 24$
Нейтроны от SNS	$18.4 \pm 4.6$	$17.3 \pm 4.5$
Нейтроны от $Pb(\nu_e, Xn)$	$5.6 \pm 2.0$	$5.5 \pm 2.0$
УКРН	$341 \pm 43$	$306 \pm 20$

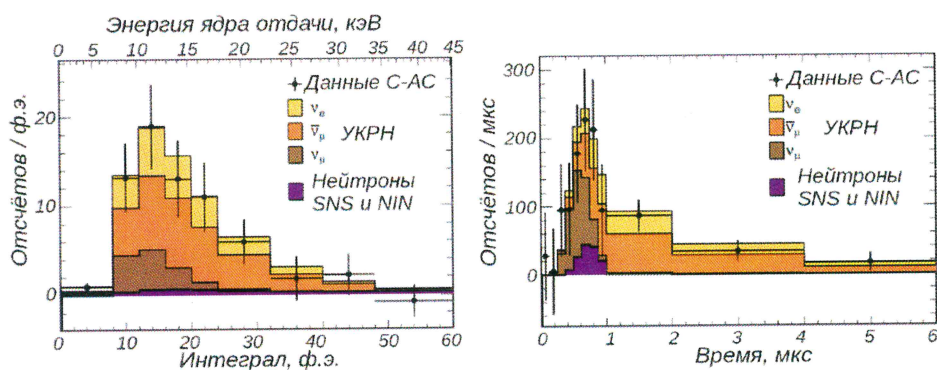


Рисунок 6.16 — Сравнение результата аппроксимации двумерного распределения для сигналов из CROI (вклад постоянного фона вычтен) с эмпирической разностью C – AC (интеграл менее 60 ф.э., время появления менее 6 мкс).

Однако, уровень достоверности результата определяется как статистикой, так и уровнем систематических ошибок и точностью расчётов, что не менее важно. Именно этот аспект анализа данных обсуждается в диссертации недостаточно подробно (часть страниц 67 и 113, а также Таблица 6.3). Было бы целесообразно уделить этому вопросу больше внимания, поскольку он напрямую влияет на точность результата.

Таблица 6.3

Источники систематической неопределённости измерения  $\langle \sigma \rangle_{\Phi}$

Источник	Вклад в неопределённость, %
Поток нейтрино SNS	10%
Эффективность отборов	4.1%
КФ ядер отдачи	3.8%
Ядерный форм-фактор	3.4% (теор.) / 0.6% (изм.)



Измерение эффекта упругого когерентного рассеяния позволяет оценить среднее значение сечения УКРН на ядрах Cs и I. Усреднённое по спектру энергий нейтрино SNS сечения УКРН на ядрах атомов Cs и I составило  $(165^{+30}_{-25}) \times 10^{-40} \text{ см}^2$ .

В завершение шестой главы обсуждаются возможные следствия для поиска новой физики на основе измерения сечения УКРН. Однако, следует отметить, что это скорее относится к перспективам дальнейших исследований.

Наконец, следует отметить, что в диссертации перечислен личный вклад автора в коллаборационную работу, который подтверждает его право использовать представленные материалы.

**В заключении** диссертации содержится два положения:

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  $(165^{+30}_{-25}) \times 10^{-40} \text{ см}^2$ .

Конечно, это наиболее значимые результаты работы, но они были получены на основе ряда методических разработок, которые также могли бы быть представлены.

По-видимому, автор предпочёл ограничить заключение наиболее яркими результатами.

**Научная новизна и значимость** работы состоит в том, что впервые измерено упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядрах.

Сформулированные в заключении положения в достаточной степени **обоснованы**.

**Достоверность** результатов обусловлена анализом экспериментальных данных и их достаточно высоким уровнем значимости.

Результаты работы опубликованы в 4-х рецензируемых изданиях и прошли апробацию в виде докладов на многочисленных международных и российских конференциях. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

По диссертации возникли следующие **замечания**:

1. Как уже отмечалось, анализ систематических ошибок мог бы быть представлен более подробно и сконцентрировано.
2. В диссертации излишне часто используется словосочетание предсказание Стандартной Модели, хотя если говорить о эффекте упругого когерентного рассеяния нейтрино, то он определяется известными волновыми свойствами нейтрино при длине волны больше, чем расстояние между нуклонами в ядре. А если говорить об оценке сечения взаимодействия нейтрино с ядром за счёт слабого взаимодействия, то это далеко не вся Стандартная Модель.





Список основных работ официального оппонента доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН, профессора Сереброва А.П. по тематике диссертации Коновалова А.М. в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A.P. Serebrov, R.M. Samoiloв, Analysis of the Results of the Neutrino-4 Experiment on the Search for the Sterile Neutrino and Comparison with Results of Other Experiments, JETP Letters volume 112 (2020) 199–212
2. Serebrov, A.P. et al., Search for explanation of the neutron lifetime anomaly, Physical Review D, 2021, 103(7), 074010
3. Serebrov, A.P. et al., Search for sterile neutrinos with the Neutrino-4 experiment and measurement results, Physical Review D, 2021, 104(3), 032003
4. Serebrov, A.P. et al., Result of the Neutrino-4 Experiment and the Cosmological Constraints on the Sterile Neutrino (Brief Review) JETP Letters , 2022, 116(10), pp. 669–682
5. А.П. Серебров и др., Создание второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 с целью увеличения точности эксперимента “Нейтрино-4” // Журнал технической физики, 2023, том 93, вып. 1, с.175
6. Serebrov A.P., Samoiloв R.M., Chaikovskii M.E., Analysis of the Result of the Neutrino-4 Experiment Together with Other Experiments on the Search for Sterile Neutrinos within the 3 + 1 Neutrino Model, Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2023, 137(1), 55–70