

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

На правах рукописи



Кумпан Александр Вячеславович

**ПЕРВОЕ НАБЛЮДЕНИЕ УПРУГОГО
КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРИНО НА
ЯДРАХ АРГОНА**

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

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете "МИФИ"

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
заведующий Межкафедральной лабораторией
экспериментальной ядерной физики НИЯУ
МИФИ

Болоздыня Александр Иванович

Официальные оппоненты: **Ляшук Владимир Иванович**,
доктор физико-математических наук,
Отдел экспериментальной физики Института
ядерных исследований Российской академии наук,
старший научный сотрудник

Ростовцев Андрей Африканович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Институт проблем передачи информации им.
А. А. Харкевича Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник

Чепурнов Александр Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
Отдел электромагнитных процессов и вза-
имодействия атомных ядер НИИЯФ имени
Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова,
ведущий научный сотрудник

Защита состоится 20 декабря 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного 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 университета «МИФИ».

Автореферат разослан

2023 года.

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



Улин Сергей Евгеньевич

Общая характеристика работы

Целью данной работы являлось измерение сечения процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах аргона и сравнение полученного результата с расчетами по Стандартной модели электрослабых взаимодействий.

Актуальность темы

Одним из фундаментальных процессов, в которых участвует нейтрино, является упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядрах атомов (здесь и далее – УКРН). Несмотря на то, что нейтрино было впервые зарегистрировано более 60 лет назад, оно до сих пор остается одной из самых загадочных частиц.

Уникальной особенностью процесса УКРН является то, что при определенных условиях нейтрино низких энергий могут взаимодействовать при рассеянии одновременно со всеми нуклонами ядра [1; 2]. Упрощенно сечение УКРН выглядит следующим образом [3]:

$$\sigma \sim 4.22 \times 10^{-45} N^2 (E_\nu^2) [cm^2]$$

где N - количество нейтронов в ядре атома мишени, E_ν - энергия рассеивающегося нейтрино. Благодаря фактору N^2 сечение УКРН, в зависимости от количества нейтронов в ядре, превосходит сечения процессов обратного β -распада и рассеяния на электронах на 2-3 порядка [4].

УКРН имеет важное значение для изучения процессов формирования Вселенной и эволюции звезд [5]. Данный процесс может использоваться для изучения структуры ядра и уточнения магнитного момента нейтрино [6; 7]. УКРН является основным фоном для современных экспериментов по прямому поиску Темной материи в виде слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP) [8]. Несовпадение экспериментально измеренной величины сечения УКРН с прогнозом, произведенном в рамках Стандартной Модели электрослабых взаимодействий, будет явным указанием на существование физики за ее пределами [9; 10]. Многообещающей возможностью прямого использования этого фундаментального процесса является мониторинг состояния активной зоны ядерных реакторов [11–13].

Для изучения УКРН крайне важным является измерение его сечения на ядрах различных мишеней с тем, чтобы проверить зависимость процесса УКРН от квадрата количества нейтронов.

В настоящее время УКРН активно изучается по всему миру. Наиболее известными научными группами, занимающимися изучением УКРН, являются коллаборации CONNIE [14], CONUS [15], COHERENT [16], ν Gen [17], RICOCHET [18], TEXONO [19], RED [20] и ν -Cleus [21]. В данный момент самой успешной является коллаборация COHERENT, детекторы которой располагаются в Окриджской Национальной Лаборатории США. В 2017 г коллаборацией COHERENT процесс УКРН был впервые экспериментально обнаружен с помощью детектора CsI[Na] [22]. Одним из детекторов, используемых коллаборацией COHERENT, является однофазный детектор на жидком аргоне CENNS-10 [23]. Учитывая то, что аргон в настоящее время – наиболее легкий элемент, использующийся для измерения сечения УКРН, данное исследование является крайне важным и актуальным.

Цель работы

Целью данной работы являлось измерение сечения процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах аргона и сравнение полученного результата с расчетами по Стандартной модели электрослабых взаимодействий. Для достижения поставленной цели в рамках эксперимента CENNS-10 решались следующие **задачи**:

1. Разработка алгоритмов и инструментария для анализа и обработки данных;
2. Анализ калибровочных данных и изучение отклика детектора на электроны и ядра отдачи;
3. Анализ постоянного фона и фона от коррелированных с пучком нейтронов (BRN) для детектора CENNS-10;
4. Создание Монте Карло модели с учетом результатов анализа калибровочных и фоновых данных. Модель была критически необходима для анализа экспериментальных данных;
5. Анализ экспериментальных данных, измерение сечения УКРН и сравнение полученного результата с прогнозом Стандартной Модели.

Научная новизна

Впервые экспериментально измерена величина сечения упругого когерентного рассеяния нейтрино с энергией до 50 МэВ на ядрах аргона на уровне значимости более 3σ . Ядро аргона в настоящий момент является наиболее легким ядром-мишенью из тех, на которых получен результат.

Практическая значимость

Разработанные в диссертации подходы и методы будут использоваться при анализе данных новых экспериментов, включая готовящийся эксперимент на АЭС с модернизированной версией детектора РЭД-100. Полученный в диссертации результат используется в ряде работ, направленных на поиск тёмной материи [24; 25] и исследования редких процессов [26], а также изучения физики сверхновых [27; 28], уточнении структуры атомного ядра [29] и др.

Основные положения, выносимые на защиту

Величина измеренного сечения упругого когерентного рассеяния нейтрино с энергией около 50 МэВ на ядрах атомов аргона, составившая $(2.2 \pm 0.8) \times 10^{-39}$ см². Статистическая значимость результата составляет более 3σ . Полученное значение совпадает с предсказанием Стандартной Модели электрослабых взаимодействий в пределах погрешности.

Достоверность

Достоверность данной работы подтверждается результатами работы группы перекрестного анализа [30], согласованностью с результатами детектора CsI[Na] [31] и отсутствию противоречий с известным массивом экспериментальных данных.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на различных международных конференциях, таких как NPhE-2020 [32], ICPPA2020 [33] и INSTR20 [34], а так же на семинарах НИЯУ МИФИ и рабочих совещаниях коллаборации COHERENT. В настоящее время результаты данной работы используются в ряде научных работ, посвященных уточнению известных величин [29], поиску нестандартных взаимодействий [26] и дальнейшим перспективам использования жидкоаргоновых детекторов в изучении нейтрино [35].

Личный вклад

Автор принимал определяющее участие в работе эксперимента CENNS-10 с 2016 года, в разработке программ для контроля состояния де-

тектора CENNS-10, обработке экспериментальных данных, являлся автором программы предварительной обработки данных и Монте Карло модели детектора CENNS-10, а также принимал активное участие в сеансах набора данных.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных трудах 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Akimov D.Y., ..., Kumpan A.V., ..., Khromov A.V. et al. (COHERENT Collaboration) First constraint on coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon, Phys. Rev. D, 2019, Vol. 100, P. 115020.
2. D Akimov, JB Albert, ..., Kumpan A.V. et al. (COHERENT Collaboration) / First measurement of coherent elastic neutrino-nucleus scattering on argon // Physical review letters, 2021, Vol. 126, no. 1, P. 012002.
3. Akimov D.Y. ..., Kumpan A.V., ..., Khromov A.V. et al. (COHERENT Collaboration) / Development of a Kr-83m source for the calibration of the CENNS-10 liquid argon detector // JINST, 2021, Vol. 16, P. 04002.
4. A. V. Kumpan & the COHERENT Collaboration. / Development of Liquid Noble Gas Scintillation Detectors for Studying Coherent Elastic Neutrino–Nucleus Scattering // Instruments and Experimental Techniques, 2020, Vol. 63, P. 641–646.

Содержание работы

Во введении дается краткое описание процесса когерентного рассеяния нейтрино, очерчивается область возможной применимости процесса УКРН, показывается актуальность исследований. Обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава содержит теоретическое описание процесса упругого когерентного рассеяния на ядрах атомов.

Раздел 1.1 посвящен теоретическому описанию УКРН. УКРН - это фундаментальный процесс в рамках Стандартной модели электрослабых взаимодействий, впервые предложенный в 1974 г. В общем случае взаимодей-

ствие между нейтрино и ядром атома сводится к взаимодействию нейтрино с отдельными нуклонами ядра. Однако, если импульс, передаваемый нейтрино ядру, достаточно мал, нейтрино может взаимодействовать одновременно со всеми нуклонами ядра. В рамках Стандартной модели электрослабых взаимодействий дифференциальное сечение когерентного рассеяния нейтрино описывается следующим выражением:

$$\frac{d\sigma_{coh}}{dT} = G_F^2 M \left[(G_V + G_A)^2 + (G_V - G_A)^2 \left(1 - \frac{T}{E_\nu}\right) - (G_V^2 + G_A^2) \frac{MV}{E_\nu^2} \right] \quad (1)$$

где G_F – константа Ферми, M – масса ядра, T – энергия ядра отдачи, E_ν – энергия нейтрино, а G_A и G_V – аксиальная и векторная составляющие взаимодействия нейтрино с нуклонами на кварковом уровне [9]:

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

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

где Z_\pm и N_\pm отражают число протонов и нейтронов с противоположно направленными спинами, Q – переданный импульс, $F_{nucl}^V(Q^2)$ и $F_{nucl}^A(Q^2)$ – векторный и аксиальный форм-факторы ядра [36; 37]. Константы векторного и аксиального взаимодействия нейтрино с протонами и нейтронами $g_V^{(n,p)}$ и $g_A^{(n,p)}$ выглядят следующим образом [9]:

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

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

Здесь θ_W – угол электрослабого смешивания (угол Вайнберга), $\sin^2(\theta_W) = 0.23122(3)$, а $\rho_{\nu N}^{NC}$, $\hat{k}_{\nu N}$ и параметры λ являются радиационными поправками, значения которых можно найти в [38]. В случае ядра

с нулевым спином радиационными поправками можно пренебречь [6]:

$$\frac{d\sigma_{coh}}{dT} = \frac{G_F^2 M}{2\pi} \left\{ 2 - \frac{2T}{E_\nu} + \left(\frac{T}{E_\nu}\right)^2 - \frac{MT}{E_\nu^2} \right\} \frac{MQ_W^2}{4} F_{nucl}^2(Q^2) \quad (6)$$

$$Q_W^2 = [Z(1 - 4\sin^2(\theta_W)) - N] \quad (7)$$

Здесь Q_W - слабый заряд ядра. При условии, что $T \ll E_\nu$ дифференциальное сечение упругого когерентного рассеяния нейтрино выглядит следующим образом [31]:

$$\frac{d\sigma_{coh}}{dT} = \frac{G_F^2 M}{4\pi} MQ_W^2 \left(1 - \frac{MT}{2E_\nu^2}\right) F_{nucl}^2(Q^2) \quad (8)$$

Если подставить в получившееся уравнение 8 значения констант и учесть, что значение $F_{nucl}^2(Q^2)$ при малых величинах переданного импульса близко к 1, можно записать [31]:

$$\sigma_{coh} \sim 0.4 \times 10^{-44} N^2 (E_\nu^2) [cm^2] \quad (9)$$

где N - количество нейтронов в ядре, E_ν -энергия нейтрино, МэВ. Благодаря фактору N^2 величина сечения упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах $\sim 10^{-39} cm^2$, что значительно превосходит значения величин сечений обратного бета-распада ($\sigma_{\bar{\nu}ep} \sim 10^{-41} cm^2$) и упругого рассеяния нейтрино на электроне ($\sigma_{\nu ee} \sim 10^{-43} cm^2$).

Несмотря на то, что процесс УКРН был предложен более 40 лет назад, впервые он был зарегистрирован коллаборацией COHERENT с использованием детектора CsI[Na] [31]. Такой значительный промежуток времени между предположением о существовании процесса и его первой регистрацией связан с очень малым энерговыделением при его протекании и низкой чувствительностью детекторных технологий.

В разделе 1.2 рассматриваются основные искусственные источники нейтрино. Ими являются ядерные реакторы и ускорительные комплексы, в процессе работы которых рождаются остановленные пионы.

Выгорание топлива в ядерном реакторе сопровождается бета-распадами осколков деления, в которых рождаются электронные антинейтрино. Об-

щий поток $\bar{\nu}_e$ при мощности энергоблока в 3 ГВт будет составлять $\sim 6 \times 10^{-20}$ антинейтрино в секунду.

На ускорительном комплексе интенсивный протонный пучок с энергией протонов порядка 1 ГэВ, сталкиваясь с мишенью, генерирует π^+ и π^- мезоны. Распад π^+ -мезонов сопровождается рождением ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$ и ν_e [39]. Средний поток нейтрино, рождающихся при сбросе протонов на мишень гораздо меньше, чем во время работы ядерного реактора, однако сечение взаимодействия больше из-за гораздо более высокой энергии нейтрино. Преимуществом ускорителя является известная импульсная временная структура работы ускорителя, которая является дополнительным фактором режекции внешнего фона.

Раздел 1.3 посвящен одному из искусственных источников нейтрино - Spallation Neutron Source (SNS) и расположившемуся на нем эксперименте COHERENT.

SNS располагается в Окриджской Национальной Лабораторией США и управляется Министерством Энергетики (DOE) США. В настоящее время SNS является самым мощным импульсным источником нейтронов в мире [40]. Рождение нейтронов происходит в результате сброса пучка протонов с энергией ~ 1 ГэВ на ртутную мишень. В каждом взаимодействии протона с ртутью рождается 20-30 нейтронов. При работе на номинальной проектной мощности ~ 1.4 МВт SNS производит до 10^{16} взаимодействий протонов с мишенью в секунду. Протонный пучок сбрасывается с частотой 60 Гц.

Нейтринный сигнал с SNS имеет известный временной профиль. Время жизни π^+ составляет 26 нс, а распад μ^+ происходит через 2.2 мкс [41]. Компонента ν_μ называется «быстрыми» нейтрино, она возникает сразу после сброса пучка протонов на мишень SNS. ν_e и $\bar{\nu}_\mu$ запаздывают на время жизни мюона, поэтому данная компонента называется «задержанной». Любое событие, происходящее в течение ~ 1 мкс после сброса пучка, принадлежит быстрой компоненте, а события, наблюдаемые позже, считаются задержанными [42].

В настоящий момент SNS в качестве источника нейтрино используется экспериментом COHERENT. Детекторы эксперимента расположены в одном из корридоров цокольного этажа здания мишени SNS [4]. Детекторные установки эксперимента располагаются на расстоянии 19-28 м от центра мишени SNS (рисунок 1). Кампания по изучению фоновых условий показала, что дан-

ное расположение является наилучшим для экспериментов по регистрации УКРН: потолочные перекрытия обеспечивают защиту от космической компоненты фона, соответствующую 8 м.в.э., а стена, отделяющая детекторы от ртутной мишени, создает защиту от потока рождающихся на ней нейтронов.

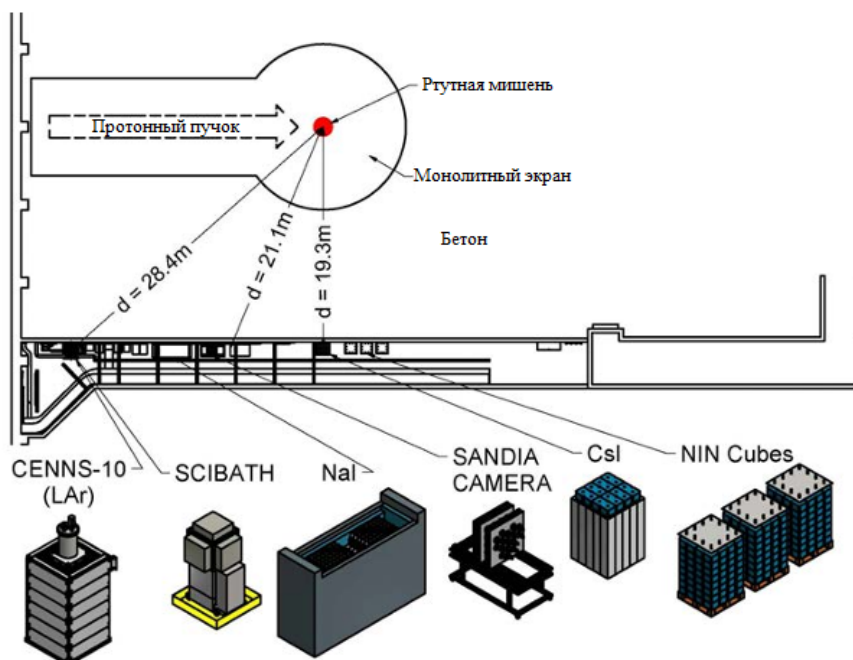


Рис. 1 — Набор детекторов эксперимента SOHERENT и их расположение относительно мишени.

В рамках научной программы эксперимента SOHERENT планируется использовать несколько детекторных технологий с различной массой ядер вещества мишени. В настоящее время процесс УКРН уже зарегистрирован с помощью CsI[Na] [31] в 2017 г и CENNS-10 [43]. Массив детекторов NaI[Tl] с общей массой 185 кг является нечувствительным к УКРН и будет использоваться для измерения взаимодействий нейтринопо заряженному току с ^{127}I [44; 45]. MARS представляет собой пластиковый сцинтилляционный детектор с наполнителем Gd для измерения связанных с пучком нейтронов.

Данная работа посвящена обработке экспериментальных данных детектора CENNS-10 [23], работающему в рамках научной программы коллаборации SOHERENT. В работе изложены результаты моделирования и обработки данных, набор которых проводился с 2017 по 2019 годы.

В разделе 1.4 кратко сформулированы выводы для разделов 1.1-1.3. Задачи и мотивация данного исследования выглядят следующим образом:

- Проведение калибровки детектора;

- Анализ фоновых условий;
- Проведение моделирования отклика детектора на коррелированные с пучком нейтроны и УКРН;
- Проведение обработки экспериментальных данных и определение величины когерентного рассеяния нейтрино на ядрах аргона.

Вторая глава посвящена детектору CENNS-10, расположенном на ускорительном комплексе SNS для исследования процесса УКРН. Раздел 2.1 посвящен детектору CENNS-10. Он представляет собой однофазный сцинтилляционный детектор, рабочим веществом которого является жидкий аргон. Аргон обладает рядом преимуществ:

- быстро очищается от посторонних примесей при помощи стандартных промышленных фильтров;
- в сжиженном состоянии обладает высокой плотностью (1392 кг/м^3), что позволяет набрать значительную массу мишени при компактных размерах детектора;
- ядро аргона имеет достаточно высокую энергию отдачи для рассматриваемого диапазона энергий нейтрино;
- сцинтилляционный сигнал в жидком аргоне имеет две компоненты: быструю и медленную с характерными временами высвечивания 6 нс и 1.5 мкс соответственно, что позволяет отделять электроны от ядер отдачи по форме сигнала;
- Квенчинг-фактор для жидкого аргона измерен с высокой точностью в диапазоне энергий предполагаемого отклика детектора (4.1-30.6) кэВээ на события УКРН.

Под кэВээ подразумевается электрон-эквивалентное энерговыделение в 1 кэВ, т.е. 1 кэВ, выделенный электроном отдачи. Если энергия в 1 кэВ потеряна в детекторе ядром отдачи, то используется ядерный эквивалент энергии (кэВяэ).

Детектор представляет собой цилиндр из нержавеющей стали, диаметром 21 см и высотой в 40 дюймов. Пустой детектор может вместить до 79,5 кг жидкого аргона. Внутренняя часть детектора просматривается двумя восьмидюймовыми электронными фотоумножителями (ФЭУ) Hamamatsu R5912-02, максимальная квантовая эффективность которых составляет 18% на длине волны 420 нм. Стенки детектора выложены отражателем - тефлоном. Для ми-

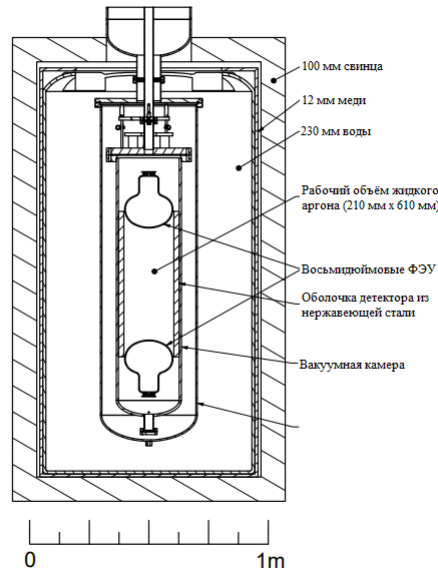


Рис. 2 — Детектор CENNS-10 в пассивной защите

нимизации теплообмена детектор помещен в вакуумную рубашку, давление в которой поддерживалось на уровне $\sim 10^{-6}$ Торр на протяжении всей длительности эксперимента. На тефлоновый отражатель и входные окна ФЭУ напылен спектросместитель 1,1,4,4-тетрафенил-1,3-бутадиен (ТРВ), переизлучающий испущенные аргоном фотоны из области ультрафиолета (128 нм) в область видимого света (400 нм) с эффективностью, близкой к 100%. Для защиты от нейтронного фона детектор CENNS-10 помещен в заполненный деионизированной водой полиэтиленовый бак. Толщина слоя водной защиты составляет 20 см. Для защиты от гамма-квантов используется медный экран с толщиной 1.25 см, возведенный снаружи водной защиты, и внешний слой свинца, толщиной 10 см.

Сигналы с ФЭУ поканально оцифровываются с помощью 12 битного 8 канального быстрого АЦП CAEN V1720 и записываются. Частота оцифровки составляет 250 МГц. Для выработки триггера используется синхроимпульс ускорителя, вырабатываемый во время сброса пучка протонов на мишень. Дополнительный синхроимпульс отражает время попадания протонов в мишень. Синхроимпульсы представляют собой логические TTL-сигналы, амплитудой 2.5 В. Частота выработки синхроимпульсов составляет 60 Гц. Сигналы синхроимпульсов также оцифровываются и записываются. Запись каждого события по синхроимпульсу чередуется с записью антикоррелированных с пучком данных. Для их записи используется дополнительный стро-

бирующий сигнал генератора осциллографа Rigol DG4162. Таким образом частота записи данных составляет 120 Гц.

Еженедельно во время сервисного обслуживания SNS проводилась калибровка детектора CENNS-10 с помощью светодиода и радиоактивных источников различных энергий. Во время калибровок записывались временные окна $-1.5 < t_{trig} < 6$ мкс. Запись проводилась по синхроимпульсу с генератора осциллографа Rigol DG4162.

Общая экспозиция составила 7,37 ГВтч ($\sim 16 \times 10^{22}$ сбросов пучка на мишень) интегрированной мощности пучка за период с июля 2017 г. по декабрь 2018 год — это набор данных, использовавшийся для первого наблюдения УКРН с помощью детектора CENNS-10.

В разделе 2.2 описаны фоновые условия, в которых находится детектор CENNS-10. Источниками постоянного фона являются:

- Естественное гамма-излучение ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K от пола, стен и перекрытий. Величина потока генерируемых γ -квантов составляет $\sim 1\gamma/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$;
- Изотоп ^{39}Ar , который нарабатывается в атмосферном аргоне в результате взаимодействия космических мюонов с ядрами ^{40}Ar . Активность изотопа ^{39}Ar составляет ~ 1 Бк/кг.

Источниками коррелированного с пучком фона являются:

- Труба отвода горячего газа от ртутной мишени является источником γ -квантов с энергией 511 кэВ. Во время сброса пучка величина потока γ -квантов составляет $\sim 25\gamma/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$;
- Быстрые нейтроны, рождающиеся при сбросе пучка протонов на мишень (BRN). Такие нейтроны, упруго рассеиваясь в аргоне, дают ядра отдачи с таким же профилем, что и УКРН. Величина потока BRN составила ~ 10 нейтронов в день.

Третья и четвертая главы посвящены анализу данных и моделированию. Для обработки данных применялся метод параллельного слепого анализа. Анализ называется слепым, когда перед вскрытием экспериментальных данных проводится подробный анализ калибровочных и фоновых данных, а также разрабатываются параметры и процедура отбора полезных событий. Параллельный анализ предполагает наличие двух групп обработки, работающих независимо друг от друга и не обменивающиеся информацией. Такой

подход позволяет сразу провести перекрестную проверку полученного результата. Обе группы использовали одну Монте Карло модель детектора.

Обработка экспериментальных данных детектора CENNS-10 проводилась двумя группами: американской (анализ А) и российской (анализ В), базирующимися в Университете Индианы и НИЯУ МИФИ соответственно.

В третьей главе описаны калибровки и моделирование детектора CENNS-10. Раздел 3.1 описывает процедуру предварительной обработки данных. Результатом обработки данных отсева зашумленных и пустых осциллограмм и подготовка данных к физическому анализу.

Для измерения энергетического отклика детектора CENNS-10 выполнялось два типа калибровок: однофотозлектронная калибровка ФЭУ и калибровка детектора CENNS-10 с помощью калибровочных источников.

В разделе 3.2 описаны однофотозлектронная и энергетическая калибровки CENNS-10.

Однофотозлектронная калибровка представляет собой измерение площади однофотозлектронного сигнала с ФЭУ (SPE), т.е. сигнала, поступающего с ФЭУ при рождении ровно одного электрона на фотокатоде. Площадь одиночного фотозлектрона у разных ФЭУ одной модели разная в силу того, что она определяется состоянием и конструктивом ФЭУ. Энергия регистрируемой частицы может быть выражена в количестве фотозлектронов (ФЭ), родившихся при регистрации на всех ФЭУ установки.

Площадь одиночного фотозлектрона измерялась двумя способами: путем генерирования однофотозлектронных сигналов с помощью светодиода и путем поиска однофотозлектронных событий на хвостах реальных физических сигналов. Огромным преимуществом второго варианта является возможность получения значения площади одиночного электрона для каждого набора экспериментальных данных. Поэтому вариант поиск однофотозлектронных событий на хвостах реальных сигналов выбран как основной метод калибровки SPE.

Энергетическая калибровка детектора проводилась с помощью калибровочных источников ^{57}Co , ^{241}Am , ^{83m}Kr . Полученный калибровочный график представлен на рисунке 3.

Результатом аппроксимации является значение световыхода $LY = (4.90 \pm 0.15)$ ФЭ/кэВээ. Общая систематическая погрешность световыхода

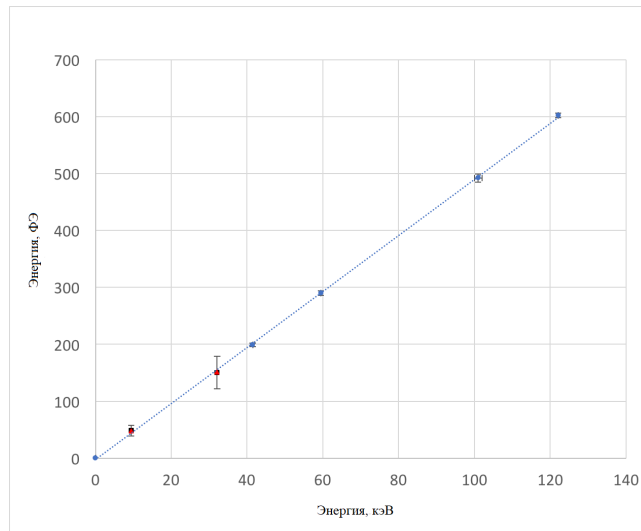


Рис. 3 — Калибровочная прямая световыхода

составляет 3.06%. Систематическая погрешность, обусловленная моделью аппроксимации при определении положений пиков для радиоактивных источников составляет 1.9%. Энергетическое разрешение составило 9.0% при 41.5 кэВ для ^{83m}Kr .

Дополнительно проведено изучение отклика детектора CENNS-10 на ядра отдачи с помощью источника AmBe. В качестве параметра разделения по форме сигнала использовался параметр F90, представляющий собой количество фотонов, зарегистрированное в первые 90 нс события, отнесенные к полной интенсивности сцинтилляции. Выяснено, что параметр F90, а значит, и световыход детектора изменяется с энергией для электронов и ядер отдачи. Экспериментальное поведение зависимости параметра F90 от энергии в дальнейшем использовалось в Монте Карло модели детектора CENNS-10.

Раздел 3.2 посвящен моделированию детектора CENNS-10. Так как истинное распределение событий УКРН неизвестно, а поток коррелированных с пучком нейтронов мал, разработка Монте Карло модели детектора CENNS-10 является жизненно необходимым для отделения УКРН от BRN в экспериментальных данных. Поэтому на основе фреймворка Geant4 была создана Монте Карло модель, в которой учтены квенчинг-фактор аргона и зависимость световыхода от энергии и типа частицы. Результаты работы созданной модели воспроизводят результаты работы с калибровочными источниками.

В разделе 3.3 описывается изучение скорости счета быстрых нейтронов SNS детектором CENNS-10. В силу того, что такие взаимодействия являются редкими, для получения экспериментального энергетического профиля рас-

пределения BRN и сравнения его с модельным проведено измерение частоты регистрации быстрых нейтронов с помощью детектора CENNS-10. На время проведения этих измерений водная защита была убрана. Экспериментальный энергетический спектр BRN совпал с модельным с точностью до масштабного множителя, что подтверждает корректность работы Монте Карло модели.

В четвертой главе описываются процедуры получения функций плотностей вероятности для параметра F90, энергии и времени для BRN, УКРН и постоянного фона, трехмерная аппроксимация экспериментальных данных и получение величины сечения процесса УКРН. В конце главы приведено сравнение полученной в рамках данной работы величины сечения процесса УКРН с полученной американской группой. В раздел 1.1 описывается получение функций плотностей вероятности для параметра F90, энергии и времени. Данные BRN и УКРН были смоделированы, в качестве постоянного фона рассматривались некоррелированные с пучком данные. Для всех событий использованы следующие параметры отбора:

- Параметр F90: $0.5 < F90 < 0.8$;
- Время возникновения события относительно синхроимпульса SNS: $-1 < t_{trig} < 8$ мкс;
- Ограничение на активный объем. В качестве параметра использовалась доля света в событии, зарегистрированного верхним ФЭУ: $0.2 < f_{top} < 0.8$;
- Энергетический диапазон: $4.1 < E < 30.6$ кэВээ.

Прошедшие отбор данные использованы для получения профилей вероятности для параметра F90, энергии и времени для каждой из составляющих данных.

В разделе 4.2 дан прогноз на ожидаемое при обработке данных количество событий BRN, УКРН и постоянного фона. Прогноз для каждой компоненты можно увидеть в таблице 1.

Таблица 1 — Прогноз на ожидаемое количество зарегистрированных событий.

Компонента	Количество событий, шт
УКРН	101 ± 12
BRN	226 ± 33
Постоянный фон	1155 ± 45

Раздел 4.3 посвящен оценке систематической погрешности, привносимой процедурой аппроксимации. Составляющие погрешности вынесены в таблицу 2.

Таблица 2 — Источники систематической погрешности процедуры аппроксимации.

Источник погрешности	Оценка погрешности
Время прихода нейтрино	6.3%
Энергетическое распределение BRN	5.2%
Время прихода BRN	5.3%
ПШПВ для времени прихода BRN	7.7%
Распределение F90 по энергии для УКРН	3.1%

Каждый источник систематической погрешности рассматривался, как независимый. Итоговая оценка систематической погрешности, привносимой процедурой аппроксимации, составляет 13%.

Раздел 4.4 описывает процедуру аппроксимации экспериментальных данных методом наибольшего правдоподобия, используя профили функций плотности вероятности, полученные в разделе 1.1. К экспериментальным данным применен такой же отбор по параметру F90, E, t_{trig} и f_{top} , что и к модельным. Значимость полученного результата превышает 3σ . Количество событий для каждой из компонент, полученное в результате аппроксимации, можно найти в таблице 3.

Таблица 3 — Количество событий каждой из компонент, полученное в результате анализа данных.

Компонента	Количество событий, шт
УКРН	121 ± 48
BRN	222 ± 23
Постоянный фон	1112 ± 41

В разделе 4.5 приведена усредненная по потоку нейтрино величина сечения УКРН для всех ароматов $(2.2 \pm 0.8) \times 10^{-39}$ см², вычисленная на основе количества событий УКРН, полученного в эксперименте (см раздел 4.4). Экспериментальный результат совпадает с прогнозом Стандартной модели (1.8×10^{-39}) в пределах 1σ . Это измерение является вторым подтверждением зависимости величины сечения CEvNS от N^2 (рисунок 4).

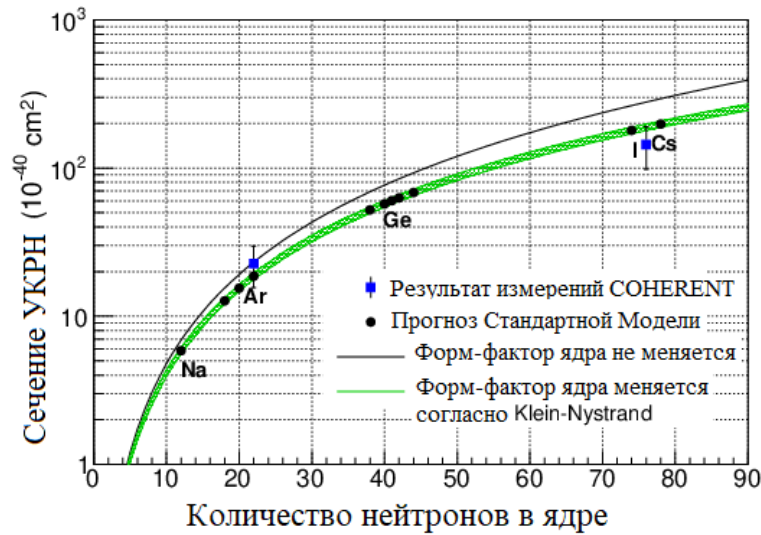


Рис. 4 — Зависимость сечения УКРН от количества нейтронов в ядрах атомов. Голубые точки соответствуют результатам экспериментов CsI[Na] и CENNS-10. Данное измерение соответствует прогнозу Стандартной Модели о зависимости величины сечения УКРН от количества нейтронов в ядре. Сведения об изменении форм-фактора ядра взяты из работы [46].

В разделе 4.6 сравниваются результаты анализа, полученные в данной работе с результатами, полученными группой параллельного анализа для тех же данных. Процедура параллельного анализа реализовывала похожую стратегию, но использовались иные параметры отбора и не использовалось ограничение на активный объем. Полученная группой параллельного анализа величина сечения УКРН $(2.3 \pm 0.7) \times 10^{-39} \text{ см}^2$, что совпадает с результатом, полученным в данной работе, в пределах погрешности. Результаты обеих групп анализа показаны на рисунке 5.

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

1. Разработан алгоритм обработки и произведена адаптация имеющегося инструментария для обработки данных детектора CENNS-10;
2. Проанализированы калибровочные данные и измерен отклик детектора на электроны и ядра отдачи;
3. Проанализированы постоянный и коррелированный с пучком фон для детектора CENNS-10;
4. Создана Монте Карло модель с учетом результатов анализа калибровочных и фоновых данных;

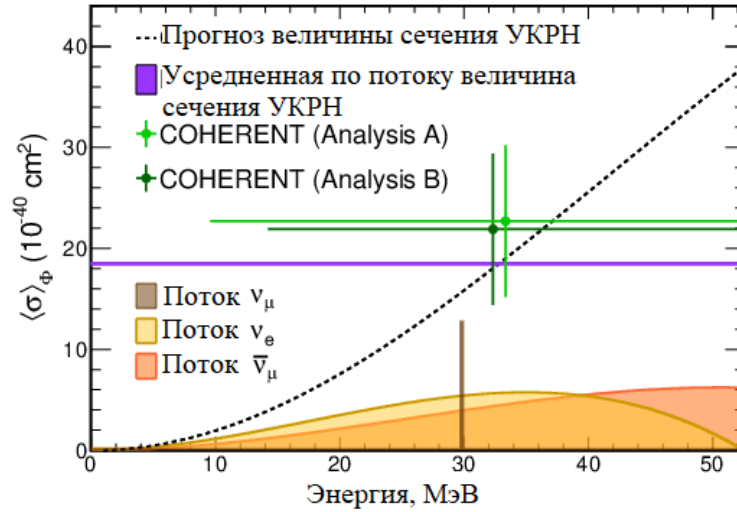


Рис. 5 — Результаты измерения усредненного по потоку нейтрино сечения УКРН для обеих групп (зеленый) в сравнении с расчетами в рамках Стандартной модели (фиолетовый). Результат данной работы соответствует Анализу В. Полученные группами значения величины сечения согласуются друг с другом и совпадают в пределах погрешности с прогнозом Стандартной Модели.

5. В результате анализа данных пучка, впервые измерено сечение УКРН на ядрах ^{40}Ar и доказана справедливость Стандартной Модели в условиях эксперимента CENNS-10. Значимость полученного результата составляет более 3σ .

Полученное в работе сечение УКРН является крайне важным, так как подтверждает зависимость N^2 и справедливость Стандартной Модели для самого легкого ядра, для которого получен экспериментальный результат. Подходы, разработанные в настоящей работе в дальнейшем будут использоваться в рамках текущей экспериментальной программы коллаборации COHERENT, а также при анализе результатов новых экспериментов, включая готовящийся эксперимент на АЭС с модернизированной версией детектора РЭД-100 для поиска упругого когерентного рассеяния реакторных $\bar{\nu}_e$ в области относительно низких энергий (<10 МэВ). Полученная величина сечения УКРН на ядрах аргона в настоящий момент используется в теоретических научных работах, посвященных уточнению известных величин, [29], поиску нестандартных взаимодействий [26] и дальнейшим перспективам использования жидкоаргоновых детекторов в изучении нейтрино [35].

Список литературы

1. *Freedman D. Z.* Coherent effects of a weak neutral current // *Physical Review D*. — 1974. — Т. 9, № 5. — С. 1389.
2. *Копелиович В. Б., Франкфурт Л. Л.* Изотопическая и киральная структура нейтрального тока // *Письма в ЖЭТФ*. — 1974. — Т. 19. — С. 236.
3. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре-недавно обнаруженный тип взаимодействия нейтрино низких энергий / Д. Ю. Акимов [и др.] // *ЛЭЯФ НИЯУ МИФИ*. — 2019. — С. 55–93.
4. COHERENT 2018 at the Spallation Neutron Source / D. Akimov [и др.]. — 2018. — arXiv: [1803.09183](https://arxiv.org/abs/1803.09183) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/abs/1803.09183)].
5. *Freedman D. Z., Schramm D. N., Tubbs D. L.* The weak neutral current and its effects in stellar collapse // *Annual Review of Nuclear Science*. — 1977. — Т. 27, № 1. — С. 167–207.
6. *Amanik P. S., McLaughlin G. C.* Nuclear neutron form factor from neutrino–nucleus coherent elastic scattering // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2008. — Т. 36, № 1. — С. 015105.
7. Neutrino-nucleus coherent scattering as a probe of neutron density distributions / К. Patton [и др.] // *Physical Review C*. — 2012. — Т. 86, № 2. — С. 024612.
8. *Billard J., Figueroa-Feliciano E., Strigari L.* Implication of neutrino backgrounds on the reach of next generation dark matter direct detection experiments // *Physical Review D*. — 2014. — Т. 89, № 2. — С. 023524.
9. *Barranco J., Miranda O. G., Rashba T. I.* Probing new physics with coherent neutrino scattering off nuclei // *Journal of High Energy Physics*. — 2005. — Т. 2005, № 12. — С. 021.
10. *Barranco J., Miranda O., Rashba T.* Sensitivity of low energy neutrino experiments to physics beyond the standard model // *Physical Review D*. — 2007. — Т. 76, № 7. — С. 073008.

11. (*Akademiia nauk SSSR*) *I. iadernykh issledovani.* Neutrino '77: Proceedings of the International Conference on Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics, Baksan Valley, 18-24 June, 1977. — Nauka, 1978. — С. 383. — (Neutrino '77: Proceeding's ... 18-24 June, 1977 ; т. 2). — URL: <https://books.google.ru/books?id=TCUNAQAIAAJ>.
12. Neutrino method remote measurement of reactor power and power output / Y. V. Klimov [и др.] // Atomic Energy. — 1994. — Т. 76. — С. 123—127. — DOI: [10.1007/BF02414355](https://doi.org/10.1007/BF02414355).
13. Future perspectives for a weak mixing angle measurement in coherent elastic neutrino nucleus scattering experiments / B. Cañas [и др.] // Physics Letters B. — 2018. — Т. 784. — С. 159—162. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.07.049>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269318305872>.
14. The CONNIE experiment / A. Aguilar-Arevalo [и др.] // J. Phys. Conf. Ser. / под ред. E. de la Cruz Burelo, A. Fernandez Tellez, P. Roig. — 2016. — Т. 761, № 1. — С. 012—057. — DOI: [10.1088/1742-6596/761/1/012057](https://doi.org/10.1088/1742-6596/761/1/012057). — arXiv: [1608.01565](https://arxiv.org/abs/1608.01565) [physics.ins-det].
15. Neutron-induced background in the CONUS experiment / J. Hakenmüller [и др.] // The European Physical Journal C. — 2019. — Август. — Т. 79, № 8. — DOI: [10.1140/epjc/s10052-019-7160-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7160-2). — URL: <https://doi.org/10.1140%2Fepjc%2Fs10052-019-7160-2>.
16. *Bernardi I.* CEvNS and COHERENT // PoS. — 2023. — Т. NOW2022. — С. 066. — DOI: [10.22323/1.421.0066](https://doi.org/10.22323/1.421.0066).
17. The ν GeN experiment at the Kalinin Nuclear Power Plant / V. Belov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2015. — Дек. — Т. 10, № 12. — P12011. — DOI: [10.1088/1748-0221/10/12/P12011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/12/P12011).
18. Ricochet Progress and Status / C. Augier [и др.]. — 2021. — Ноябрь. — DOI: [10.1007/s10909-023-02971-5](https://doi.org/10.1007/s10909-023-02971-5). — arXiv: [2111.06745](https://arxiv.org/abs/2111.06745) [physics.ins-det].
19. *Wong H. T.-K.* Taiwan EXperiment On Neutrino — History and Prospects // The Universe. — 2015. — Т. 3, № 4. — С. 22—37. — DOI: [10.1142/S0217751X18300144](https://doi.org/10.1142/S0217751X18300144). — arXiv: [1608.00306](https://arxiv.org/abs/1608.00306) [hep-ex].

20. 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) [physi cs. i ns-det].
21. The ν -cleus experiment: Gram-scale cryogenic calorimeters for a discovery of coherent neutrino scattering / R. Strauss [и др.] // J. Phys. Conf. Ser. / под ред. К. Clark [и др.]. — 2020. — Т. 1342, № 1. — С. 012132. — DOI: [10.1088/1742-6596/1342/1/012132](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1342/1/012132).
22. Measurement of the liquid argon energy response to nuclear and electronic recoils / P. Agnes [и др.] // Physical Review D. — 2018. — Т. 97, № 11. — С. 112005.
23. *Taylor R.* The CENNS-10 Liquid Argon Detector to measure CEvNS at the Spallation Neutron Source // JINST. — 2018. — Т. 13, № 04. — С. C04005. — DOI: [10.1088/1748-0221/13/04/C04005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/04/C04005). — arXiv: [1801.00086](https://arxiv.org/abs/1801.00086) [physi cs. i ns-det].
24. Constraining scalar leptoquarks using COHERENT data / R. Calabrese [и др.] // Phys. Rev. D. — 2023. — Т. 107, № 5. — С. 055039. — DOI: [10.1103/PhysRevD.107.055039](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.055039). — arXiv: [2212.11210](https://arxiv.org/abs/2212.11210) [hep-ph].
25. Constraining nonminimal dark sector scenarios with the COHERENT neutrino scattering data / A. Elpe [и др.] // Phys. Rev. D. — 2023. — Т. 107, № 7. — С. 075022. — DOI: [10.1103/PhysRevD.107.075022](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.075022). — arXiv: [2212.06861](https://arxiv.org/abs/2212.06861) [hep-ph].
26. Global constraints on non-standard neutrino interactions with quarks and electrons / P. Coloma [и др.]. — 2023. — Май. — arXiv: [2305.07698](https://arxiv.org/abs/2305.07698) [hep-ph].
27. Nuclear recoil response of liquid xenon and its impact on solar 8B neutrino and dark matter searches / X. Xiang [и др.] // Phys. Rev. D. — 2023. — Т. 108, № 2. — С. 022007. — DOI: [10.1103/PhysRevD.108.022007](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.022007). — arXiv: [2304.06142](https://arxiv.org/abs/2304.06142) [hep-ex].
28. Coherent elastic neutrino-nucleus scattering: Terrestrial and astrophysical applications / M. Abdullah [и др.]. — 2022. — Март. — arXiv: [2203.07361](https://arxiv.org/abs/2203.07361) [hep-ph].

29. Physics implications of a combined analysis of COHERENT CsI and LAr data / V. De Romeri [и др.] // JHEP. — 2023. — Т. 04. — С. 035. — DOI: [10.1007/JHEP04\(2023\)035](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2023)035). — arXiv: [2211.11905 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/2211.11905).
30. First constraint on coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon / D. Akimov [и др.] // Physical Review D. — 2019. — Т. 100, № 11. — С. 115020.
31. Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering / D. Akimov [и др.] // Science. — 2017. — Т. 357, № 6356. — С. 1123—1126.
32. *Kumpan A.* First results and Current status of COHERENT experiment with LAr. — 2020. — <https://indico.nevod.mephi.ru/event/2/contributions/78/>.
33. *Kumpan A.* The COHERENT experiment with LAr:First results and current status. — 2020. — <https://indico.particle.mephi.ru/event/35/contributions/2252/>.
34. *Kumpan A.* The COHERENT experiment with LAr. — 2020. — <https://indico.inp.nsk.su/event/20/contributions/867/>.
35. *Lai M.* Dark matter search and neutrino physics in Liquid Argon : дис. ... канд. / Lai Michela. — Cagliari U., 2021.
36. *Klein S. R., Nystrand J.* Exclusive vector meson production in relativistic heavy ion collisions // Physical Review C. — 1999. — Т. 60, № 1. — С. 014903.
37. *Helm R. H.* Inelastic and Elastic Scattering of 187-Mev Electrons from Selected Even-Even Nuclei // Phys. Rev. — 1956. — Дек. — Т. 104, вып. 5. — С. 1466—1475. — DOI: [10.1103/PhysRev.104.1466](https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.1466). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.104.1466>.
38. Review of Particle Physics / M. Tanabashi [и др.] // Phys. Rev. D. — 2018. — Авг. — Т. 98, вып. 3. — С. 030001. — DOI: [10.1103/PhysRevD.98.030001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.030001>.
39. Proposal for a Neutrino Facility at the Spallation Neutron Source. — URL: <http://www.phy.ornl.gov/nusns/proposal.pdf>.

40. The Spallation Neutron Source in Oak Ridge: A powerful tool for materials research / T. Mason [и др.] // *Physica B: Condensed Matter*. — 2006. — Т. 385/386. — С. 955–960. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.05.281>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092145260601177X>.
41. Proposal for a neutrino facility at the spallation neutron source / *S. collaboration*[.]. — 2005.
42. First constraint on coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon / D. Akimov [и др.] // *Phys. Rev. D*. — 2019. — Дек. — Т. 100, вып. 11. — С. 115020. — DOI: [10.1103/PhysRevD.100.115020](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.115020). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.100.115020>.
43. First measurement of coherent elastic neutrino-nucleus scattering on argon / D. Akimov [и др.] // *Physical review letters*. — 2021. — Т. 126, № 1. — С. 012002.
44. *Engel J., Pittel S., Vogel P.* Capture of solar and higher-energy neutrinos by ^{127}I // *Physical Review C*. — 1994. — Сент. — Т. 50, № 3. — С. 1702–1708. — DOI: [10.1103/physrevc.50.1702](https://doi.org/10.1103/physrevc.50.1702). — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevc.50.1702>.
45. Measurement of the cross section for the reaction $^{127}\text{I}(\nu_e, e^-)^{127}\text{Xe}_{\text{boundstates}}$ with neutrinos from the decay of stopped muons / J. R. Distel [и др.] // *Phys. Rev. C*. — 2003. — Ноябрь. — Т. 68, вып. 5. — С. 054613. — DOI: [10.1103/PhysRevC.68.054613](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.68.054613). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.68.054613>.
46. *Klein S. R., Nystrand J.* Exclusive vector meson production in relativistic heavy ion collisions // *Phys. Rev. C*. — 1999. — Июнь. — Т. 60, вып. 1. — С. 014903. — DOI: [10.1103/PhysRevC.60.014903](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.60.014903). — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.60.014903>.