

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.123.6

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
ИССЛЕДОВАНИЙ УПРУГОГО
КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ
РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО НА ЯДРЕ

Научный руководитель
(доц., к.ф.-м.н.)

_____ Е. А. Литвинович

Студент

_____ В. М. Крапля

Москва, 2024

Содержание

Введение	3
1 Обзор методик регистраций	6
1.1 Полупроводниковые детекторы	6
1.2 Низкотемпературные болометры	6
1.3 Низкотемпературные фононные детекторы	7
1.4 Детекторы на основе ПЗС-матрицы	7
1.5 Детекторы на жидких благородных газах	7
1.6 Детекторы на основе твердых сцинтилляторов	8
2 Обзор экспериментов по обнаружению УКРН на реакторах	9
2.1 <i>νGen</i>	9
2.2 TEXONO	9
2.3 CONUS	11
2.4 Dresden II	11
2.5 CONNIE	12
2.6 NEON	13
2.7 РЭД-100	14
2.8 Готовящиеся эксперименты	14
2.9 Систематизация полученных данных	15
3 Заключение	17
Список использованных источников	19

ВВЕДЕНИЕ

Процесс упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН) на атомном ядре был теоретически предсказан почти одновременно российскими и американскими учеными 50 лет назад в рамках стандартной модели (СМ), после открытия нейтрального тока во взаимодействиях нейтрино с ядрами мишени.[1] Экспериментально зафиксирован данный процесс был в 2017 году в рамках международной коллаборации COHERENT, сначала при помощи детектора с кристаллическим сцинтиллятором CsI , затем на жидкоаргоновом детекторе CENNS-10 и в 2024 году на германиевом полупроводниковом детекторе Ge-Mini.[2, 3, 4] В качестве источника нейтрино ($\nu_e, \nu_\mu, \bar{\mu}_e$) использовался ускорительный комплекс Spallation Neutron Source (SNS) в Окриджской национальной лаборатории США.

Свойство когерентности данного процесса проявляется в том, что нейтрино и антинейтрино могут упруго взаимодействовать со всеми нуклонами ядра при выполнении квантово-механического условия неопределённости Фридмана[5]

$$qR \ll 1 \quad (1)$$

где q - модуль 4-импульса, переданный нейтрино ядру, характерный размер которого определяется радиусом R . Условие (1) частично выполняется для нейтрино с энергиями $E_\nu < 50\text{МэВ}$ (полная когерентность наблюдается при $E_\nu < 30\text{МэВ}$ [6]). При выполнении (1) изменение фазы дебройлевской волны нейтрино в системе, состоящей из A центров, на которых рассеивается нейтрино, невелико. Поэтому амплитуды рассеяния элементарной частицы (нейтрино) на каждом нуклоне складываются и итоговое сечение реакции становится пропорциональным величине $A^2|\bar{f}(\mathbf{k}' - \mathbf{k})|^2$ [2], где $\bar{f}(\mathbf{k}' - \mathbf{k})$ - усредненная по системе амплитуда рассеяния, а \mathbf{k}, \mathbf{k}' - импульсы частицы в начальном и конечном состояниях соответственно, что при условии использования в качестве рабочего вещества детектора элементов с атомной массой ≥ 100 а.е.м. даёт сечение взаимодействия реакции в несколько сотен раз большее, чем сечение процесса обратного бета-распада, которое традиционно применяется для регистрации реакторных антинейтрино.

Согласно СМ сечение УКРН на ядре с нулевым спином в пренебрежении радиационными поправками описывается формулой[7, 8]

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2}{2\pi} M \left[2 - \frac{2T}{E} + \left(\frac{T}{E} \right)^2 - \frac{MT}{E^2} \right] \frac{Q_W^2}{4} F^2(Q^2), \quad (2)$$

$$Q_W^2 = N - (1 - 4\sin^2\theta_W)Z, \quad (3)$$

где E -энергия налетающего нейтрино; T -кинетическая энергия ядра отдачи; M - масса ядра; F -ядерный форм-фактор; Q_W -заряд слабого ядерного взаимодействия; G_F -постоянная Ферми; Z -число протонов; N -число нейтронов; θ_W -угол слабого смешивания. Пренебрегая некоторыми величинами, ввиду большого числа нуклонов ядра, можно представить полное сечение взаимодействия, как величину, пропорциональную квадрату числа нейтронов в ядре[2]

$$\sigma \approx 0,4 \times 10^{-44} N^2 (E)^2 \quad [\text{см}^2] \quad (4)$$

УКРН на атомном ядре играет важную роль во Вселенной в различных процессах, сопровождающихся интенсивными потоками нейтрино. Так при взрывах сверхновых звёзд нейтрино уносят в виде кинетической энергии порядка 99% энергии, выделяющейся при взрыве.[2]. Также явление УКРН возможно использовать для исследования СМ и поиска физики за рамками СМ: исследование форм-фактор нейтронов, и следовательно плотности нуклонов, исследование отклонений от ожидаемого угла слабого смешивания в масштабах энергий порядка МэВ, существование нестандартных нейтрино-кварковых взаимодействий и электромагнитные свойства, такие как магнитный момент нейтрино, или эффективный радиус заряда.[9]

В данной работе явление УКРН рассматривается в рамках возможного относительного контроля изотопного состава топлива и объективного мониторинга состояния, мощности ядерных реакторов, которые, в свою очередь, являются самым мощным рукотворным источником электронных антинейтрино на Земле. Так же возможно использование для "аварийного" мониторинга ядерных реакторов, когда необходимо проверить наличие цепной реакции в реакторе после случившейся аварии. Привлекательность использования детекторов на основе УКРН заключается в описанном выше превосходстве полного сечения реакции УКРН над реакцией обратного бета-распада на несколько порядков для тяжелых ядер[2], что позволяет уменьшить массу рабочего вещества детектора, а следовательно, и его размер. Однако до сих пор процесс УКРН для реакторных антинейтрино не был обнаружен ввиду нескольких причин, связанных в основном с проблемами технического характера: высокая собственная радиоактивность детектора и большое количество внешних "шумов" различного происхождения, которые дают соотношение фон/эффект >1 . Рассмотрим характеристики реакторных электронных антинейтрино[10]: Так как средняя энергия для антинейтрино от реактора составляет порядка 3.5 МэВ, то энергосодержание при упругом когерентном рассеянии нейтрино будет находиться в области нескольких сотен эВ[2]. Из этого следует следующая трудность, связанная с тем, что помимо низкого порога детектора, необходим точный учёт всех систематических погрешностей, которые могут быть причиной событий, внешне похожих на УКРН. Таким образом, для работы в

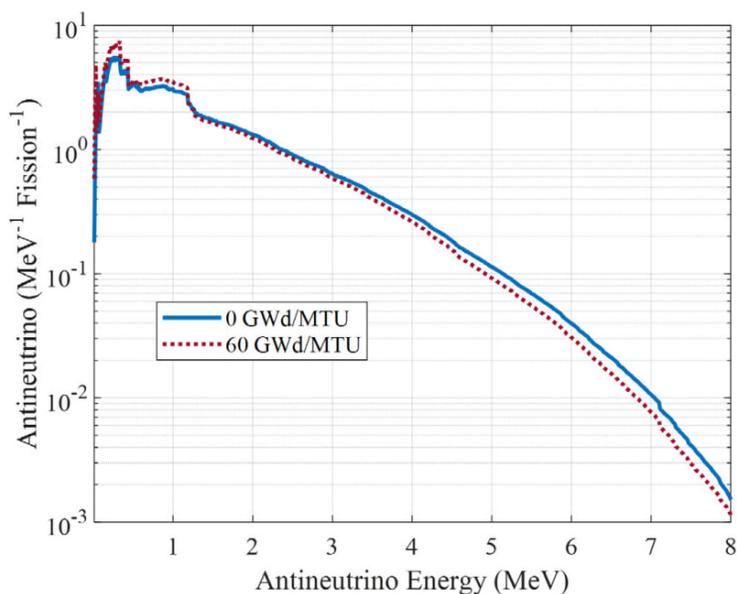


Рисунок 1 - Суммарный энергетический спектр электронных антинейтрино от ядерного реактора мощностью 3ГВт тепловой мощности

данном семестре определены следующие

Цель: Обзор современного состояния исследований упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на ядре.

Задачи:

1. Изучение существующих методик регистрации для фиксации УКР реакторного электронного антинейтрино.
2. Изучение существующих экспериментов по поиску упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино.
3. Систематизация результатов достигнутых современными экспериментами по поиску УКРН на ядрах атома от реакторных электронных антинейтрино.

Актуальность. Применение УКРН в регистрации реакторных антинейтрино открывает новые возможности по относительному контролю изотопного состава, мониторингу мощности и состояния ядерных реакторов, в том числе реакторов в аварийном состоянии.

1. ОБЗОР МЕТОДИК РЕГИСТРАЦИЙ

1.1 Полупроводниковые детекторы

Германиевые детекторы с точечным контактом, позволяют обеспечить низкий порог детектирования от порядка 100 эВ (νGen)[11] до 200 эВ (TEXONO [12], CONUS[6], Dresden-II[13])[2]. Выбор Ge также обусловлен большим числом нейтронов в ядре элемента по сравнению с Si (40 против 28) Сигнал считывается при ионизации элементарной частицей активного вещества (Ge), которое постоянно охлаждается за счет электронных охладителей. В свою очередь, они представляют из себя поток электронов низких энергий, обменивающихся температурой с "горячими" ионами Ge и тем самым охлаждают их. Также может применяться охлаждение жидким азотом диодов детектора или электрические холодильники с импульсной трубкой. Детекторы подобного типа могут обладать массой активного вещества от 1 до 2 кг. Низкий эквивалентный шум детектора обеспечивается точечным контактом, который уменьшает электроемкость детектора до порядка 1 пФ при полном электрическом разряде.[9, 14]

1.2 Низкотемпературные болометры

При низких температурах теплоёмкость материала очень резко снижается при дальнейшем охлаждении. Данный процесс описывается по закону Дебая [2]

$$C = \lambda_D \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3, \quad (5)$$

где $\lambda_D = 1944$ Дж моль⁻¹ К⁻¹, T -температура в кельвинах, Θ_D -температура Дебая. Для Ge $\Theta_D = 374$ К, а при $T \sim 20$ мК (В этот момент Ge практически становится диэлектриком) теплоемкость $C_{Ge} \sim 1$ кэВ моль⁻¹ мкК⁻¹. Этот эффект лежит в основе данного типа детекторов, которые применяют в качестве активного вещества Zn и Ge (коллаборация Ricochet[15, 16]), чьи энергии ядерной отдачи при взаимодействии с нейтронами реактора будут ограничивать общий фон детектора в ходе эксперимента, хотя нельзя исключать события, имитирующие УКРН от реакторных антинейтрино. Масштабируемость данного типа детекторов позволяет получить до 10 кг активного вещества в перспективе. Достигнутый порог регистрации для данного типа детекторов с 0.5 кг Ge в качестве активного вещества и Si поглотителя составляет порядка 15 эВ.[15]

1.3 Низкотемпературные фононные детекторы

Подобный вид детекторов также состоит из кристалла-мишени, функционирующего как поглотитель частиц. К кристаллу подключен фононный датчик. Поступающие фотоны, поглощаемые металлом детектора, разрушают Куперовские пары и изменяют кинетическую индуктивность металла, что приводит к измеримому сдвигу резонансной частоты. Поэтому датчик помещается в темноту для минимизации количества индуцированных светом разрушенных Куперовских пар. Детектор представляет из себя 0,34г Si поглотителя, изготовленного из монокристаллической пластины. Конструкция детектора позволяет масштабировать его вплоть до нескольких килограммов активного вещества. Продемонстрированный потенциал Si-устройства позволяет полагать потенциальный выигрыш детектора от использования другого кристалла с более тяжелым ядром (например Ge).[17]

1.4 Детекторы на основе ПЗС-матрицы

Технология детекторов на основе ПЗС-матриц (ПЗС-прибор с зарядовой связью), позволяет регистрировать редкие события с низким энерговыделением. [2] Данные детекторы также работают при криогенных температурах (<100 К). В результате ионизации высвобождаются носители заряда, которые под действием электрического поля перемещаются к каскаду ПЗС-матриц, выступающих в роли трековой камеры, там ряд 3-фазных электродов формирует двумерную пиксельную структуру потенциальных ям. Во время экспозиции в ячейках матрицы накапливается заряд, после чего он физически перемещается пиксель за пикселем с помощью высокочастотных синхронизирующих импульсов, пока не достигнет усилителя, где будет считываться.[18, 19] Энергетический порог подобных детекторов может достигать 20 эВ. В качестве активного вещества используются кристаллы Si.[20] На данный момент достигнута масса в десятки грамм активного вещества детектора.

1.5 Детекторы на жидких благородных газах

Для регистрации упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино возможно использование двухфазных эмиссионных детекторов на основе жидкого Ar[21] и Xe[22]. Данный тип детекторов легко масштабируется и имеет достаточно большую атомную массу активного вещества.[2] При взаимодействии с ионизирующим излучением происходит возбуждение и, соответственно, ионизация атомов активного вещества в объеме. Далее ионизирующие электроны дрейфуют к поверхности жидкой фазы детектора, где

попадают в газовый зазор с повышенным давлением и электрическим полем, достаточным для последующей электролюминесценции.[23]

Детекторы на Ar имеют преимущество в виде дешевизны сырья, большой плотности, наличия быстрой и медленной компоненты, что позволяет использовать анализ формы сигнала для подавления событий от β - и γ -источников. Однако существует проблема, связанная с распадом радиоактивного изотопа ^{39}Ar , который образуется под воздействием нейтронной компоненты космических лучей. Данный изотоп распадается по каналу β -распада, тем самым создавая дополнительные "шумы".[21]

Детекторы на Xe также могут выделять сигналы, которые можно интерпретировать как сигналы одиночных ионизационных электронов. Масса ядер ксенона в несколько раз превышает данный показатель у Ar, что дает большое сечение взаимодействия реакции. Также в подобных детекторах полностью отсутствуют долгоживущие радиоактивные изотопы. Внешний слой жидкой фазы ксенона можно использовать в качестве эффективной активной и пассивной защиты за счёт большой плотности.[2]

1.6 Детекторы на основе твердых сцинтилляторов

Данный вид детекторов основан на выделении гамма-квантов при взаимодействии частиц с сцинтиллятором, которые впоследствии фиксируются на фотоэлектронном умножителе (ФЭУ). Масса кристаллов активного вещества может достигать от десятков кг до 100 кг. Могут применяться кристаллы NaI(Tl), CsI(Na), CsI(Tl) (В скобках указаны элементы, посредством которых сцинтилляторы были активированы). Порог данных детекторов может достигать 200 эВ.[12, 24]

2. ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ УКРН НА РЕАКТОРАХ

Далее будут рассмотрены действующие эксперименты [2, 25, 26] по наблюдению упругого когерентного рассеяния реакторных антинейтрино и несколько перспективных экспериментов на наблюдение данного явления.[15, 27, 28]

2.1 νGen

Полупроводниковый германиевый детектор νGen (см.Рис.1,2) расположен на Калининской атомной электростанции (КАЭС-3.1 ГВт_{th}) на дистанции порядка 10 м от центра активной зоны в потоке антинейтрино более 5×10^{13} нейтрино/(см²×сек). Защита от космических лучей составляет порядка 50 метров водного эквивалента (м.в.э.). Масса активного вещества детектора составляет 1-1.5 кг германия, охлаждение детектора происходит посредством электронного и азотного охлаждения. Сам детектор окружен многослойной пассивной защитой, состоящей из: напечатанного на 3Д принтере нейлона для вытеснения радона, 10 см слоя бескислородной меди, 8 см слоя борированного полиэтилена с 3,5% обогащением, 10 см слоя свинца, 8 см слоя полиэтилена и 5 см слоя мюонного вето, предназначенного для уменьшения систематических погрешностей, вносимых космическими лучами при пост-обработке сигналов детектора. Также сам детектор расположен на специальном подъемном механизме, регулирующем удаление детектора от активной зоны ядерного реактора в диапазоне от 10.869 до 11.935 м. Изменение высоты позволит регулировать поток антинейтрино и подавлять систематические ошибки, связанные с уровнем фона при включенном/выключенном реакторе. Детектор провел 109.33 дня измерений при включенном реакторе ($2.47 \pm 0.14 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д}}$) и 53.31 дня измерений при выключенном реакторе ($2.42 \pm 0.20 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д}}$). Подъемный механизм был испытан и будет применяться в дальнейшем для подавления фоновых событий. В данный момент эксперимент продолжает набор событий.[11, 14]

2.2 TEXONO

До марта 2023 года эксперимент с полупроводниковым германиевым детектором, занимающийся в том числе поиском УКРН реакторных антинейтрино, проводился на АЭС Куошен (Тайвань-2.9 ГВт_{th}). Детектор располагался на расстоянии 28 метров от активной зоны реактора и имел защиту от космических лучей порядка 30 м.в.э. за счёт капитальных строений АЭС.

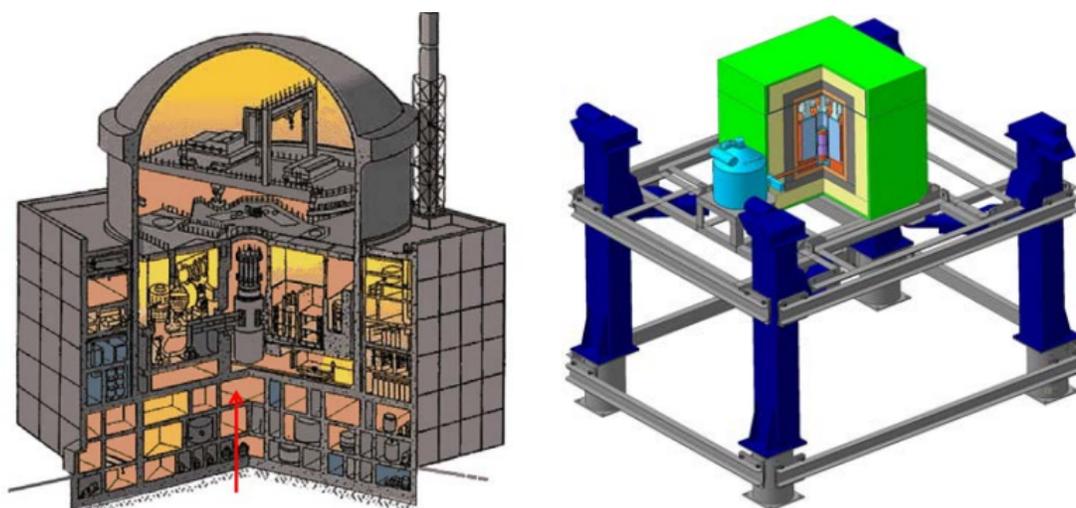


Рисунок 2 - νGen детектор

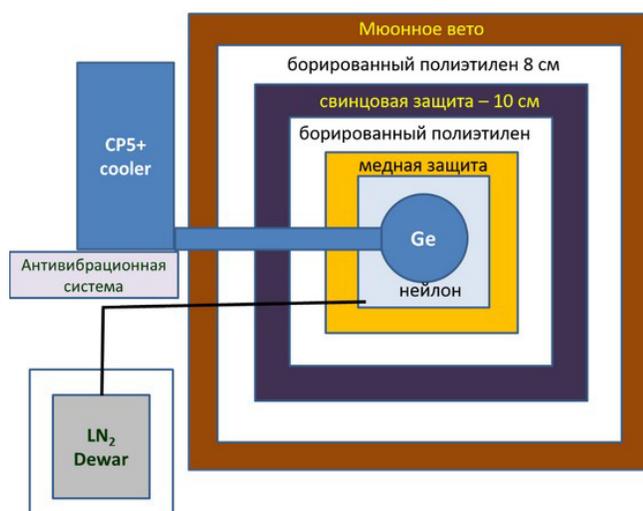


Рисунок 3 - νGen экранирование детектора

Поток нейтрино составлял порядка 6.4×10^{12} нейтрино/ $(\text{см}^2 \times \text{сек})$. Подавление фоновых событий происходило за счет данных с твердых сцинтилляторов NaI(Tl), CsI(Tl). Конструкция детектора была окружена 5 см бескислородной меди, 25 см борированного полиэтилена, 5 см стали, 15 см свинца и панели мюонного вето. Общий вес конструкции составляет 50 тонн. Достигнутый по итогам измерений порог детектора составил 200-400 эВ, при этом при пороге в 200 эВ ошибка возрастает из-за падения эффективности сигнала. Количество фоновых событий при энергии в 200 эВ, составило $25.8 \frac{\text{СОБЫТИЙ}}{\text{КГ} \times \text{Д} \times \text{КЭВ}}$. На данный момент экспериментальная программа переносится на новый реактор лаборатории Санмен, которая строится в Чжэцзяне, Китай, ввиду остановки реакторов АЭС Куошен.[12, 29]

2.3 CONUS

Эксперимент CONUS (см.Рис.3.) проводился на расстоянии 20.7 метра от центра активной зоны на АЭС Брокдорф (ФРГ-3.9 ГВт_{th}). Поток нейтрино составлял 2.3×10^{13} нейтрино/(см²×сек). 4 полупроводниковых германиевых детектора массой активного вещества по 1-1.5 кг каждый находились вместе в защитном контейнере, обеспечивавшем эквивалент 24 м.в.э. в среднем, состоявшем из полиэтилена, борированного полиэтилена, стали (серебра) и пластмассового сцинтиллятора, использованного как мюонное вето (с каждой стороны ставилось по 2 ФЭУ, по 1 на угол, а сверху ставилось 4 ФЭУ Hamamatsu R11265 U-200). Медные криостаты детектора были соединены с криокулерами, охлаждавшими детекторы. Впоследствии, ввиду высоких шумов, данные с детектора СЗ были исключены из итоговых измерений. Порог детектора составил 210 эВ. После остановки реакторов АЭС Брокдорф продолжился сбор данных при выключенном реакторе для подавления шумов. Новый эксперимент CONUS+ собирает данные на реакторе в Лейбштаде (Швейцария).[6, 9, 30, 31]

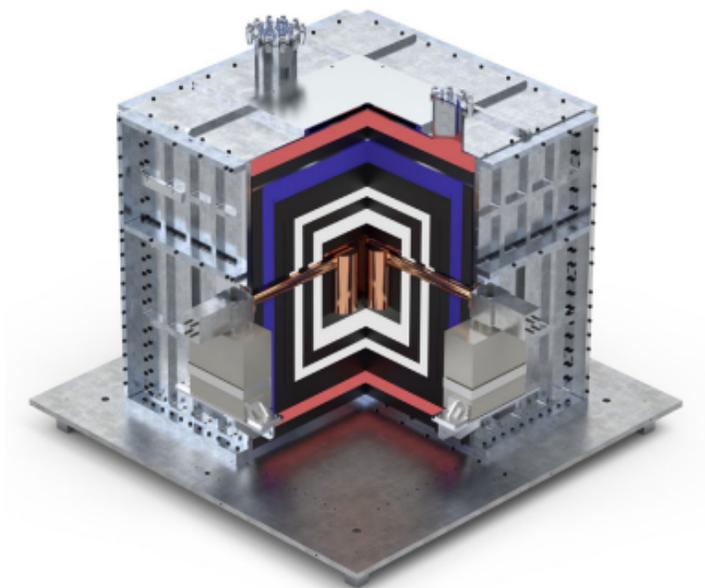


Рисунок 4 - Устройство детектора CONUS

2.4 Dresden II

Низкошумный полупроводниковый германиевый детектор с точечным контактом, с временем экспозиции в 96.4 дня и массой активного вещества в 2.924 кг. Мощность реактора DresdenII(ФРГ) составляла 2.94 ГВт_{th}. Расстояние до центра активной зоны от детектора - 10.39 м. Поток антинейтрино

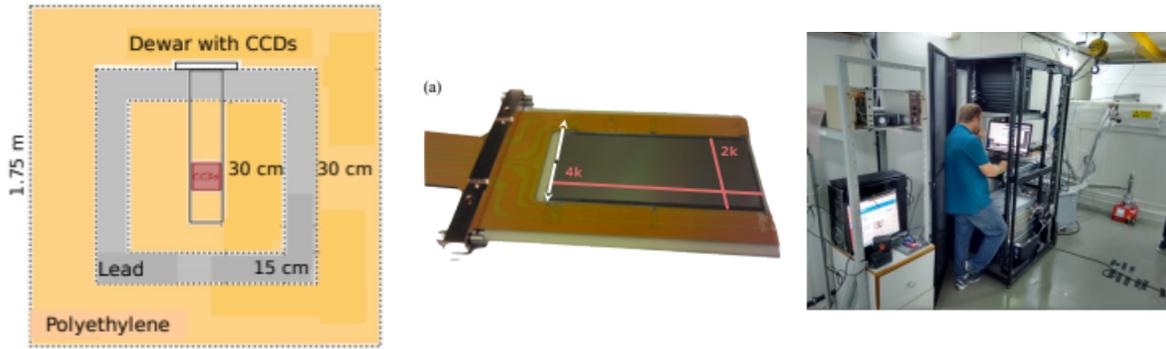


Рисунок 5 - эксперимент CONNIE

4.8×10^{13} нейтрино/ $(\text{см}^2 \times \text{сек})$ с 2% неточностью. Основной шум в области интересующих энергий (0.2-1.5кэВ) УКРН составлял рассеяние эпитептермальных нейтронов. Также влиял захват электронов в ^{71}Ge , который описывался Гауссовским распределением плотностей вероятности. Устоявшееся среднее значение шумов от электронного захвата М-оболочек составило 158 эВ, со стандартным отклонением в виде электронного шума, равного 68.5 эВ. Также на протяжении 25 дней проводился сбор данных при выключенном реакторе. В итоге был достигнут порог в 200 эВ при $8 \frac{\text{СОБЫТИЙ}}{3\text{кг} \times \text{д} \times 10^9 \text{эВ}}$. [13, 32, 33]

2.5 CONNIE

Эксперимент с детектором из каскада ПЗС-матриц(см.Рис.4). Установлен в морском контейнере в 30 метрах от активной зоны реактора ANGARA-II. Находится вне строений АЭС, поэтому прикрытие от космических лучей составляет 0 м.в.э. Масса активного вещества(Si) детектора составляет 52г. Блок ПЗС-матриц в медном сосуде Дьюара закрыт в 30 см слой полиэтилена, 15 см слой свинца и 30 см слой полиэтилена. Сам детектор охлаждается криогенной техникой до температур меньше 100 К. Поток антинейтрино от реактора составляет 7.8×10^{12} нейтрино/ $(\text{см}^2 \times \text{сек})$. Порог детектора составил 50 эВ. В 2019 году было улучшено подавление фона за счёт сжатия в 5 раз по вертикали количества пикселей матрицы при обработке данных. С установкой новых Skipper ПЗС-матриц, коллаборация рассчитывает достигнуть порога ниже 20 эВ. Полная эффективность детектора достигнута при 100 эВ. Эффективность при 15 эВ порога составляет 22%. Фоновые события составляют $5 \frac{\text{СОБЫТИЙ}}{\text{кг} \times \text{д}}$. В планах коллаборации создать 1 кг детектор, который при частоте фоновых событий в $4 \frac{\text{СОБЫТИЙ}}{\text{кг} \times \text{д}}$ с 90% доверительным интервалом должен зафиксировать УКРН в течение 30 дней.[18, 19, 20, 34]

2.6 NEON

Детектор на основе массива из 6 кристаллов сцинтиллятора NaI(Tl) весом в 13.3 кг каждый, расположен в 23.7 м от центра активной зоны реактора мощностью в 2.8 ГВт. Поток антинейтрино оценивается в 8.09×10^{12} нейтрино/(см²×сек). Приемлемый фон составляет $6 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д} \times \text{кэВ}}$ в области 2-6кэВ в электронном эквиваленте. После 100 дней измерений при выключенном реакторе и одногодичном измерении при включенном реакторе порог составил 200 эВ с чувствительностью в 3σ , при световых выходе сцинтиллятора в 22 фотоэлектронов на кэВ энергии и уровне фона в $7 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д} \times \text{кэВ}}$. По бокам от каждого кристалла расположено суммарно 2 ФЭУ, а вся данная конструкция помещена в медный корпус. Защита всего детектора состоит из расположенных на стальном палете размерами 250см×200см×20см, 2.5 см борированного полиэтилена с 5% содержанием бора, покрывающего свинцовый ящик, 20 см по бокам полиэтилена высокой плотности, и 30 см сверху и снизу. 15 см слой свинца сверху и снизу и 10 см толщина по бокам. Ограничением на общую ширину в 2 м выступают размеры галереи под детектор. Свинец, в свою очередь, окружает акриловый контейнер, заполненный жидким сцинтиллятором. 800 литров жидкого сцинтиллятора LAB-LS, необходимы для учета систематической погрешности космического фонового излучения, черенковское излучение в нём фиксировалось 5-дюймовыми ФЭУ снаружи контейнера. Сверху было установлено усиление свинцовой конструкции в виде стали 5 см толщины и 120 см длины стержней, поддерживавших блоки свинца. Между стальными стержнями и акриловой коробкой (100см×100см×100см) сохранялся зазор в 10 см. Внутренние стенки ящика были покрыты тефлоновыми листами для увеличения эффективности сбора света. Итоговый порог детектора оказался равен 200 эВ при уровне фона в диапазоне энергий от 0.2 до 0.5 кэВ $7 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д} \times \text{кэВ}}$ [24]

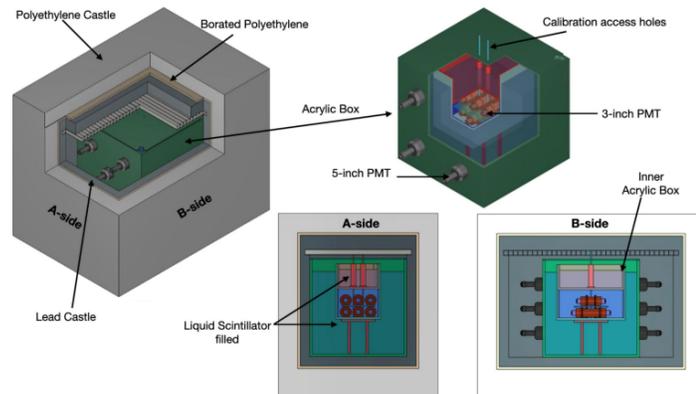


Рисунок 6 - Устройство детектора NEON

2.7 РЭД-100

Двухфазный эмиссионный детектор с ксеноном в качестве активного вещества(см.Рис.5) в количестве 130 кг в жидкой фазе, собирал в 2021-2022 г. данные на КАЭС, где детектор находился в 19 метрах от центра активной зоны, в потоке антинейтрино 1.4×10^{13} нейтрино/($\text{см}^2 \times \text{сек}$). Защита в вертикальном направлении составляет 50 м.в.э. Также детектор был окружен 5 см медным слоем и 70 см слоем воды во всех направлениях. 19 ФЭУ установлено сверху бака и 7 снизу, из которых 3 ФЭУ работают в режиме низких напряжений. Большим источником фонового сигнала, являются космические мюоны, которые порождают единичные электроны ионизации, данный эффект был частично компенсирован добавлением в конструкцию электронного затвора. Вторым по величине источником шумов была потеря электронов на границе раздела жидкость-газ. Она характеризуется коэффициентом эффективности извлечения электронов, который составил 0,33. Уменьшение шумов на верхней матрице ФЭУ происходило за счёт учёта вероятности наличия точечного источника освещения в газовом зазоре. Для данных расчётов применялась нейронная сеть. Также другая нейронная сеть применялась для прогнозирования вероятности события по трёхмерным изображениям сигналов. В результате верхние пределы амплитуды УКРН составили от 61 до 94 раз больше в сравнении с предсказаниями СМ в зависимости от модели первичного спектра антинейтрино. Пороги соответствуют для электронной отдачи 0.2кэВ И 2кэВ для эквивалентной энергии отдачи ядра, при том что соответствует УКРН от 8 МэВ антинейтрино энергия отдачи ксенона в 1кэВ. При экстраполяции полученных данных за 1 год работы детектора было вычислено, что в 90% интервале доверия пределы амплитуды процесса превышают в 15-20 раз предсказания СМ, что все ещё недостаточно для фиксации УКРН. В дальнейшем команда проекта планирует перейти на жидкий аргон в качестве активного вещества, ввиду проблем с эффективностью извлечения электронов из жидкого. Хе.[2, 7, 23, 35, 36]

2.8 Готовящиеся эксперименты

К таковым относятся эксперименты на детекторах с низкотемпературными болометрами, такие как Ricochet[15, 16], Miner[27],NUCLEUS[37] и аналогичный РЭД-100 китайский эксперимент RELICS[28], с двухфазным ксеноновым детектором меньшего объёма активного вещества, но с большим числом ФЭУ(24 с одной стороны против 19 у РЭД-100). Эксперименты с низкотемпературными болометрами обещают низкие пороги в 30 эВ при возможности масштабирования детекторов от 0.5 кг до 10 кг. При этом для них крайне

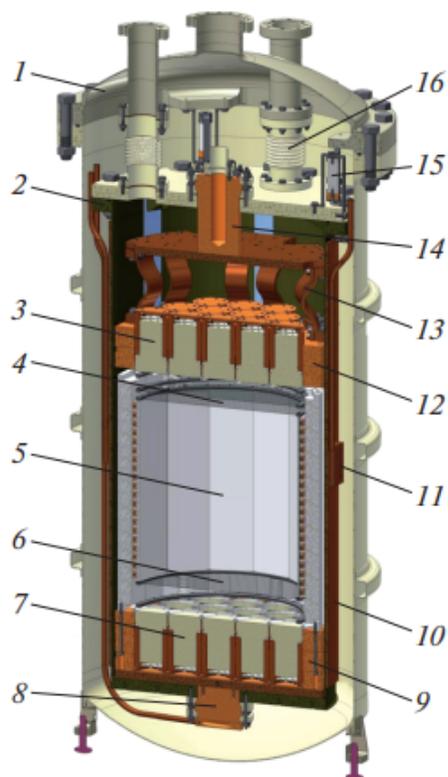


Рисунок 7 - Устройство детектора РЭД-100

важно охлаждение до сверхнизких температур и также важен учёт шумов, которые могут превосходить измеряемые сигналы от УКРН.

2.9 Систематизация полученных данных

При множестве достоинств вышеперечисленных экспериментов, пока ни на одном из них не было зафиксировано УКРН реакторных антинейтрино на ядре. Происходит это по причинам недостаточно низкого порога детекторов и очень больших шумов в низких диапазонах энергий [0-0.5 кЭв].

При систематизации вышеописанной информации получилась таблица:

Название	Тип детектора	Порог измерений	Уровень фона*	ROI
РЭД100	2-ух фазовый эмиссионный детектор на благородном газе	1.0кэВ	$5.22 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д}}$ **	события в 1 электрон ионизации
NEON	Кристал. сцинтиллятор NaI[Tl]	0.2кэВ	$7 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д}}$	0.2-0.5кэВ
CONUS	Полупроводниковый детектор (Ge - 3×1,5кг)	0.21кэВ	$10 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д} \times \text{кэВ}}$	0.21-1.00кэВ
TEXONO	Полупроводниковый детектор (Ge - 1,06кг)	0.2кэВ	$9 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д} \times \text{кэВ}}$	0.2-0.4кэВ
CONNIE	ПЗС-матрицы из Si (52г)	0.015кэВ-22% <i>ef</i> , 0.1кэВ-100% <i>ef</i>	$5 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д}}$	0.15-0.50кэВ
Dresden2	Полупроводниковый детектор (Ge - 3кг)	0.2кэВ	$267 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д} \times \text{кэВ}}$	0.2-1.5кэВ
νGen	Полупроводниковый детектор (Ge - 1,4кг)	0.25кэВ	$60 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д} \times 1\text{кэВ}}$	0.32-0.36кэВ

Таблица 1 - Характеристики детекторов ч.1

* речь идет о фоновых событиях в области интереса (ROI)

** при регистрации 4 электронов ионизации

Название	Разрешение(FWHM)	Доп. информация
РЭД100	-	Верхний предел амплитуды рассеяния в 15-20 раз больше предсказаний СМ
NEON	0.25кэВ при 0.30кэВ	-
CONUS	0.07кэВ при 0.21кэВ	Верхний предел ожидаемого количества событий в 2 раза меньше чем предсказывает СМ($0.34 \frac{\text{событий}}{\text{кг} \times \text{д}}$)
TEXONO	0.07кэВ при 0.20кэВ	Верхний предел отношения экспериментального сечения к сечению СМ $\rho < 4.7$
CONNIE	-	-
Dresden2	0.16кэВ при 1.29кэВ	-
ν Gen	0.10кэВ при 1.05кэВ	Верхний предел отношения экспериментального сечения к сечению СМ $\rho = 4.3$

Таблица 2 - Характеристики детекторов ч.2

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были рассмотрены существующие эксперименты по поиску реакторных электронных антинейтрино. Благодаря объемам собранной информации удалось систематизировать параметры различных детекторов, в результате чего выяснилось:

1. Самый низкий порог детектора достигнут на эксперименте, с применением технологии кремниевой ПЗС-матрицы - CONNIE - 100 эВ. Однако масса активного вещества в эксперименте достигает только 52г - чего явно недостаточно для фиксации УКРН.
2. Детекторы с применением неорганической мишени имеют конкурентоспособные пороги детектирования при простоте конструкции и отсутствии необходимости работать с криогенным охлаждением детектора
3. Низкотемпературные болометры имеют пороги детектирования на уровне детекторов на ПЗС-матрицах, при этом у них возможно использование более тяжелого ядра-мишени. Также конструкция низкотемпературных болометров, позволяет их масштабировать намного проще, чем детекторы на ПЗС-матрицах.[38]

Данные факты могут иметь значение при дальнейшем поиске УКРН для реакторных антинейтрино, в том числе при подготовке новых экспериментов по поиску УКРН. Это может стать необходимым по той причине, что нейтринный мониторинг ядерных реакторов является крайне необходимой технологией для обеспечения дополнительной безопасности в современной атомной отрасли.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Freedman Daniel Z. Coherent effects of a weak neutral current // *Physical Review D*. — 1974. — Vol. 9, no. 5. — P. 1389.
2. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре-недавно обнаруженный тип взаимодействия нейтрино низких энергий / Акимов Д.Ю., Белов В.А., Болоздыня А.И. и others и // *Успехи Физических наук*. — 2019. — С. 55–93.
3. Measurement of the Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering Cross Section on CsI by COHERENT / Akimov D., An P., Awe C., et al. // *Physical Review Letters*. — 2022. — Vol. 129.
4. First detection of coherent elastic neutrino-nucleus scattering on germanium. — 2024. — [2406.13806](#).
5. В.А. Бедняков, Наумов Д.В., Титкова И.В. О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНОГО И НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ (АНТИ) НЕЙТРИНО НА ЯДРАХ // *Ядерная физика*. — 2021. — Т. 84, № 3. — С. 235–249.
6. A novel experiment for coherent elastic neutrino nucleus scattering: CONUS / Buck Christian, Fülber K, Hakenmüller J, et al. // *Journal of Physics: Conference Series* / IOP Publishing. — 2020. — Vol. 1342. — P. 012094.
7. Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 / Акимов Д.Ю., Александров И.С., Белов В.А. и others и // *Приборы и техника эксперимента*. — 2017. — № 2. — С. 22–28.
8. Kouzakov Konstantin A., Studenikin Alexander I. Neutrino-atom collisions // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 718.
9. Constraints on elastic neutrino nucleus scattering in the fully coherent regime from the CONUS experiment / Bonet H, Bonhomme A, Buck C, et al. // *Physical review letters*. — 2021. — Vol. 126, no. 4. — P. 041804.
10. Kim Yeongduk. Detection of Antineutrinos for Reactor Monitoring // *Nuclear Engineering and Technology*. — 2016. — Vol. 48, no. 2. — P. 285–292. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573316000498>.

11. Изучение свойств нейтрино с помощью низкофонового германиевого спектрометра ν GEN / Белов В.В., Бруданин В.Б., Вольных и др. // ν GeN. — 2021.
12. Wong Henry Tsz-King. Taiwan EXperiment On Neutrino – History, Status and Prospects. — 2016. — [1608.00306](#).
13. Bounds on new physics with data of the Dresden-II reactor experiment and COHERENT / Coloma Pilar, Esteban Ivan, Gonzalez-Garcia M. C., et al. // [Journal of High Energy Physics](#). — 2022. — May. — Vol. 2022, no. 5. — Access mode: [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP05\(2022\)037](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP05(2022)037).
14. on behalf of the ν GeN collaboration A.Lubashevskiy. First results of the ν GeN experiment at Kalinin Nuclear Power Plant on coherent elastic neutrino-nucleus scattering // JINR. — 2021.
15. First demonstration of 30 eVee ionization energy resolution with Ricochet germanium cryogenic bolometers / Augier C., Baulieu G., Belov V., et al. // [European Physical Journal C](#). — 2024. — Vol. 84.
16. Results from a prototype TES detector for the Ricochet experiment / Augier C., Baulieu G., Belov V., et al. // [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#). — 2023. — Dec. — Vol. 1057. — P. 168765. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2023.168765>.
17. Delicato Daniele et al. Germanium target sensed by phonon-mediated kinetic inductance detectors. — 2024. — 12. — [2412.07379](#).
18. [The CONNIE experiment](#) / Aguilar-Arevalo A., Bertou X., Bonifazi C., et al. // [Journal of Physics: Conference Series](#). — 2016. — Vol. 761.
19. Aguilar-Arevalo Alexis A. [Upgraded CONNIE experiment with Skipper CCDs/CONNIE First results with Skipper-CCDs](#) // [Proceedings of Science](#). — 2024. — Vol. 441.
20. on behalf of the CONNIE collaboration Irina Nasteva. Status and perspectives of the CONNIE experiment // CONNIE collaboration. — 2022.
21. Кумпан АВ. РАЗРАБОТКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УПРУГОГО КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ НЕЙТРИНО НА АТОМНЫХ ЯДРАХ // Приборы и техника эксперимента. — 2020. — № 5. — С. 32–37.

22. Использование эмиссионного двухфазного детектора на благородном газе для обнаружения редкого процесса когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре / Акимов Д.Ю., Болоздыня А.И., Ефременко Ю.В. и др. // Мир измерений No 8 2014. — 2017. — С. 22.
23. Akimov D. Yu. et al. First constraints on the coherent elastic scattering of reactor antineutrinos off xenon nuclei. — 2024. — 11. — 2411.18641.
24. Exploring coherent elastic neutrino-nucleus scattering using reactor electron antineutrinos in the NEON experiment / Choi J. J., Jeon E. J., Kim J. Y., et al. // [European Physical Journal C](#). — 2023. — Vol. 83.
25. Бояркин О.М., Будько А.А. Детекторы, основанные на эффекте упругого когерентного рассеяния антинейтрино на ядрах тяжелых элементов // САХАРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2022 ГОДА: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ XXI ВЕКА. — 2022.
26. Undagoitia Teresa Marrodán. Neutrino physics: Theory and experiment (SS2021) Coherent neutrino scattering // Max-Planck-Institut für Kernphysik. — 2021.
27. Background Studies for the MINER Coherent Neutrino Scattering Reactor Experiment. — 2016. — [1609.02066](#).
28. Reactor neutrino liquid xenon coherent elastic scattering experiment / Cai Chang, Chen Guocai, Chen Jiangyu, et al. // *Physical Review D*. — 2024. — Vol. 110, no. 7. — P. 072011.
29. New Limits on Coherent Neutrino Nucleus Elastic Scattering Cross Section at the Kuo-Sheng Reactor Neutrino Laboratory / Karmakar S, Singh MK, Sharma V, et al. // arXiv preprint arXiv:2411.18812. — 2024.
30. Large-size sub-keV sensitive germanium detectors for the CONUS experiment / Bonet H, Bonhomme A, Buck C, et al. // *The European Physical Journal C*. — 2021. — Vol. 81, no. 3. — P. 1–18.
31. Final CONUS results on coherent elastic neutrino nucleus scattering at the Brokdorf reactor / Ackermann N, Bonet H, Bonhomme A, et al. // arXiv preprint arXiv:2401.07684. — 2024.
32. Measurement of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering from Reactor Antineutrinos / Colaresi J., Collar J. I., Hossbach T. W., et al. // [Phys. Rev. Lett.](#) — 2022. — Vol. 129, no. 21. — P. 211802. — 2202.09672.

33. First results from a search for coherent elastic neutrino-nucleus scattering at a reactor site / Colaresi J., Collar J. I., Hossbach T. W., Kavner A. R. L., Lewis C. M., Robinson A. E., and Yocum K. M. // *Phys. Rev. D.* — 2021. — Oct. — Vol. 104. — P. 072003. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.104.072003>.
34. Search for coherent elastic neutrino-nucleus scattering at a nuclear reactor with CONNIE 2019 data / Aguilar-Arevalo Alexis, Bernal Javier, Bertou Xavier, et al. // *Journal of High Energy Physics.* — 2022. — Vol. 2022.
35. RED-100 detector for the first observation of the elastic coherent neutrino scattering off xenon nuclei / Akimov D. Yu, Berdnikova A. K., Belov V. A., et al. // *Journal of Physics: Conference Series.* — 2016. — Vol. 675.
36. First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100 / Akimov D.Y., Belov V.A., Bolozdynya A.I., et al. // *Journal of Instrumentation.* — 2020. — feb. — Vol. 15, no. 02. — P. P02020. — Access mode: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/P02020>.
37. Observation of a Nuclear Recoil Peak at the 100 eV Scale Induced by Neutron Capture / Abele H., Angloher G., Bento A., et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2023. — May. — Vol. 130. — P. 211802. — Access mode: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.130.211802>.
38. Observation of a Nuclear Recoil Peak at the 100 eV Scale Induced by Neutron Capture / Abele H., Angloher G., Bento A., et al. // *Physical Review Letters.* — 2023. — May. — Vol. 130, no. 21. — Access mode: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.211802>.