

## Поиск бозонной темной материи нейтринным детектором iDREAM на Калининской атомной электростанции

А.В. Абрамов,<sup>1</sup> Р.Р. Алыев,<sup>2</sup> М.Б. Громов,<sup>3,4</sup> И.Н. Жутиков,<sup>1,5</sup> К.К. Киселев,<sup>5</sup> С.М. Киселев,<sup>2</sup>  
 А.В. Константинов,<sup>1</sup> Д.С. Кузнецов,<sup>1</sup> Е.А. Литвинович,<sup>1,5,\*</sup> И.Н. Мачулин,<sup>1,5</sup> А.Е. Мурченко,<sup>1</sup>  
 А.М. Немерюк,<sup>1</sup> Р.Р. Нугманов,<sup>1,†</sup> А.Ю. Оралбаев,<sup>1,5</sup> Д.В. Попов,<sup>1,5</sup> А.А. Растишешин,<sup>1,5</sup>  
 М.А. Стриж,<sup>1,3</sup> В.А. Хватов,<sup>2</sup> А.С. Чепурнов,<sup>3</sup> Д.А. Чмыхало,<sup>1,5</sup> А.В. Этенко<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Россия, 123182, Москва

<sup>2</sup>Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская атомная станция». Россия, 171841, Удомля

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва

<sup>4</sup>Объединенный институт ядерных исследований. Россия, 141980, Дубна

<sup>5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Россия, 115409, Москва  
 (Поступила в редакцию 16.10.2024; после доработки 06.12.2024; подписана в печать 16.12.2024)

Представлены результаты исследований по поиску «темных» бозонов нейтринным детектором iDREAM на Калининской АЭС. На основе данных о составе активной зоны реактора ВВЭР-1000 и долях делений основных делящихся изотопов рассчитан спектр  $\gamma$ -излучения в активной зоне. В предположении, что темные бозоны могут образоваться в активной зоне при рассеянии  $\gamma$ -квантов на электронах и быть зарегистрированы детектором iDREAM в обратном процессе, установлены модельно-независимые экспериментальные ограничения на константу взаимодействия (псевдо)скалярных темных бозонов с заряженными лептонами Стандартной модели  $g_X$ .

PACS: 95.35.+d. УДК: 539.1.

Ключевые слова: темная материя, скрытый сектор, темный бозон, нейтринный детектор, ядерный реактор.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2520203](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2520203)

### ВВЕДЕНИЕ

Поисковые исследования Темной материи (ТМ) формируют одно из ключевых направлений развития естествознания последних десятилетий. Астрофизические и космологические данные указывают на то, что около 85% массы вещества Вселенной приходится на ТМ, однако ее природа до сих пор остается неизвестной. В настоящее время интенсивно изучается широкий спектр кандидатов на роль ТМ, включая массивные компактные объекты гало галактик, массивные слабовзаимодействующие частицы, легкие гравитино, стерильные нейтрино и мн. др. Широко рассматривается «скрытый» сектор частиц и существование нового бозона (т.н. «темного» бозона), который может взаимодействовать с током Стандартной модели (СМ) и обеспечить «мост» между частицами СМ и скрытого сектора [1–3].

Основные вопросы скрытого сектора частиц и взаимодействий обсуждались в работах [4–6]. В концепции бозонной ТМ обычно рассматриваются векторные (темный фотон) и (псевдо)скалярные (аксион, аксионо-подобные частицы, легкие бозоны

Хиггса и др.) частицы. На массу ТБ как единственной составляющей ТМ существуют сильные ограничения [7]. Если же ТБ составляет только часть ТМ, тогда разрешенная область значений его параметров значительно расширяется.

Экспериментальный поиск ТБ ведется в широком диапазоне их масс, охватывающем более 30 порядков величины и, как правило, ограниченным сверху  $m_X \leq 2m_e$ , где  $m_e$  — масса электрона. Эксперименты включают поиск влияния ТБ на поглощение света в межгалактической среде [8], исследования эволюции звездных скоплений как следствия флуктуации плотности бозонной ТМ [9], изучение потери энергии звездами за счет испускания ТБ [10], измерение вызванных взаимодействием материи с ТБ осцилляций физических констант с помощью атомных часов [11], поиск переходов ТБ в фотоны в неоднородном электромагнитном поле [12] и др. Результаты многих экспериментов по поиску ТБ зависят от локальной плотности ТМ и поэтому являются модельно-зависимыми. Вместе с тем темные бозоны могут образовываться в процессах с участием  $\gamma$ -квантов в активной зоне (АЗ) ядерных реакторов. Это делает возможным проведение поисковых, модельно-независимых исследований ТБ в реакторных нейтринных экспериментах.

В [13] было показано, что для векторных ТБ необходимость учета осцилляций темный фотон  $\leftrightarrow$  фотон СМ приводит к значительной потере чув-

\* E-mail: [Litvinovich\\_EA@nrcki.ru](mailto:Litvinovich_EA@nrcki.ru)

† E-mail: [Nugmanov\\_RR@nrcki.ru](mailto:Nugmanov_RR@nrcki.ru)

ствительности к ним детекторов реакторных антинейтрино. Чувствительность сохраняется для (псевдо)скалярных ТБ в области масс  $m_X \lesssim 10^6$  эВ [14]. Таким образом, в настоящей работе мы ограничимся рассмотрением скалярных и псевдоскалярных ТБ, источником которых может являться АЗ ядерного реактора.

Мы будем предполагать, что ТБ слабо взаимодействуют с заряженными лептонами СМ. Такое взаимодействие для скалярных и псевдоскалярных частиц, соответственно, феноменологически описывается юкавскими слагаемыми в лагранжиане [15]:

$$\mathcal{L} \supset -g_X \bar{\psi} \psi X, \quad (1)$$

$$\mathcal{L} \supset -g_X \bar{\psi} \gamma^5 \psi X, \quad (2)$$

где  $m_X$  — масса ТБ,  $X$  — поле, описывающее ТБ,  $g_X$  — константа взаимодействия ТБ с заряженными лептонами СМ,  $\psi$  — поле заряженного фермиона (электрона) СМ. Подобная формулировка модели обеспечивает применимость получаемых далее результатов к любой теории, где возникают слагаемые такого вида. Ниже представлены результаты поиска темных бозонов нейтринным детектором iDREAM, размещенным на промышленном реакторе Калининской АЭС (КАЭС).

## 1. ДЕТЕКТОР IDREAM

Нейтринный детектор iDREAM (industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring) расположен на удалении 19.5 м от центра АЗ реактора ВВЭР-1000 ( $P_{th} = 3000$  МВт) энергоблока № 3 КАЭС. Детектор предназначен для мониторинга состояния и мощности реактора по потоку антинейтрино из активной зоны.

Схематическое изображение детектора приведено на рис. 1. Детектор представляет собой два концентрических бака из нержавеющей стали, накрытые общей герметичной крышкой. Акриловая мембрана разделяет внутренний бак на две части. Верхняя часть (буфер) заполнена линейным алкилбензолом (ЛАБ), а нижняя (мишень для нейтрино) — гадолинизированным жидким органическим сцинтиллятором на основе ЛАБ (Gd-ЖОС). Общая масса Gd-ЖОС 1 т. Мишень просматривают 16 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), расположенных на крышке внутреннего бака. Пространство между внутренним и внешним баками заполнено ЖОС без Gd, просматривается 12 ФЭУ и играет роль гамма-кэтчера, а также пассивной защиты мишени от внешней фоновой радиоактивности. Подробное описание детектора приведено в [16].

## 2. СПЕКТР $\gamma$ -КВАНТОВ В АЗ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Предполагается, что темный бозон  $X$  может образоваться в АЗ в процессе рассеяния  $\gamma$ -квантов

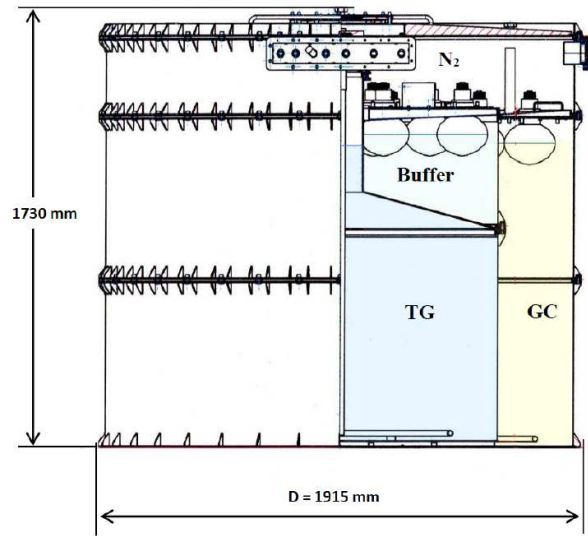


Рис. 1. Схематическое изображение детектора iDREAM [16]

с наименее связанными электронами атомов, аналогично эффекту Комптона:  $\gamma e^- \rightarrow e^- X$ . Основными источниками  $\gamma$ -квантов в АЗ являются мгновенное  $\gamma$ -излучение деления ядер и  $(n, \gamma)$ -реакции. Малый, согласно [17], вклад других источников  $\gamma$ -излучения (распады долгоживущих изотопов, неупругое рассеяние нейтронов, аннигиляция  $e^+e^-$ -пар и др.) не учитывался.

Спектры мгновенного  $\gamma$ -излучения  $S_p^i$ , МэВ<sup>-1</sup> основных делящихся ядер ( $i = {}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{241}\text{Pu}$ ) были получены из открытых баз ядерных данных [18] и нормированы на множественность  $\gamma$ -квантов по результатам работ [19–21]. После этого спектры были просуммированы с долями делений  $\alpha_i$  за выбранный для анализа период набора данных детектором iDREAM. Полученный таким образом взвешенный спектр мгновенного  $\gamma$ -излучения был нормирован на тепловую мощность реактора  $P_{th}$  и среднее энерговыделение на один акт деления  $\langle E_f \rangle$  [22].

Вклад от  $(n, \gamma)$ -реакций рассчитывался на основе данных о составе АЗ реактора, согласно таблице. Состав был рассчитан для топливной кампании реактора ВВЭР-1000 длительностью  $\sim 500$  эфф. сут, при которой загружаемые в АЗ на первый цикл эксплуатации ТВС содержат гадолиний в качестве выгорающего поглотителя нейтронов. Таким образом, вследствие наличия в АЗ гадолиния с высоким сечением захвата тепловых нейтронов и его выгорания к концу топливной кампании выход  $(n, \gamma)$ -реакций в начале и конце кампании различен.

Спектры  $\gamma$ -излучения  $S_{n\gamma}^j$ , МэВ<sup>-1</sup>, и сечения  $(n, \gamma)$ -реакций  $\sigma_j$ , см<sup>2</sup>, взяты из открытых баз данных [23]. После вычисления скоростей  $(n, \gamma)$ -реакций  $R_j = n_j V \Phi \sigma_j$ , где  $n_j$  — концентрация ядер  $j$  в АЗ (см. таблицу),  $V = 2.8 \cdot 10^7$  см<sup>3</sup> — объем АЗ, и  $\Phi = 10^{13}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> — поток нейтронов

Таблица 1. Состав АЗ реактора ВВЭР-1000 энергоблока № 3 КАЭС в начале и конце топливной кампании длительностью ~500 эфф. сут

Изоотоп	Концентрация, см <sup>-3</sup>	
	Начало кампании	Конец кампании
О	2.582 · 10 <sup>22</sup>	2.582 · 10 <sup>22</sup>
Н	2.516 · 10 <sup>22</sup>	2.516 · 10 <sup>22</sup>
<sup>238</sup> U	6.196 · 10 <sup>21</sup>	6.101 · 10 <sup>21</sup>
Zr	5.634 · 10 <sup>21</sup>	5.634 · 10 <sup>21</sup>
<sup>235</sup> U	2.132 · 10 <sup>20</sup>	1.164 · 10 <sup>20</sup>
<sup>239</sup> Pu	2.453 · 10 <sup>19</sup>	4.292 · 10 <sup>19</sup>
Gd	1.528 · 10 <sup>19</sup>	0
<sup>240</sup> Pu	7.237 · 10 <sup>18</sup>	1.540 · 10 <sup>18</sup>

в АЗ, для полного спектра  $\gamma$ -квантов в АЗ получаем:

$$\frac{dN}{dE_\gamma} = \frac{P_{th}}{\langle E_f \rangle} \sum_i \alpha_i S_p^i + \sum_j R_j S_{n\gamma}^j. \quad (3)$$

Взвешивание спектров мгновенных  $\gamma$ -квантов с долями делений  $\alpha_i$  и нормировка на энерговыделение  $\langle E_f \rangle$ , а также взвешивание спектров  $\gamma$ -излучения от  $(n, \gamma)$ -реакций со скоростями реакций  $R_j$  позволяют учесть особенности топливного состава реактора ВВЭР-1000 и уточнить как общую нормировку, так и форму спектрального состава  $\gamma$ -излучения в АЗ по сравнению с широко используемыми и упрощенными оценками (см., например, [24]). Полученный полный спектр  $\gamma$ -излучения (3) представлен на рис. 2 для начала (синий) и конца (красный) топливной кампании. Ошибки расчета обусловлены погрешностями множественности  $\gamma$ -излучения [19–21] (~7%), ошибками долей делений  $\alpha_i$  (~4%), тепловой мощности  $P_{th}$  (~2%) и ошибками интенсивностей линий  $(n, \gamma)$ -реакций (~2%). Таким образом, для итоговой погрешности спектра (3) можно консервативно принять  $\sigma_\gamma = 10\%$ .

Энергетический спектр рождённых в АЗ тёмных бозонов можно рассчитать по формуле:

$$\frac{dN}{dE_X} = \int_{E_{\gamma min}}^{E_{\gamma max}} \frac{1}{\sigma_{tot} + \sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}} \frac{d\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}}{dE_X} \frac{dN}{dE_\gamma} dE_\gamma, \quad (4)$$

где  $E_X$  — энергия родившегося ТБ,  $\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}$  — полное сечение рождения ТБ,  $\frac{d\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}}{dE_X}$  — дифференциальное сечение рождения ТБ [15]. Полное сечение рассеяния  $\gamma$ -квантов на электронах  $\sigma_{tot}$  было рассчитано для состава АЗ реактора ВВЭР-1000 (таблица) с использованием открытой базы ядерных данных [25]. Рассчитанные по формуле 4 спектры ТБ в АЗ реактора изображены на рис. 3 для скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) темных бозонов для  $g_X = 10^{-4}$  и  $m_X = 1$  эВ.

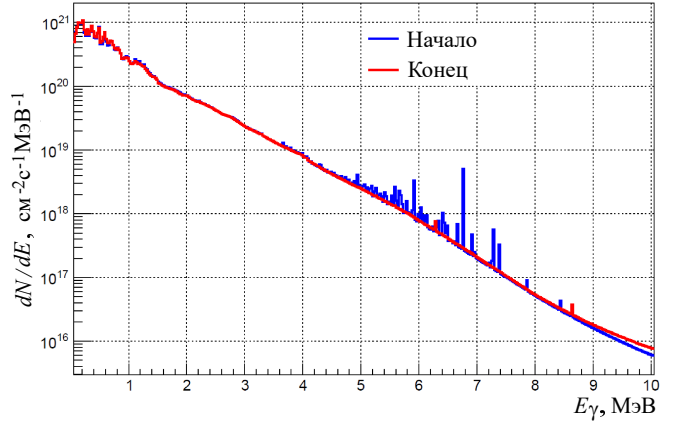


Рис. 2. Суммарные энергетические спектры мгновенных  $\gamma$ -квантов и  $\gamma$ -квантов, рождённых в  $(n, \gamma)$ -реакциях в АЗ реактора ВВЭР-1000 энергоблока № 3 КАЭС в начале (синий) и конце (красный) топливной кампании

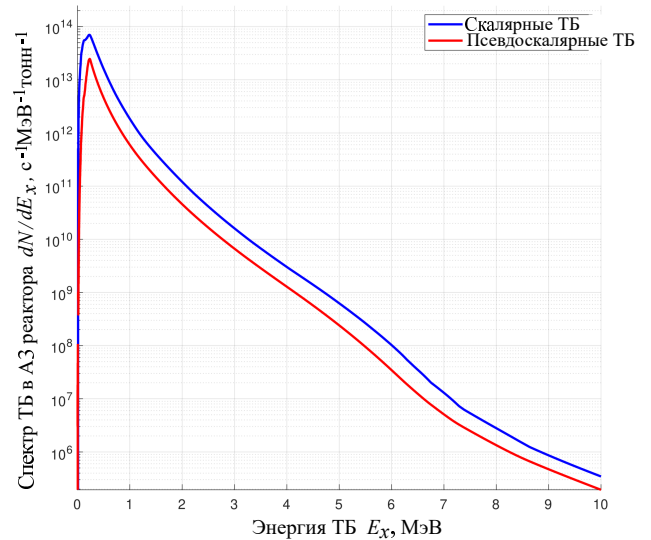


Рис. 3. Рассчитанные по формуле (4) энергетические спектры для скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) темных бозонов в АЗ реактора. Спектры приведены для  $g_X = 10^{-4}$  и  $m_X = 1$  эВ

### 3. СИГНАЛ ОТ ТЁМНЫХ БОЗОНОВ В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM

Предполагается, что ТБ может быть зарегистрирован по реакции обратного рассеяния на электронах сцинтиллятора с образованием вторичного  $\gamma$ -кванта:  $Xe^- \rightarrow e^- \gamma'$ . Ввиду того, что детектор IDREAM является гомогенным, электрон отдачи и  $\gamma$ -квант будут регистрироваться как одно событие. В предположении, что АЗ реактора является точечной, а поток ТБ из нее — изотропный, число одиночных событий с энергией  $E_{ev}$  за время экспо-

зиции  $T$  в детекторе iDREAM составит:

$$\frac{dN}{dE_{ev}} = \frac{N_e T}{4\pi R^2} \int_{E_{\gamma' \min}}^{E_{\gamma' \max}} \frac{d\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e}}{dE_{\gamma'}} \frac{dN}{dE_X} \times \exp(-R\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e} n_e) dE_{\gamma'}. \quad (5)$$

В этой формуле  $N_e$  — плотность электронов в мишени детектора,  $R$  — расстояние от центра АЗ до центра детектора,  $\frac{d\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e}}{dE_{\gamma'}}$  — дифференциальное сечение реакции обратного рассеяния ТБ на электроне [15],  $E_{\gamma'}$  — энергия вторичного  $\gamma$ -кванта. Для учета ослабления потока ТБ на пути от АЗ к детектору в (5) введен экспоненциальный множитель, в котором  $\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e}$  — полное сечение обратного рассеяния ТБ на электронах вещества,  $n_e$  — средняя концентрация электронов на пути к детектору (воздух, бетон). Ожидаемый в детекторе iDREAM энергетический спектр событий взаимодействия ТБ приведён на рис. 4. Отметим, что спектр пропорционален  $g_X^4$ , а изменение массы ТБ влияет на его форму только в низкоэнергетической области.

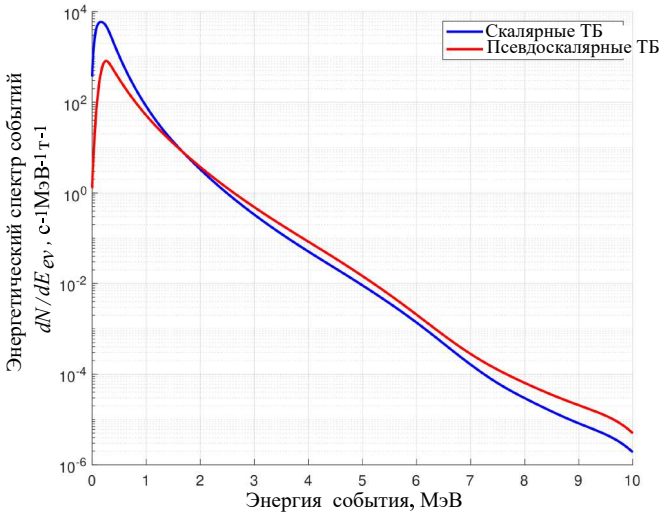


Рис. 4. Рассчитанные по формуле (5) ожидаемые в детекторе iDREAM энергетические спектры событий взаимодействия скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) темных бозонов. Спектры приведены для  $g_X = 10^{-4}$  и  $m_X = 1$  эВ

#### 4. АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа были взяты периоды набора данных детектором iDREAM, соответствующие 47 (37) суткам живого времени при включенном (выключенном) реакторе в начале топливной кампании, когда поток  $\gamma$ -квантов в АЗ является наибольшим. Набор данных при включенном реакторе осуществлялся в период его стабильной работы на мощности вблизи среднего значения  $P_{th} = 3093 \pm 6$  МВт. Были

отобраны одиночные события с энергией в интервале от 5 до 10 МэВ, для которых в течение 100 мкс до и после не было зарегистрировано других событий. После каждого зарегистрированного детектором космического мюона вводилось мертвое время 150 мкс.

На рис. 5 показана скорость счета отобранных событий в периоды выключенного и включенного реактора. Каждая точка на рисунке соответствует одной серии набора данных длительностью, в среднем, 4 ч. Предполагая, что скорость счёта фоновых одиночных событий не зависит от режима работы реактора, учёт фона можно произвести вычитанием скорости счёта детектора при выключенном реакторе  $R_{OFF} = 1.986 \pm 0.001(\text{стат.}) \text{ c}^{-1}$  из скорости счёта при включенном реакторе  $R_{ON} = 2.030 \pm 0.001(\text{стат.}) \text{ c}^{-1}$ ;  $R_{exp} = R_{ON} - R_{OFF} = 0.044 \pm 0.001(\text{стат.}) \text{ c}^{-1}$ . После такого вычитания величина  $R_{exp}$  должна содержать события взаимодействия ТБ, которые, как предполагается, происходят при включенном реакторе, а также события, связанные с флуктуациями скорости счёта.

Основной вклад в погрешность измеренной величины  $R_{exp}$  будет вносить систематическая ошибка  $\Delta R_f$ , связанная с флуктуацией скорости счёта. Численное значение  $\Delta R_f$  определялось как среднеквадратичное отклонение распределений значений скорости счёта по всем сериям сбора данных при выключенном  $\Delta R_{f,OFF} = 0.027 \text{ c}^{-1}$  и включенном  $\Delta R_{f,ON} = 0.027 \text{ c}^{-1}$  реакторе и составило  $\Delta R_f = \sqrt{\Delta R_{f,OFF}^2 + \Delta R_{f,ON}^2} = 0.038 \text{ c}^{-1}$ . Поскольку измеренные значения  $\Delta R_{f,OFF}$  и  $\Delta R_{f,ON}$  значительно превышают статистические ошибки величин  $R_{ON}$  и  $R_{OFF}$ , можно оценить величину вносимой в  $R_{exp}$  систематической погрешности на

основании:  $\Delta R_{f,OFF} = \sqrt{\Delta R_{syst,OFF}^2 + \Delta R_{stat,OFF}^2}$

и  $\Delta R_{f,ON} = \sqrt{\Delta R_{syst,ON}^2 + \Delta R_{stat,ON}^2}$ . Таким образом, для оценки величин систематических ошибок

получаем  $\Delta R_{syst,OFF} = \Delta R_{syst,ON} = 0.025 \text{ c}^{-1}$

и  $\Delta R_{exp,syst} = \sqrt{\Delta R_{syst,ON}^2 + \Delta R_{syst,OFF}^2} = 0.035 \text{ c}^{-1}$ .

Окончательно для  $R_{exp}$  можно записать  $R_{exp} = 0.044 \pm 0.001(\text{стат.}) \pm 0.035(\text{сист.}) \text{ c}^{-1}$ . В пределах ошибок измерений, превышения  $R_{ON}$  над  $R_{OFF}$  не наблюдается. Отметим, что систематическая погрешность обусловила выбор энергетического диапазона для отбора одиночных событий: область энергий ниже предела естественной радиоактивности  $< 5$  МэВ «загрязнена» низкоэнергетическими фоновыми событиями, а наибольшее отношение ожидаемого эффекта к фону ( $R_{exp}/\Delta R_f$ ) без заметного увеличения вклада статистической погрешности за счет уменьшения числа событий наблюдается как раз в диапазоне 5–10 МэВ.

Для оценки чувствительности эксперимента к ТБ (к  $g_X$ ) на рис. 6 изображен экспериментально полученный спектр разности  $R_{ON} - R_{OFF}$  и ожи-

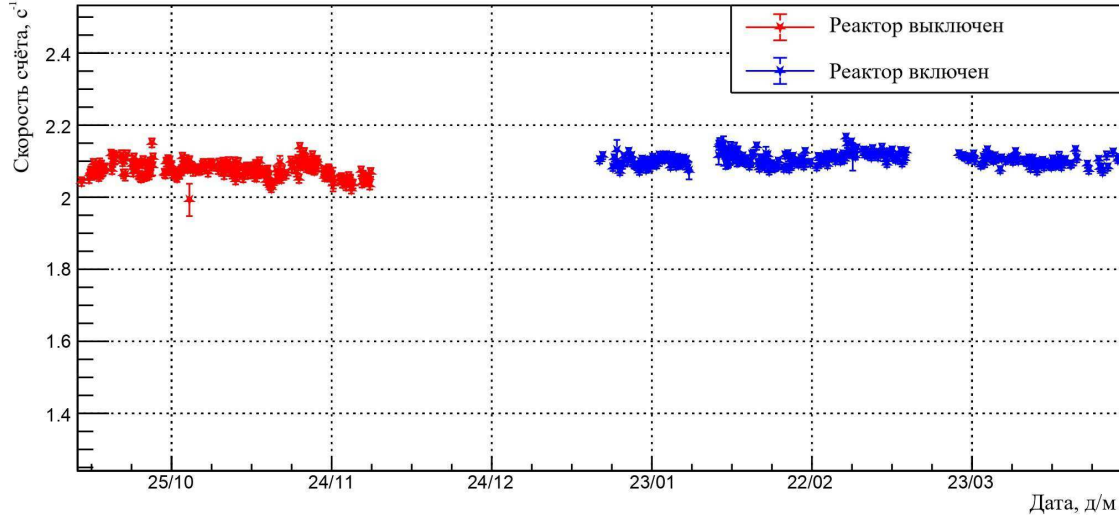


Рис. 5. Скорость счёта ( $\text{с}^{-1}$ ) одиночных событий iDREAM в диапазоне от 5 до 10 МэВ в периоды выключенного (красный) и включенного (синий) реактора. Ошибки только статистические

даемые спектры событий взаимодействия ТБ для  $g_X = 10^{-3}$ . Как видно из рисунка, при таком значении  $g_X$  детектор iDREAM уже бы «увидел» ТБ.

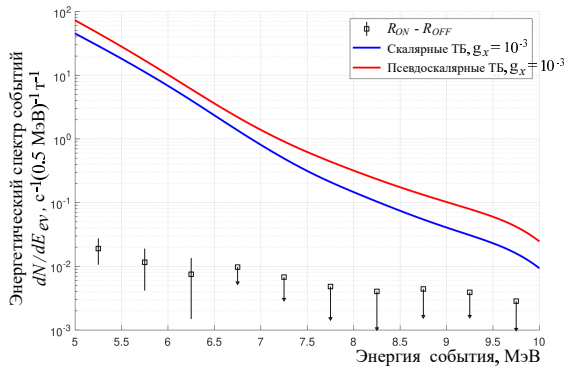


Рис. 6. Экспериментально измеренная разность спектров iDREAM при включенном и выключенном реакторе с отложенными систематическими и статистическими погрешностями и ожидаемые спектры событий для скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) ТБ для  $g_X = 10^{-3}$

Для получения ограничения на параметры модели ТБ была построена статистическая модель ожидаемой скорости счёта:

$$R_{th} = R_{DB}(1 + \theta_\gamma \sigma_\gamma) + \Delta R_{syst} \theta_{syst}, \quad (6)$$

где  $R_{DB}$  — ожидаемая скорость счёта событий от ТБ, получаемая интегрированием формулы (5) в диапазоне от 5 до 10 МэВ,  $\theta_\gamma$ ,  $\theta_{syst}$  — штрафные параметры неопределенности спектра  $\gamma$ -квантов в АЗ и систематической ошибки  $\Delta R_{syst}$  скорости счёта

одиночных событий соответственно, а  $\sigma_\gamma = 10\%$ . относительная погрешность спектра  $\gamma$ -квантов в АЗ. В формулу (6) не включен вклад одиночных событий от рассеяния реакторных антинейтрино на электронах, которым можно пренебречь вследствие малости сечения этого процесса.

Далее была составлена функция правдоподобия:

$$L = \frac{R_{th}^{R_{exp}}}{R_{exp}!} e^{-R_{th}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_\gamma^2}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_{syst}^2}{2}}. \quad (7)$$

Из максимизации (7) по всем параметрам ( $m_X, g_X, \theta_\gamma, \theta_{syst}$ ) и условно (по параметрам  $\theta_\gamma$  и  $\theta_{syst}$  при фиксированных параметрах  $m_X, g_X$ ) и выбранного уровня достоверности 90% можно получить ограничения на параметры моделей ТБ для псевдоскалярных  $g_X < 1.9 \cdot 10^{-4}$  (красная) и скалярных  $g_X < 2.1 \cdot 10^{-4}$  (синяя) частиц, которые представлены на рис. 7 слева.

Желтая и зеленая области соответствуют ограничениям для псевдоскалярных ТБ, полученным в реакторных нейтринных экспериментах TEXONO [26] и Bugey [27] соответственно. В области  $m_X \lesssim 30$  эВ ограничения iDREAM являются единственными, полученными в рамках модельно-независимого подхода в лабораторном, реакторном нейтринном эксперименте на Земле.

На рис. 7 справа эти же ограничения представлены в сравнении с результатами прямых поисков ТМ в гало галактики [28–30] и астрофизическими данными. В области масс  $m_X \lesssim 10^3$  эВ для псевдоскалярных ТБ существуют строгие ограничения на уровне  $g_X < 1.3 \cdot 10^{-13}$  (95% У.Д.), следующие из исследований по остыванию красных гигантов [31]. То же касается скалярных ТБ, для которых при  $m_X \lesssim 10^3$  эВ есть сильные ограничения из данных по остыванию белых карликов [32], а при

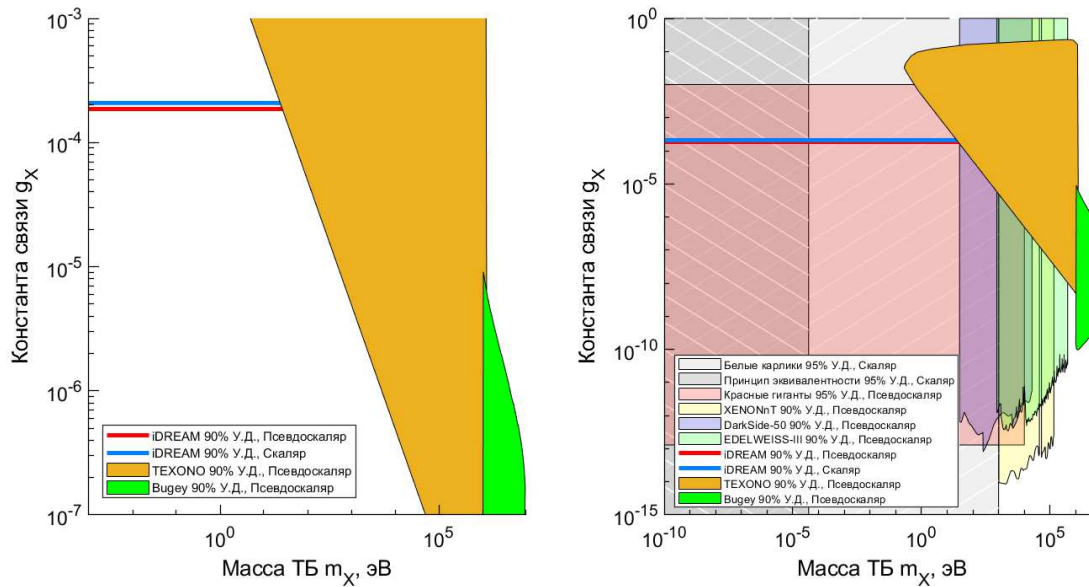


Рис. 7. Слева — ограничения на параметры моделей псевдоскалярного (красная) и скалярного (синяя) темного бозона, полученные в настоящей работе и других реакторных нейтринных экспериментах TEXONO (желтый, [26]) и Vigeu (зеленый, [27]). Справа — те же ограничения в сравнении с имеющимися результатами прямого поиска ТМ в гало галактики детекторами XENONnT [28], DarkSide-50 [29] и EDELWEISS-III [30], а также ограничениями, следующими из астрофизики [31, 32] и эксперимента по проверке принципа эквивалентности [33]

$m_X < 4 \cdot 10^{-5}$  эВ — из экспериментов по проверке принципа эквивалентности [33]. Тем не менее полученные в настоящей работе ограничения для  $m_X \lesssim 30$  эВ являются сегодня единственными лабораторными, модельно-независимыми результатами, которые дополняют картину поиска бозонной ТМ в рамках других поисковых методик.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных нейтринного детектора iDREAM на Калининской АЭС установлены ограничения на константу связи псевдоскалярных  $g_X < 1.9 \cdot 10^{-4}$  (90% У.Д.) и скалярных  $g_X < 2.1 \cdot 10^{-4}$  (90% У.Д.) темных бозонов с заряженными лептонами Стандартной модели. В работе предполагалось, что темный бозон может образоваться в активной зоне ядерного реактора в процессе рассеяния  $\gamma$ -квантов на электронах и быть зарегистрирован нейтринным детектором в обратном процессе. Для получения ограничений

были использованы данные о составе активной зоны промышленного реактора и долях делений нуклидов, соответствующих выбранному для анализа периоду набора статистики. В диапазоне масс темного бозона  $10^{-10} \lesssim m_X \lesssim 30$  эВ имеющиеся в литературе строгие ограничения на константу  $g_X$ , следующие из массива астрофизических данных, впервые дополнены экспериментальными результатами реакторного нейтринного эксперимента в рамках модельно-независимого подхода.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00219). Анализ данных детектора iDREAM проведен с использованием вычислительных ресурсов Объединенного вычислительного кластера НИЦ «Курчатовский институт». Авторы выражают благодарность М.И. Высоцкому за полезные обсуждения, Калининской атомной электростанции и АО «Концерн Росэнергоатом» за поддержку проведения исследований на промышленной АЭС.

- [1] Berlin A., Gori S., Lin T., Wang L.T. // *Phys. Rev. D.* **92**, N1. 015005 (2015).
- [2] Saez B.D., Escalona P., Norero S., Zerwekh A. // *JHEP.* **2021**, N10. 1 (2021).
- [3] Cox P., Dolan M.J., Wood J. // *Phys. Rev. D.* **109**, N9. 095013 (2024).
- [4] Окунь Л.Б. // *ЖЭТФ.* **79**, №694. 62 (1980). (Okun L.B. // *Sov. Phys. JET.* **79**, 694 (1980)).

- [5] Boehm C., Fayet P. // *Nucl. Phys. B.* **683**, N1-2. 219 (2004).
- [6] Jaeckel J., Ringwald A. // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **60**, N1. 405 (2010).
- [7] Antypas D., Banerjee A., Bartram C. et al. // *arXiv preprint arXiv:2203.14915*. 2022.
- [8] Rogers K.K., Peiris H.V. // *Phys. Rev. Lett.* **126**, N7. 071302 (2021).

- [9] Marsh D.J.E., Niemeyer J.C. // *Phys. Rev. Lett.* **123**. N 5. 051103 (2019).
- [10] Hardy E., Lasenby R. // *JHEP* **2017**. N 2. 1 (2017).
- [11] Van Tilburg K., Leefer N., Bougas L., Budker D. // *Phys. Rev. Lett.* **115**. N 1. 011802 (2015).
- [12] Bartram C., Braine T., Burns E. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **127**. N 26. 261803 (2021).
- [13] Danilov M., Demidov S., Gorbunov D. // *Phys. Rev. Lett.* **122**. N 4. 041801 (2019).
- [14] Dent J. B., Dutta B., Kim D. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **124**. N 21. 211804 (2020).
- [15] Smirnov M., Yang G., Liao J. et al. // *Phys. Rev. D.* **104**. N 11. 116024 (2021).
- [16] Abramov A., Chepurnov A., Etenko A. et al. // *JINST.* **17**. N 09. 09001 (2022).
- [17] Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. // Эксплуатационные режимы ВВЭР. Энергоатомиздат. 1988.
- [18] Brown D. A., Chadwick M. B., Capote R. et al. // *Nuclear data sheets.* **148**. 1 (2018).
- [19] Litaize O., Regnier D., Serot O. // *Physics Procedia.* **59**. 89 (2014).
- [20] Serot O., Litaize O., Regnier D. // *Physics Procedia.* **59**. 132 (2014).
- [21] Oberstedt S., Billnert R., Belgya T. et al. // *Phys. Rev. C.* **90**. N 2. 024618 (2014).
- [22] Kopeikin V.I., Popov D.V., Skorokhvatov M.D. // *Phys. Atom. Nuclei.* **87**. 389 (2024).
- [23] From ENSDF database as of April 20th, 2024., Version available at <http://www.nndc.bnl.gov/ensarchivals/>
- [24] Sierra D.A., De Romeri V., Flores L.J., Papoulias D.K. // *JHEP* **2021**. N 3. 1 (2021).
- [25] Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M. et al. // *XCOM: Photon Cross Section Database* (2010). (version 1.5). [Online] Available: <http://physics.nist.gov/xcom> [2023, December 11]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [26] Chang H. M., Wong H. T., Chou M. H. et al. // *Phys. Rev. D.* **75**. N 5. 052004 (2007).
- [27] Altmann M., Declais Y., Feilitzsch F. et al. // *Zeitschrift fur Physik C.* **68**. 221 (1995).
- [28] Aprile E., Abe K., Agostini F. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **129**. N 16. 161805 (2022).
- [29] Agnes P., Albuquerque I. F. M., Alexander T. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **130**. N 10. 101002 (2023).
- [30] Armengaud E., Augier C., Benoit A. et al. // *Phys. Rev. D.* **98**. N 8. 082004 (2018).
- [31] Capozzi F., Raffelt G. // *Phys. Rev. D.* **102**. N 8. 083007 (2020).
- [32] Bottaro S., Caputo A., Raffelt G., Vitagliano E. // *JCAP* **2023**. N 07. 071 (2023).
- [33] Hees A., Minazzoli O., Savalle E. et al. // *Phys. Rev. D.* **98**. N 6. 064051 (2018).

## Searching for bosonic dark matter with the iDREAM neutrino detector at Kalinin Nuclear Power Plant

A. V. Abramov<sup>1</sup>, R. R. Alyev<sup>2</sup>, M. B. Gromov<sup>3,4</sup>, I. N. Zhutikov<sup>1,5</sup>, K. K. Kiselev<sup>5</sup>, S. M. Kiselev<sup>2</sup>, A. V. Konstantinov<sup>1</sup>, D. S. Kuznetsov<sup>1</sup>, E. A. Litvinovich<sup>1,5,a</sup>, I. N. Machulin<sup>1,5</sup>, A. E. Murchenko<sup>1</sup>, A. M. Nemeryuk<sup>1</sup>, R. R. Nugmanov<sup>1,b</sup>, A. Yu. Oralbaev<sup>1,5</sup>, D. V. Popov<sup>1,5</sup>, A. A. Rastimeshin<sup>1,5</sup>, M. A. Strizh<sup>1,3</sup>, V. A. Khvatov<sup>2</sup>, A. S. Chepurnov<sup>3</sup>, D. A. Chmykhalo<sup>1,5</sup>, A. V. Etenko<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute», 123182 Moscow, Russia

<sup>2</sup>«Kalinin Nuclear Power Plant» branch of JSC Rosenergoatom, 171841 Udomlya, Russia

<sup>3</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, 119991 Moscow, Russia

<sup>4</sup>Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

<sup>5</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», 115409 Moscow, Russia

E-mail: <sup>a</sup>[Litvinovich\\_EA@nrcki.ru](mailto:Litvinovich_EA@nrcki.ru), <sup>b</sup>[Nugmanov\\_RR@nrcki.ru](mailto:Nugmanov_RR@nrcki.ru)

Bosonic dark matter search results obtained with the iDREAM neutrino detector at Kalinin Nuclear Power Plant are presented. Using data on composition of the active core of VVER-1000 nuclear reactor and fission fractions of primary fissile isotopes, the  $\gamma$ -radiation energy spectrum in the active core is calculated. Assuming that the dark bosons can be produced in the active core via  $\gamma$ -scattering on electrons and can be detected via an inverse process inside the iDREAM detector, experimental bounds on the coupling constant  $g_X$  between the dark boson and Standard Model charged leptons are derived.

PACS: 95.35.+d.

Keywords: dark matter, hidden sector, dark boson, neutrino detector, nuclear reactor.

Received 16 October 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2025. **80**, No. . Pp. .

### Сведения об авторах

1. Абрамов Алексей Вячеславович — инженер-исследователь; e-mail: [Abramov\\_AV@nrcki.ru](mailto:Abramov_AV@nrcki.ru).
2. Алыев Руслан Ровшанович — канд. техн. наук, главный инженер; e-mail: [alyev@knpp.ru](mailto:alyev@knpp.ru).
3. Громов Максим Борисович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: [gromov@physics.msu.ru](mailto:gromov@physics.msu.ru).
4. Жутиков Иван Николаевич — лаборант-исследователь; e-mail: [Zhutikov\\_IN@nrcki.ru](mailto:Zhutikov_IN@nrcki.ru).
5. Киселев Кирилл Клаудиович — студент; e-mail: [kiryu.kiss.2001@mail.ru](mailto:kiryu.kiss.2001@mail.ru).
6. Киселев Сергей Михайлович — заместитель начальника ОЯБиН; e-mail: [kiselevsm@knpp.ru](mailto:kiselevsm@knpp.ru).

7. Константинов Андрей Викторович — науч. сотрудник; e-mail: Konstantinov\_AV@nrcki.ru.
8. Кузнецов Денис Сергеевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Kuznetsov\_DS@nrcki.ru.
9. Литвинович Евгений Александрович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: Litvinovich\_EA@nrcki.ru.
10. Мачулин Игорь Николаевич — ст. науч. сотрудник; e-mail: Machulin\_IN@nrcki.ru.
11. Мурченко Алексей Евгеньевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Murchenko\_AE@nrcki.ru.
12. Немерюк Алексей Михайлович — лаборант-исследователь; e-mail: Nemeryuk\_AM@nrcki.ru.
13. Нугманов Радик Рафаэльевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Nugmanov\_RR@nrcki.ru.
14. Оралбаев Алдияр Юрьевич — науч. сотрудник; e-mail: Oralbaev\_AY@nrcki.ru.
15. Попов Даниэль Валерьевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Popov\_DV@nrcki.ru.
16. Растимешин Антон Алексеевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: Rastimeshin\_AA@nrcki.ru.
17. Стриж Михаил Александрович — главный специалист; e-mail: strizh.ma15@physics.msu.ru.
18. Хватов Валерий Анатольевич — ведущий инженер ОЯБиН; e-mail: hvatov@knpp.ru.
19. Чепурнов Александр Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: chepurnov@sinp.msu.ru.
20. Чмыхало Дмитрий Александрович — мл. науч. сотрудник; e-mail: Chmyhalo\_DA@nrcki.ru.
21. Этенко Александр Владимирович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: Etenko\_AV@nrcki.ru.