

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

УДК 539.123

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ПОИСК ТЁМНЫХ БОЗОНОВ  
НЕЙТРИННЫМ ДЕТЕКТОРОМ IDREAM  
НА КАЛИНИНСКОЙ АТОМНОЙ  
СТАНЦИИ**

Студент \_\_\_\_\_ К. К. Киселев

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Е. А. Литвинович

Научный консультант,  
младший научный сотрудник \_\_\_\_\_ Р. Р. Нугманов

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
Тёмные бозоны . . . . .	3
Детектор iDREAM . . . . .	5
<b>1 Расчёт ожидаемого сигнала в детекторе iDREAM</b>	<b>7</b>
1.1 Спектр $\gamma$ -квантов в АЗ реактора ВВЭР-1000 . . . . .	7
1.2 Ожидаемый сигнал в детекторе iDREAM . . . . .	10
<b>2 Анализ данных и результаты</b>	<b>14</b>
2.1 Критерии отбора . . . . .	14
2.2 Анализ данных . . . . .	14
2.3 Оценка погрешностей . . . . .	15
2.4 Оценка чувствительности детектора IDREAM к тёмным бозонам . . . . .	17
2.5 Получение ограничений . . . . .	17
<b>3 Заключение</b>	<b>21</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>22</b>

# ВВЕДЕНИЕ

## ТЁМНЫЕ БОЗОНЫ

К настоящему времени целый ряд экспериментов, направленных на поиск проявлений темной материи (ТМ) в виде массивных слабо-взаимодействующих частиц (МСВЧ), не привел к их обнаружению. Полученные в экспериментах ограничения на сечение взаимодействия МСВЧ с нуклонами указывают на чрезвычайно малое, если оно вообще есть, взаимодействие [1; 2]. В этой связи, возрастает роль экспериментальных поисков ТМ в рамках других ее моделей. В частности, широко рассматривается скрытый сектор частиц и взаимодействий, постулируется существование нового бозона («тёмного бозона», ТБ) — возможного переносчика скрытого взаимодействия, — который может обеспечить «мост» между частицами СМ и скрытого сектора [3–5] (рисунок 1).

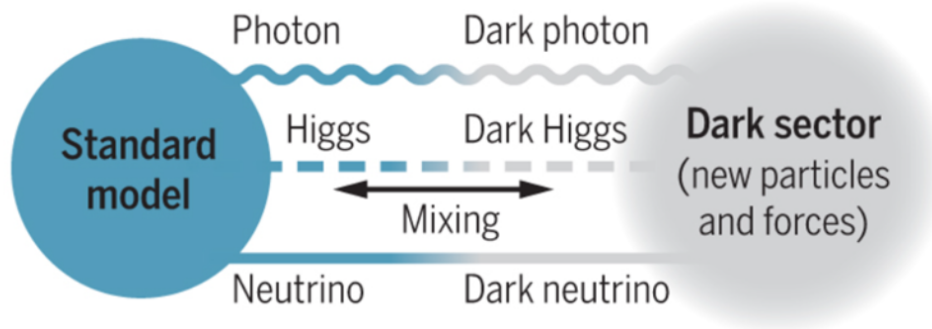


Рисунок 1 — Стандартная Модель и её возможное взаимодействие со скрытым сектором [6]

Основные вопросы скрытого сектора частиц и взаимодействий широко рассматривались в работах [7–11]. В концепции бозонной ТМ обычно рассматриваются векторные (тёмный фотон) и (псевдо)скалярные (аксион, аксионо-подобные частицы, легкие бозоны Хиггса и др.) частицы. На массу ТБ как единственной составляющей ТМ существуют сильные ограничения

[12]. Если же ТБ составляет только часть ТМ, тогда разрешенная область значений параметров значительно расширяется.

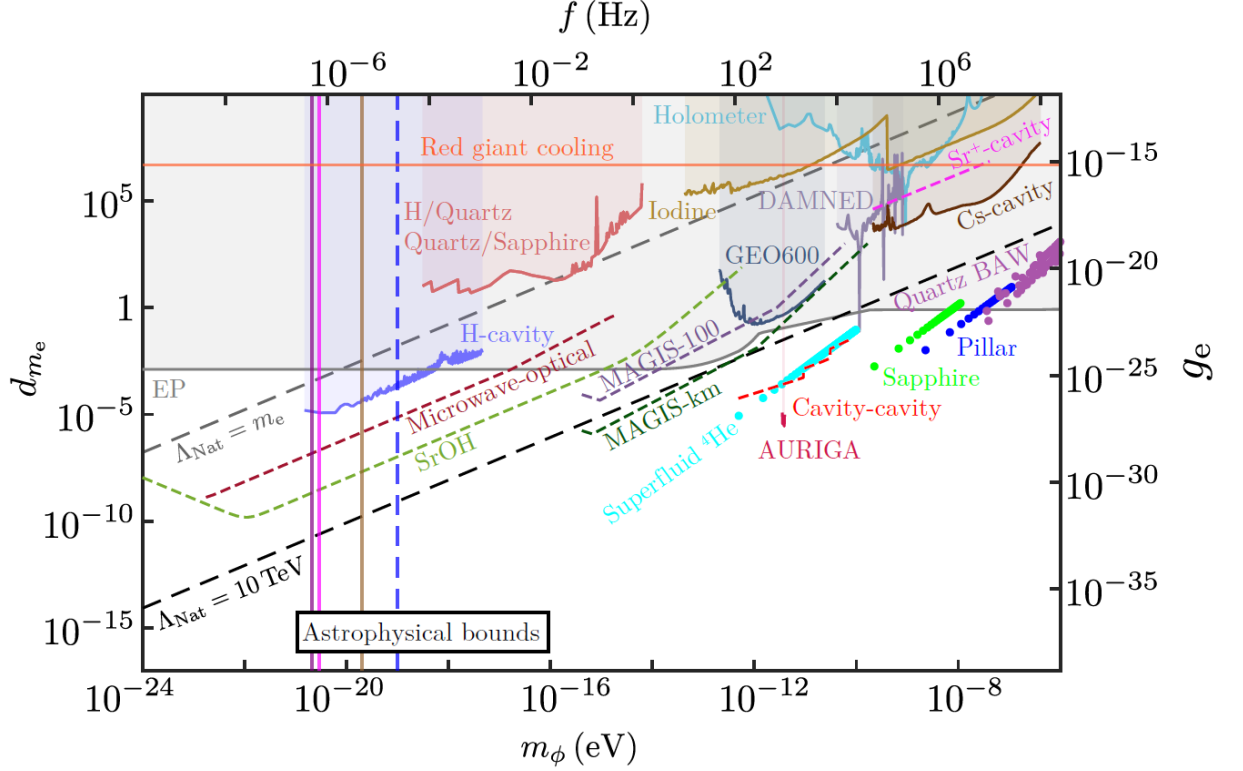


Рисунок 2 — Ограничения на скалярный ТБ, полученные из предположения его возможного взаимодействия с электроном СМ с константой взаимодействия  $g_e$  [12]

Экспериментальный поиск ТБ ведется в широком диапазоне их масс, охватывающем более 30 порядков величины и, как правило, ограниченным сверху  $m_\chi \leq 2m_e$ , где  $m_e$  – масса электрона. Эксперименты включают поиск влияния ТБ на поглощение света в межгалактической среде [13], исследования эволюции звёздных скоплений как следствия флуктуации плотности бозонной ТМ [14], изучение потери энергии звёздами за счёт испускания ТБ [15], измерение вызванных взаимодействием материи с ТБ осцилляций физических констант с помощью атомных часов [16], поиск переходов ТБ в фотоны в неоднородном электромагнитном поле [17] 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 [18] было показано, что для векторных ТБ необходимость учета осцилляций тёмный фотон  $\leftrightarrow$  фотон СМ приводит к значительной потере чувствительности к ним детекторов реакторных антинейтрино. Чувствительность сохраняется для (псевдо)скалярных ТБ в области масс  $m_X \leq 10^6$  эВ [19]. Таким образом, в настоящей работе мы ограничимся рассмотрением скалярных и псевдоскалярных ТБ, источником которых может являться АЗ ядерного реактора.

В данной работе предполагается, что ТБ слабо взаимодействует с заряженными токами СМ. Такое взаимодействие для скалярных и псевдоскалярных частиц описывается юкавовскими слагаемыми в лагранжиане [20]:

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

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

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).

## ДЕТЕКТОР IDREAM

Нейтринный детектор iDREAM (industrial Detector of REactor Anti-neutrinos for Monitoring) расположен на удалении 19.6 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. 3. Детектор представляет собой два концентрических бака из нержавеющей ста-

ли, 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-кетчера, а также пассивной защиты мишени от внешней фоновой радиоактивности. Подробное описание детектора приведено в [21].

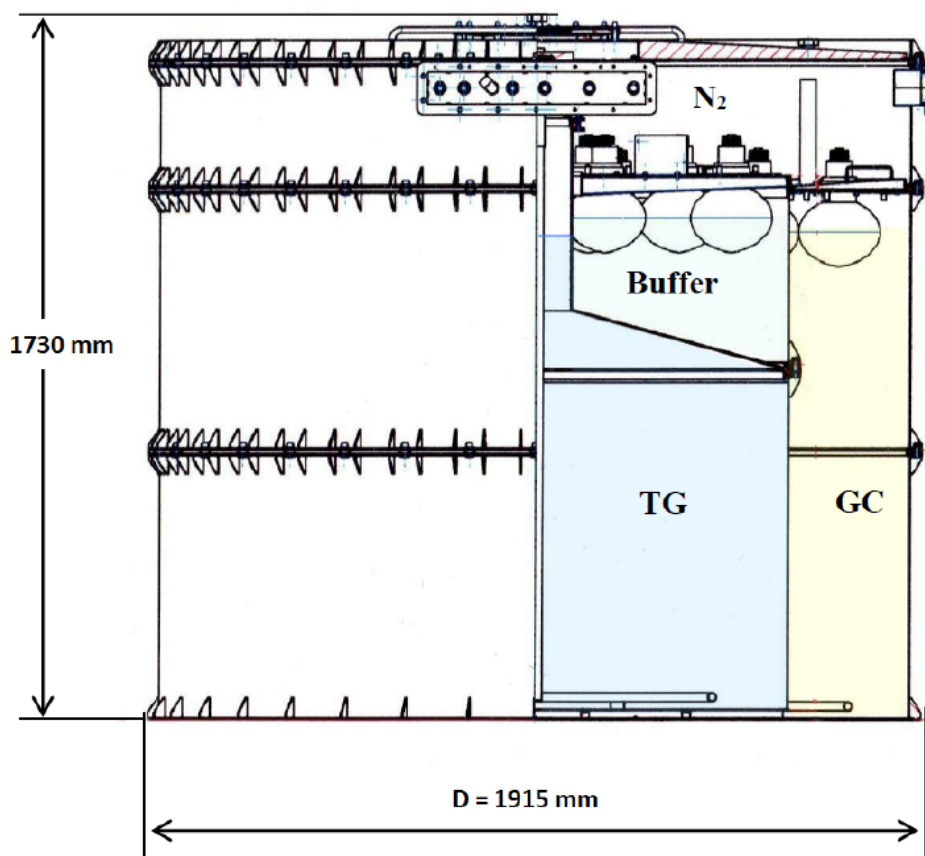


Рисунок 3 — Схема детектора iDREAM [21]

# 1 РАСЧЁТ ОЖИДАЕМОГО СИГНАЛА В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM

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

Предполагается, что темный бозон  $X$  может образоваться в АЗ в процессе рассеяния  $\gamma$ -квантов с наименее связанными электронами атомов, аналогично эффекту Комптона:  $\gamma e^- \rightarrow e^- X$  (рис. 1.1, а). Основными источниками  $\gamma$ -квантов в АЗ являются мгновенное  $\gamma$ -излучение деления ядер и  $(n, \gamma)$ -реакции. Малый, согласно [22], вклад других источников  $\gamma$ -излучения (распады долгоживущих изотопов, неупругое рассеяние нейтронов, аннигиляция  $e^+e^-$ -пар и др.) не учитывался.

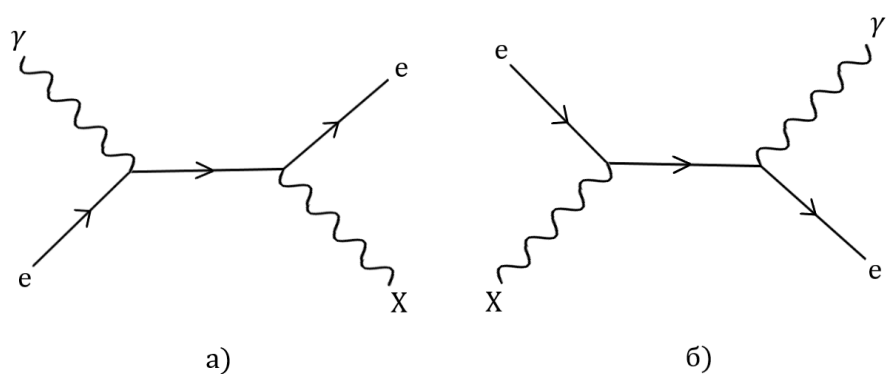


Рисунок 1.1 — Реакции образования ТБ в АЗ (а) и поглощения ТБ в веществе детектора (б)

Спектры мгновенного  $\gamma$ -излучения  $S_p^i$ ,  $\text{МэВ}^{-1}$  основных делящихся ядер ( $i = {}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{241}\text{Pu}$ ) были получены из открытых баз ядерных данных [23] и нормированы на множественность  $\gamma$ -квантов (имеется в виду среднее число  $\gamma$ -квантов, образующихся в одном акте деления) по резуль-

татам работ [24–26]. 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  $\langle E_f \rangle$  [27].

Вклад от  $(n, \gamma)$ -реакций рассчитывался на основе данных о составе АЗ реактора, согласно табл. 1.1. 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 будет различным. Для учёта быстрого выгорания гадолиния в начале топливной кампании скорость связанных с ним  $(n, \gamma)$ -реакций для была усреднена для периода сбора данных ( $T_{ON}$ ):

$$\langle R_{Gd} \rangle = \frac{1}{T_{ON}} \int_0^{T_{ON}} R_{Gd}(0) e^{-\sigma_{Gd} \Phi t} dt. \quad (1.1)$$

Здесь  $R_{Gd}$ ,  $\sigma_{Gd}$  – скорость и сечение  $(n, \gamma)$ -реакций на гадолинии соответственно,  $\Phi = 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  – плотность потока нейтронов в АЗ реактора.

Таблица 1.1 – Состав АЗ реактора ВВЭР-1000 энергоблока № 3 КАЭС в начале и конце топливной кампании длительностью  $\sim 500$  эфф. сут.

Изотоп	Концентрация, $\text{см}^{-3}$	
	Начало кампании	Конец кампании
O	$2.582 \cdot 10^{22}$	$2.582 \cdot 10^{22}$
H	$2.516 \cdot 10^{22}$	$2.516 \cdot 10^{22}$
$^{238}\text{U}$	$6.196 \cdot 10^{21}$	$6.101 \cdot 10^{21}$
Zr	$5.634 \cdot 10^{21}$	$5.634 \cdot 10^{21}$
$^{235}\text{U}$	$2.132 \cdot 10^{20}$	$1.164 \cdot 10^{20}$
$^{239}\text{Pu}$	$2.453 \cdot 10^{19}$	$4.292 \cdot 10^{19}$
Gd	$1.528 \cdot 10^{19}$	0
$^{240}\text{Pu}$	$7.237 \cdot 10^{18}$	$1.540 \cdot 10^{18}$

Спектры  $\gamma$ -излучения  $S_{n\gamma}^j$ ,  $\text{МэВ}^{-1}$  и сечения  $\sigma_j$ ,  $\text{см}^2$  взяты из откры-



тых баз данных [28]. После вычисления скоростей  $(n, \gamma)$ -реакций  $R_j = n_j V \Phi \sigma_j$ , где  $n_j$  - концентрация ядер  $j$  в АЗ, а  $V$  - объем АЗ, для полного спектра  $\gamma$ -квантов в АЗ получаем:

$$\frac{dN}{dE_\gamma} = \frac{P_{th}}{\langle E_f \rangle} \sum_i \alpha_i S_p^i + \sum_j R_j S_{n\gamma}^j. \quad (1.2)$$

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, [29]). Полученный полный спектр  $\gamma$ -излучения (1.2) представлен на рис. 1.2 для начала топливной кампании (зелёным) и с учётом усреднения скорости счёта  $(n, \gamma)$ -реакций на гадолинии (красным).

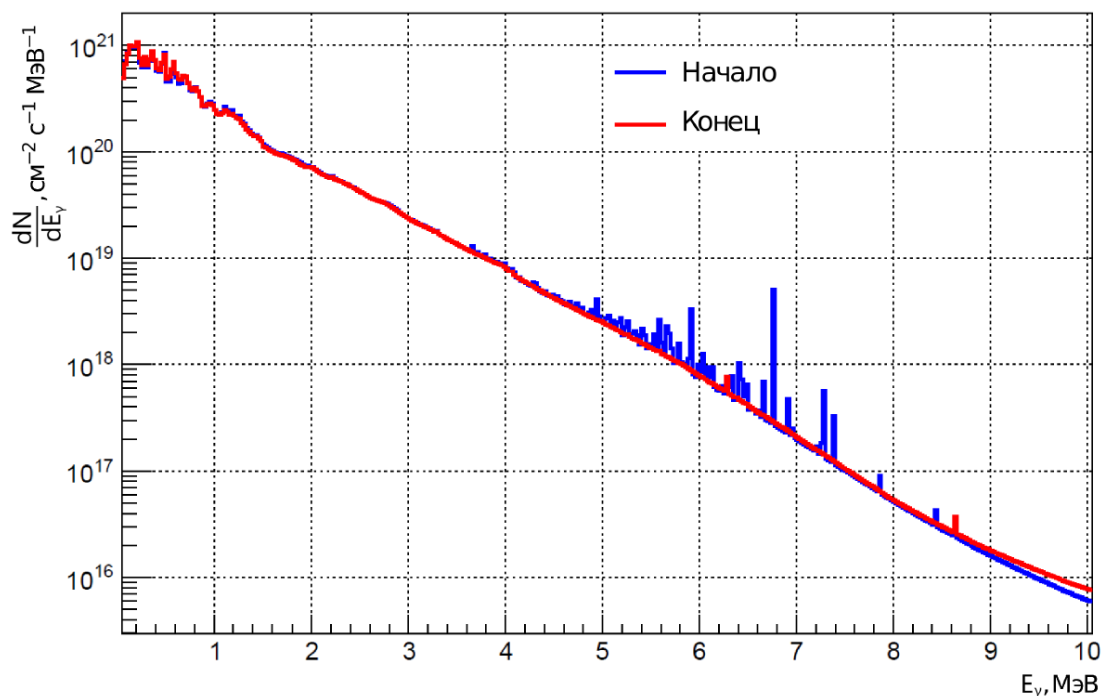


Рисунок 1.2 — Спектр  $\gamma$ -квантов в АЗ реактора ВВЭР-1000 для начала кампании (синим) и конца кампании (красным)

Ошибки расчета обусловлены:

- погрешностями множественности  $\gamma$ -излучения [24–26] ( $\sim 7\%$ )
- ошибками долей делений  $\alpha_i$  ( $\sim 4\%$ )

- ошибками тепловой мощности  $P_{th}$  ( $\sim 2\%$ )
- ошибками интенсивностей линий  $(n, \gamma)$ -реакций ( $\sim 2\%$ ).

Таким образом, для итоговой погрешности спектра (1.2) можно консервативно принять  $\sigma_\gamma = 10\%$ .

## 1.2 ОЖИДАЕМЫЙ СИГНАЛ В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM

Используя спектр  $\gamma$ -квантов в АЗ реактора, энергетический спектр рождённых в АЗ тёмных фотонов можно рассчитать по формуле:

$$\frac{dN}{dE_X} = \int \frac{1}{\sigma_{\text{tot}} + \sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}} \frac{d\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}}{dE_X} \frac{dN}{dE_\gamma} dE_\gamma, \quad (1.3)$$

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 [20]. Полное сечение рассеяния  $\gamma$ -квантов на электронах  $\sigma_{\text{tot}}$  было рассчитано для состава АЗ реактора ВВЭР-1000 (табл. 1.1) с использованием открытой базы ядерных данных [30].

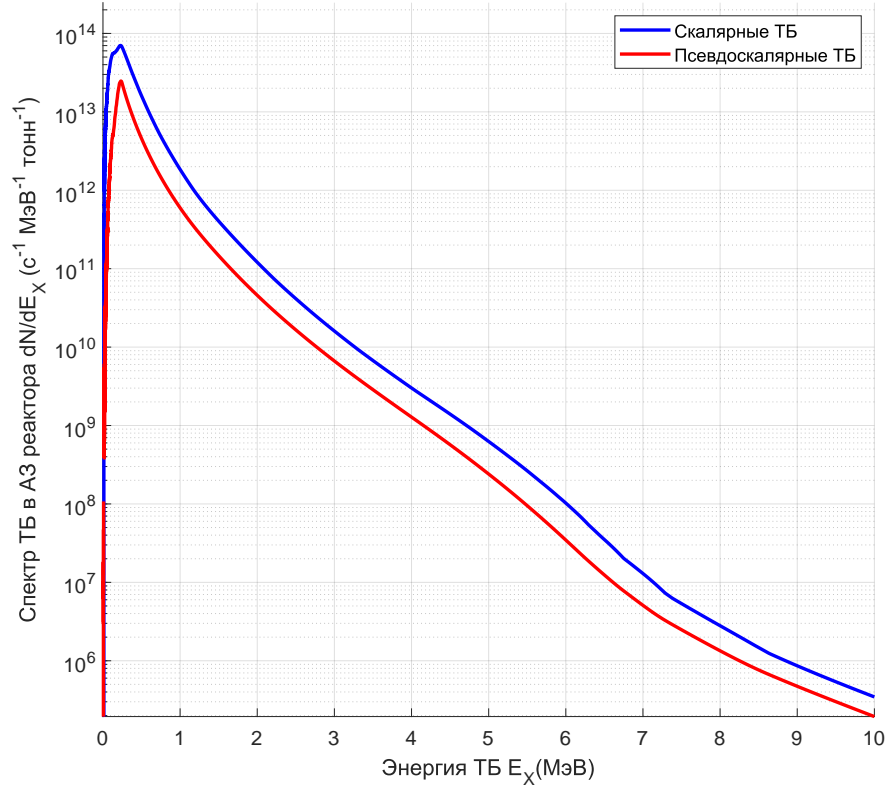


Рисунок 1.3 — Спектры ТБ (скалярные — синим, псевдоскалярные — красным), рассчитанные по формуле 1.3, рождённых в АЗ реактора для  $g_X = 10^{-4}$ ,  $m_X = 1$  эВ

Также из кинематики реакции рождения ТБ следует

$$E_\gamma = \frac{-\frac{1}{2}m_X^2 + E_X m_e}{m_e - E_X + \cos\theta \cdot \sqrt{E_X^2 - m_X^2}} \quad (1.4)$$

Здесь  $\theta$  — угол между импульсами исходного гамма-кванта АЗ и рождённого ТБ. Используя выражение (1.4), можно получить пределы интегрирования в формуле (1.3).

Предполагается, что ТБ может быть зарегистрирован по реакции обратного рассеяния на электронах сцинтиллятора с образованием вторичного  $\gamma$ -кванта:  $Xe^- \rightarrow e^- \gamma'$  (рисунок 1.1, б). 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, энергетический спектр событий в детекторе iDREAM можно записать как:

$$\frac{dN}{dE_{e\gamma'}} = \frac{N_e T}{4\pi R^2} \int \frac{d\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e}}{dE_{\gamma'}} \frac{dN}{dE_X} \exp(-R\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e} n_e) dE_{\gamma'}. \quad (1.5)$$

В этой формуле  $N_e$  – плотность электронов в мишени детектора,  $T$  – время экспозиции,  $R$  – расстояние от центра АЗ до центра детектора,  $\frac{d\sigma_{Xe\rightarrow\gamma'e}}{dE_{\gamma'}}$  – дифференциальное сечение реакции обратного рассеяния ТБ на электроне[20],  $E_{\gamma'}$  – энергия вторичного  $\gamma$ -кванта. Для учета ослабления потока ТБ на пути от АЗ к детектору в (1.5) 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).

Пределы интегрирования в формуле (1.5) можно получить из кинематического соотношения

$$E_{\gamma'} = \frac{-\frac{1}{2}m_X^2 - E_X m_e}{m_e + E_X - \cos\phi \cdot \sqrt{E_X^2 - m_X^2}}, \quad (1.6)$$

где  $\phi$  – угол между импульсами тёмного бозона и вторичного гамма-кванта.

Для получения ожидаемого в детекторе iDREAM энергетического спектра необходимо учесть энергетическое разрешение детектора:

$$\frac{dN}{dE_{ev}} = \int \frac{dN}{dE_{e\gamma'}}(E_{e\gamma'})G(E_{e\gamma'}, E_{ev})dE_{e\gamma'} \quad (1.7)$$

где  $E_{ev}$  – энергия ожидаемого события в детекторе iDREAM,  $G(E_{e\gamma'}, E_{ev})$  – функция отклика детектора, зависящая от значения энергетического разрешения.

Ожидаемые спектры событий взаимодействия ТБ были рассчитаны для значения энергетического разрешения IDREAM:  $11.6 \frac{\%}{\text{МэВ}}$  [21].

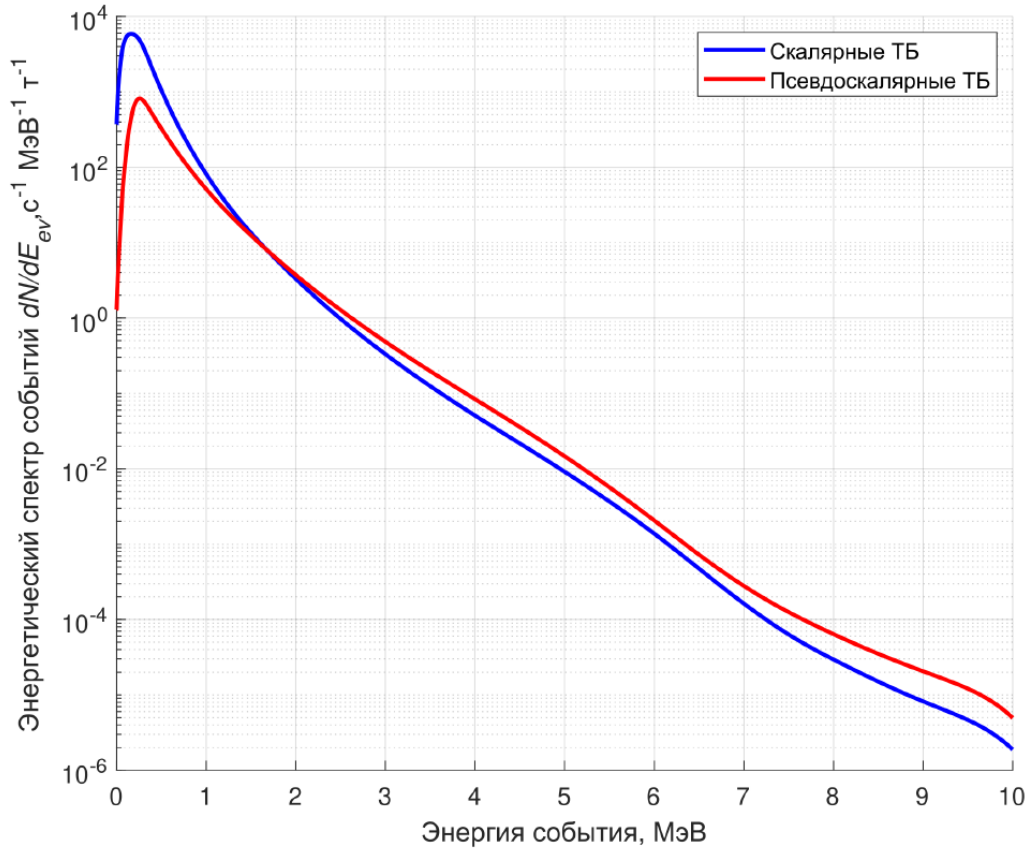


Рисунок 1.4 — Рассчитанные по формулам 1.5-1.7 ожидаемые в детекторе iDREAM энергетические спектры событий взаимодействия скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) темных бозонов. Спектры приведены для  $g_X = 10^{-4}$  и  $m_X = 1$  эВ

Стоит отметить, что спектр пропорционален  $g_X^4$ , а изменение массы ТБ влияет на его форму только в низкоэнергетической области.

## 2 АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1 КРИТЕРИИ ОТБОРА

Для отбора событий были использованы следующие критерии:

- мюонное вето: после регистрации мюона вводится мёртвое время 150 мкс;
- отбор одиночных событий: во временном окне  $\pm 100$  мкс нет других событий;
- были исследованы один энергетический бин:  $E_{ev} \in [5; 10]$  МэВ.

### 2.2 АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для анализа были взяты периоды набора данных детектором iDREAM, соответствующие 47 (37) суткам живого времени при включенном (выключенном) реакторе (279 и 233 серии набора данных соответственно) 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. На рис. 2.1 показаны скорости счета iDREAM в периоды выключенного (красным) и включенного (зелёным) реактора. Каждая точка на рисунке соответствует одной серии набора данных длительностью, в среднем, 4 часа.

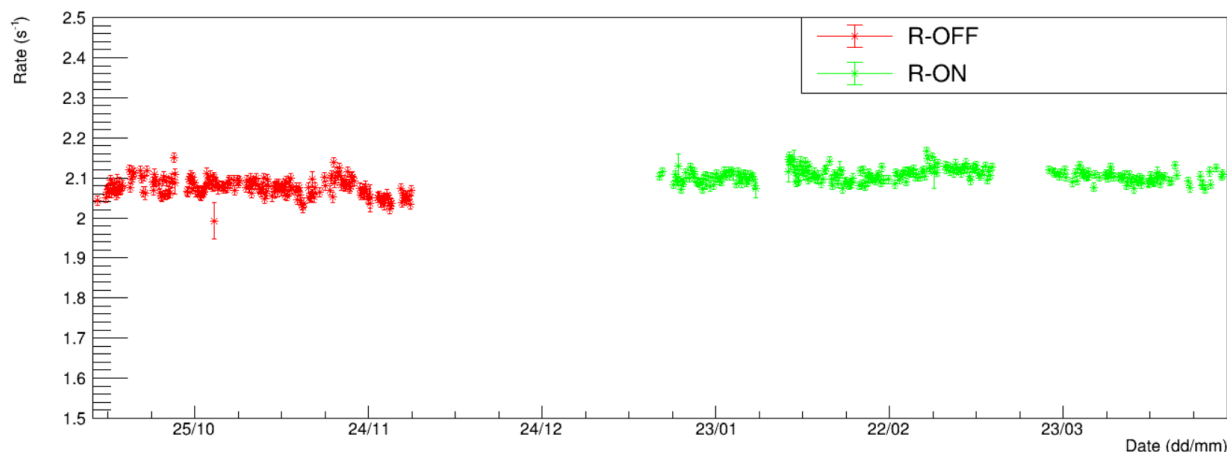


Рисунок 2.1 — Скорость счёта ( $\text{с}^{-1}$ ) одиночных событий iDREAM в диапазоне от 5 до 10 МэВ в периоды выключенного (красный) и включенного (зелёный) реактора. Ошибки только статистические

Предполагая, что скорость счёта фоновых одиночных событий не зависит от режима работы реактора, учёт фона можно произвести вычитанием скорости счёта детектора при выключенном реакторе  $R_{OFF} = 1.986 \pm 0.001(\text{стат.}) \text{ с}^{-1}$  из скорости счёта при включенном реакторе  $R_{ON} = 2.030 \pm 0.001(\text{стат.}) \text{ с}^{-1}$ :  $R_{exp} = R_{ON} - R_{OFF} = 0.044 \pm 0.001(\text{стат.}) \text{ с}^{-1}$ . 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.

## 2.3 ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ

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 (рис. 2.2) распределений значений скорости счёта по всем сериям сбора данных при выключенном  $\Delta R_{f,OFF} = 0.027 \text{ с}^{-1}$  и включенном  $\Delta R_{f,ON} = 0.027 \text{ с}^{-1}$  реакторе и составило  $\Delta R_f = \sqrt{\Delta R_{f,OFF}^2 + \Delta R_{f,ON}^2} = 0.038 \text{ с}^{-1}$ .

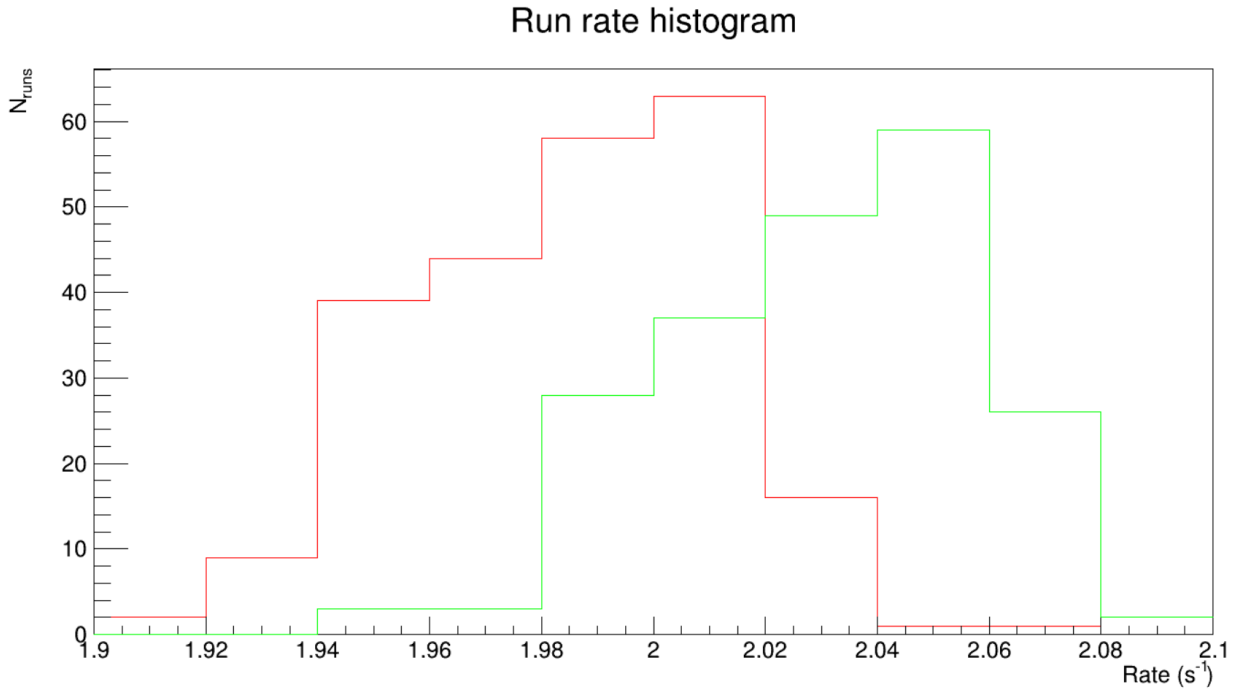


Рисунок 2.2 — Гистограмма скоростей счёта для выключенного (красным) и включенного (зелёным) реактора

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  $\Delta R_{syst,OFF} = \Delta R_{syst,ON} = 0.025 \text{ с}^{-1}$  и  $\Delta R_{exp,syst} = \sqrt{\Delta R_{syst,ON}^2 + \Delta R_{syst,OFF}^2} = 0.035 \text{ с}^{-1}$ . Окончательно, для  $R_{exp}$  можно записать  $R_{exp} = 0.044 \pm 0.001(\text{стат.}) \pm 0.035(\text{сист.}) \text{ с}^{-1}$ . 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  $< 5 \text{ МэВ}$  «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  $5 \div 10 \text{ МэВ}$ .



## 2.4 ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРА IDREAM К ТЁМНЫМ БОЗОНАМ

Для оценки чувствительности эксперимента к ТБ (к  $g_X$ ) на рис. 2.3 изображен экспериментально полученный спектр разности  $R_{ON} - R_{OFF}$  и ожидаемые спектры событий взаимодействия ТБ для  $g_X = 10^{-3}$ . Как видно из рисунка, при таком значении  $g_X$  детектор iDREAM уже бы «увидел» ТБ.

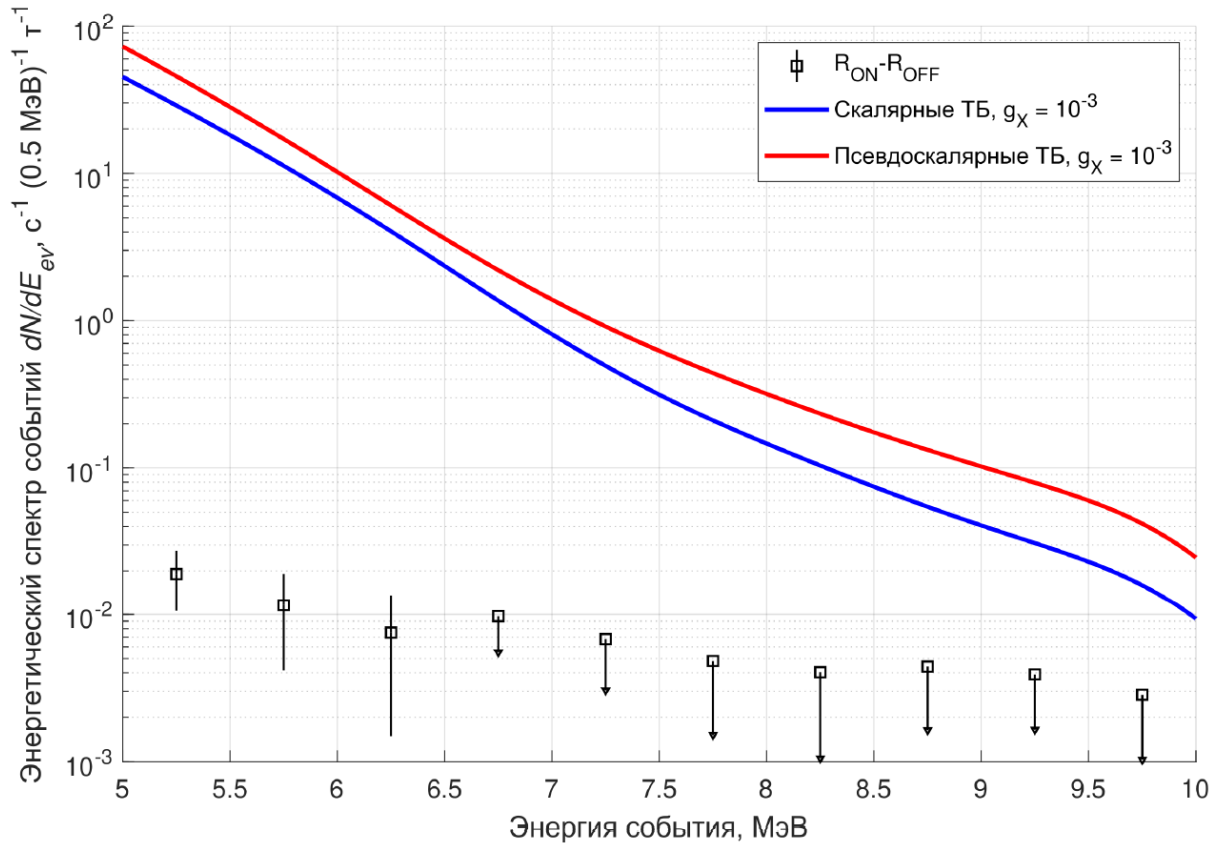


Рисунок 2.3 — Экспериментально измеренная разность спектров iDREAM при включенном и выключенном реакторе с отложенными систематическими и статистическими погрешностями и ожидаемые спектры событий для скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) ТБ для  $g_X = 10^{-3}$

## 2.5 ПОЛУЧЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ

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

$$R_{th} = R_{DB}(1 + \theta_\gamma \sigma_\gamma) + \Delta R_{syst} \theta_{syst}, \quad (2.1)$$

где  $R_{DB}$  – ожидаемая скорость счёта событий от ТБ, получаемая интегрированием формулы (1.5) в исследуемом энергетическом диапазоне,  $\theta_\gamma$ ,  $\theta_{syst}$  – штрафные параметры неопределённости 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 (см 1.1). В формулу 2.1 не включен вклад одиночных событий от рассеяния реакторных антинейтрино на электронах, которым можно пренебречь вследствие малости сечения этого процесса.

Далее была составлена функция правдоподобия:

$$L = \frac{R_{th}^{R_{exp}}}{R_{exp}!} e^{-R_{th}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_\gamma^2}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_{syst}^2}{2}} \quad (2.2)$$

Аккуратный расчет систематической ошибки является объектом исследований отдельной работы, не имеющей прямого отношения к настоящей. По этой причине был использован эмпирический подход – систематический разброс скорости счета, не связанный со статистическими флуктуациями, извлекается напрямую, модельно независимо, из данных эксперимента по наблюдениям за стабильностью счета одиночных событий. При этом, при построении функции правдоподобия этот разброс учитывается напрямую (слагаемое  $\Delta R_{syst}\theta_{syst}$  в выражении 2.1 текста) – возможный эффект отклонения скорости счета от ожидаемой мы прежде всего пытаемся объяснить этими флуктуациями, чем эффектом от взаимодействия частиц темной материи с детектором – вес этих флуктуаций, эффективно говоря, больше. Получаемые таким образом ограничения на параметры частиц темной материи представляются достаточно строгими.

Используемая тестовая статистика:

$$t_{m_X, g_X} = -2 \ln \left( \frac{L(m_X, g_X, \hat{\theta}_\gamma, \hat{\theta}_{syst})}{L_{max}} \right) \quad (2.3)$$

Здесь  $\hat{\theta}_\gamma, \hat{\theta}_{syst}$  – значения соответствующих штрафных параметров, максимизирующие функцию правдоподобия при фиксированных параметрах  $m_X, g_X$ ;  $L_{max}$  – максимум функции правдоподобия по всем параметрам.

Уравнение на ограничения физических параметров модели:

$$\Phi(\sqrt{t_{m_X, g_X}}) = \frac{1 + \alpha}{2} \quad (2.4)$$

Здесь  $\Phi(x)$  – функция распределения вероятности для стандартного нормального распределения.

Из максимизации (2.2) 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. 2.4 слева. Желтая и зеленая области соответствуют ограничениям для псевдоскалярных ТБ, полученным в реакторных нейтринных экспериментах TEXONO [31] и Bugey [32], 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. 2.4 справа эти же ограничения представлены в сравнении с результатами прямых поисков ТМ в гало галактики [33–35] 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 [36]. То же касается скалярных ТБ, для которых при  $m_X \lesssim 10^3$  эВ есть сильные ограничения из данных по остыванию белых карликов [37], а при  $m_X < 4 \cdot 10^{-5}$  эВ — из экспериментов по проверке принципа эквивалентности [38]. 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.

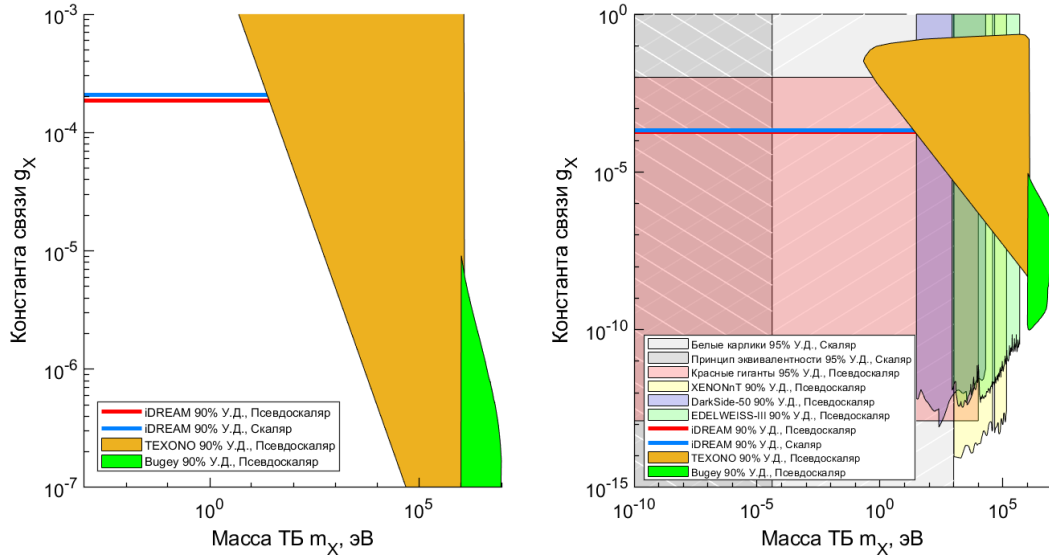


Рисунок 2.4 — Слева — ограничения на параметры моделей псевдоскалярного (красная) и скалярного (синяя) темного бозона, полученные в настоящей работе и других реакторных нейтринных экспериментах TEXONO (желтый, [31]) и Bugey (зеленый, [32]). Справа — те же ограничения в сравнении с имеющимися результатами прямого поиска ТМ в гало галактики детекторами XENONnT [33], DarkSide-50 [34] и EDELWEISS-III [35], а также ограничениями, следующими из астрофизики [36; 37] и эксперимента по проверке принципа эквивалентности [38]

### 3 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Constraining the spin-dependent WIMP-nucleon cross sections with XENON1T / X. Collaboration [и др.] // Physical review letters. — 2019. — Т. 122, № 14. — С. 141301.
2. Dark matter search results from a one ton-year exposure of XENON1T / X. Collaboration [и др.] // Physical review letters. — 2018. — Т. 121, № 11. — С. 111302.
3. *Berlin A., Harnik R., Janish R.* Light Shining Through a Thin Wall: Evanescent Hidden Photon Detection // arXiv preprint arXiv:2303.00014. — 2023.
4. Fermion singlet dark matter in a pseudoscalar dark matter portal / B. D. Sáez [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2021. — Т. 2021, № 10. — С. 1–23.
5. *Cox P., Dolan M. J., Wood J.* Absorption of fermionic dark matter via the scalar portal // Physical Review D. — 2024. — Т. 109, № 9. — С. 095013.
6. *Cho A.* In search for unseen matter, physicists turn to dark sector. — 2017.
7. *Okun L.* Searches for new long-range forces // Sov. Phys.-JETP (Engl. Transl.);(United States). — 1980. — Т. 52, № 3.
8. *Boehm C., Fayet P.* Scalar dark matter candidates // Nuclear Physics B. — 2004. — Т. 683, № 1/2. — С. 219–263.
9. WISPy cold dark matter / P. Arias [и др.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2012. — Т. 2012, № 06. — С. 013.
10. *Foot R., Vagnozzi S.* Dissipative hidden sector dark matter // Phys. Rev. D. — 2015. — Т. 91, вып. 2. — С. 023512.

11. Self-interacting hidden sector dark matter, small scale galaxy structure anomalies, and a dark force / A. Aboubrahim [и др.] // Phys. Rev. D. — 2021. — Т. 103, вып. 7. — С. 075014.
12. New horizons: Scalar and vector ultralight dark matter / D. Antypas [и др.] // arXiv preprint arXiv:2203.14915. — 2022.
13. *Rogers K. K., Peiris H. V.* Strong bound on canonical ultralight axion dark matter from the lyman-alpha forest // Physical Review Letters. — 2021. — Т. 126, № 7. — С. 071302.
14. *Marsh D. J., Niemeyer J. C.* Strong constraints on fuzzy dark matter from ultrafaint dwarf galaxy Eridanus II // Physical review letters. — 2019. — Т. 123, № 5. — С. 051103.
15. *Hardy E., Lasenby R.* Stellar cooling bounds on new light particles: plasma mixing effects // Journal of High Energy Physics. — 2017. — Т. 2017, № 2. — С. 1–37.
16. Search for ultralight scalar dark matter with atomic spectroscopy / K. Van Tilburg [и др.] // Physical review letters. — 2015. — Т. 115, № 1. — С. 011802.
17. Search for invisible axion dark matter in the 3.3–4.2  $\mu$  eV mass range / C. Bartram [и др.] // Physical review letters. — 2021. — Т. 127, № 26. — С. 261803.
18. *Danilov M., Demidov S., Gorbunov D.* Constraints on hidden photons produced in nuclear reactors // Physical Review Letters. — 2019. — Т. 122, № 4. — С. 041801.
19. New directions for axion searches via scattering at reactor neutrino experiments / J. B. Dent [и др.] // Physical Review Letters. — 2020. — Т. 124, № 21. — С. 211804.
20. Light dark bosons in the JUNO-TAO neutrino detector / M. Smirnov [и др.] // Phys. Rev. D. — 2021. — Т. 104, вып. 11. — С. 116024.
21. iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant / A. Abramov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2022. — Т. 17, № 09. — P09001.

22. *Овчинников С.* Эксплуатационные режимы ВВЭР. — Энергоатомиздат, 1988.
23. ENDF/B-VII. 0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology / M. Chadwick [и др.] // Nuclear data sheets. — 2006. — Т. 107, № 12. — С. 2931—3060.
24. *Litaize O., Regnier D., Serot O.* Prompt fission gamma-ray spectra and multiplicities for various fissioning systems // Physics Procedia. — 2014. — Т. 59. — С. 89—94.
25. *Serot O., Litaize O., Regnier D.* Fission mode influence on prompt neutrons and  $\gamma$ -rays emitted in the reaction  $^{239}\text{Pu} (n, f)$  // Physics Procedia. — 2014. — Т. 59. — С. 132—137.
26. High-precision prompt- $\gamma$ -ray spectral data from the reaction  $\text{Pu } 241 (n, f)$  / S. Oberstedt [и др.] // Physical Review C. — 2014. — Т. 90, № 2. — С. 024618.
27. *Копейкин В., Микаэлян Л., Синева В.* Реактор как источник антинейтрино: тепловая энергия деления // Ядерная физика. — 2004. — Т. 67, № 10. — С. 1916—1922.
28. From ENSDF database as of April 20th, 2024.  
Version available at <http://www.nndc.bnl.gov/ensarchivals/>. —
29. Axionlike particles searches in reactor experiments / D. A. Sierra [и др.] // Journal of High Energy Physics. — 2021. — Т. 2021, № 3. — С. 1—38.
30. XCOM: Photon cross sections database, 2010 / M. Berger [и др.] // DOI. — 2010. — Т. 10. — T48G6X.
31. Search for axions from the Kuo-Sheng nuclear power reactor with a  $\langle$ ? format? $\rangle$  high-purity germanium detector / H. Chang [и др.] // Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology. — 2007. — Т. 75, № 5. — С. 052004.
32. Search for the electron-positron decay of axions and axionlike particles at a nuclear power reactor at Bugey / M. Altmann [и др.] // Zeitschrift für Physik C Particles and Fields. — 1995. — Т. 68. — С. 221—227.



33. Search for new physics in electronic recoil data from XENONnT / E. Aprile [и др.] // Physical review letters. — 2022. — Т. 129, № 16. — С. 161805.
34. Search for dark matter particle interactions with electron final states with DarkSide-50 / P. Agnes [и др.] // Physical review letters. — 2023. — Т. 130, № 10. — С. 101002.
35. Searches for electron interactions induced by new physics in the EDELWEISS-III Germanium bolometers / E. Armengaud [и др.] // Physical Review D. — 2018. — Т. 98, № 8. — С. 082004.
36. *Capozzi F., Raffelt G.* Axion and neutrino bounds improved with new calibrations of the tip of the red-giant branch using geometric distance determinations // Physical Review D. — 2020. — Т. 102, № 8. — С. 083007.
37. Stellar limits on scalars from electron-nucleus bremsstrahlung / S. Bottaro [и др.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2023. — Т. 2023, № 07. — С. 071.
38. Violation of the equivalence principle from light scalar dark matter / A. Hees [и др.] // Physical Review D. — 2018. — Т. 98, № 6. — С. 064051.