

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

УДК 539.12

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ПРИМАКОВСКИХ
АКСИОНОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В АКТИВНОЙ
ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000, И ОЖИДАЕМЫЙ
ЭФФЕКТ В ДЕТЕКТОРЕ iDREAM

Научный руководитель
доц., к.ф.-м.н.

Е. А. Литвинович

Студентка

М. И. Макишвили

Москва, 2026

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	2
1 Рождение и регистрация АПЧ через фотон-аксионное взаимодействие	5
2 Анализ экспериментальных данных детектора iDREAM	12
2.1 Критерии отбора событий	12
2.2 Статистика	12
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	15
Список литературы	16

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и изучение тёмной материи (ТМ) представляет собой одно из ключевых направлений современной фундаментальной физики. По наблюдательным данным астрофизики и космологии, около 85 % всей массы вещества во Вселенной приходится именно на ТМ, природа которой до сих пор остаётся неизвестной [1]. Долгое время основными кандидатами на роль ТМ служили слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMPs), однако многолетние поиски точного подтверждения их существования не дали [1–3].

Ненаблюдение ТМ может быть объяснено тем, что она пребывает в «скрытом секторе» – совокупности частиц, не взаимодействующих напрямую с частицами Стандартной модели (СМ) [4]. Среди возможных кандидатов особый интерес представляют тёмные бозоны – лёгкие, слабо взаимодействующие частицы. К ним относят как векторные (тёмный фотон), так и псевдоскалярные частицы – КХД-аксионы и аксионоподобные частицы (АПЧ).

Аксионы были предложены в конце 1970-х годов для решения проблемы отсутствия наблюдаемого CP-нарушения в сильных взаимодействиях [5, 6]. В дальнейшем теоретическое рассмотрение было расширено: АПЧ естественным образом появляются в более общих теориях, в частности в моделях суперсимметрии [6]. Аксионы и АПЧ обладают рядом свойств, делающих их обоснованными кандидатами на роль ТМ: они слабо взаимодействуют с обычным веществом и излучением, обладают высокой стабильностью, а их предсказываемые в моделях плотность и распределение согласуются с космологическими данными.

Перспективным направлением в поиске АПЧ является изучение процессов их рождения под действием потока γ -излучения в активной зоне (АЗ) ядерных реакторов на установках, изначально предназначенных для исследования нейтрино. Преимуществами таких экспериментов являются хорошо известный и контролируемый

изотопный состав АЗ, обеспечивающий надёжное предсказание спектра и интенсивности потока фотонов, а также возможность получения модельно-независимых ограничений на константы связи АПЧ–фотон $g_{a\gamma}$ и АПЧ–электрон g_{ae} . Эти константы характеризуют силу взаимодействия поля АПЧ с полями фотона и электрона соответственно и являются ключевыми параметрами феноменологических моделей АПЧ; именно на них ставят экспериментальные ограничения. Рождение АПЧ может происходить через процессы, аналогичные комптоновскому рассеянию ($\gamma + e^- \rightarrow a + e^-$) или эффекту Примакова ($\gamma + A \rightarrow a + A$, где A – атомное ядро) [7].

Современные реакторные эксперименты (MINER, CONUS, CONNIE, γ -cleus, RECODE, iDREAM) дополняют картину поиска бозонной ТМ ограничениями, сравнимыми с астрофизическими (CAST, НВ-звёзды, SN1987a) и ускорительными (NOMAD, beam dump) результатами [7–13]. Для константы связи $g_{a\gamma}$ в области малых масс ($m_a < 10^4$ эВ) наиболее строгие ограничения дают астрофизические наблюдения (CAST: $g_{a\gamma} < 6,6 \times 10^{-11}$ ГэВ⁻¹ при $m_a < 0,02$ эВ), в то время как реакторные эксперименты обеспечивают конкурентные ограничения на уровне $g_{a\gamma} \sim 2 \times 10^{-4}$ ГэВ⁻¹, не зависящие от массы. В области масс порядка МэВ строгие ограничения получены в эксперименте RECODE, превосходящем по чувствительности эксперименты с пучками. Для константы связи АПЧ–электрон g_{ae} в области масс $m_a < 30$ эВ ограничение $g_{ae} < 1,9 \times 10^{-4}$ (90% У.Д.), полученное на основе данных детектора iDREAM, на настоящий момент является единственным лабораторным модельно-независимым результатом.

Целью настоящей работы является поиск аксионоподобных частиц как кандидатов на роль частиц ТМ на детекторе iDREAM через канал фотон-аксионного взаимодействия.

Задачи:

1. Рассчитать энергетический спектр АПЧ, рождающихся в АЗ ре-

актора ВВЭР-1000 в результате эффекта Примакова;

2. На основе полученного спектра рассчитать ожидаемый в детекторе iDREAM энергетический спектр событий взаимодействия АПЧ;
3. Провести анализ экспериментальных данных детектора iDREAM для дальнейшего исследования чувствительности детектора iDREAM параметрам АПЧ.

Актуальность данной работы определяется высокой научной значимостью поиска частиц ТМ. Дополнение существующего направления поиска АПЧ детектором iDREAM новым каналом регистрации – от АПЧ примаковского происхождения – позволит при дальнейшем анализе экспериментальных данных исследовать чувствительность детектора iDREAM к константе связи $g_{a\gamma}$ в новой области параметрического пространства $g_{a\gamma} - m_a$.

1 Рождение и регистрация АПЧ через фотон-аксионное взаимодействие

В общем случае поток АПЧ определяется интегрированием произведения потока фотонов и дифференциального сечения процесса $\gamma \rightarrow a$ по энергии налетающих фотонов. После расчёта потока АПЧ и проверки того, что вероятность их выживания достаточно велика, на этапе регистрации проводится повторное интегрирование — произведения потока АПЧ и дифференциального сечения процесса $a \rightarrow \gamma$ по энергии налетающих АПЧ. Если АПЧ распадается в объёме детектора, фотоны от его распада также могут давать сигналы в детекторе. В таком случае регистрация АПЧ складывается из вклада обратного примаковского рассеяния и вклада от распада, причём последний доминирует в области больших масс ALP, поскольку ширина распада быстро растёт с массой (как m_a^3 , согласно 1.4) [14].

С учётом вероятности того, что АПЧ с энергией E_a испускается после взаимодействия гамма-квантов с атомами АЗ реактора, поток АПЧ определяется следующим выражением:

$$\frac{d\Phi_a^P}{dE_a} = \mathcal{P}_{\text{surv}} \int_{E_{\gamma',\text{min}}}^{E_{\gamma',\text{max}}} \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \frac{d\sigma_P^P}{dE_a}(E_{\gamma'}, E_a) \frac{d\Phi_{\gamma'}}{dE_{\gamma'}} dE_{\gamma'}, \quad (1.1)$$

где $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{SM}} + \sigma_P^P$ — полное сечение процесса, σ_{SM} — полное сечение рассеяния γ -квантов, $\sigma_P^P \equiv \sigma_{\gamma \rightarrow a}$ — полное сечение примаковского рассеяния для рождения АПЧ посредством эффекта Примакова. Сечение σ_{tot} было рассчитано для состава АЗ реактора ВВЭР-1000 [11] с использованием открытой базы ядерных данных [15]. Пределы интегрирования определяются кинематическим соотношением:

$$E_{\gamma'} = \frac{2E_a M_N - m_a^2}{2(M_N - E_a + |\vec{p}_a| \cos \theta)}, \quad (1.2)$$

причём $E_{\gamma',\text{min}}$ ($E_{\gamma',\text{max}}$) достигается при $\cos \theta = +1$ ($\cos \theta = -1$), а M_N — масса ядра.

Вероятность выживания АПЧ, обеспечивающая достижение детектора, может быть записана как:

$$\mathcal{P}_{\text{surv}} = e^{-L E_a / |\vec{p}_a| \tau}, \quad (1.3)$$

где $L = 19,5$ м – расстояние между реактором и детектором iDREAM [11], а τ – время жизни АПЧ в системе покоя мишени, в свою очередь определяемое полной шириной распада АПЧ: $\tau^{-1} = \Gamma_{a \rightarrow 2\gamma} \times m_a / E_a$, причём ширина распада равна:

$$\Gamma_{a \rightarrow 2\gamma} \equiv \Gamma(a \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{g_{a\gamma}^2 m_a^3}{64\pi}. \quad (1.4)$$

В работе прошлого семестра поток рождённых через канал примаковского рассеяния в АЗ реактора АПЧ был рассчитан с использованием общепринятой аналитической аппроксимации, справедливой для энергий фотонов свыше 0.2 МэВ [7]:

$$\frac{d\Phi_\gamma}{dE_\gamma} = \frac{5.8 \times 10^{17}}{\text{MeV} \cdot \text{sec}} \left(\frac{P}{\text{MW}} \right) e^{-1.1E_\gamma/\text{MeV}}, \quad (1.5)$$

где тепловая мощность принимается равной $P=3000$ МВт для эксперимента iDREAM. Данная модель, однако, не учитывает индивидуальные особенности состава АЗ реактора ВВЭР-1000. В настоящей работе энергетические спектры АПЧ были пересчитаны свёрткой реального потока фотонов в начале топливной кампании с дифференциальным сечением конверсии фотон-АПЧ для состава АЗ, приведенного в Таблице 1.1 [11]. Для спектра потока АПЧ в АЗ реактора полагаем $\mathcal{P}_{\text{surv}} = 1$.

Изотоп	Концентрация, 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 U	$6,196 \cdot 10^{21}$	$6,101 \cdot 10^{21}$
Zr	$5,634 \cdot 10^{21}$	$5,634 \cdot 10^{21}$
²³⁵ U	$2,132 \cdot 10^{20}$	$1,164 \cdot 10^{20}$
²³⁹ Pu	$2,453 \cdot 10^{19}$	$4,292 \cdot 10^{19}$
Gd	$1,528 \cdot 10^{19}$	0
²⁴⁰ Pu	$7,237 \cdot 10^{18}$	$1,540 \cdot 10^{18}$

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

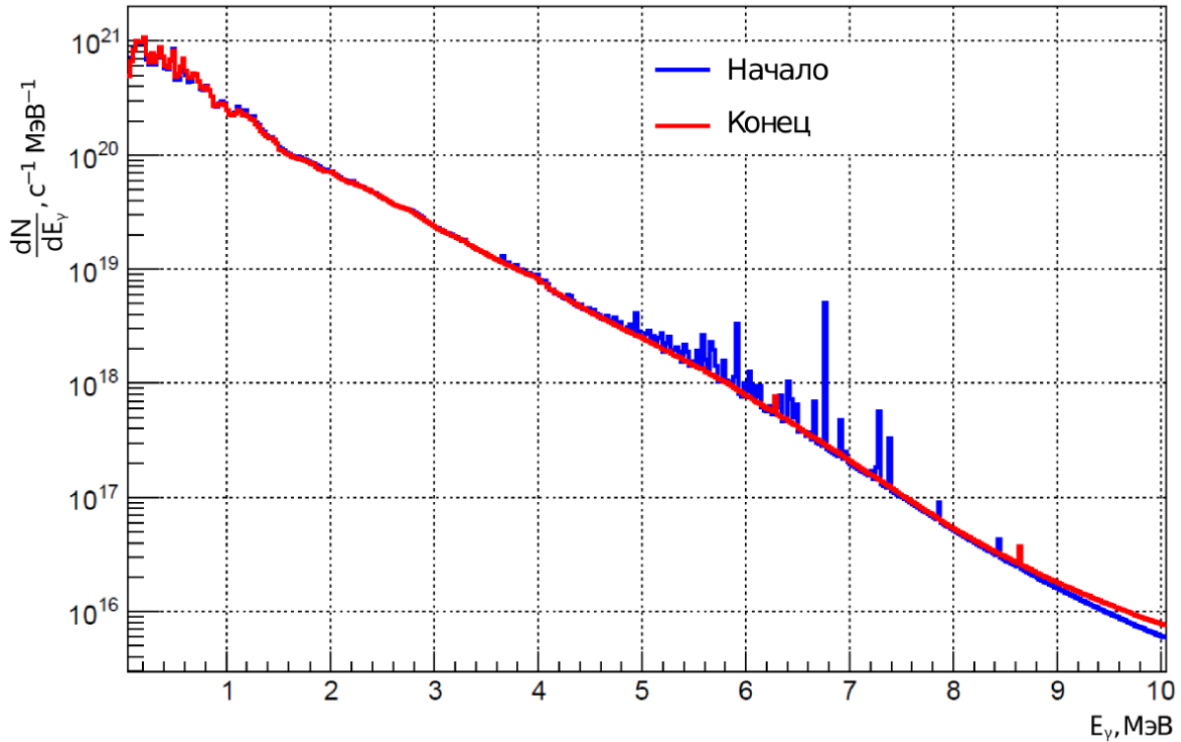


Рис. 1: Спектр γ -квантов в АЗ реактора ВВЭР-1000 для начала кампании (синим) и конца кампании (красным) [11].

Рассчитанные по формуле (1.1) энергетические спектры потока АПЧ в АЗ реактора для разных значений константы $g_{a\gamma}$ приведены на 2: красная линия соответствует значению $g_{a\gamma} = 10^{-3}$, зеленая – $g_{a\gamma} = 10^{-4}$, синяя – $g_{a\gamma} = 10^{-5}$.

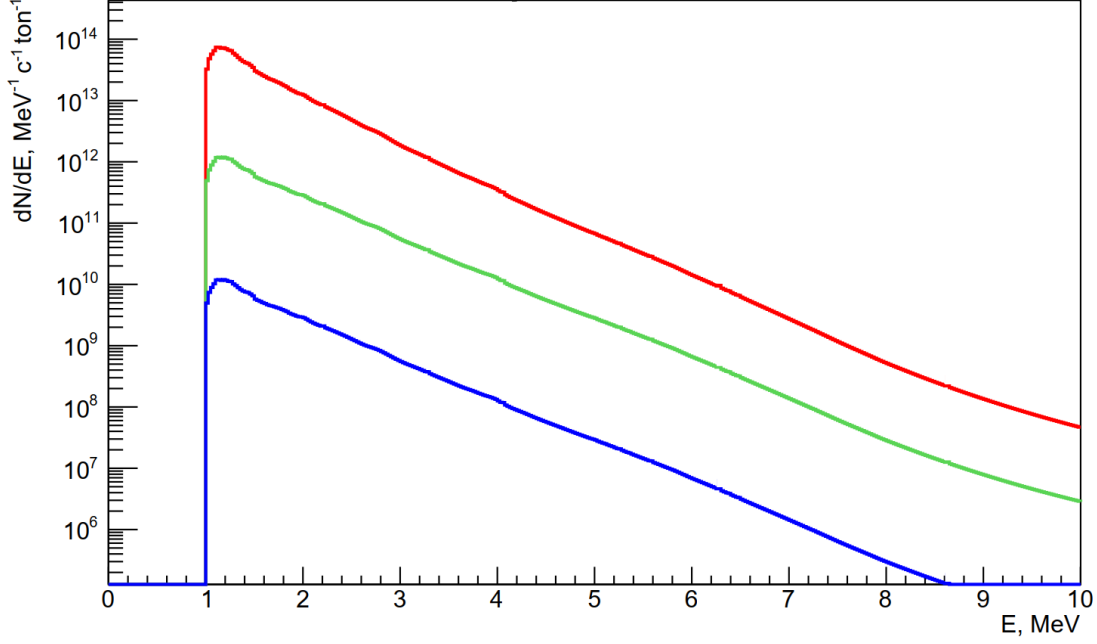


Рис. 2: Энергетический спектр АПЧ, рождённых в АЗ реактора ВВЭР-1000. Полагаем $m_a = 1$ МэВ, $g_{a\gamma} = 10^{-3}$ (красным), $g_{a\gamma} = 10^{-4}$ (зеленым), $g_{a\gamma} = 10^{-5}$ (синим).

Дифференциальная скорость событий состоит из двух слагаемых: вклада от обратного примаковского рассеяния и вклада от распада $a \rightarrow \gamma\gamma$:

$$\frac{dN_{\text{tot}}^P}{dE_a} = \frac{dN_{\text{P}}^P}{dE_a} + \frac{dN_{\text{decay}}^P}{dE_a}. \quad (1.6)$$

Первое слагаемое получается интегрированием произведения потока АПЧ и дифференциального сечения процесса АПЧ $\rightarrow \gamma$ по энергии вторичного фотона (дифференциальное сечение обратного эффекта Примакова (дифференциальное сечение в регистрации, $d\sigma_{\text{D}}^P/dE_\gamma$) в два раза больше, чем сечение в рождении [14]), а именно:

$$\frac{dN_{\text{P}}^P}{dE_a} = m_{\text{det}} \frac{N_T}{4\pi L^2} \int \frac{d\Phi_a^P}{dE_a} \frac{d\sigma_{\text{D}}^P}{dE_\gamma} dE_\gamma, \quad (1.7)$$

что позволяет записать выход АПЧ через примаковское рассеяние следующим образом:

$$N_{\text{P}}^P = m_{\text{det}} \frac{N_T}{4\pi L^2} \int_{E_a^{\text{min}}}^{E_a^{\text{max}}} \sigma_{\text{P}}^P(E_a) \frac{d\Phi_a^P}{dE_a} dE_a, \quad (1.8)$$

где $N_T = N_A/m_{\text{molar}}$, $N_A = 6,022 \times 10^{23}/\text{моль}$, а m_{molar} – молярная масса ядер мишени в кг/моль (таким образом, N_T измеряет количество ядер на кг), $m_{\text{det}} = 1000$ кг – масса сцинтиллятора в мишени детектора iDREAM (гадолинизированный жидкий органический сцинтиллятор (Gd-ЖОС)). Второе слагаемое в уравнении 1.6 задаётся выражением:

$$\frac{dN_{\text{decay}}^P}{dE_a} = \frac{A}{4\pi L^2} \frac{d\Phi_a^P}{dE_a} \mathcal{P}_{\text{decay}}, \quad (1.9)$$

где $\mathcal{P}_{\text{decay}}$ учитывает вероятность распада в объёме детектора и равна:

$$\mathcal{P}_{\text{decay}} = 1 - e^{-L_{\text{det}} E_a / |\vec{p}_a| \tau}, \quad (1.10)$$

где $L_{\text{det}} = 1$ м – продольный размер детектора [16], $A = L_{\text{det}}^2$ – его поперечное сечение.

Пределы интегрирования в формуле (1.8) определяются кинематическим соотношением

$$E_\gamma = \frac{2E_a M_N - m_a^2}{2(M_N - E_a - |\vec{p}_a| \cos \theta)}, \quad (1.11)$$

где θ – угол между импульсами АПЧ и вторичного гамма-кванта.

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

$$\frac{dN}{dE_v} = \int \frac{dN_{\text{tot}}^P}{dE_a} G(E_\gamma, E_v) dE_\gamma \quad (1.12)$$

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

Функция отклика детектора связывает реальную энергию регистрируемой частицы с измеренной детектором iDREAM энергией E_v :

$$G(E_\gamma, E_v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_E(E)} e^{-\frac{(E_\gamma - E_v)^2}{2\sigma_E^2(E)}} \quad (1.13)$$

Ожидаемый энергетический спектр событий взаимодействия псевдоскалярных АПЧ примаковского происхождения в детекторе

iDREAM, рассчитанный по формулам (1.6)–(1.13) при энергетическом разрешении $A = 20\%$ ($\sigma_E(E) = A \cdot \sqrt{E(\text{МэВ})}$ МэВ, [16]) и константе связи $g_{a\gamma} = 10^{-3}$, представлен на рис. 3. Спектры приведены для двух значений массы АПЧ: $m_a = 100$ кэВ (красная линия) и $m_a = 1$ МэВ (синяя линия).

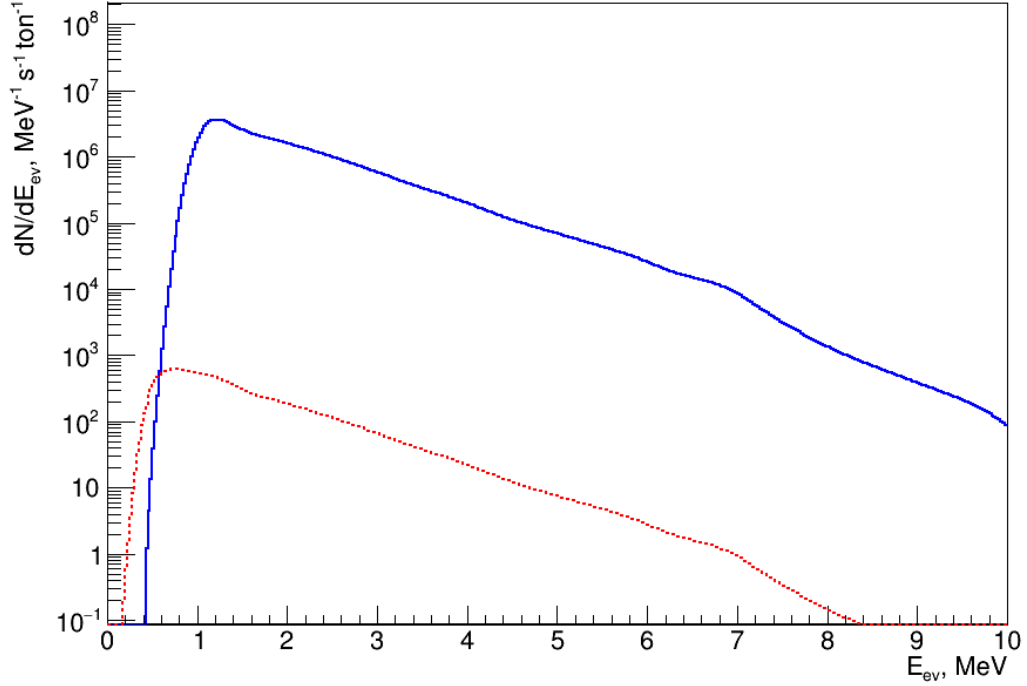


Рис. 3: Ожидаемые в детекторе iDREAM спектры событий взаимодействия АПЧ примаковского происхождения при $g_{a\gamma} = 10^{-3}$ для $m_a = 100$ кэВ (красный) и $m_a = 1$ МэВ (синий).

Ранее в работе [11] был получен аналогичный спектр для случая электрон-аксионного взаимодействия (рис. 4).

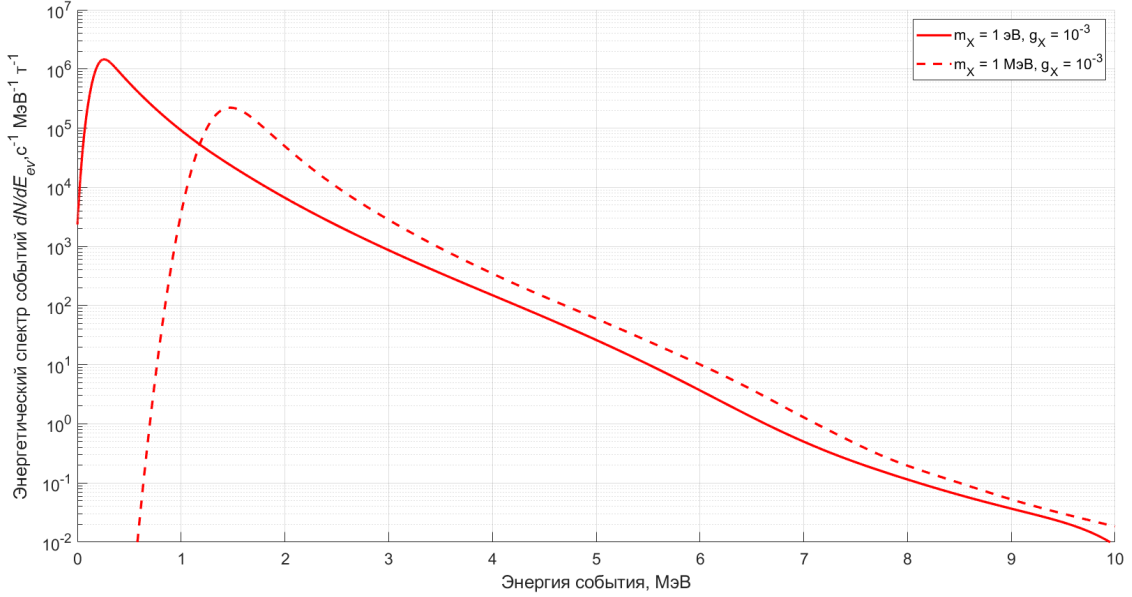


Рис. 4: Ожидаемые в детекторе iDREAM спектры событий при $g_{ae} = 10^{-3}$ для $m_a = 1$ эВ (сплошная) и $m_a = 1$ МэВ (пунктир).

Прямое количественное сравнение спектров невозможно: константы g_{ae} и $g_{a\gamma}$ имеют различную физическую природу, и одинаковые численные значения 10^{-3} соответствуют разным сечениям соответствующих процессов, поэтому дальнейшее сопоставление носит качественный характер. Общая форма спектров совпадает: быстрое нарастание сигнала вблизи порога с последующим монотонным спадом до ~ 10 МэВ. Однако в случае фотон-аксионного взаимодействия наблюдается сильная зависимость числа событий от массы АПЧ: при $m_a \sim 1$ МэВ доминирует канал распада $a \rightarrow \gamma\gamma$ ($\Gamma_{a \rightarrow \gamma\gamma} \propto m_a^3$), вклад которого при меньших массах пренебрежимо мал. В случае образования АПЧ в комптоновском процессе [11] аналогичный канал $a \rightarrow e^+e^-$ кинематически закрыт для рассмотренных масс ($m_a < 2m_e$), и подобный эффект отсутствует.

2 Анализ экспериментальных данных детектора iDREAM

2.1 Критерии отбора событий

Для отбора событий в исследуемом энергетическом диапазоне были использованы следующие критерии:

- отбор одиночных событий: во временном окне ± 100 мкс нет других событий;
- энергетический диапазон события: $E_{ev} \in [5; 10]$ МэВ.

Выбор интервала $[5; 10]$ МэВ обусловлен следующими соображениями: в области энергий ниже предела естественной радиоактивности ($\lesssim 5$ МэВ) преобладают низкоэнергетические фоновыми события: гамма-кванты от распадов цепочек ^{238}U и ^{232}Th в материалах детектора, а также гамма-кванты с энергией 1.46 МэВ от распада ^{40}K . Жёсткая компонента естественной радиоактивности обусловлена линией 2.615 МэВ изотопа ^{208}Tl . Верхняя граница рассматриваемого интервала (~ 10 МэВ) определяется максимальной энергией γ -квантов в активной зоне реактора и, соответственно, ограничивает спектр рождённых АПЧ.

2.2 Статистика

Для отработки методики анализа были использованы данные детектора iDREAM, соответствующие 8 сериям набора данных: 4 серии при выключенном реакторе и 4 серии при включенном реакторе. Длительность каждой серии составляет 6 часов. Для оценки стабильности скорости счёта каждая серия была дополнительно разбита на 5 временных интервалов длиной 1.2 часа.

На рис. 5 приведена скорость счёта одиночных событий в диапазоне $[5; 10]$ МэВ при выключенном (красным) и включенном (зелёным) реакторе. Каждая точка соответствует одному временному

интервалу; статистическая ошибка определяется как $\sigma_{stat} = \sqrt{N}/T$, где N – число событий в интервале, T – длительность интервала.

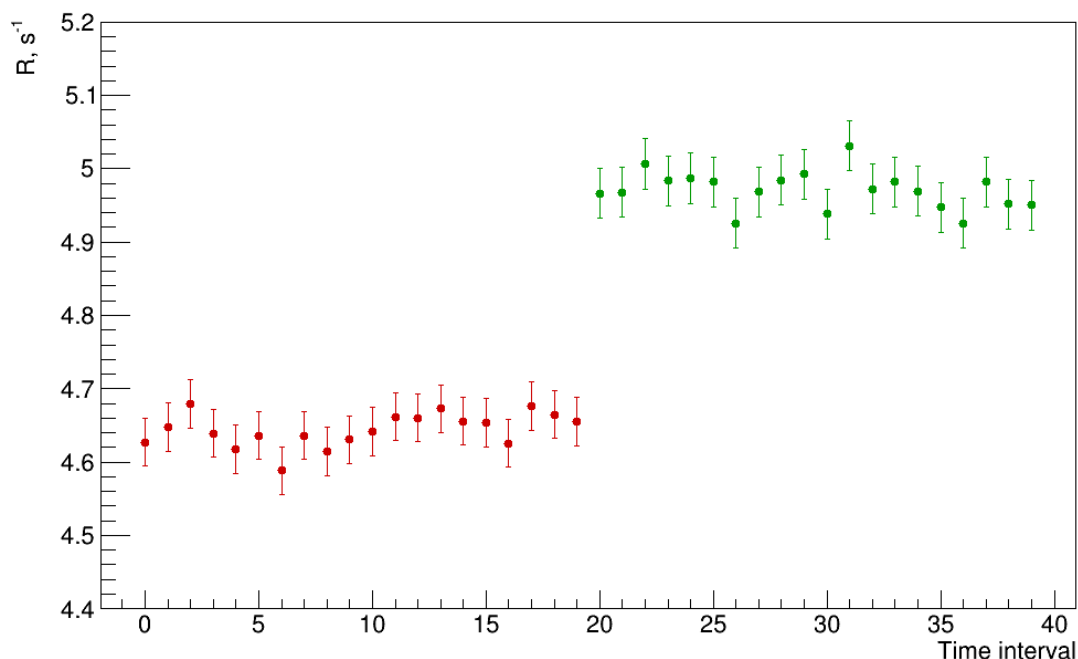


Рис. 5: Скорость счёта (s^{-1}) одиночных событий iDREAM в диапазоне от 5 до 10 МэВ в периоды выключенного (красный) и включенного (зелёный) реактора.

В предположении, что скорость счёта фоновых одиночных событий не зависит от режима работы реактора, учёт фона может быть произведён вычитанием скорости счёта детектора при выключенном реакторе R_{OFF} из скорости счёта при включенном реакторе R_{ON} :

$$R_{exp} = R_{ON} - R_{OFF}.$$

Полученное значение R_{exp} должно содержать события взаимодействия АПЧ, которые предполагаются происходящими только при работающем реакторе, а также вклад флуктуаций скорости счёта.

Усреднённые по сериям набора данных значения скорости счёта составили:

$$R_{OFF} = 4.644 \pm 0.007 \text{ (стат.) } s^{-1},$$

$$R_{ON} = 4.971 \pm 0.008 \text{ (стат.) } s^{-1}.$$

Здесь приведены статистические ошибки на средние значения, полученные усреднением статистических ошибок отдельных серий набора данных.

Среднеквадратичные отклонения скоростей счёта между сериями набора данных составили $\Delta R_{OFF} = 0.015 \text{ с}^{-1}$ для периода выключенного реактора и $\Delta R_{ON} = 0.012 \text{ с}^{-1}$ для периода включенного реактора.

Разность скоростей счёта составила:

$$R_{exp} = R_{ON} - R_{OFF} = 0.327 \pm 0.011 \text{ (стат.) } \text{с}^{-1}.$$

Полученное значение R_{exp} существенно превышает аналогичную величину, полученную в работе [11], где для близких отборов $R_{exp} = 0.044 \pm 0.001 \text{ (стат.)} \pm 0.035 \text{ (сист.) } \text{с}^{-1}$. Настолько существенное различие может являться сигналом от взаимодействия АПЧ примаковского происхождения в детекторе или вкладом от рассеяния нейтрино на электронах. Однако, на данном этапе работы нельзя исключать ошибок методического характера, допущенных в ходе обработки данных и расчётов, а также систематических ошибок, возникших вследствие значительного временного интервала между периодами OFF и ON (~ 1300 серий набора данных), включая возможные изменения в условиях работы детектора и окружения.

В дальнейшем планируется расширить статистику набора данных, а также провести независимую энергетическую калибровку для каждой серии измерений с использованием источника нейтронов ^{252}Cf по положению пика γ -линии захвата нейтронов ядрами водорода ($E_\gamma = 2,224 \text{ МэВ}$). На основе полученной разности скоростей счёта R_{exp} будут получены ограничения на константу связи $g_{a\gamma}$ классическим методом статистического анализа малых сигналов [17], который обеспечивает корректное покрытие доверительного интервала независимо от объёма статистики и близости параметра к физической границе $g_{a\gamma} \geq 0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках научно-исследовательской работы было продолжено исследование возможности поиска аксионо-подобных частиц как кандидатов на роль частиц тёмной материи на детекторе iDREAM через канал фотон-аксионного взаимодействия.

Был рассчитан энергетический спектр АПЧ, рождающихся в АЗ реактора ВВЭР-1000 в результате эффекта Примакова, с учётом реального спектра γ -квантов и изотопного состава АЗ в начале топливной кампании. На его основе получен ожидаемый в детекторе iDREAM энергетический спектр событий взаимодействия псевдоскалярных АПЧ с учётом двух каналов регистрации (обратного примарковского рассеяния и распада $a \rightarrow \gamma\gamma$) и энергетического разрешения детектора. Качественное сравнение полученного спектра с ранее рассчитанным для случая электрон-аксионного взаимодействия показало согласие в общей форме спектров и позволило выявить характерную особенность фотон-аксионного канала – сильную зависимость числа ожидаемых событий от массы АПЧ, обусловленную доминированием канала распада $a \rightarrow \gamma\gamma$ при $m_a \sim 1$ МэВ.

Также был проведён анализ экспериментальных данных детектора iDREAM, соответствующих 8 сериям набора данных. Получена разность скоростей счёта одиночных событий в диапазоне [5; 10] МэВ при включенном и выключенном реакторе $R_{exp} = 0.327 \pm 0.011$ (стат.) s^{-1} , существенно превышающая аналогичную величину, полученную ранее [11], что требует дальнейшего детального анализа.

Поставленные задачи выполнены, что подтверждает возможность и перспективность поиска АПЧ на установке iDREAM через канал фотон-аксионного взаимодействия. В рамках продолжения работы планируется расширить статистику набора данных и на основе полученной разности скоростей счёта R_{exp} исследовать чувствительность детектора iDREAM к константе связи $g_{a\gamma}$.

Список литературы

- [1] А. Б. Александров и др. “Поиск слабовзаимодействующих массивных частиц тёмной материи: состояние и перспективы”. В: *Усп. физ. наук* 191.9 (2021), с. 905—936.
- [2] Eugenio Del Nobile и др. “Update on light WIMP limits: LUX, lite and light”. В: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2014.03 (март 2014), с. 14.
- [3] R. Agnese и др. “Search for Low-Mass Weakly Interacting Massive Particles with SuperCDMS”. В: *Phys. Rev. Lett.* 112 (24 июнь 2014), с. 6.
- [4] R. Foot и S. Vagnozzi. “Dissipative hidden sector dark matter”. В: *Physical Review D* 91.2 (янв. 2015). ISSN: 1550-2368.
- [5] F. Wilczek. “Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons”. В: *Phys. Rev. Lett.* 40 (5 янв. 1978), с. 279—282.
- [6] Дербин А. Ю. “Экспериментальные поиски солнечных аксионов и аксионо-подобных частиц (ALPs)”. В: *Семинар*. 2024.
- [7] James B. Dent и др. “New Directions for Axion Searches via Scattering at Reactor Neutrino Experiments”. В: *Physical Review Letters* 124.21 (май 2020). ISSN: 1079-7114.
- [8] M. Altmann и др. “Search for the electron-positron decay of axions and axionlike particles at a nuclear power reactor at Bugey”. В: *Z. Phys. C - Particles and Fields* 68 (1995), с. 221—227.
- [9] M. Mirzakhani и др. “MINER reactor based search for axionlike particles using sapphire (Al_2O_3) detectors”. В: *Phys. Rev. D* 112 (3 авг. 2025), с. 9.
- [10] Patrick deNiverville, Hye-Sung Lee и Young-Min Lee. “New searches at reactor experiments based on the dark axion portal”. В: *Phys. Rev. D* 103 (7 апр. 2021), с. 12.
- [11] А. В. Абрамов и др. “Поиск бозонной темной материи нейтринным детектором iDREAM на Калининской атомной электростанции”. В: *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2 (2025).
- [12] Wei Dai и др. “Hunting for Axions in REactor neutrino COherent scattering Detection Experiment”. В: *Phys. Rev. D* (2025).
- [13] H. M. Chang и др. “Search for axions from the Kuo-Sheng nuclear power reactor with a high-purity germanium detector”. В: *Phys. Rev. D* 75 (5 апр. 2007), с. 9.

- [14] D. Aristizabal Sierra и др. "*Axionlike particles searches in reactor experiments*". 2020.
- [15] M. J. Berger, J. H. Hubbell, S. M. Seltzer и др. *XCOM: Photon Cross Section Database*. (version 1.5). [Online] Available: <http://physics.nist.gov/xcom> [2023, December 11]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2010.
- [16] A. Abramov и др. "iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant". В: *Journal of Instrumentation* 17.09 (2022).
- [17] Gary J. Feldman и Robert D. Cousins. "Unified approach to the classical statistical analysis of small signals". В: *Physical Review D* 57.7 (апр. 1998), с. 3873—3889.