

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
ЭФФЕКТ ПРИМАКОВА ДЛЯ АКСИОНА.
ПОИСК ПРИМАКОВСКИХ АКСИОНОВ В
ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРАХ

Научный руководитель
доц., к.ф.-м.н.

_____ Е. А. Литвинович

Студент

_____ М. И. Макишвили

Москва, 2025

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Аксионы и АПЧ	5
2 Обзор экспериментов для поиска частиц «скрытого» сектора	7
2.1 Эксперимент MINER с германиевыми (а) и сапфировыми (б) детекторами	9
2.2 Эксперимент CONUS	10
2.3 Эксперимент RECODE	10
2.4 Эксперимент на детекторе iDREAM	11
3 Текущие ограничения на константы связи g_{ae} и $g_{a\gamma}$	13
4 Эффект Примакова в активной зоне реактора ВВЭР-1000. Энергетический спектр АПЧ	17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	21
Список литературы	23

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и изучение тёмной материи (ТМ) представляет собой одно из ключевых и наиболее динамично развивающихся направлений современной фундаментальной физики. Наблюдательные данные в астрофизике и космологии показывают, что приблизительно 85% всей массы вещества во Вселенной приходится именно на тёмную материю, природа которой до сих пор остаётся неизвестной [1].

Современная физика рассматривает широкий спектр гипотетических частиц-кандидатов на роль ТМ. Долгое время основными кандидатами на роль ТМ служили так называемые WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), или «вимпы» — тяжелые частицы, взаимодействующие посредством гравитации и любой другой силы (или сил), которая является столь же слабой или более слабой, чем слабое ядерное взаимодействие [1]. По результатам многолетних экспериментов и коллабораций, были предложены различные ограничения на возможные параметры вимпов ([2], [3]), однако точного подтверждения их существования получено не было [1].

Ненаблюдение темной материи (ТМ) может быть объяснено тем, что ТМ пребывает в «скрытом секторе» — это совокупность частиц, которые не взаимодействуют напрямую с частицами СМ. В общем случае, СМ может быть расширена за счет скрытых секторов, связанных с СМ прямо или косвенно. Концепция скрытого сектора расширила пространство возможных кандидатов на ТМ, например, таковыми могут являться темные бозоны (ТБ) — они могут обеспечить связь между частицами скрытого сектора и частицами СМ [4].

Темный бозон — обобщенный термин для легких, слабо взаимодействующих частиц, которые могут играть роль темной материи. К ТБ относят как векторные (имеют спин, равный единице (в единицах \hbar) и отрицательную четность) — темный фотон, так и псевдоскалярные (имеют нулевой спин и отрицательную четность) — QCD-аксионы, аксионоподобные частицы (АПЧ).

Цель настоящего исследования заключается в рассмотрении процесса рождения АПЧ в активной зоне (АЗ) реактора ВВЭР-1000 в резуль-

тате эффекта Примакова.

Задачи:

1. Анализ современного состояния исследований по поиску АПЧ с помощью нейтринных детекторов на ядерных реакторах;
2. Исследование механизма рождения АПЧ через эффект Примакова в активной зоне реактора ВВЭР-1000;
3. Построение энергетического спектра АПЧ для АЗ реактора ВВЭР-1000.

Актуальность данной научно-исследовательской работы заключается в том, что эксперименты на ядерных реакторах позволяют искать аксионы и АПЧ в тех областях параметров, которые недоступны для ускорителей и астрофизических методов, а дополнительный анализ частиц, рожденных в АЗ реактора в результате эффекта Примакова, поможет уточнить и усовершенствовать уже существующие исследования.

1. Аксионы и АПЧ

Аксионы как гипотетические частицы впервые были предложены в конце 1970-х годов для решения проблемы нарушения CP-симметрии (симметрии между материей и антиматерией) в квантовой хромодинамике (КХД). Эта проблема заключается в том, что уравнения лагранжиана КХД допускают наличие Θ -члена, представляющего взаимодействие глюонных полей и являющегося CP-нечетным, который должен приводить к нарушению CP-симметрии в сильных взаимодействиях [5]:

$$L_{\Theta} = \Theta \frac{g_s^2}{32\pi^2} G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{a\mu\nu}, \quad (1)$$

где Θ – безразмерный параметр, описывающий нарушение CP-симметрии, g_s – константа сильного взаимодействия, $G_a^{\mu\nu}$ – тензор напряженности глюонного поля, $\tilde{G}_{a\mu\nu}$ – дуальный тензор глюонного поля.

Однако, эксперименты показывают, что подобного нарушения CP-симметрии практически не наблюдается. В связи с этим в 1977 году Роберто Печчеи и Хелен Куинн предложили механизм, при котором CP-нарушение в сильных взаимодействиях автоматически подавляется за счёт введения новой глобальной симметрии – симметрии Печчеи–Куинн (PQ-симметрии). Когда эта симметрия спонтанно нарушается, возникает новая псевдоскалярная частица – аксион, термин, введённый Фрэнком Вильчеком в 1978 году [6].

В процессе исследований стало ясно, что аксионы обладают рядом свойств, которые делают их естественными и обоснованными кандидатами на роль ТМ [5]: аксионы взаимодействуют с обычным веществом и излучением очень слабо; это согласуется с тем, что ТМ не излучает и не поглощает свет. Из-за слабости взаимодействий аксионы чрезвычайно стабильны.

Кроме того, в ранней Вселенной аксионы могли образоваться при фазовом переходе, связанном с нарушением PQ-симметрии. Модели аксионов предсказывают плотность и распределение, согласующиеся с космологическими данными для ТМ.

Теоретические исследования отошли от изучения только исходных КХД-аксионов и включили в круг рассматриваемых моделей общие АПЧ,

которые естественным образом появляются не только в КХД, но и более общих теориях, таких как, например, суперсимметрия (SUSY) [5].

Таким образом, аксионы и АПЧ решают проблему отсутствия CP -нарушения в сильных взаимодействиях и являются хорошо мотивированными кандидатами на роль частиц ТМ.

2. Обзор экспериментов для поиска частиц «скрытого» сектора

Наиболее распространенными способами зарегистрировать аксионы и АПЧ экспериментально являются распад АПЧ на специальных устройствах, которые поглощают и рассеивают энергию направленного луча заряженных частиц (beam dumps) и их преобразование в фотоны в галоскопах и гелиоскопах [7].

Однако, перспективным направлением в поиске АПЧ является исследование процессов их рождения под действием потока гамма-излучения от АЗ ядерных реакторов на установках, изначально предназначенных для изучения нейтрино. Преимуществом таких установок является хорошо известный и детально контролируемый изотопный состав активной зоны реактора, который обеспечивает надёжное предсказание спектра и интенсивности потока фотонов. Кроме того, реакторные эксперименты позволяют исследовать частицы в областях параметров, недоступных ускорительным и астрофизическим наблюдениям, благодаря сочетанию высокой интенсивности источника и низкого порога регистрации [7].

Рождение АПЧ a в таких условиях может происходить через процессы, аналогичные комптоновскому рассеянию или эффекту Примакова [8] (рис. 1):

$$\gamma + e^- \rightarrow a + e^-$$

– комптоновское рассеяние на электронах;

$$\gamma + A \rightarrow \gamma + a$$

– эффект Примакова, где A – атомное ядро.

Основными источниками γ -квантов в АЗ являются мгновенное γ -излучение деления ядер и (n, γ) -реакции.

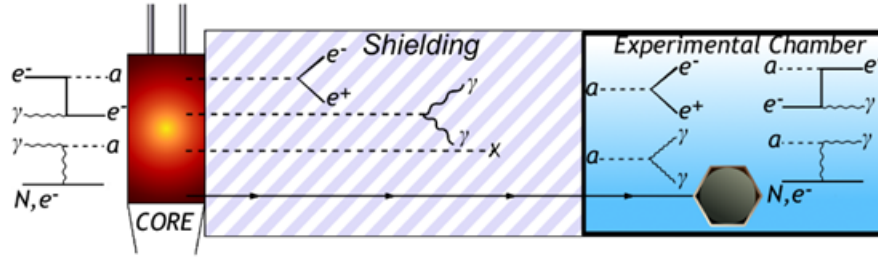


Рис. 1: Схематическое изображение АПЧ и процессов их рождения (слева) и их взаимодействий (справа) в эксперименте с реакторными нейтрино. АПЧ могут распасться внутри защиты и не быть зарегистрированными (пунктирные линии). АПЧ, которые свободно проходят через защиту (сплошная линия), могут быть обнаружены через каналы обратного примаковского и комптоновского рассеяния, а также через каналы распада. Детектор герметично защищен (сплошной синий контур) для дополнительного подавления фона от гамма-квантов и нейтронов [7].

Одним из первых реакторных экспериментов по поиску аксионов и АПЧ стал французский эксперимент Bugey (назв. от франц. Centrale nucléaire du Bugey – АЭС Бюже, на которой в 1980-1990-х годах проводился эксперимент), в рамках которого осуществлялся поиск распада аксионов и АПЧ на электрон-позитронную пару. Рассматривались слабо взаимодействующие частицы, рождающиеся в ядерных γ -переходах в АЗ реактора и затем распадающиеся по каналу $\chi \rightarrow e^+ + e^-$. По результатам эксперимента удалось установить строгие верхние пределы на вероятность рождения аксионов в γ -переходах и ограничения на массу QHD-аксионов. Таким образом, была заложена основа для последующих реакторных поисков [9].

Рассмотрим конфигурацию современных реакторных экспериментов по поиску аксионов и АПЧ и их результаты (см. раздел 3. Полученные из реакторных экспериментов ограничения на константы связи g_{ae} и $g_{a\gamma}$) подробнее.

2.1 Эксперимент MINER с германиевыми (а) и сапфировыми (б) детекторами

(а): Установка состоит из криогенных германиевых детекторов (имеют тип SuperCDMS), расположенных на расстоянии 4,5 м от АЗ реактора типа TRIGA мощностью 1 МВт, использующего слабообогащённый уран U^{235} , в исследовательском центре NSC [7].

(б): Установка включает в себя три цилиндрических детектора из сапфира Al_2O_3 , каждый диаметром 3 дюйма, расположенные вертикально внутри медного экрана. Два детектора имеют толщину 1 см, а средний — 4 мм, с общей массой 435 г. Сапфир (Al_2O_3) в виде монокристалла имеет плотность приблизительно 3.98 г/см^3 и классифицируется как сцинтиллятор с низким световыходом. Используемые криогенные сапфировые детекторы обладают низким энергетическим порогом регистрации (порядка 100 эВ) и оснащены переходным датчиком (TES), способным детектировать атермальные фононы [10].

Хотя эксперимент MINER изначально был создан для регистрации когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах атомов ($CE\gamma NS$), он также подходит для поиска АПЧ [7]. АЗ реактора в этом эксперименте производит большое количество фотонов, которые могут рассеиваться на материале внутри реакторного бака, порождая АПЧ. На стороне детектирования, АПЧ могут непосредственно рассеиваться на ядрах и электронах детектора (обратное примаковское и комптоновское рассеяние), а также распадаться в полёте на пары фотон-фотон или электрон-позитрон, что позволяет получить ограничения на константы связи АПЧ-фотон $g_{a\gamma}$ или АПЧ-электрон g_{ae} (подробнее про константы связи см. раздел 3. Полученные из реакторных экспериментов ограничения на константы связи g_{ae} и $g_{a\gamma}$), соответственно. Исследования в ранее неизученных областях пространства параметров $m_a - g_{a\gamma}$ (где m_a — масса аксиона) становятся возможны благодаря комбинации нескольких факторов [10]:

- значительный поток фотонов из реактора, порядка $10^{19} \text{ } \gamma/\text{s}$;
- близкое расположение детекторов к реактору и их высокая чувствительность при низких энергетических порогах;
- возможность регистрации сигналов как через процессы рассеяния,

так и через каналы распада.

2.2 Эксперимент CONUS

Так же, как и эксперименты MINER, предназначен для измерения когерентного упругого нейтрино-ядерного рассеяния. Расположен на площадке коммерческой атомной электростанции в Брокдорфе, Германия, с тепловой мощностью реактора 3.9 ГВт. Эксперимент использует четыре германиевых детектора с ожидаемым порогом чувствительности около 300 эВ. Детекторы расположены на расстоянии 17 м от активной зоны реактора; объём детектора составляет приблизительно 751.46 см^3 с полезной массой германия 4 кг. Аналогично, предполагается регистрация АПЧ посредством обратного примаковского и комптоновского рассеяния [7].

2.3 Эксперимент RECODE

Эксперимент RECODE (REactor neutrino COherent scattering Detection Experiment) [11] представляет собой двухдетекторную установку (оба детектора - низкопороговые германиевые) для поиска АПЧ, расположенную в непосредственной близости от АЗ реактора мощностью 3,4 ГВт на АЭС Саньмэнь. Ближний детектор установлен внутри защитной оболочки на расстоянии 11 м от АЗ, дальний детектор расположен снаружи оболочки в 22 м от АЗ. Оба детектора заключены в многослойную защитную сборку из меди, свинца и полиэтилена, которая специально разработана для минимизации фона от космических нейтронов.

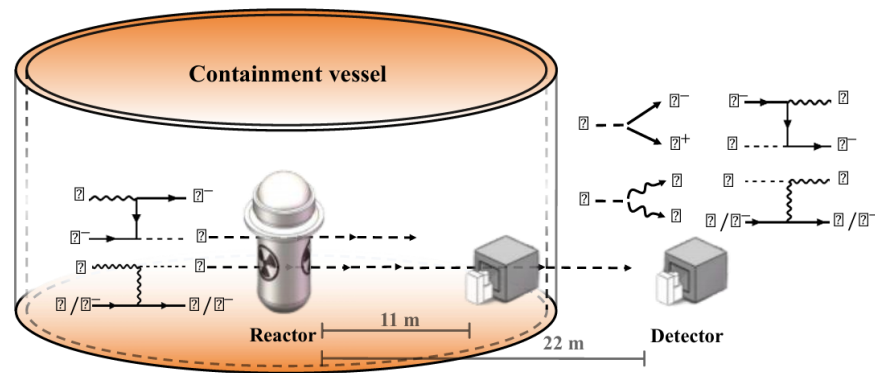


Рис. 2: Схематическое изображение эксперимента RECODE по поиску АПЧ на ядерном реакторе

2.4 Эксперимент на детекторе iDREAM

Детектор iDREAM (industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring) [12] на Калининской атомной электростанции расположен на удалении 19.5 м от центра АЗ реактора ВВЭР-1000 мощностью 3000 МВт энергоблока № 3 КАЭС. Детектор предназначен для мониторинга состояния и мощности реактора по потоку антинейтрино из активной зоны.

Конструкция детектора включает два концентрических стальных бака, которые герметично закрыты общей крышкой. Внутренний объем разделен акриловой перегородкой на две независимые зоны. В верхней зоне (буфер) находится линейный алкилбензол (ЛАБ), а в нижней (нейтринная мишень) — жидкий органический сцинтиллятор на основе ЛАБ, легированный гадолинием (Gd-ЖОС). Общая масса сцинтиллятора в мишени составляет 1 тонну.

Регистрация сигналов в мишени осуществляется шестнадцатью фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), установленными на крышке внутреннего бака. Пространство между внутренним и внешним баками заполнено обычным ЖОС (без гадолиния), который просматривается двенадцатью ФЭУ. Эта конструкция выполняет две функции: она служит гамма-уловителем (кетчером) и создает пассивную защиту мишени от внешнего радиационного фона.

Так же как и в других реакторных экспериментах, АПЧ предполагается регистрировать через каналы обратного примаковского и комптоновского рассеяния.

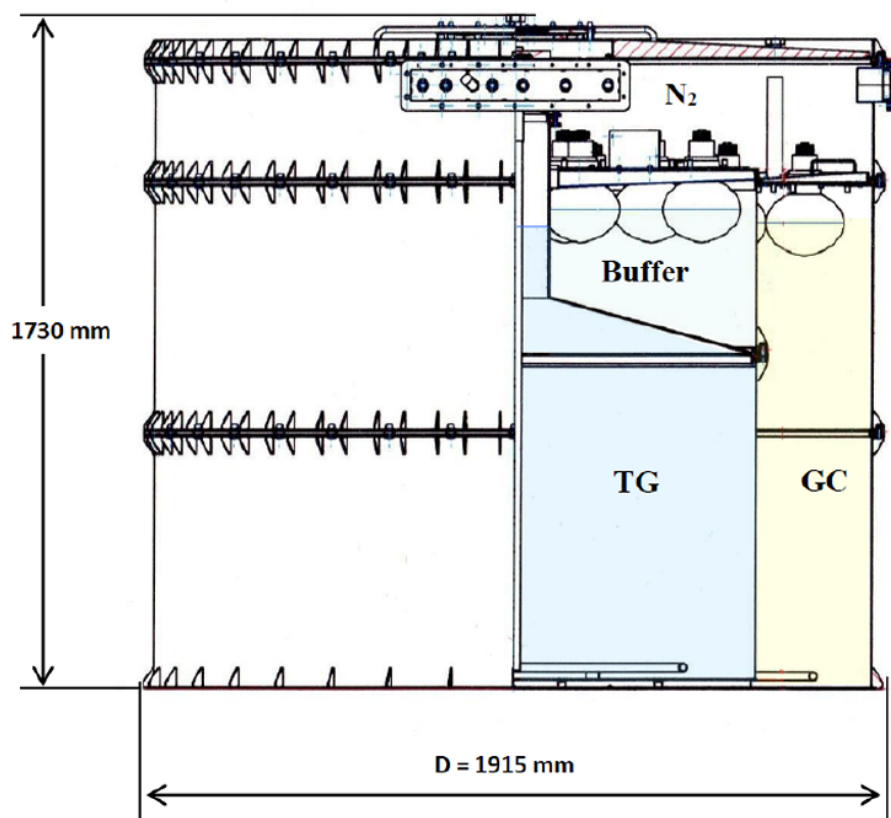


Рис. 3: Схематическое изображение детектора iDREAM

3. Полученные из реакторных экспериментов ограничения на константы связи g_{ae} и $g_{a\gamma}$

Полученные на реакторных экспериментах результаты дополняют картину поиска бозонной ТМ в рамках других поисковых методик: как уже было отмечено ранее, реакторные установки позволяют искать АПЧ в таких областях параметров, которые недоступны для ускорителей и астрофизических методов [7].

Взаимодействие поля АПЧ a с полем фотона A_μ и полем заряженного фермиона (электрона) ψ_e феноменологически описывается следующими слагаемыми в Лагранжиане [11]:

$$L_{\text{int}} = -\frac{1}{4}g_{a\gamma}aF_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} - g_{ae}a\bar{\psi}_e\gamma_5\psi_e, \quad (2)$$

где $F_{\mu\nu}$ и $\tilde{F}_{\mu\nu}$ – тензор напряжённости электромагнитного поля и его дуальный тензор соответственно, $g_{a\gamma}$ – константа связи АПЧ с γ -квантами, g_{ae} – константа связи АПЧ с заряженными лептонами (электронами) СМ.

На рис. 4 представлены прогнозируемые ограничения на константу связи АПЧ с фотонами $g_{a\gamma}$ при УД 95%, полученные экспериментами MINER, CONUS, CONNIE и γ -cleus [7]. Для $m_a < 10^4$ эВ наблюдается линейный участок, не зависящий от массы, поскольку эта часть ограничения определяется процессом рассеяния АПЧ на материале детектора. Пик чувствительности наблюдается при массе около 4 МэВ и обусловлен детектированием фотонов от распада АПЧ ($a \rightarrow \gamma\gamma$). Резкое снижение чувствительности после примерно 10 МэВ объясняется достижением верхней границы энергетического спектра фотонов из реактора (~ 10 МэВ), что ограничивает максимальную массу АПЧ, которую можно зарегистрировать.

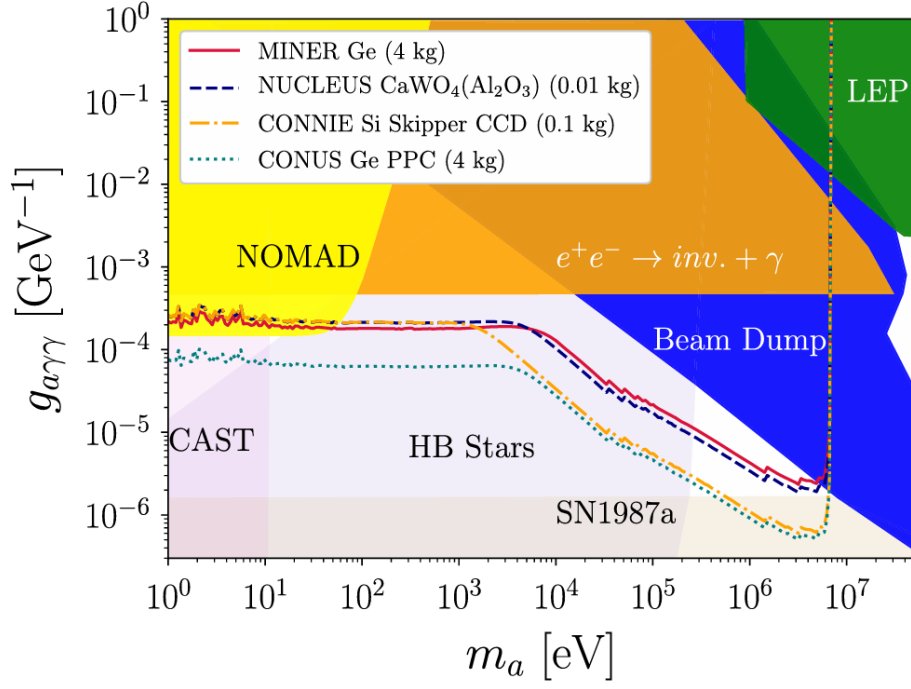


Рис. 4: Ограничения на константу связи АПЧ с фотонами $g_{a\gamma}$ при УД 95%, полученные экспериментами MINER, CONUS, CONNIE и γ -cleus, как функции массы АПЧ m_a . Астрофизически полученные ограничения показаны светлой заливкой. Константа связи g_{ae} предполагается пренебрежимо малой

На рис. 5 показаны аналогичные ограничения на константу связи АПЧ с электронами g_{ae} [7]. В этом случае ограничения в основном определяются рассеянием АПЧ на электронах в детекторе. Распад АПЧ на позитрон-электронную пару ($a \rightarrow e^+e^-$) возможно наблюдать при массах выше 1 МэВ ($m_a > 2m_e$), однако m_a не может быть слишком большой, чтобы удовлетворять законам сохранения. В этом узком диапазоне масс частицы либо распадаются не достигая детектора (если связь слишком сильная), либо не дают статистически значимого сигнала (если связь слишком слабая).

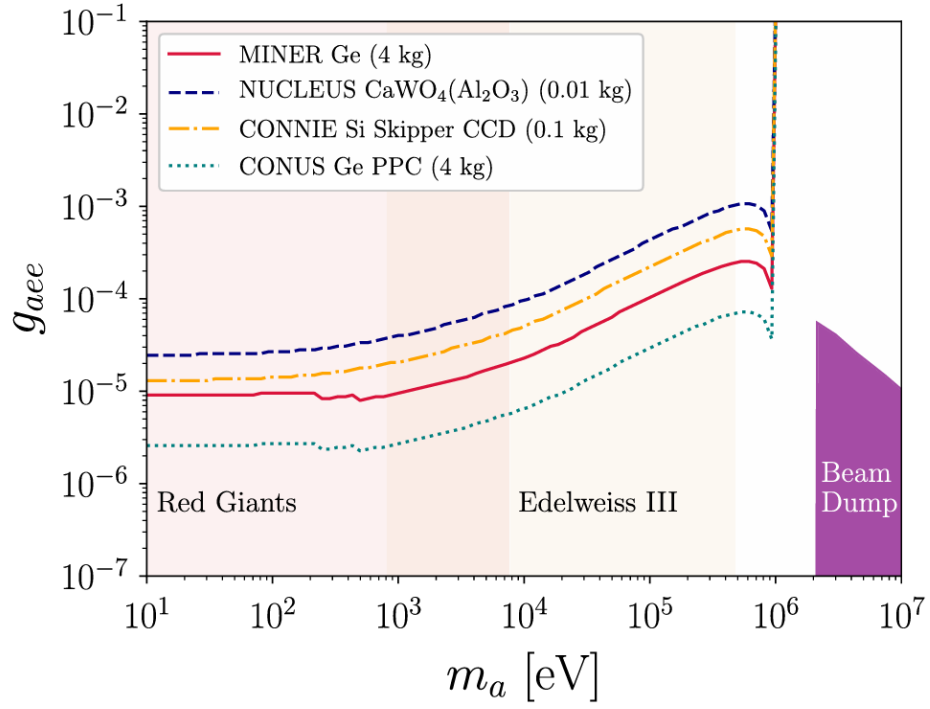


Рис. 5: Ограничения на константу связи АПЧ с электронами g_{ae} при УД 95%, полученные экспериментами MINER, CONUS, CONNIE и γ -cleus, как функции массы АПЧ m_a . Астрофизически полученные ограничения показаны светлой заливкой. Константа связи $g_{a\gamma}$ предполагается пренебрежимо малой

В области масс АПЧ порядка МэВ более строгие ограничения на константы связи были получены в эксперименте RECODE [11]. В текущей конфигурации он превосходит по чувствительности традиционные астрофизические (beam dump) эксперименты для определения константы связи $g_{a\gamma}$ и сравним по чувствительности с экспериментами по определению константы связи g_{ae} . При переходе к улучшенной конфигурации RECODE сможет установить еще более строгие ограничения для обеих констант, превышающие возможности всех существующих экспериментов с рассеиванием частиц.

В области масс АПЧ $m_a < 30$ эВ на основе данных нейтринного детектора iDREAM удалось установить ограничения на константу связи АПЧ с электронами $g_{ae} < 1.9 \cdot 10^{-4}$ (90% У.Д.), изображенные красной линией на рис. 6 [12]. Желтая и зеленая области соответствуют ограничениям для АПЧ, полученным в реакторных нейтринных экспериментах TEXONO [13] и Bugey [9] соответственно. В данной области параметрического про-

странства данные iDREAM являются в настоящий момент единственными лабораторными, модельно-независимыми результатами.

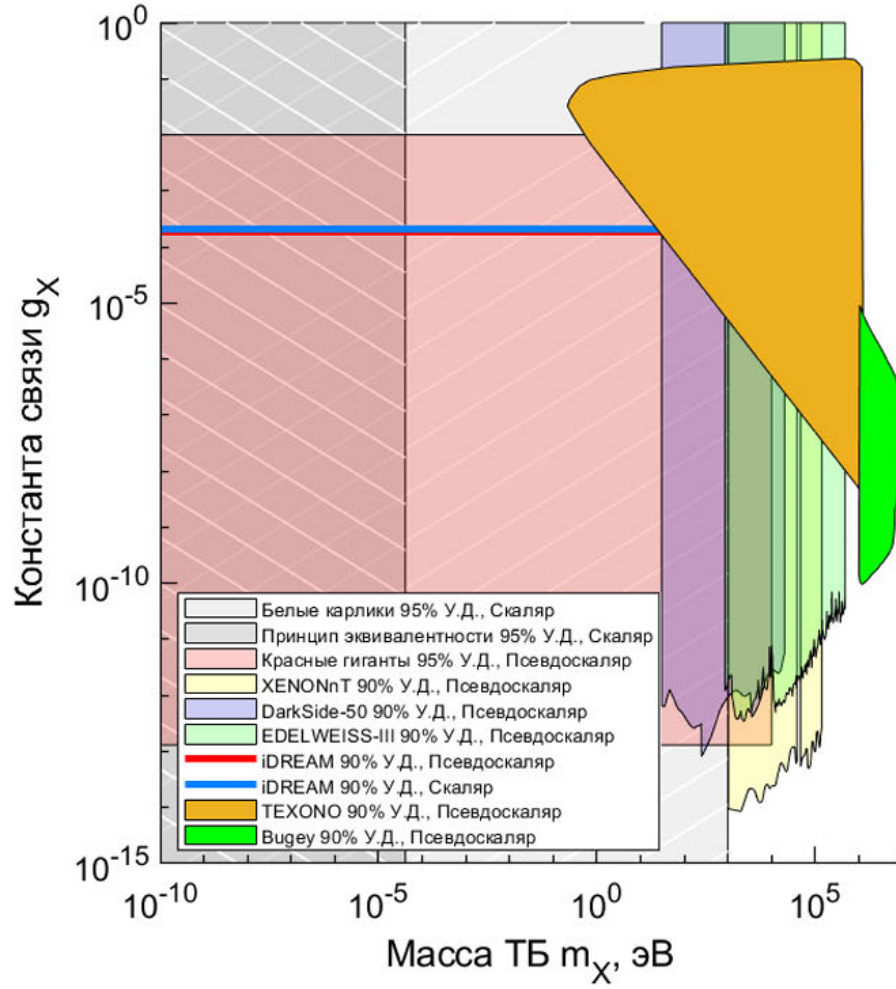


Рис. 6: Ограничения на параметры АПЧ (красная линия), полученные в результате анализа данных нейтринного детектора iDREAM и других реакторных нейтринных экспериментов (TEXONO [13] и Bugey [9]) в сравнении с имеющимися результатами прямого поиска ТМ астрофизическими методами. Константа связи $g_{a\gamma}$ предполагается пренебрежимо малой

4. Эффект Примакова в активной зоне реактора ВВЭР-1000. Энергетический спектр АПЧ

Ранее поиск ТБ с помощью детектора iDREAM осуществлялся в предположении, что ТБ могут образоваться в АЗ реактора только при рассеянии γ -квантов на электронах и быть зарегистрированы детектором iDREAM в обратном процессе (аналогично эффекту Комптона) [12]. В данной работе предлагается добавить к рассмотрению механизм рождения псевдоскалярных ТБ посредством эффекта Примакова. Таким образом, удастся рассмотреть взаимодействия поля АПЧ а с полем фотона A_μ и полем электрона ψ_e (2). Для расчетов, связанных с эффектом Примакова, положим $g_{ae} = 0$.

Взаимодействие γ -кванта атомной мишени в эффекте Примакова происходит через t-канальный обмен фотоном, скорость которого определяется константой связи $g_{a\gamma}$. Данный процесс усиливается коэффициентом когерентности Z^2 , где Z – атомный номер материала мишени (рассматриваем в качестве атомов-мишеней атомы U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{240}). Дифференциальное сечение этого процесса имеет вид [11]:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_P}{dt} = & \frac{e^2 Z^2 F^2(t) g_{a\gamma}^2 M_N^2}{8\pi t^2 E_\gamma^2 (t - 4M_N^2)^2} \left\{ 2m_a^2 t (M_N^2 + E_\gamma M_N) \right. \\ & \left. - m_a^4 M_N^2 - t [4E_\gamma^2 M_N^2 + t(M_N^2 + 2E_\gamma M_N)] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где t – квадрат переданного 4-импульса, $F(t) = a_0^2 t / (1 - a_0^2 t)$ – нуклонный форм-фактор, $a_0 = 111.7 Z^{1/3} / m_e E_\gamma$, E_γ – энергия падающего фотона, M_N – масса нуклона.

Поток рождённых через канал примаковского рассеяния в АЗ АПЧ можно рассчитать по формуле [11]:

$$\frac{d\Phi_a}{dE_a} = P_{\text{surv}}(L) \int_{E_\gamma^{\min}}^{E_\gamma^{\max}} \frac{1}{\sigma_{\text{tot}} + \sigma_P} \frac{d\sigma_P(E_\gamma, E_a)}{dE_a} \frac{d\Phi_\gamma}{dE_\gamma} dE_\gamma, \quad (4)$$

где E_a – энергия родившейся АПЧ, $P_{\text{surv}}(L) = 1$ – вероятность выживания АПЧ на расстоянии L между активной зоной и детектором. Для детектора iDREAM $L = 19,5$ м. Полное сечение процесса задаётся как $\sigma_{\text{tot}} + \sigma_P$, где σ_{tot} – полное сечение рассеяния γ -квантов. σ_{tot} было рассчитано для состава АЗ реактора ВВЭР-1000 [12] с использованием открытой базы ядерных данных ENSDF.

Пределы интегрирования E_{γ}^{\min} и E_{γ}^{\max} в (4) могут быть определены из уравнения

$$t_{\min(\max)} = \frac{m_a^4}{4s} - (p_{\gamma}^{\text{cm}} \pm k_a^{\text{cm}})^2, \quad (3)$$

где p_{γ}^{cm} и k_a^{cm} обозначают трёхмерные импульсы падающего фотона и вылетающей АПЧ в системе центра масс.

Для потока фотонов от реактора используем общепринятую аналитическую аппроксимацию (которая, однако, не учитывает индивидуальные особенности состава АЗ реактора ВВЭР-1000) [11]:

$$\frac{d\Phi_{\gamma}}{dE_{\gamma}} = \frac{5.8 \times 10^{17}}{\text{MeV} \cdot \text{sec}} \left(\frac{P}{\text{MW}} \right) e^{-1.1E_{\gamma}/\text{MeV}}, \quad (5)$$

где тепловая мощность принимается равной $P=3000$ МВт для эксперимента iDREAM. Данная модель справедлива для энергий фотонов выше 0.2 МэВ.

Рассчитанный по формуле (4) энергетический спектр потока АПЧ в АЗ реактора приведен на рис. 7. Спектр приведен для $g_{a\gamma} = 10^{-4}$ и $m_a = 0,3$ МэВ.

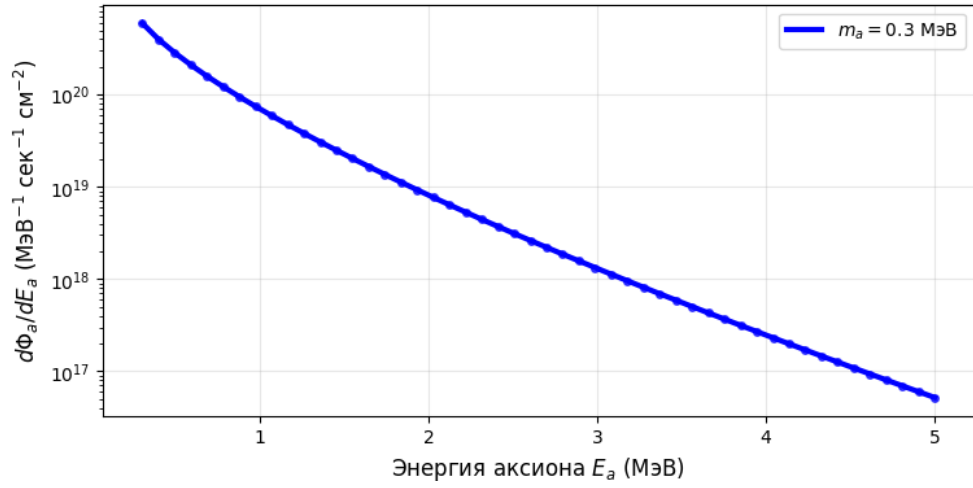


Рис. 7: Энергетический спектр потока АПЧ, рожденных в АЗ реактора ВВЭР-1000 в результате эффекта Примакова

В статье [12] был получен энергетический спектр dN/dE_x числа скалярных и псевдоскалярных ТБ рожденных в АЗ реактора ВВЭР-1000 в результате процесса, аналогичного эффекту Комптона (рис. 8).

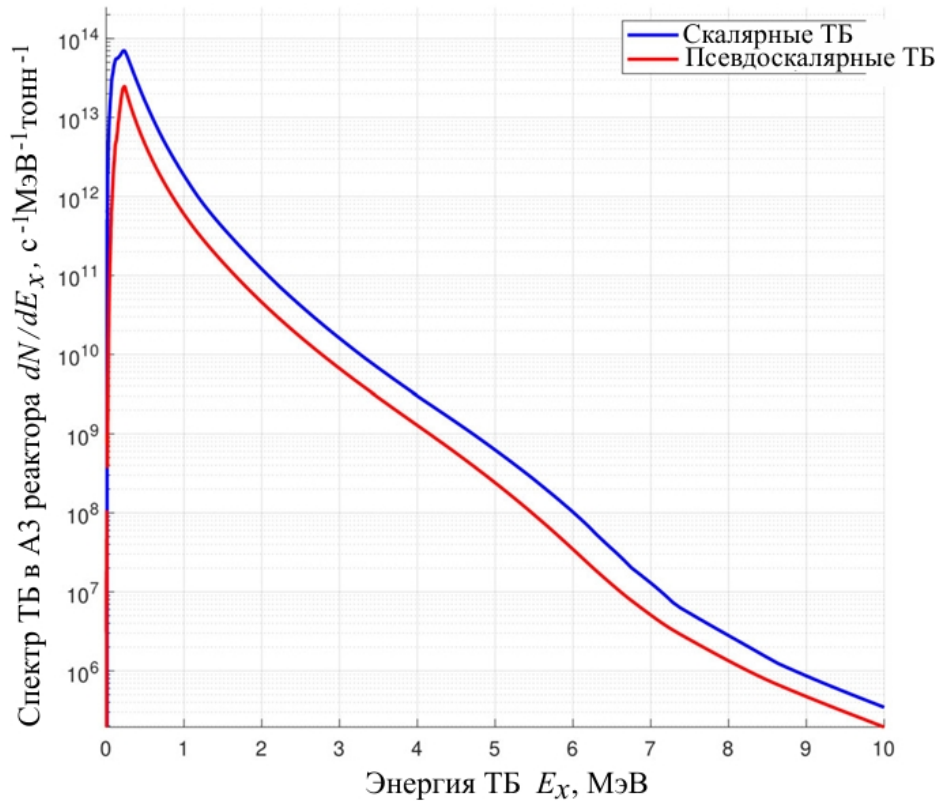


Рис. 8: Энергетический спектр числа скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) ТБ, рожденных в АЗ реактора ВВЭР-1000 в результате комптоновского рассеяния

Принимая во внимание то, что величины dN/dE_x и дополнительно нормированный на массу вещества АЗ поток $d\Phi_a/dE_a$ связаны линейно, можно сделать вывод о том, что полученная в ходе данной работы зависимость (рис. 7) качественно совпадает с полученной ранее зависимостью (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках данной научно-исследовательской работы было проведено обобщение исследований по поиску аксионов и АПЧ на реакторных экспериментах, в частности, было рассмотрено явление эффекта Примакова для аксионов и АПЧ.

В начале исследования был произведен анализ современных реакторных экспериментов по поиску АПЧ (в т. ч. iDREAM). Результаты анализа демонстрируют перспективность этих экспериментов для исследования областей параметров, недоступных для ускорительных и астрофизических методов.

Затем был подробно рассмотрен механизм рождения псевдоскалярных тёмных бозонов через эффект Примакова в АЗ реактора ВВЭР-1000. Был получен энергетический спектр потока АПЧ, рождающихся в АЗ реактора ВВЭР-1000 через примаковское рассеяние. Проведённое сравнение полученного спектра с ранее рассчитанным спектром для процессов комптоновского типа показало качественное согласие, что позволяет сделать вывод о потенциальной важности учёта примаковского канала рождения.

Таким образом, поставленные задачи исследования выполнены, что подтверждает возможность и перспективность поиска АПЧ в реакторных экспериментах, в частности на установке iDREAM, через канал примаковского рассеяния.

В рамках продолжения работы планируется получить энергетический спектр dN/dE_a числа псевдоскалярных темных бозонов рожденных в АЗ реактора ВВЭР-1000 в результате эффекта Примакова, произвести расчет ожидаемого в детекторе iDREAM энергетического спектра событий взаимодействия АПЧ и провести сбор экспериментальных данных с помощью детектора.

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] Дербин А. Ю. “Экспериментальные поиски солнечных аксионов и аксионо-подобных частиц (ALPs)”. В: *Семинар*. 2024.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wei Dai и др. “Hunting for Axions in REactor neutrino COherent scattering Detection Experiment”. В: *Phys. Rev. D* (2025).

- [12] 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).
- [13] Н. М. 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.