

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДК 539.12

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПАДА АКСИОНА
НА ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННУЮ ПАРУ В
ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРАХ**

Научный руководитель

(доц., к.ф.-м.н.)

_____ Е. А. Литвинович

Студент

_____ В. К. Жабин

Москва, 2025

Содержание

| | |
|---|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1 Возможные пути распада аксиона | 5 |
| 2 Обзор экспериментальных исследований по поиску аксионов на ядерных реакторах | 7 |
| 2.1 Эксперимент на реакторе Bugey | 8 |
| 2.2 Эксперимент MINER | 10 |
| 2.3 Hunting for Axions in REactor neutrino COherent scattering Detection Experiment (RECODE) | 12 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 15 |
| ЛИТЕРАТУРА | 16 |

ВВЕДЕНИЕ

Аксионы являются гипотетическими элементарными частицами, предложенными для решения так называемой сильной СР-проблемы в квантовой хромодинамике (КХД) [1]. Стандартная теория сильных взаимодействий допускает нарушение СР-симметрии (симметрии между зарядами и пространственными инверсиями), которое, однако, не наблюдается экспериментально с высокой точностью. Аксионный механизм предлагает элегантное решение, вводя новую очень легкую частицу, которая естественным образом обеспечивает СР-сохранение в сильных взаимодействиях.

Помимо их теоретического значения, аксионы и аксионоподобные частицы стали одними из наиболее привлекательных кандидатов на роль темной материи [2]. Их предполагаемая сверхмалая масса и чрезвычайно слабое взаимодействие с обычной материей позволяют им формировать большую часть невидимой массы Вселенной, согласуясь с космологическими наблюдениями. [3] В настоящее время экспериментальные ограничения на массу и константу связи аксионов посредством косвенного их наблюдения постоянно уточняются, однако прямое обнаружение этой частицы до сих пор не состоялось. [2]

Одним из предполагаемых свойств аксионов является распад на электрон-позитронную пару ($a \rightarrow e^+e^-$), что представляет значительный интерес по нескольким причинам. Во-первых, этот канал может быть использован для их косвенного обнаружения. Сила этого распада зависит от константы связи аксиона с электрон-позитронной системой, которая, в свою очередь, связана с массой аксиона и другими параметрами модели. Во-вторых, изучение этого распада может предоставить ценную информацию о свойствах самой частицы, в частности, о её массе и структуре взаимодействий. В-третьих, исследование этого процесса в сильных электромагнитных полях позволяет изучить нетривиальные эффекты квантовой теории поля, такие как поляризация вакуума и рождение пар из вакуума, которые могут модифицировать механизм распада и открывать новые пути для детектирования.

Цель данного НИРС:

Комплексное исследование современного состояния знаний о распаде

аксионов на электрон-позитронную пару, и перспектив этих исследований.

Задачи исследования:

- 1) Рассмотреть возможные процессы распада аксиона;
- 2) Проанализировать текущее состояние экспериментальных исследований на ядерных реакторах, направленных на детектирование таких распадов.

1 Возможные пути распада аксиона

Так как зарегистрировать аксионы и АПЧ напрямую невозможно из-за их слабого взаимодействия с материей, эти частицы пытаются обнаружить косвенным путём, изучая продукты их распада и взаимодействие с другими частицами. По сегодняшним данным, аксионы способны взаимодействовать с частицами Стандартной модели через несколько каналов, каждый из которых описывается определёнными параметрами. Эти взаимодействия и связанные с ними распады определяют стратегии поиска аксионов в экспериментах и астрофизических наблюдениях. Каждое из них описывается своей константой связи, а сама возможность взаимодействия позволяет аксионам распадаться на соответствующие частицы. Основные виды таких взаимодействий включают в себя:

1) Аксион-фотонное взаимодействие: определяется константой связи аксиона с фотоном $g_{a\gamma\gamma}$ и делает возможным распад аксиона на два фотона ($a \rightarrow \gamma\gamma$). Этот канал доминирует для аксионов с массой ниже порога производства электрон-позитронной пары ($m_a < 2m_e$).

2) Аксион-электронное взаимодействие: определяется константой связи аксиона с фотоном g_{aee} и позволяет аксионам распадаться на электрон-позитронную пару ($a \rightarrow e^+e^-$) при условии, что масса аксиона превышает порог производства пары ($m_a > 2m_e$).

3) Аксион-глюонное взаимодействие: фундаментальное взаимодействие, описываемое масштабом PQ-симметрии f_a и допускающее для более тяжёлых аксионов ($m_a > 1$ ГэВ) распад на адроны, такие как пионы и нуклоны,

Каждый случай описывается своим членом в лагранжиане стандартной модели. Так, для рассматриваемого взаимодействия аксиона с электроном он имеет следующий вид;

$$\mathcal{L}_{aee} = ig_{aee}a\bar{\psi}_e\gamma_5\psi_e,$$

где g_{aee} — константа связи аксиона с электронами, $\bar{\psi}_e$ и ψ_e — спиноры Дирака, a — поле аксиона, γ_5 — матрица Дирака, отвечающая псевдоскалярной природе аксиона.

Ширина распада $a \rightarrow e^+e^-$ определяется как:

$$\Gamma_{aee} = \frac{g_{aee}^2 m_a}{8\pi} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{m_a^2}}.$$

2 Обзор экспериментальных исследований по поиску аксионов на ядерных реакторах

Поиск аксионов и АПЧ традиционно опирается на их характерные взаимодействия, такие как превращение в фотоны в сильном магнитном поле (используемое в галоскопах, например, ADMX) или поиск продуктов распада ($\alpha \rightarrow \gamma\gamma$) в экспериментах типа beam dump. Однако, есть и другой экспериментальный путь — использование ядерных реакторов мегаваттного масштаба в качестве мощных источников аксионов. Эти реакторы генерируют колоссальный поток гамма-квантов (γ -излучения), который может индуцировать рождение АПЧ через процессы, аналогичные эффекту Примакова или Комптоновскому рассеянию, в материале активной зоны или корпуса реактора.

В рамках этого подхода аксионы рождаются при взаимодействии фотонов с атомными ядрами в эффекте Примакова ($\gamma + A \rightarrow a + A$, где сечение зависит от константы связи $g_{a\gamma\gamma}$), с электронами в комптоновском процессе ($\gamma + e^- \rightarrow a + e^-$, зависящее от g_{aee}) или при переходе возбуждённого атома в нормальное состояние.

После рождения, аксионы могут быть обнаружены детекторами, расположенными поблизости, через обратные процессы: обратное рассеяние (например, обратный эффект Примакова $a + N \rightarrow \gamma + N$ и обратное комптоновское рассеяние $a + e^- \rightarrow \gamma + e^-$) или распад в полете на пару фотонов ($a \rightarrow \gamma\gamma$) или электрон-позитронную пару ($a \rightarrow e^+e^-$). Особое преимущество этого метода заключается в том, что современные низкороговые детекторы, разработанные для нейтринных экспериментов, такие как MINER и RECODE, уже установлены рядом с активными зонами реакторов. Использование этих установок позволяет выйти на беспрецедентную чувствительность, особенно в области низких масс аксионов, и прогнозируется, что они могут установить лучшие лабораторные ограничения для константы связи g_{aee} в суб-МэВ диапазоне масс, обходя при этом возможные ограничения, налагаемые астрофизическими наблюдениями.

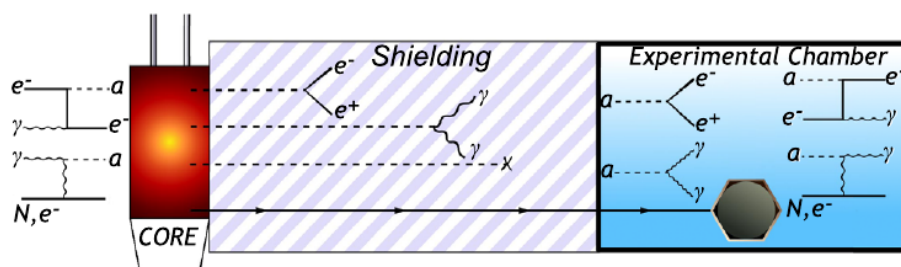


Рис. 1: Схема поиска АПЧ в реакторных экспериментах. Слева показано, как гамма-кванты (γ) из активной зоны реактора производят АПЧ (α). Справа изображены каналы детектирования: АПЧ либо рассеиваются на электронах/ядрах детектора, либо распадаются внутри него. АПЧ, покинувшие экран (сплошная линия), могут быть обнаружены через обратное рассеяние или распад, тогда как частицы, распавшиеся в экране (пунктир), теряются.

2.1 Эксперимент на реакторе Bugey

Первый эксперимент на реакторе по поиску распада аксионов на электрон-позитронные пары был выполнен во Франции на реакторе Bugey-5 тепловой мощностью 2800 МВт [4]. Сбор данных проводился в течение трёх сезонов: июнь-июль 1991 года, апрель-июнь 1992 года, сентябрь-ноябрь 1992 года.

Детектор был расположен на расстоянии 18.5 м от активной зоны реактора и состоял из восьми многопроволочных пропорциональных стенок (МПС) (см. рис.2). Шесть из них составляли куб с ребром 2 м и использовались как вето. Оставшиеся две МПС, составляющие ХУ-детектор размером $1.8\text{ м} \times 1.7\text{ м} \times 0.09\text{ м}$, располагались внутри куба у дальней от детектора грани и имели двумерное разрешение в $7.8\text{ см} \times 6.8\text{ см}$, которое достигалось двумя плоскостями проводов (анодной и катодной), расположенных перпендикулярно. После двойной стенки МПС располагалась медная пластинка толщиной 1 мм для остановки продуктов распада. Так, внутри куба оставалось свободное пространство объёмом 5.4 м^3 , заполненное He, где происходили регистрируемые распады аксионов на электрон-позитронные пары.

Для защиты от внешнего низкоэнергетического гамма излучения детектор был окружён слоями алюминия и меди толщиной в 1 мм каждый.

При детектировании из событий, зарегистрированных ХУ-детектором как совпадение двух треков заряженных частиц, исключались события, об-

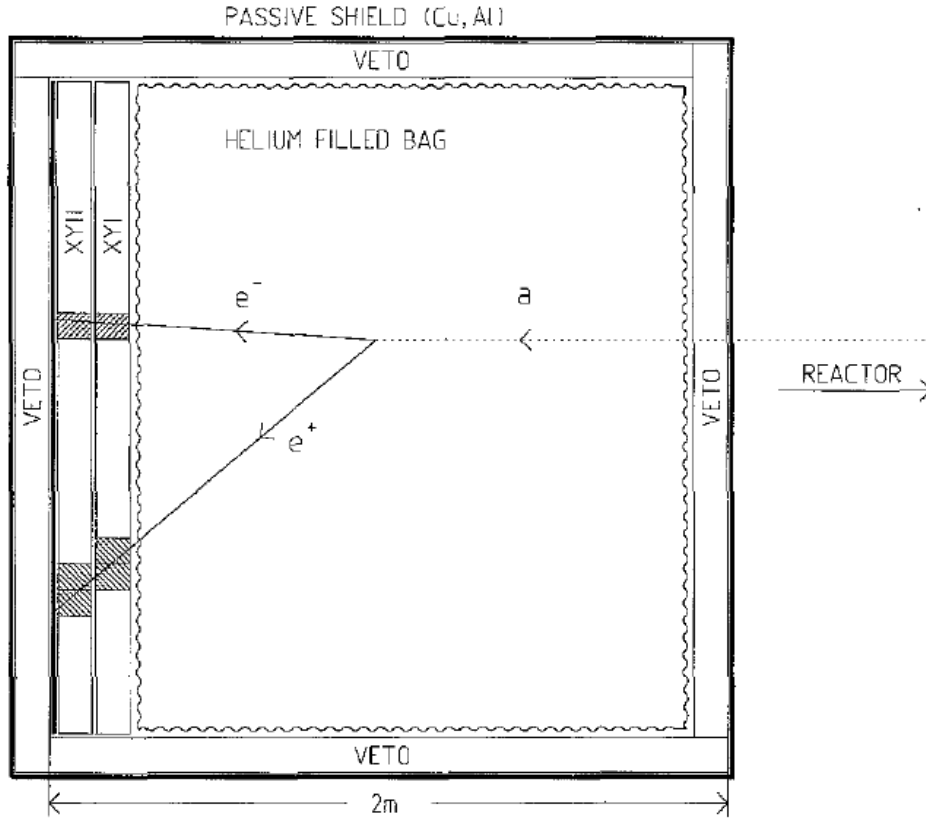


Рис. 2: Схема детектора на реакторе Burgey

наруженные при помощи вето. Вероятность гарантированного выявления события распада при этом составляла 60%.

По результатам эксперимента распад аксиона на электрон-позитронную пару обнаружен не был. Тем не менее полученные данные позволили исключить интервал масс долгоживущих стандартных аксионов (PQWW-аксионов) в диапазоне между $2m_e$ и 4.8 МэВ, а также поставить ограничения на константу распада аксионоподобных бозонов f_χ в области 1.4-7 МэВ с достоверностью в 90% (см. рис. 3). При этом для массы 1.7 МэВ был исключён интервал времени жизни аксионоподобного бозона $4.4 \times 10^{-10} < \tau_{e^+e^-} < 6.6 \times 10^{-3}$ с.

Результаты стали первыми и наиболее строгими на тот момент лабораторными ограничениями для канала распада $a \rightarrow e^+e^-$ в условиях реакторного источника.

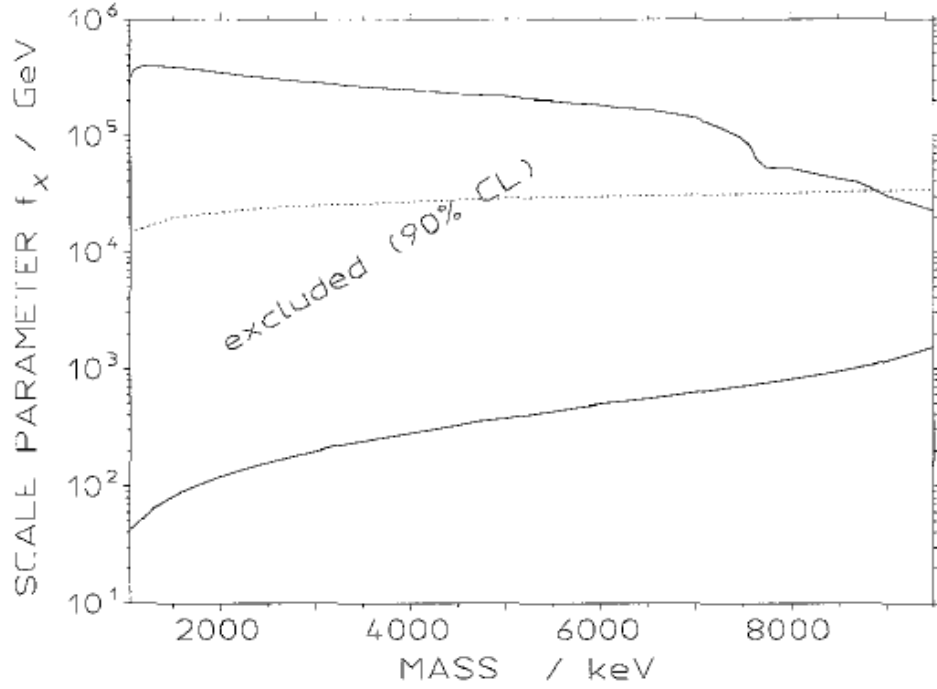


Рис. 3: График исключения для константы распада f_χ аксионоподобных бозонов χ . Пунктирная линия представляет собой предел 90%-го доверительного уровня, полученный Файснером и др. [5]. Данный эксперимент исключает значения ниже этой кривой.

2.2 Эксперимент MINER

Эксперимент MINER (Mitchell Institute Neutrino Experiment at Reactor) [6] совершал сбор данных в период с февраля по сентябрь 2022 года (59.5 часов при работающем реакторе и 163,8 часов в режиме выключенного реактора). Для исследования использовался исследовательский реактор TRIGA мощностью 1 МВт в Центре ядерных наук (NSC) Техасского университета A&M, США.

Во время эксперимента реактор работал на мощности около 800 кВт. Детектор находился на расстоянии 4 м от активной зоны реактора.

Установка (см. рис. 4) использовала три криогенных сапфировых (Al_2O_3) детектора цилиндрической формы (диаметром 7.5 см, два толщиной 1 см и один — 4 мм) уложенных в вертикальную башню. Порог регистрации при этом ≈ 100 эВ, что достигается за счет считывания аtermальных фоонов через тензорные датчики (TES) при температуре 8 мК. Для защиты от внешних излучений детектор был окружён слоем свинца, меди, борированной резины и воды, а также активным вето.

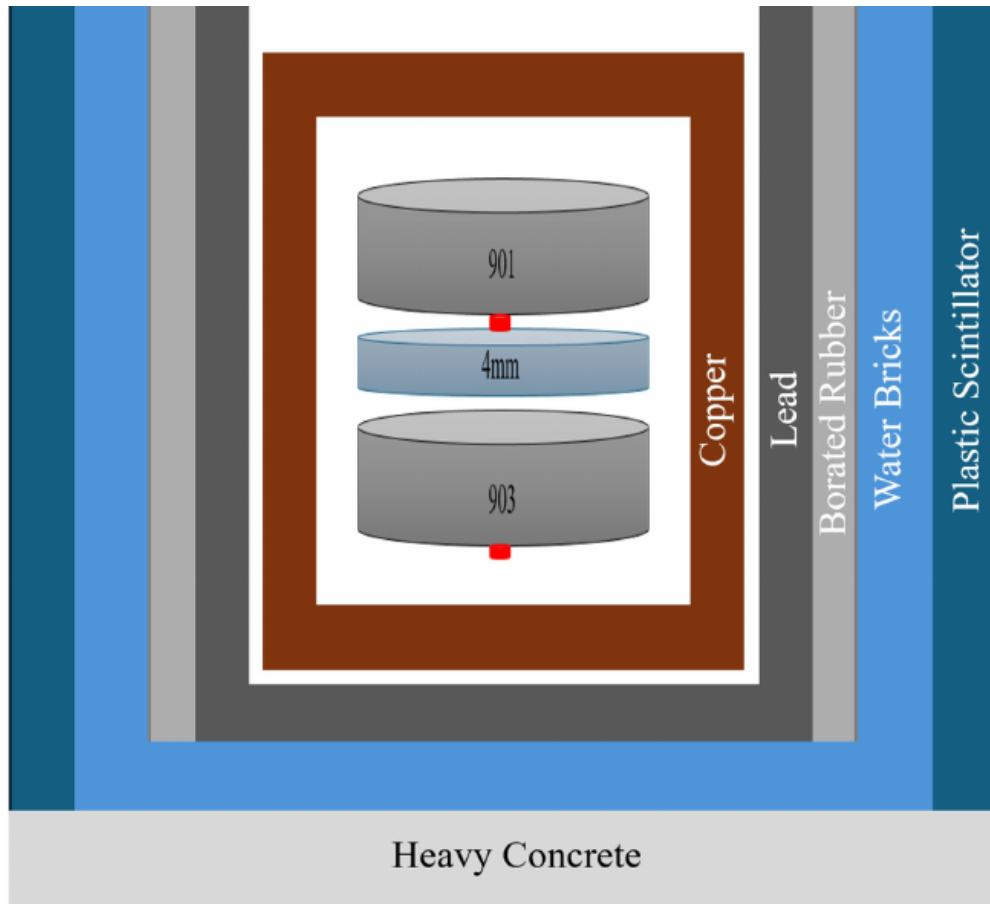


Рис. 4: Схема детектора в эксперименте MINER.

Суть эксперимента состоит в использовании интенсивного фотонного потока реактора для производства АПЧ через процессы, зависящие от констант связи $g_{a\gamma\gamma}$ (эффект Примакова) и g_{aee} (Комптоновское рассеяние). Детектирование АПЧ проводится либо через обратное рассеяние в детекторе, либо через их распад.

По результатам анализа одиночных событий, которые являются приоритетными для подавления фоновых взаимодействий, были установлены первые пределы исключения для MINER: они исключили значения $g_{a\gamma\gamma}$ до 10^{-5} ГэВ^{-1} и g_{aee} до 10^{-7} ГэВ^{-1} (в диапазоне масс от 3 кэВ до 10 МэВ), что продемонстрировало потенциал реакторной установки для исследования низкомассовых АПЧ (см. рис. 5).

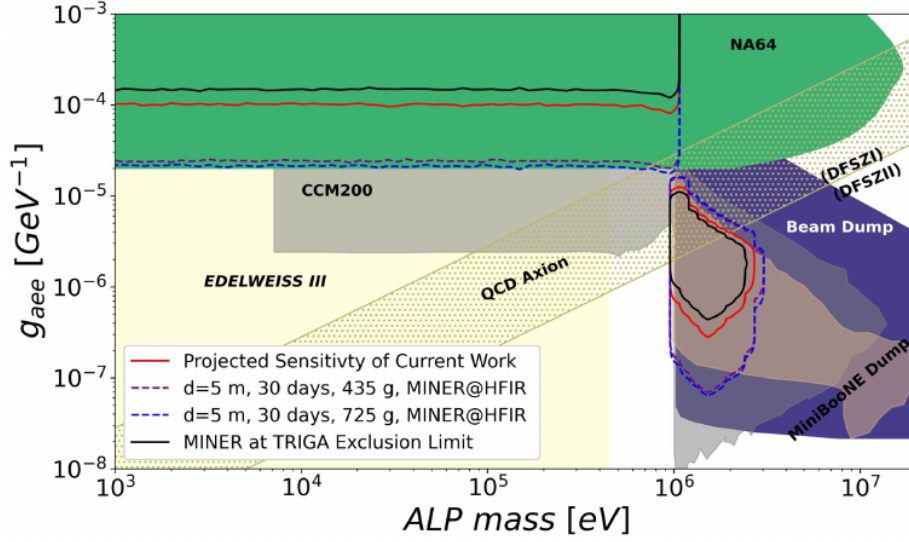


Рис. 5: Полученные ограничения на константу связи g_{aee} в сравнении с другими экспериментами.

2.3 Hunting for Axions in REactor neutrino COherent scattering Detection Experiment (RECODE)

Эксперимент RECODE (REactor Neutrino COherent scattering Detection Experiment) [7], расположен на реакторе Sanmen (Китай) мощностью 3.4 ГВт. Установка использует АПЧ, генерируемые из интенсивного гамма-потока реактора, для последующего детектирования продуктов их распада в двух германиевых детекторах общей массой 5 кг, расположенных на расстоянии 11 м (внутри защитной оболочки реактора) и 22 м от активной зоны. (см. рис. 6) Двухуровневая система детектирования, а также расположение детекторов позволяет провести совместный анализ данных «ближний/дальний», отделить сигнал ALP (который убывает с расстоянием как $1/L^2$) от фоновых процессов, одинаковых для обоих детекторов, и точно оценить вклад посторонних частиц.

Детекторы окружены многослойным экраном (Cu/Pb/полиэтилен) для подавления фона от космических лучей и нейтронов. Также используются активные системы вето (пластиковый сцинтиллятор и NaI-детектор) для подавления фона от мюонов и естественной радиоактивности.

Эксперимент направлен на поиск АПЧ через их слабую связь с фотонами ($g_{a\gamma\gamma}$) и электронами (g_{aee}). АПЧ регистрируются как за счет обратного рассеяния на атомах оболочки и электронах (обратный эффект Примакова),

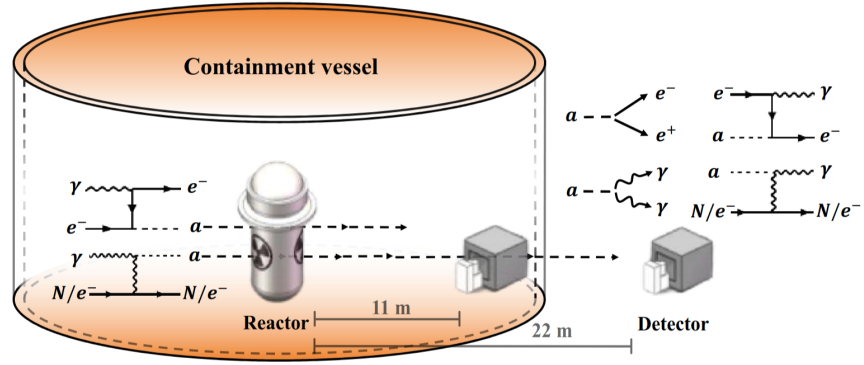


Рис. 6: Схема создания аксионов и их детектирование на установке RECODE. Показаны схемы образования и распада аксионов, а также расположение детекторов.

так и за счет их распада внутри детектора. Для АПЧ с массой $m_a \geq 2m_e$ канал распада на электрон-позитронную пару вытесняет другие процессы, связанные с электронами, такие как обратное комптоновское рассеяние (см. рис. 7). Сигнал от этого распада регистрируется как локальная отдача электрона (или пары) в объеме германиевого детектора.

По итогам текущей работы (с экспозицией 10 кг·год и фонов в 2 отчёта на кэВ·кг·день) были установлены ограничения, которые являются конкурентными или превосходят существующие результаты beam-dump экспериментов (см рис. 8). В частности, для связи g_{aee} достигнута чувствительность до 10^{-7} ГэВ^{-1} . В дальнейшем планируется улучшение установки до экспозиции 100 кг·год, что позволит получить ещё большие ограничения в исследуемой области масс, где доминирует распад $a \rightarrow e^+e^-$.

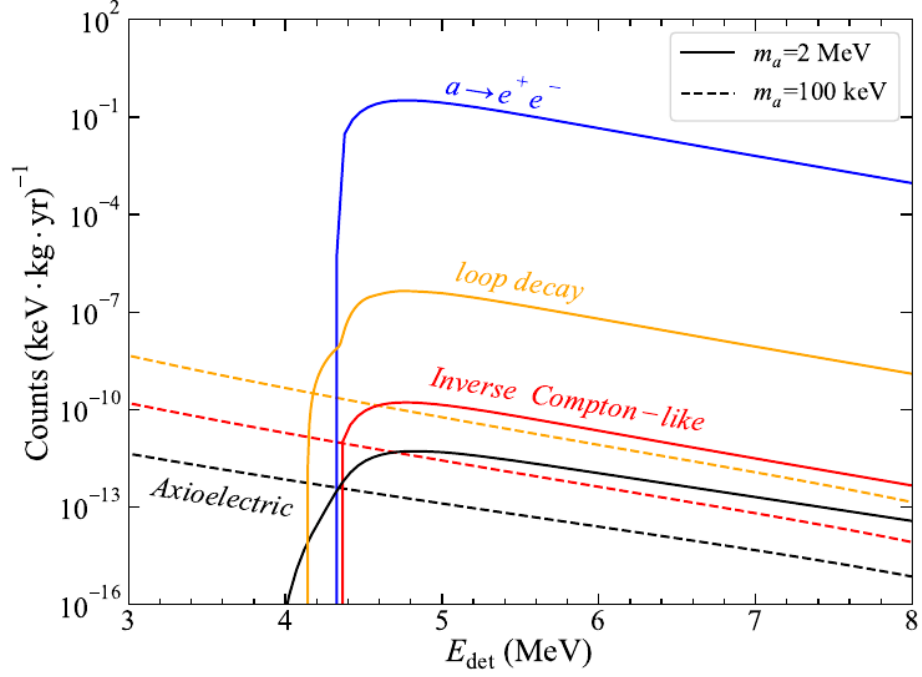


Рис. 7: Сравнение частоты событий различных процессов взаимодействия аксионов с частицами при фиксированных $a \rightarrow \gamma\gamma = 0$ и $g_{aee} = 1 \cdot 10^{-7}$ для эксперимента RECODE. Процесс распада на электрон-позитронную пару начинает преобладать при массах аксиона $m_a > 2m_e$

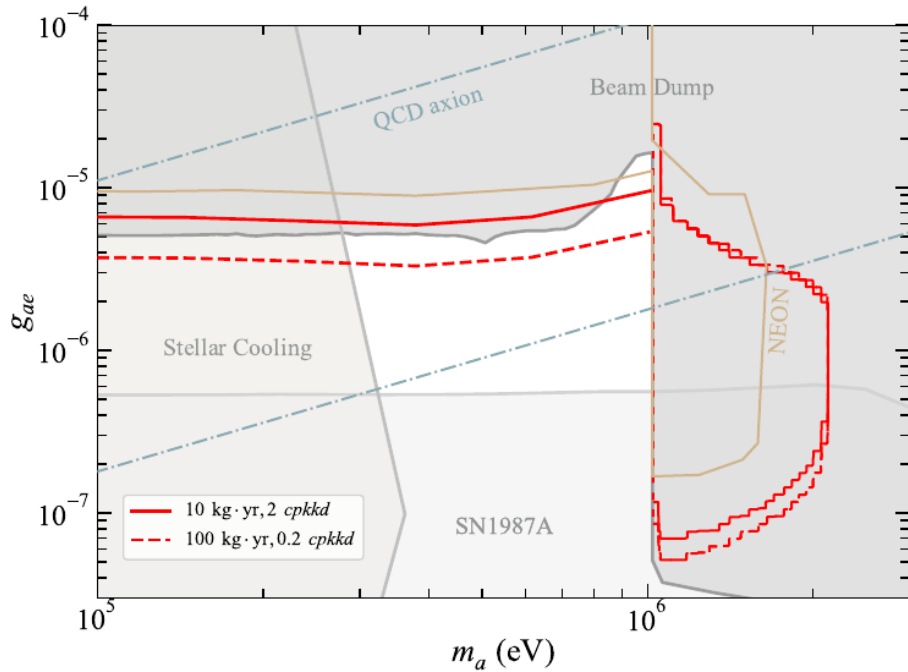


Рис. 8: Ограничение на константу связи g_{aee} полученные в эксперименте RECODE в сравнении с другими экспериментами для текущих результатов (сплошная красная линия) и прогнозируемые после улучшения (пунктирная красная линия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведён анализ современного состояния исследований распада аксиона на электрон-позитронную пару ($a \rightarrow e^+e^-$) в экспериментах на ядерных реакторах.

В обзоре детально проанализированы три ключевых эксперимента: Bugey, MINER и RECODE. Результаты данных экспериментов подтверждают, что реакторные установки, особенно в сочетании с современными низкофоновыми детекторами, являются высокоэффективной платформой для поиска лёгких аксионов и АПЧ в области масс, больших 1 МэВ, где распад на электрон-позитронную пару становится доминирующим.

В перспективе ожидается дальнейшее повышение точности измерений за счёт увеличения экспозиции, улучшения защиты от фона и развития новых детекторных технологий. Это позволит не только установить более строгие ограничения на параметры аксионов, но и, возможно, впервые обнаружить сигналы, указывающие на их существование, что станет важным шагом в понимании физики за пределами Стандартной модели и природы тёмной материи.

Список литературы

- [1] CPeccei R. D., Quinn H. R. CP conservation in the presence of pseudoparticles //Physical Review Letters. – 1977. – Т. 38. – №. 25. – С. 1440.
- [2] Peccei R. D. The Strong CP problem and axions //Axions: Theory, Cosmology, and Experimental Searches. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008. – С. 3-17.
- [3] Duffy L. D., Van Bibber K. Axions as dark matter particles //New Journal of Physics. – 2009. – Т. 11. – №. 10. – С. 105008.
- [4] Altmann M. et al. Search for the electron-positron decay of axions and axionlike particles at a nuclear power reactor at Bugey //Zeitschrift für Physik C Particles and Fields. – 1995. – Т. 68. – №. 2. – С. 221-227.
- [5] UA1 collaboration et al. Studies of intermediate vector boson production and decay in UA1 at the CERN proton-antiproton collider //Zeitschrift für Physik C Particles and Fields. – 1989. – Т. 44. – №. 1. – С. 15-61.
- [6] Mirzakhani M. et al. MINER reactor based search for axionlike particles using sapphire (Al₂O₃) detectors //Physical Review D. – 2025. – Т. 112. – №. 3. – С. 032013.
- [7] Dai W. et al. Hunting for Axions in REactor neutrino COherent scattering Detection Experiment //arXiv preprint arXiv:2509.01538. – 2025.