

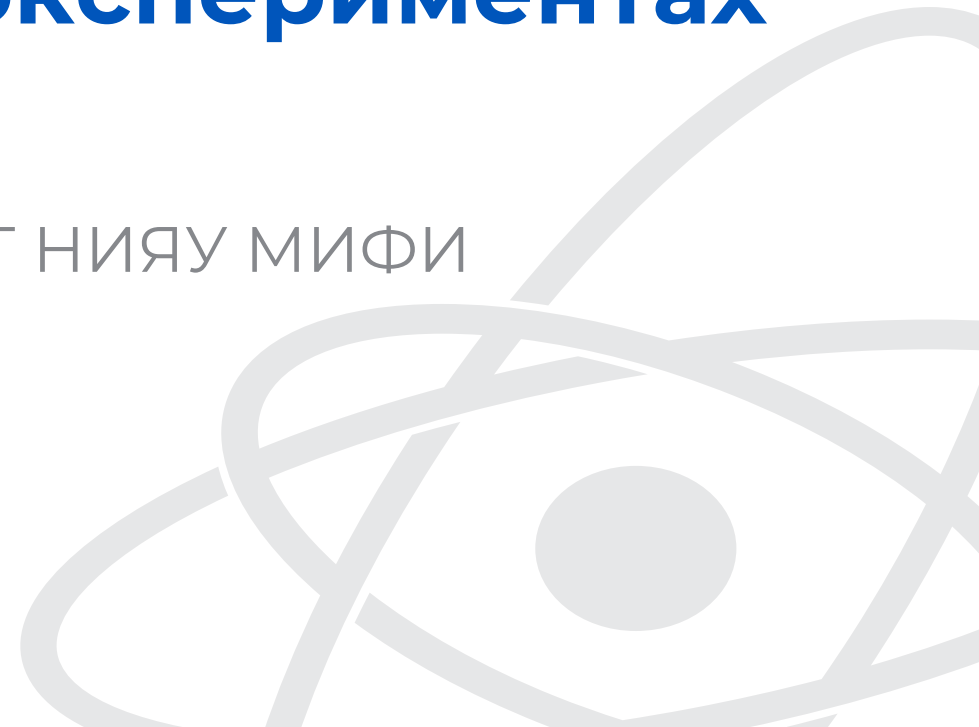
Эффект Примакова для аксиона. Поиск примаковских аксионов в экспериментах на ядерных реакторах

Макишвили М. И., студентка 3 курса ИЯФиТ НИЯУ МИФИ

Научный руководитель:

Литвинович Е. А., доц., к.ф.-м.н.

Москва, 2025



Актуальность

Эксперименты на ядерных реакторах позволяют искать аксионы и аксионо-подобные частиц (АПЧ) в тех областях параметров, которые недоступны для ускорителей и астрофизических методов. Дополнительный анализ частиц, рожденных в АЗ реактора в результате эффекта Примакова, поможет уточнить и усовершенствовать уже существующие исследования.

Цель

Анализ процесса рождения АПЧ в активной зоне (АЗ) реактора ВВЭР-1000 в результате эффекта Примакова.

Задачи

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

1. Аксионы – псевдоскалярные темные бозоны (гипотетические частицы «скрытого сектора»), которые впервые были предложены с качестве решения сильной CP-проблемы

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

(1) Θ -член в лагранжиане КХД, 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.

2. АПЧ – подходящие кандидаты на роль частиц темной материи (ТМ)

1. Слабое взаимодействие с барионным веществом и излучением; высокое время жизни;
2. Предсказанная реликтовая плотность и распределение согласуются с космологическими данными для ТМ.

James B. Dent и др. "New Directions for Axion Searches via Scattering at Reactor Neutrino Experiments", 2020

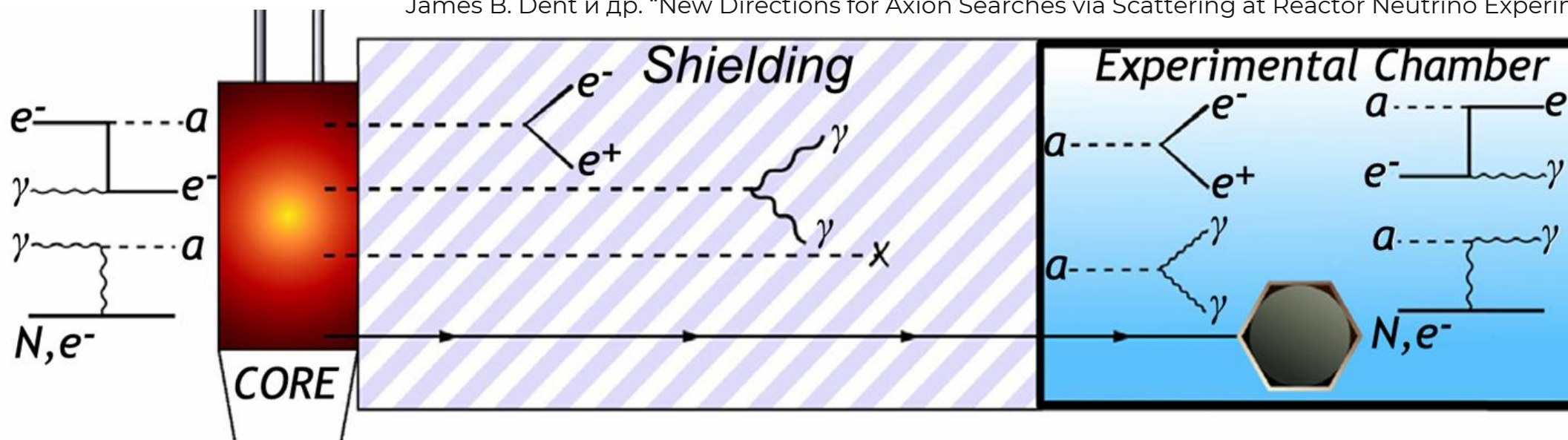


РИС 1. Схематическое изображение АПЧ и процессов их рождения* (слева) и их взаимодействий (справа) в эксперименте с реакторными нейтрино. АПЧ может распасться внутри защиты и не быть зарегистрированными (пунктирные линии). АПЧ, которые свободно проходят через защиту (сплошная линия), могут быть обнаружены 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

* **Комптоновское рассеяние** $\gamma + e^- \rightarrow a + e^-$

Эффект Примакова, $\gamma + A \rightarrow \gamma + a$
где **A** – атомное ядро

Текущие ограничения на константы связи

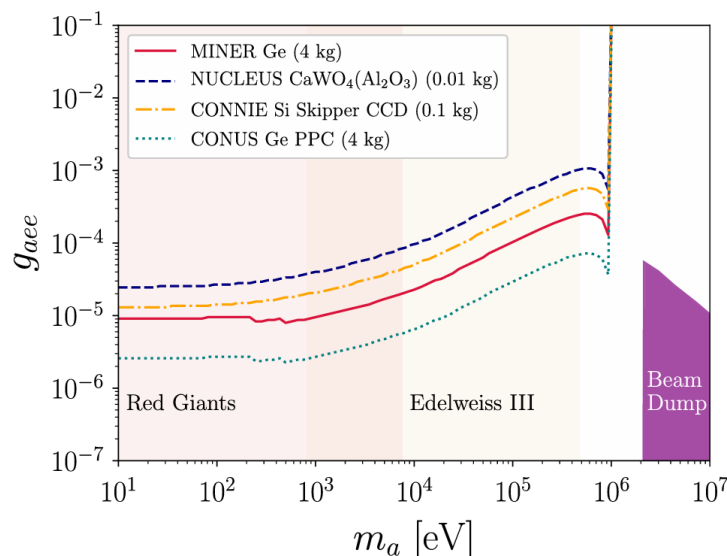
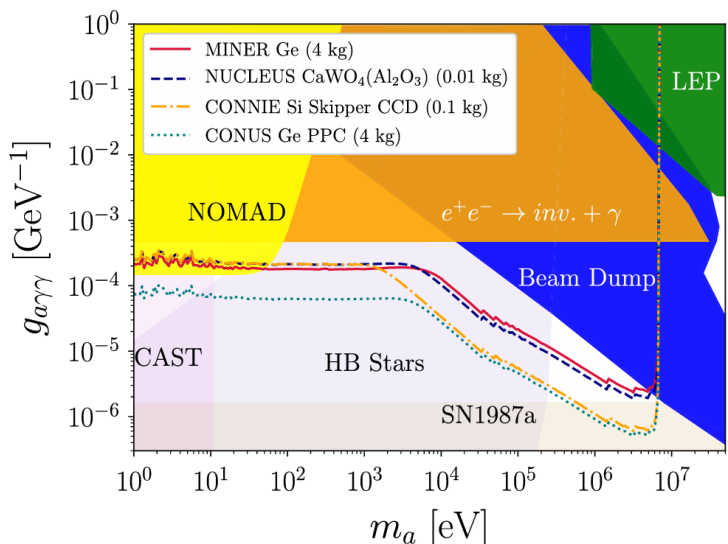


РИС 2.

Ограничения на константу связи АПЧ с фотонами $g_{a\gamma}$ (сверху) и константу связи АПЧ с электронами g_{aee} (снизу), при УД 95%, полученные экспериментами MINER, CONUS, CONNIE и γ -cleus, как функции массы АПЧ m_a . Астрофизически полученные ограничения показаны светлой заливкой.

James B. Dent и др. "New Directions for Axion Searches via Scattering at Reactor Neutrino Experiments", 2020

А. В. Абрамов и др. "Поиск бозонной темной материи нейтринным детектором iDREAM на Калининской атомной электростанции", 2025

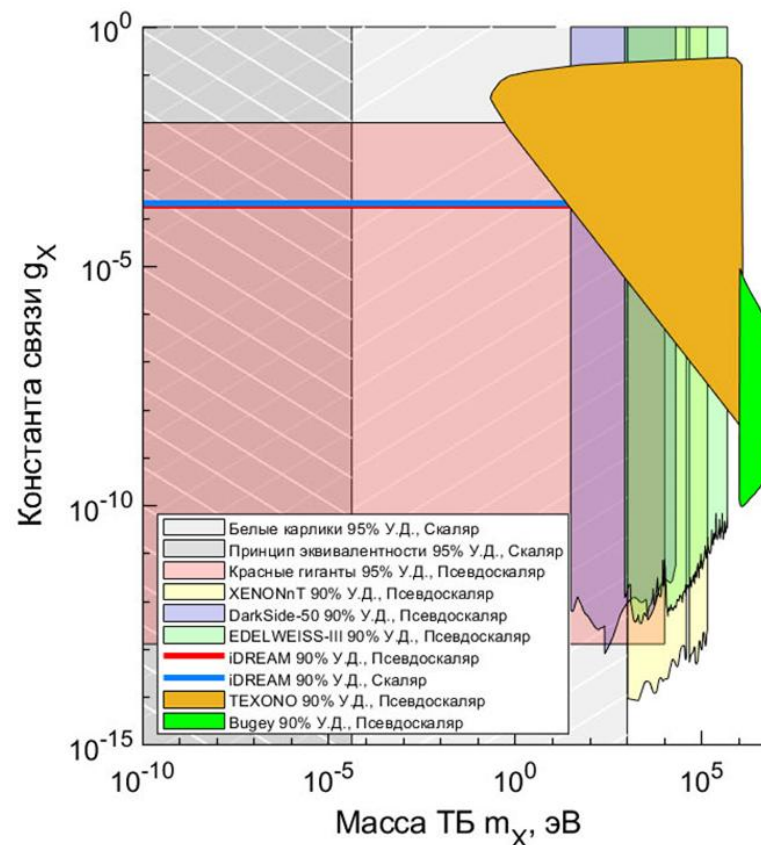


РИС 3.

Ограничения на параметры АПЧ (красная линия), полученные в результате анализа данных нейтринного детектора iDREAM и других реакторных нейтринных экспериментов (TEXONO и Bugey) в сравнении с имеющимися результатами прямого поиска тёмной материи астрофизическими методами.

А. В. Абрамов и др. "Поиск бозонной темной материи нейтринным детектором iDREAM на Калининской атомной электростанции", 2025

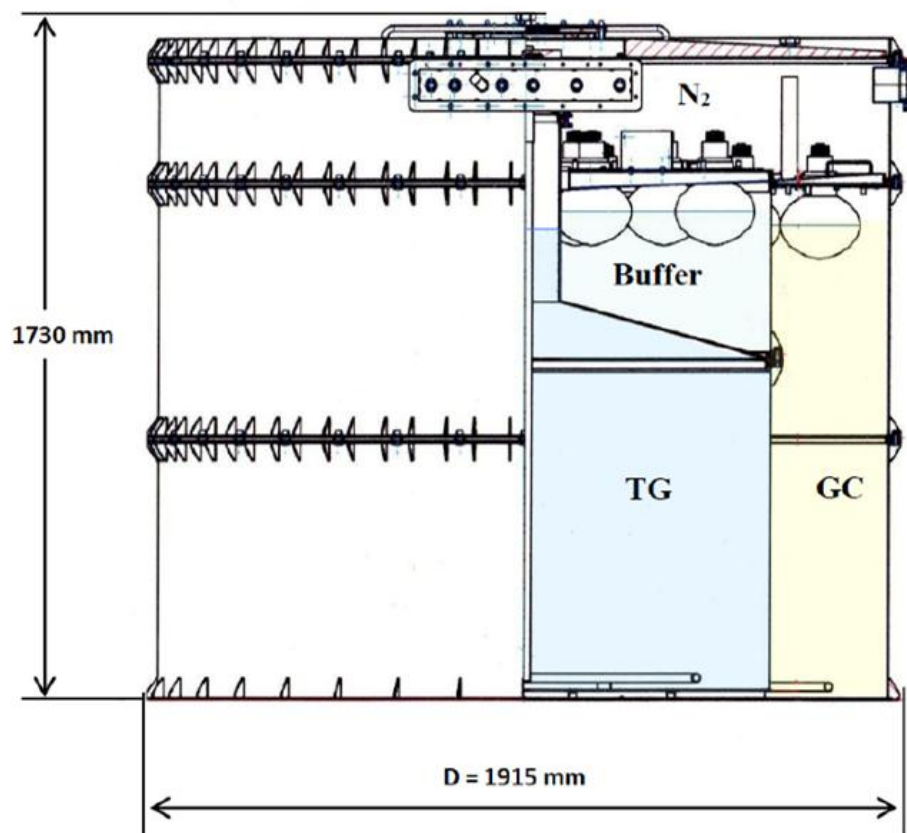


РИС 4. Схематическое изображение детектора iDREAM

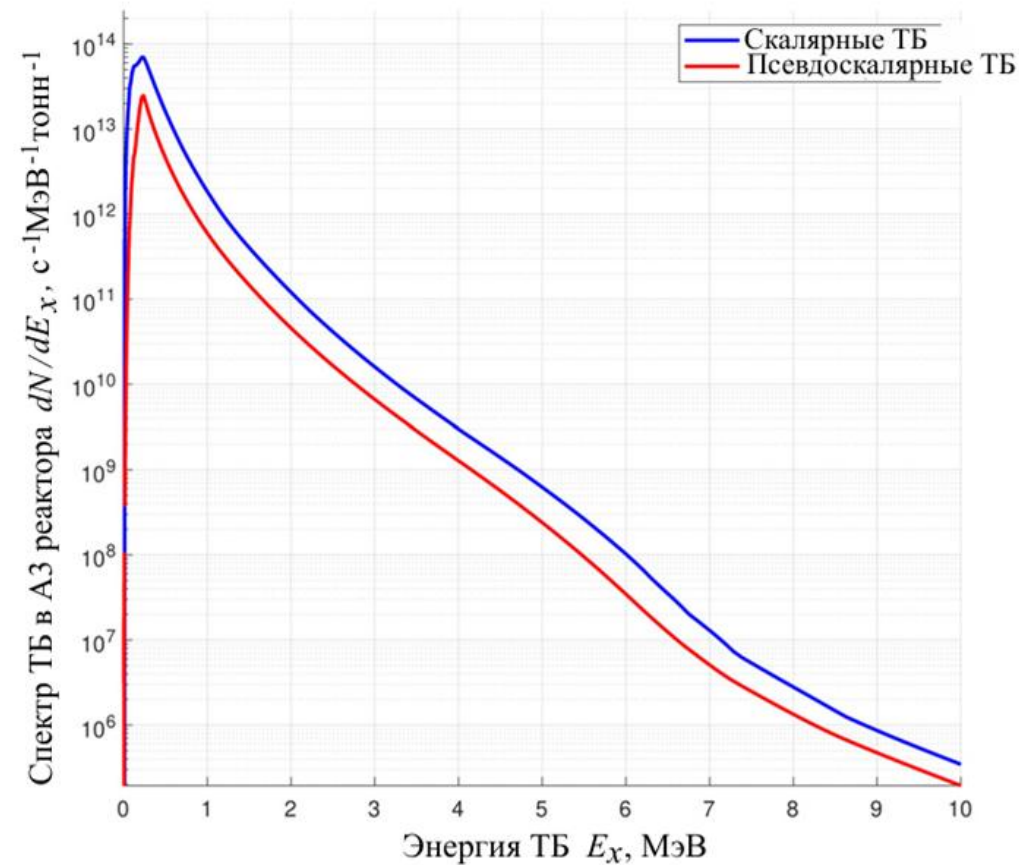


РИС 5. Энергетический спектр числа скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) темных бозонов (комптоновское рассеяние)

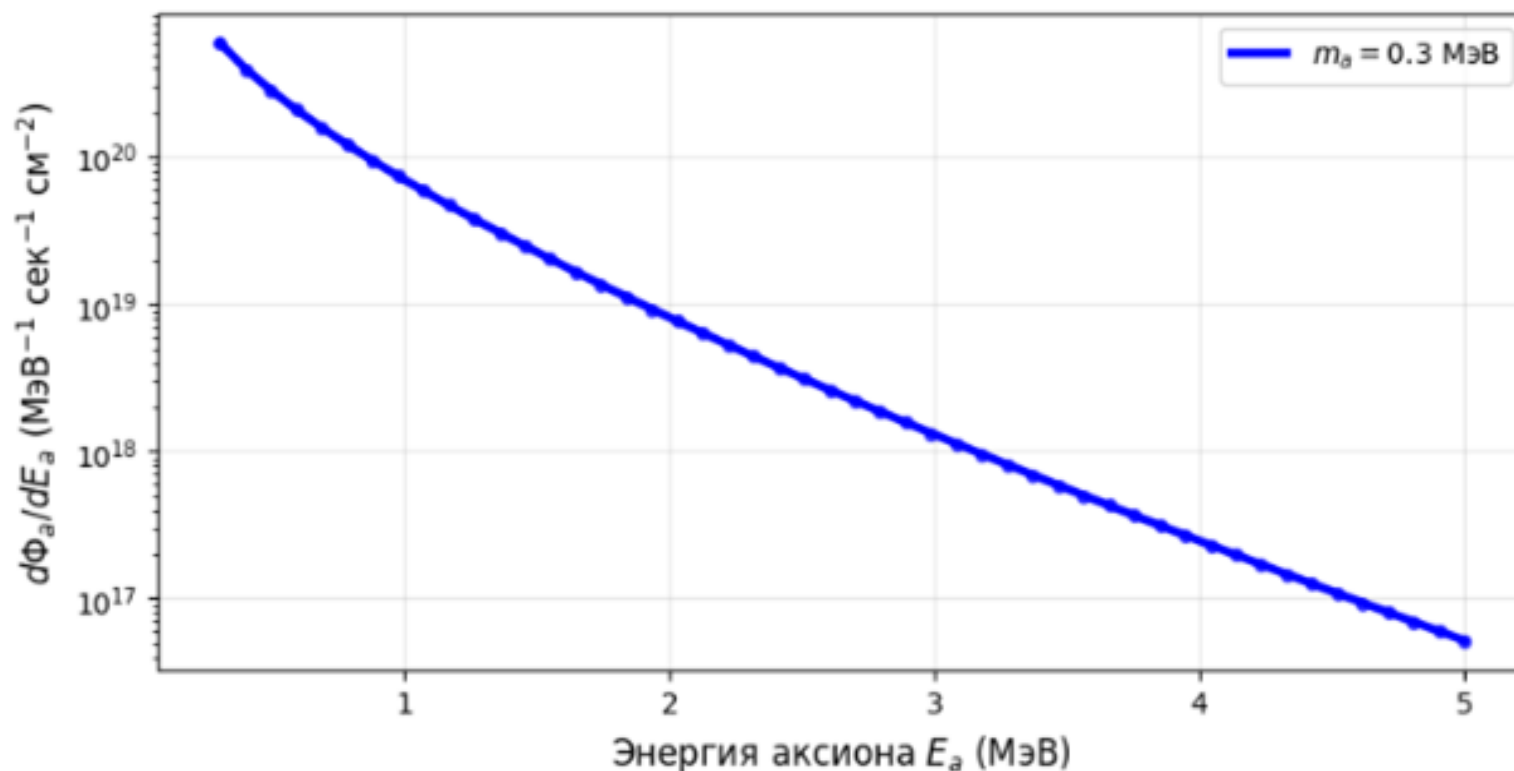


РИС 6. Энергетический спектр потока АПЧ, рожденных в АЗ реактора ВВЭР-1000 в результате эффекта Примакова *core*.

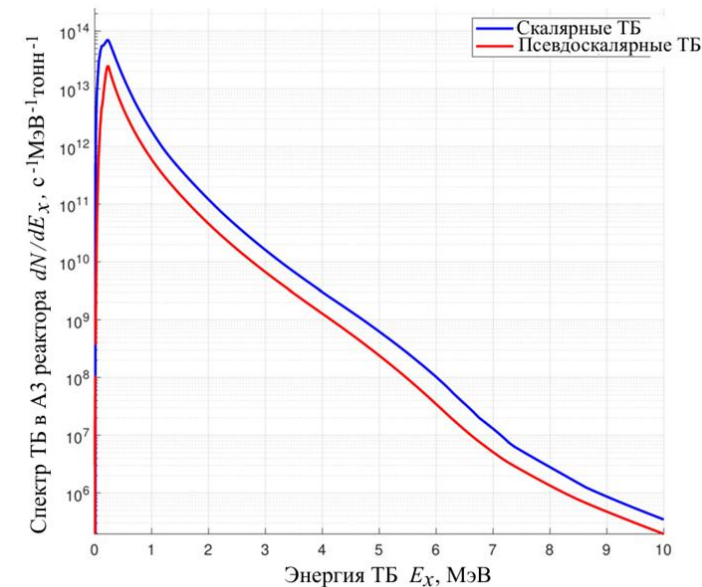


РИС 5. Энергетический спектр числа скалярных (синий) и псевдоскалярных (красный) темных бозонов, рожденных в АЗ реактора в результате комптоновского рассеяния

1. Произведен анализ современных реакторных экспериментов по поиску АПЧ (MINER, CONUS, RECODE, iDREAM).
2. Рассмотрен механизм рождения АПЧ через эффект Примакова в АЗ реактора ВВЭР-1000.
3. 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.

Перспективы: завершение расчёта энергетического спектра АПЧ от АЗ реактора, оценка ожидаемого спектра событий в детекторе iDREAM и переход к сбору экспериментальных данных.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Москва, 2025



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

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

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

(2) Дифференциальное сечение эффекта Примакова, 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

(3) Поток рожденных в АЗ реактора через канал примаковского рассеяния АПЧ, где E_a – энергия родившейся АПЧ, $P_{\text{surv}}(L) = 1$ – вероятность выживания АПЧ на расстоянии L между АЗ и детектором, $\sigma_{\text{tot}} + \sigma_P$ – полное сечение процесса, σ_{tot} – полное сечение рассеяния γ -квантов

(4) Общепринятая аналитическая аппроксимация для потока фотонов из АЗ реактора, где P – мощность реактора