



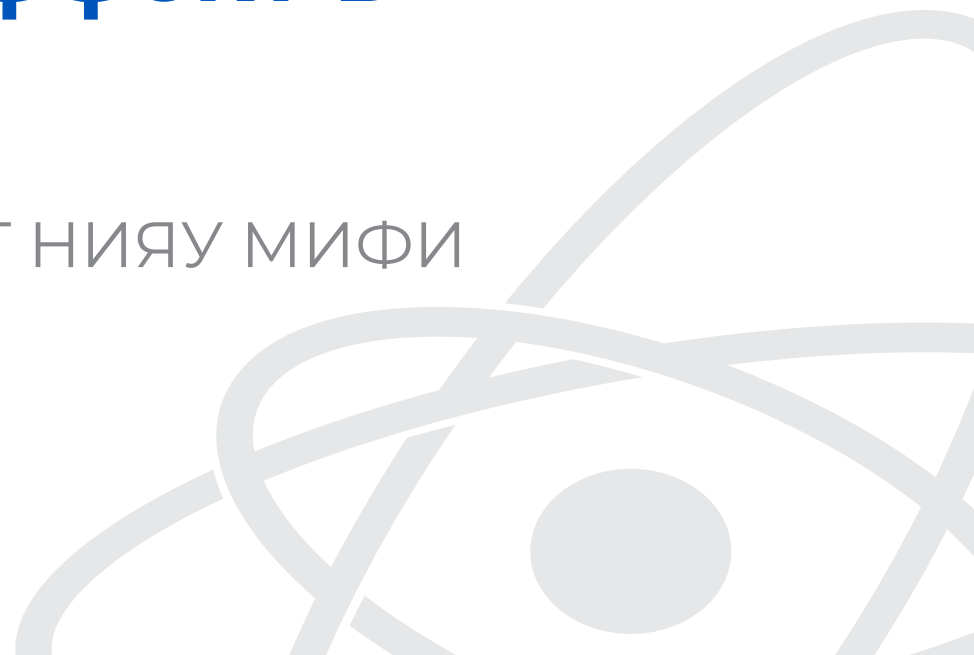
# Энергетический спектр примаковских аксионов, образующихся в АЗ реактора ВВЭР-1000, и ожидаемый эффект в детекторе iDREAM

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

Научный руководитель:

Литвинович Е. А., доц., к.ф.-м.н.

Москва, 2026



**Актуальность** работы определяется высокой научной значимостью поиска частиц темной материи (ТМ). В рамках настоящего исследования существующее направление поиска аксионо-подобных частиц (АПЧ) на детекторе iDREAM дополняется новым каналом регистрации — от АПЧ, рождённых в АЗ реактора в результате эффекта Примакова. Дальнейший анализ экспериментальных данных по этому каналу позволит исследовать чувствительность детектора iDREAM к параметрам АПЧ.

## Цель

Поиск АПЧ как кандидатов на роль частиц ТМ на детекторе iDREAM через канал фотон-аксионного взаимодействия.

## Задачи

1. Рассчитать энергетический спектр АПЧ, рождающихся в АЗ реактора ВВЭР-1000 в результате эффекта Примакова;
2. Рассчитать ожидаемый в детекторе iDREAM энергетический спектр событий взаимодействия АПЧ;
3. Провести анализ экспериментальных данных детектора iDREAM.

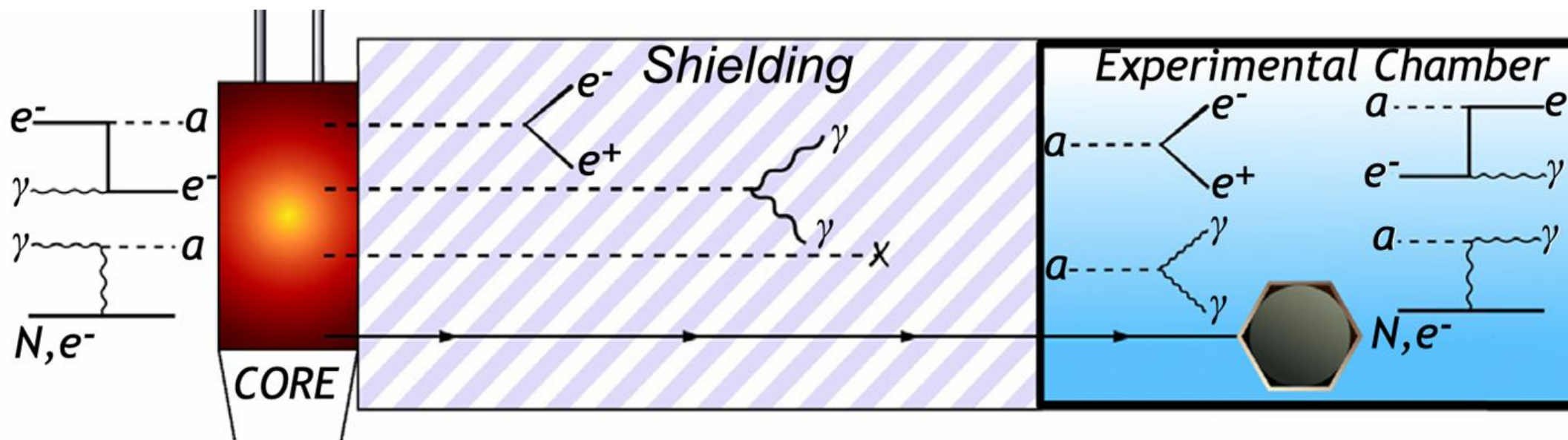
**1. Аксионы** – псевдоскалярные темные бозоны (гипотетические частицы «скрытого сектора»), которые впервые были предложены с качестве решения сильной CP-проблемы

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

**2. АПЧ** – подходящие кандидаты на роль частиц (ТМ):

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

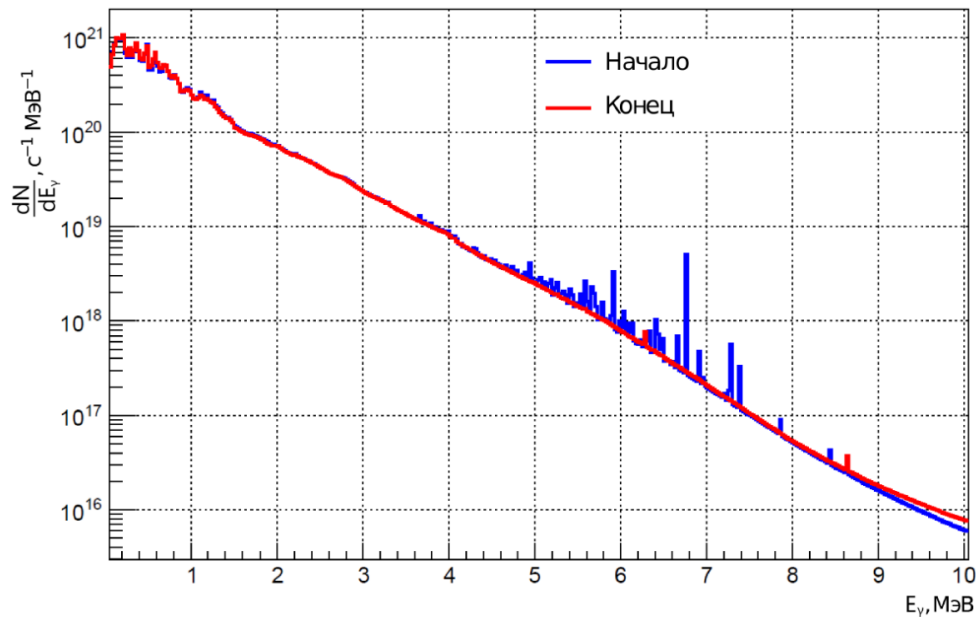
Подробнее об экспериментах по поиску АПЧ с помощью нейтринных детекторов: [1]-[7]



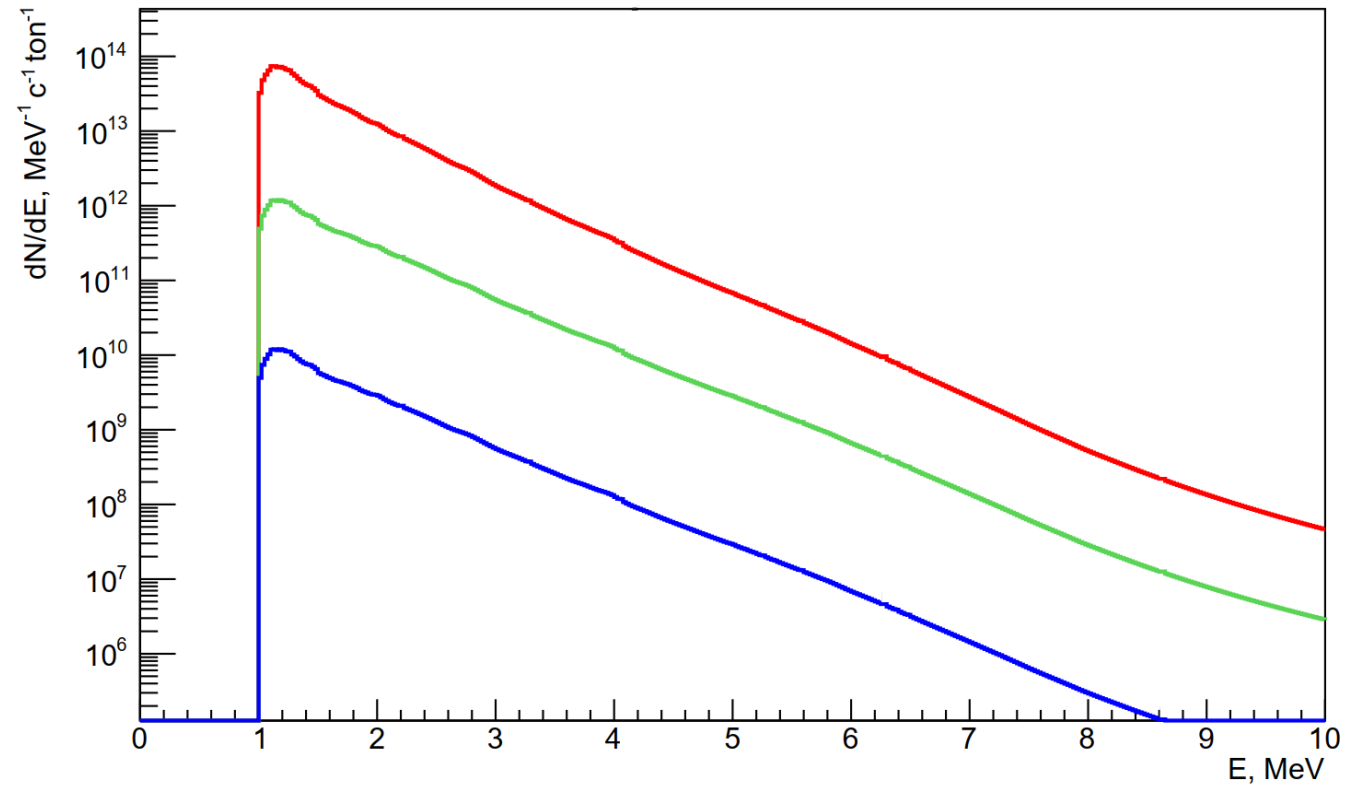
**РИС 1.** Схематическое изображение АПЧ и процессов их рождения\* (слева) и их взаимодействий (справа) в эксперименте с реакторными нейтрино. АПЧ может распасться внутри защиты и не быть зарегистрированными (пунктирные линии). АПЧ, которые свободно проходят через защиту (сплошная линия), могут быть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

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

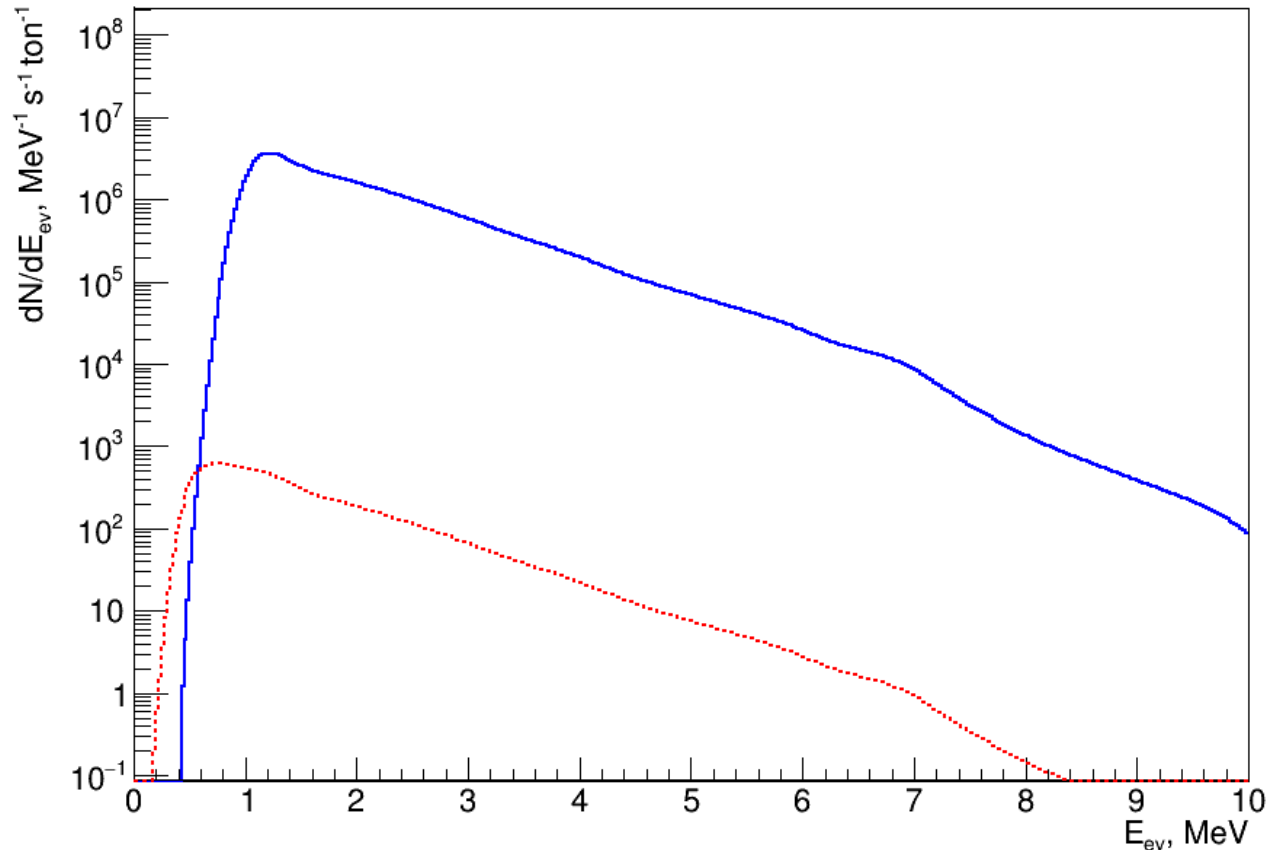
**Эффект Примакова,**  $\gamma + A \rightarrow A + a$   
где **A** – атомное ядро



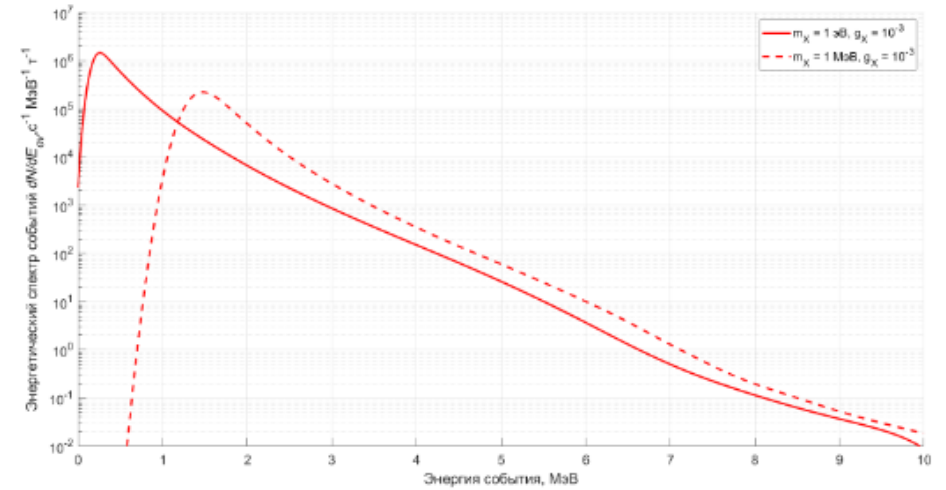
**РИС 2.** Спектр  $\gamma$ -квантов в АЗ реактора ВВЭР-1000 для начала (синим) и конца (красным) топливной кампании.



**РИС 3.** 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).



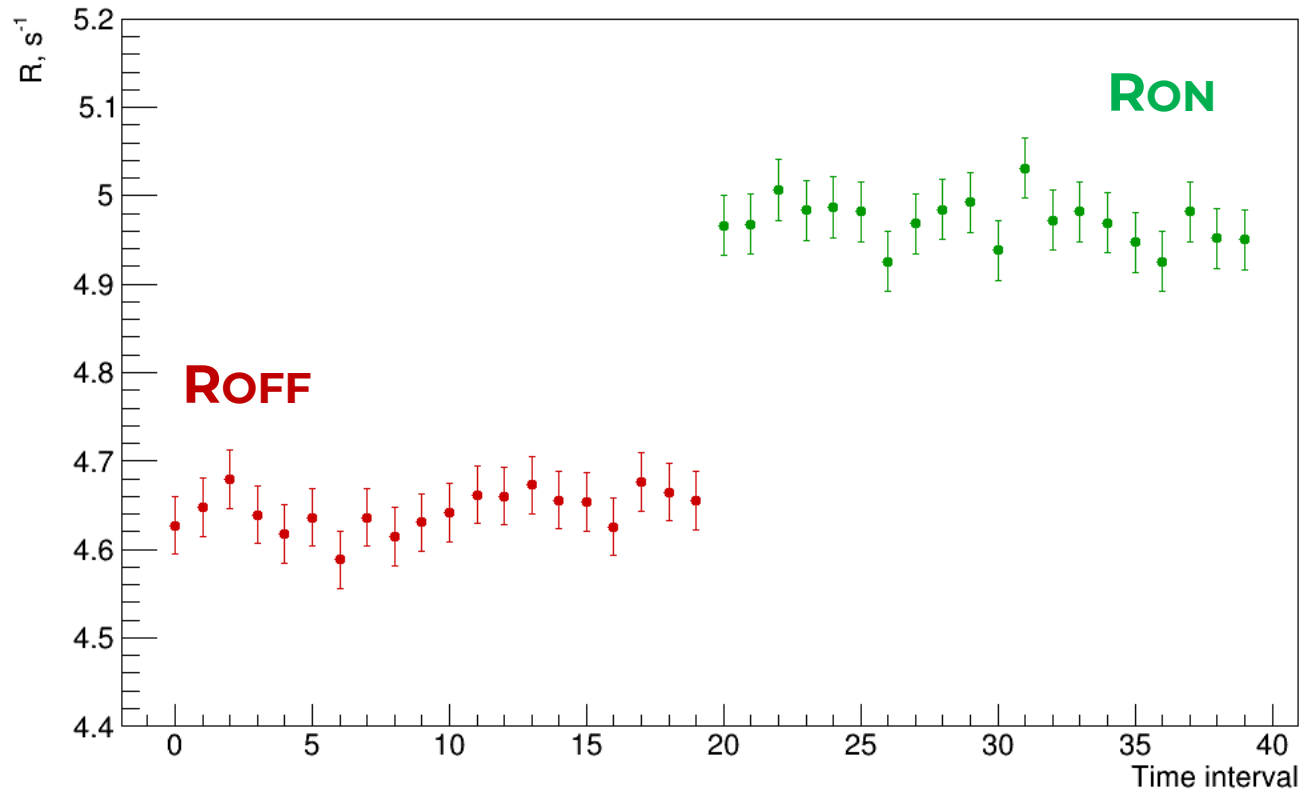
**РИС 4.** Ожидаемые в детекторе iDREAM спектры событий взаимодействия АПЧ примаконского происхождения при  $g_{ay} = 10^{-3}$  для  $m_a = 100$  кэВ (красный) и  $m_a = 1$  МэВ (синий).



**РИС 5.** Ожидаемые в детекторе iDREAM спектры событий при  $g_{ae} = 10^{-3}$  для  $m_a = 1$  эВ (сплошная) и  $m_a = 1$  МэВ (пунктир).

$$\frac{dN_{\text{tot}}^P}{dE_a} = \frac{dN_P^P}{dE_a} + \frac{dN_{\text{decay}}^P}{dE_a}$$

(2) Дифференциальная скорость событий



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

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

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

(3) Разность скоростей счета,  $R_{ON}$  – скорость счета при включенном реакторе,  $R_{OFF}$  – скорость счета при выключенном реакторе

**РИС 6.** Скорость счёта одиночных событий iDREAM в диапазоне от 5 до 10 МэВ в периоды выключенного (красный) и включенного (зелёный) реактора.

1. Рассчитан энергетический спектр АПЧ, рождающихся в АЗ реактора ВВЭР-1000 в результате эффекта Примакова, с учётом реального спектра  $\gamma$ -квантов и изотопного состава АЗ.
2. Получен ожидаемый в детекторе iDREAM спектр событий взаимодействия АПЧ с учётом каналов обратного примаковского рассеяния и распада  $a \rightarrow \gamma\gamma$ . Сравнение со спектром для электрон-аксионного взаимодействия выявило характерную зависимость числа событий от массы АПЧ.
3. Проведён анализ экспериментальных данных детектора iDREAM. Получена разность скоростей счёта  **$R_{exp} = 0.327 \pm 0.011$  (стат.)  $s^{-1}$**  в диапазоне [5; 10] МэВ, существенно превышающая ранее полученное значение, что может свидетельствовать о наличии статистически значимого сигнала от взаимодействия АПЧ примаковского происхождения в детекторе.

Перспективы: расширение статистики набора данных, исследование чувствительности детектора iDREAM к константе связи  $g_{a\gamma}$ .



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

Москва, 2026



Некоторые из современных реакторных экспериментов по поиску АПЧ с помощью нейтринных детекторов:

[1] James B. Dent и др. “New Directions for Axion Searches via Scattering at Reactor Neutrino Experiments”. В: *Phys. Rev. D* (2020).

[2] M. Mirzakhani и др. “MINER reactor based search for axionlike particles using sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) detectors”. В: *Phys. Rev. D* 112 (2025), с. 9.

[3] 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 (2021), с. 12.

[4] 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).

[5] Wei Dai и др. “Hunting for Axions in REactor neutrino Coherent scattering Detection Experiment”. В: *Phys. Rev. D* (2025).

[6] 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 (2007), с. 9-16.

[7] D. Aristizabal Sierra и др. “Axionlike particles searches in reactor experiments”. (2020).