



# 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 частицы (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

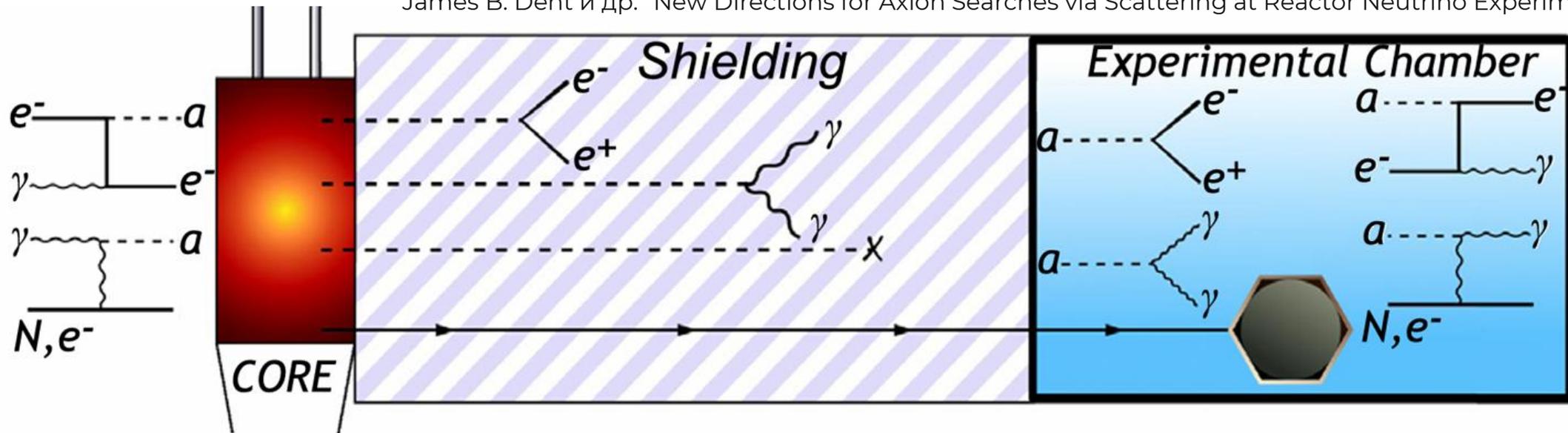
$$L_{\Theta} = \Theta \frac{g_s^2}{32\pi^2} G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{a\mu\nu},$$

(1)  $\Theta$ -член в лагранжиане КХД, где  $\Theta$  – 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

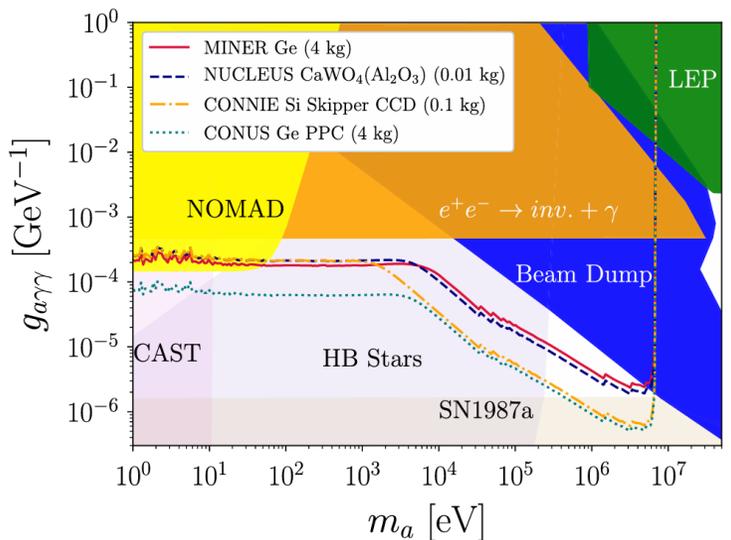


**РИС 1.** Схематическое изображение АПЧ и процессов их рождения\* (слева) и их взаимодействий (справа) в эксперименте с реакторными нейтрино. АПЧ может распасться внутри защиты и не быть зарегистрированными (пунктирные линии). АПЧ, которые свободно проходят через защиту (сплошная линия), могут быть 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**  $\gamma + e^- \rightarrow a + e^-$

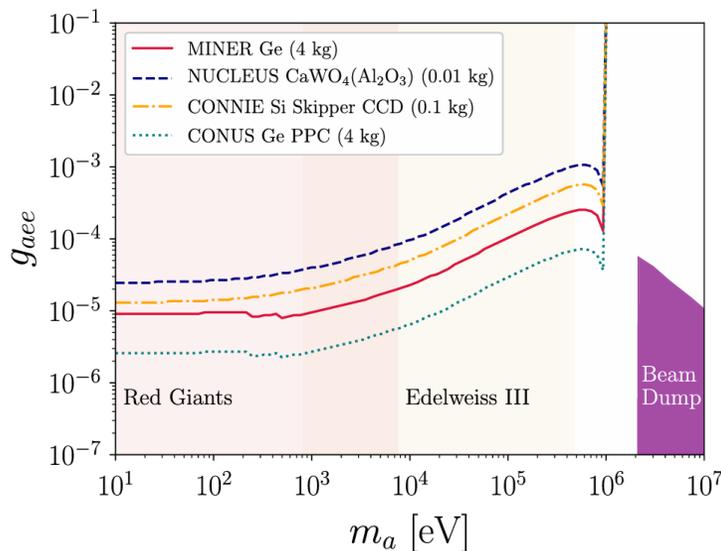
**Эффект Примакова,**  $\gamma + A \rightarrow \gamma + a$   
где **A** – атомное ядро

# Текущие ограничения на константы связи

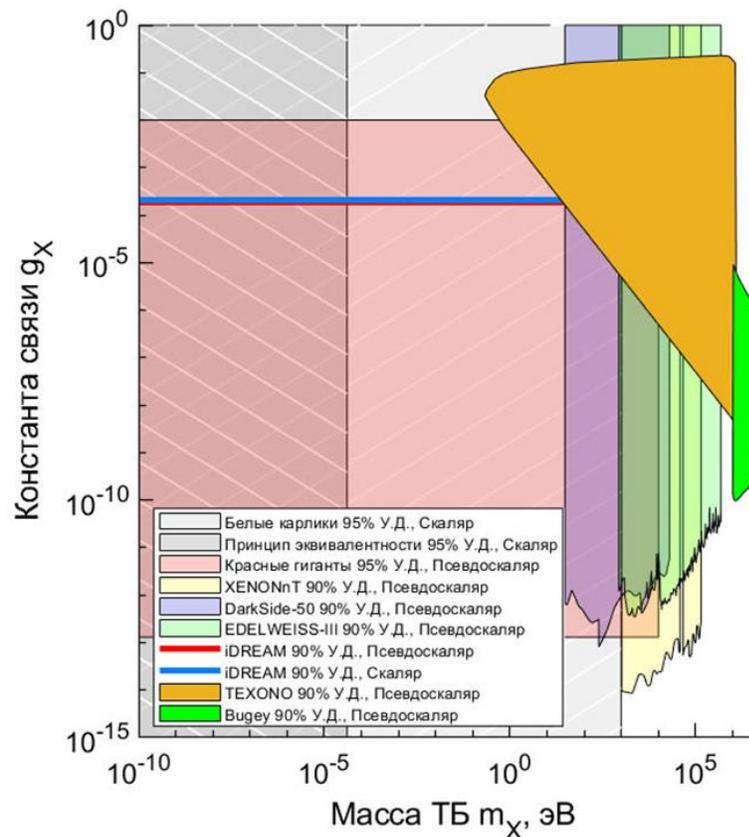


**РИС 2.**

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



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

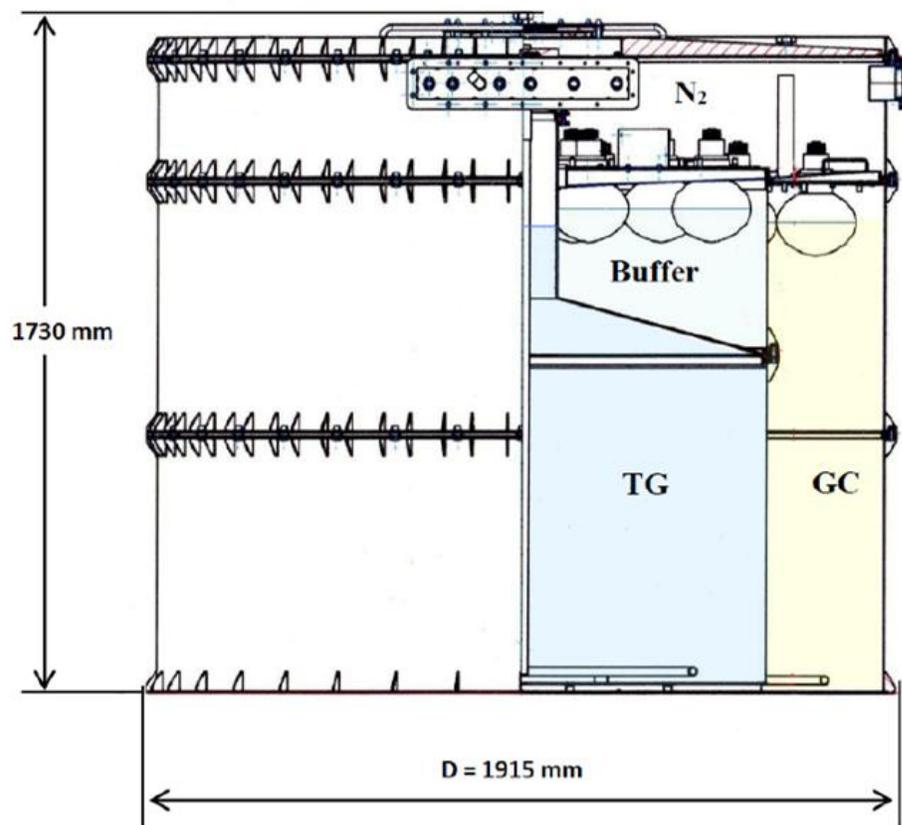


**РИС 3.**

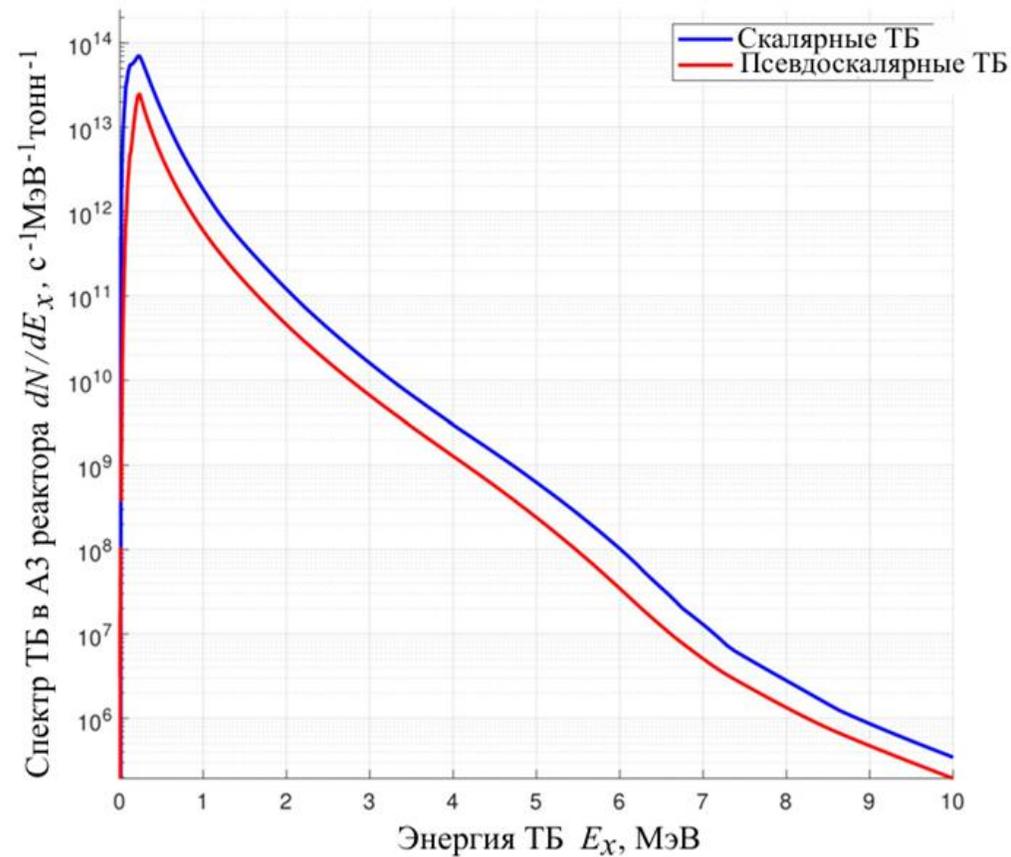
Ограничения на параметры АПЧ (красная линия), полученные в результате анализа данных нейтринного детектора iDREAM и других реакторных нейтринных экспериментов (TEXONO и Bugey) в сравнении с имеющимися результатами прямого поиска тёмной материи астрофизическими методами.

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

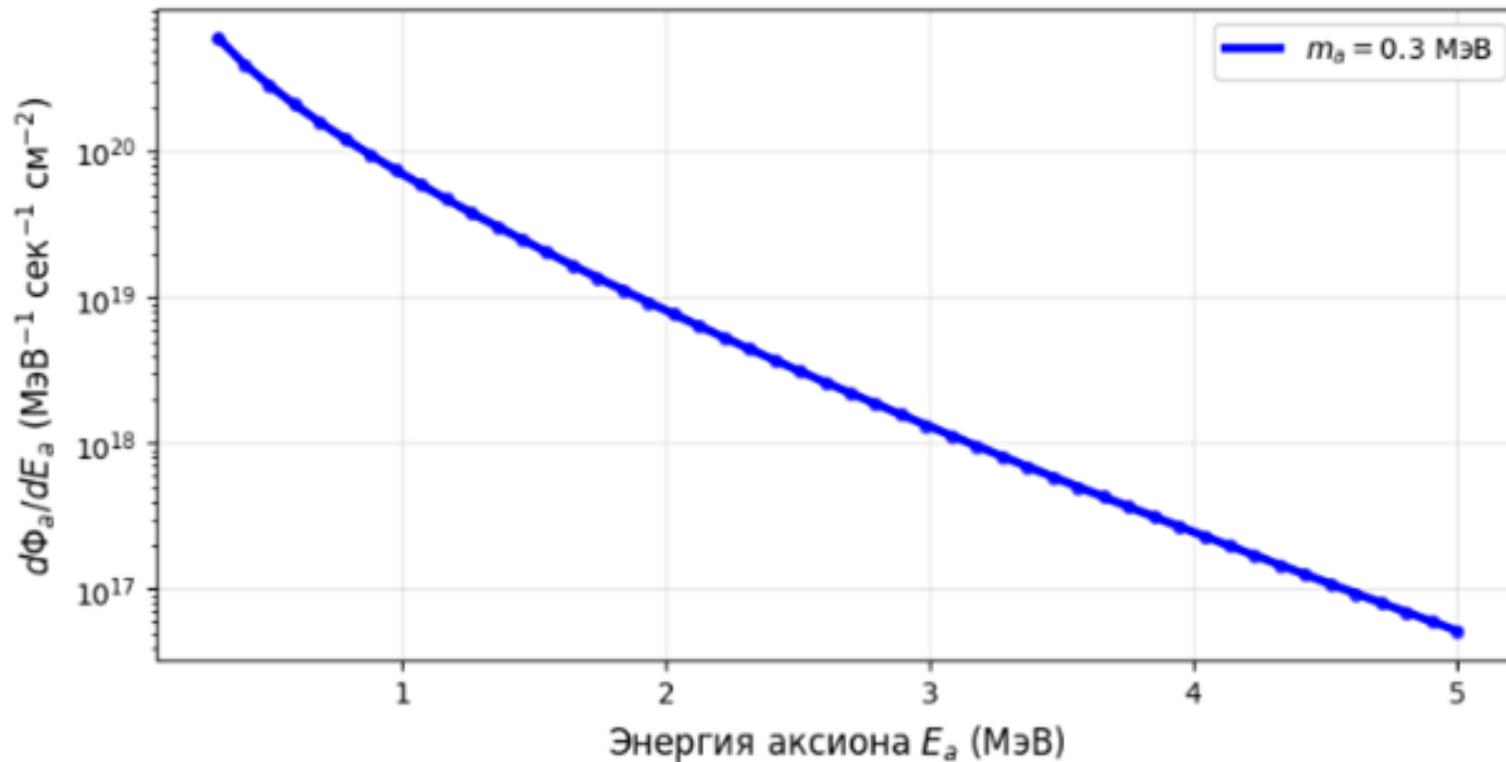
А. В. Абрамов и др. "Поиск бозонной темной материи нейтринным детектором iDREAM на Калининской атомной электростанции", 2025



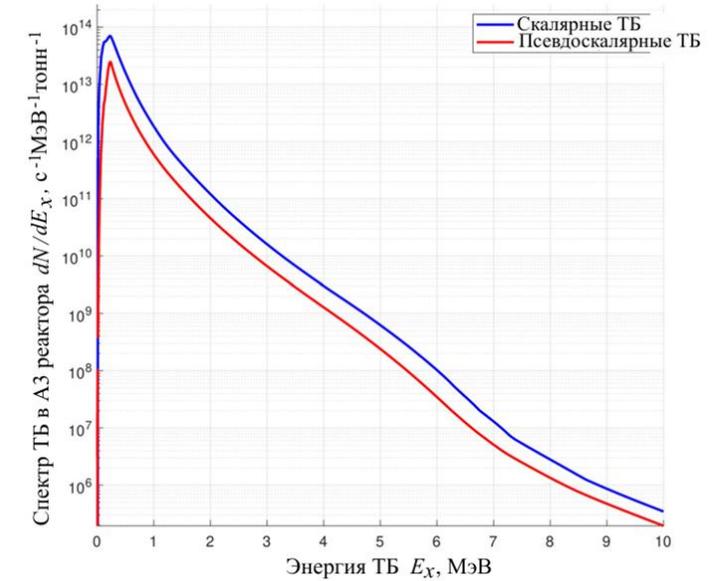
**РИС 4.** Схематическое изображение детектора iDREAM



**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 [more](#).



**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



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

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

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

(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,  $a_0 = 111.7 Z^{1/3} / m_e E_\gamma$ ,  $E_\gamma$  – 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,  $\sigma_{\text{tot}}$  – полное сечение рассеяния  $\gamma$ -квантов

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