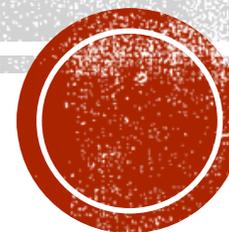


ПОИСК ТЁМНЫХ БОЗОНОВ НЕЙТРИННЫМ ДЕТЕКТОРОМ IDREAM НА КАЛИНИНСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

Выполнил: Студент группы М23-114 Киселев Кирилл Клаудиович

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Литвинович Евгений Александрович

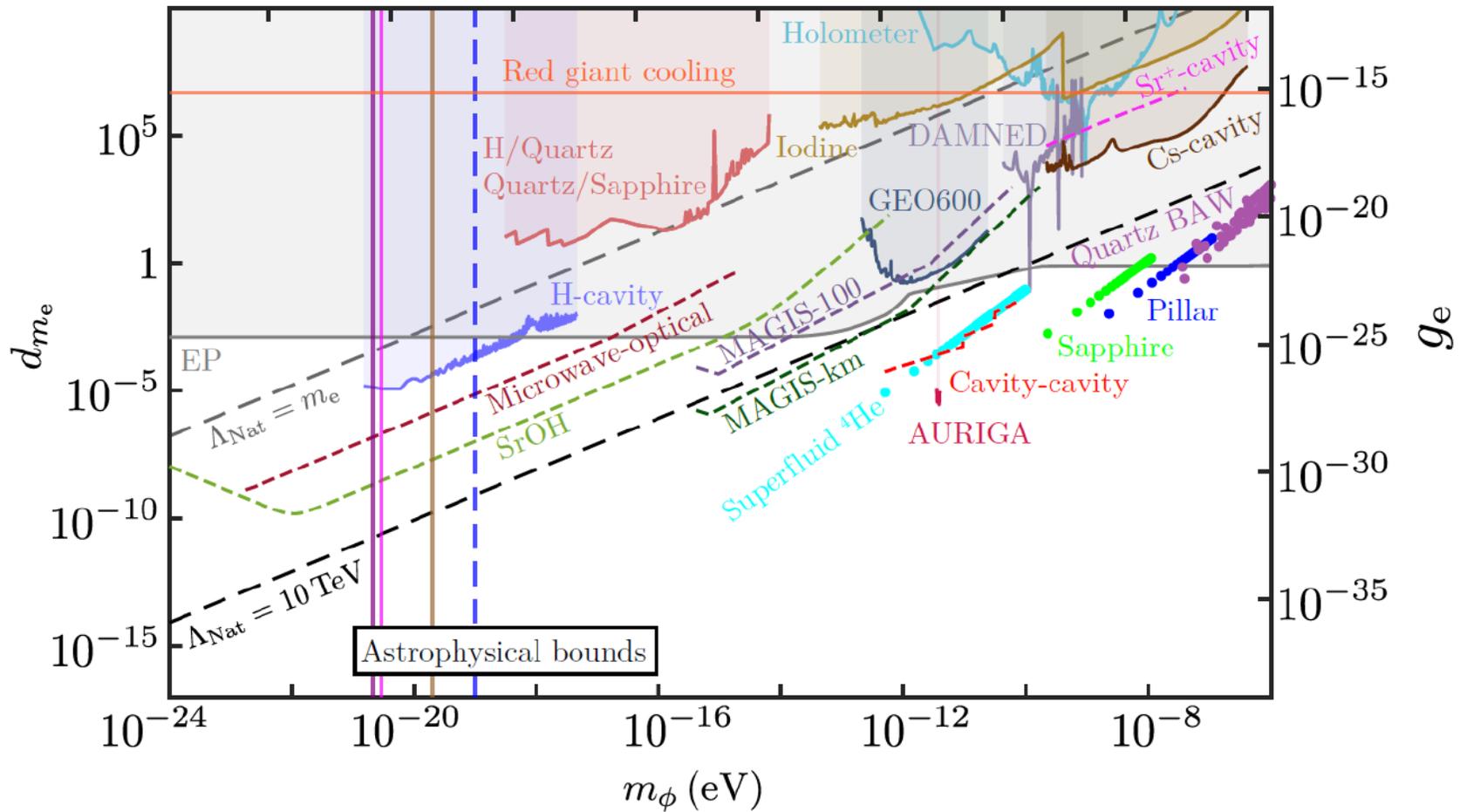
Научный консультант: м.н.с. Нугманов Радик Рафаэльевич



ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- **Цель работы:** исследовать чувствительность детектора iDREAM к тёмным бозонам.
- **Задачи:**
 - Рассмотреть модель тёмных бозонов (скалярных и псевдоскалярных) и рассчитать ожидаемый энергетический спектр событий для детектора iDREAM, предсказываемый этой моделью;
 - Разработать критерии отбора и произвести отбор событий-кандидатов в данных iDREAM;
 - Оценить погрешности измеряемой скорости счёта;
 - Получить ограничения на физические параметры модели тёмных бозонов: масса тёмного бозона m_χ , константа связи с заряженным током (электроном) Стандартной Модели g_χ .

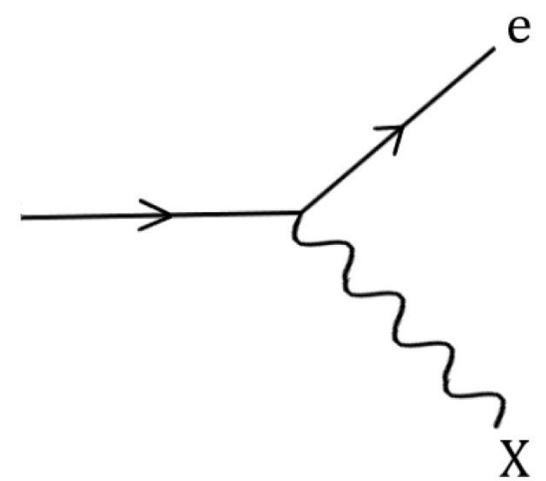
ТЁМНЫЕ БОЗОНЫ



$$\mathcal{L} \supset -g_X \bar{\psi} \psi X$$

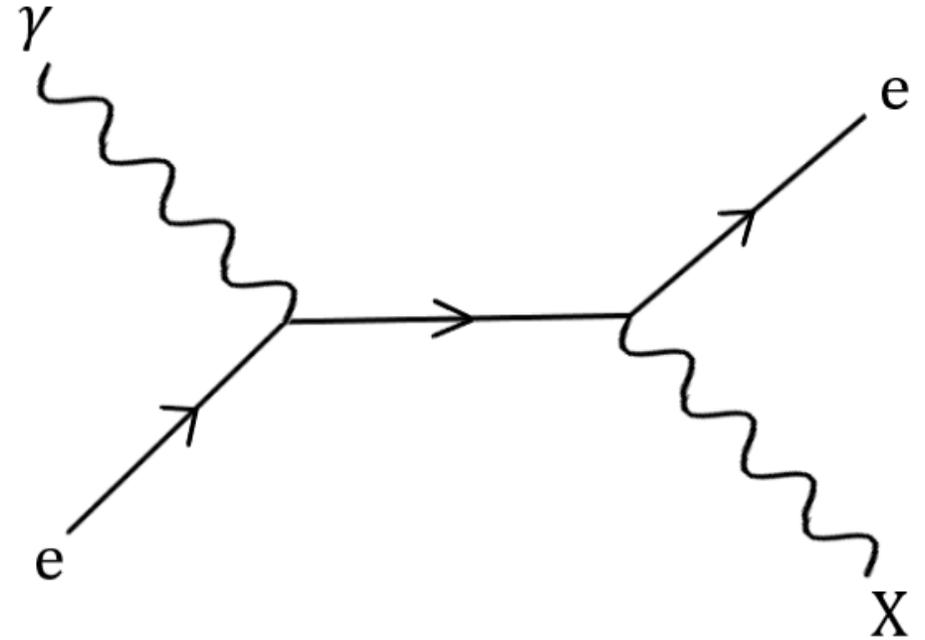
$$\mathcal{L} \supset -g_X \bar{\psi} \gamma^5 \psi X$$

g_e



МЕХАНИЗМ РОЖДЕНИЯ ТЁМНЫХ БОЗОНОВ В АЗ

- АЗ (активная зона) реактора – мощный источник γ -квантов
- Предполагается, что тёмный бозон X может образоваться в АЗ в процессе рассеяния γ -квантов на электронах:
 $\gamma e \rightarrow e X$
- Нужен спектр γ -квантов в АЗ



ИСТОЧНИКИ γ -КВАНТОВ В АЗ РЕАКТОРА

Источники γ -квантов:

- **Мгновенное γ -излучение деления (**prompt**)**
- **Захватное γ -излучение от реакции (**n, γ**):** большой вклад от захвата на ^{155}Gd , ^{157}Gd в начале кампании
- γ -излучение коротко- и долгоживущих продуктов деления (**delayed**)
- Излучение при неупругом рассеянии нейтронов
- γ -излучение продуктов реакций
- γ -излучение продуктов активации
- Аннигиляционное γ -излучение
- Тормозное γ -излучение

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АЗ (ПРЕДОСТАВЛЕН ПЕРСОНАЛОМ КАЭС)

| Изотоп | $n_i \left[\frac{\text{шт}}{\text{см}^3} \right]$ (начало кампании) | $\sigma_{i(n,\gamma)}$ [барн] | $\sigma_{i(n,\gamma)}$ [см ²] | Скорость реакции (n, γ) [с ⁻¹] (начало кампании) |
|------------------------|---|-------------------------------|---|--|
| U-235 | 2,132E+20 | 98,8 | 9,88E-23 | 5,832E+18 |
| U-238 | 6,196E+21 | 2,68 | 2,68E-24 | 4,597E+18 |
| Pu-239 | 2,453E+19 | 269,3 | 2,693E-22 | 1,829E+18 |
| Pu-240 | 7,237E+18 | 289,5 | 2,895E-22 | 5,800E+17 |
| H | 2,516E+22 | 0,3326 | 3,326E-25 | 2,317E+18 |
| O | 2,582E+22 | 0,00019 | 1,9E-28 | 1,358E+15 |
| Zr | 5,815E+21 | 0,83 | 8,3E-25 | 1,336E+18 |
| Gd-152 (0,20%) | 3,056E+16 | 735 | 7,35E-22 | 6,218E+15 |
| Gd-154 (2,18%) | 3,331E+17 | 85 | 8,5E-23 | 7,839E+15 |
| Gd-155 (14,80%) | 2,261E+18 | 60900 | 6,09E-20 | 3,813E+19 |
| Gd-156 (20,47%) | 3,128E+18 | 1,8 | 1,8E-24 | 1,559E+15 |
| Gd-157 (15,65%) | 2,391E+18 | 254000 | 2,54E-19 | 1,682E+20 |
| Gd-158 (24,84%) | 3,796E+18 | 2,2 | 2,2E-24 | 2,312E+15 |
| Gd-160 (21,86%) | 3,340E+18 | 1,4 | 1,4E-24 | 1,295E+15 |

Скорость реакции (число (n, γ)-реакций для i -изотопа в АЗ в единицу времени)

$$R_i = \sigma_{i(n,\gamma)} V \Phi n_i$$

$\Phi \left[\frac{\text{шт}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right] = 10^{13}$ - поток

нейтронов в АЗ

$V \text{ [см}^3\text{]} = 2.77 \cdot 10^7$ - объём АЗ

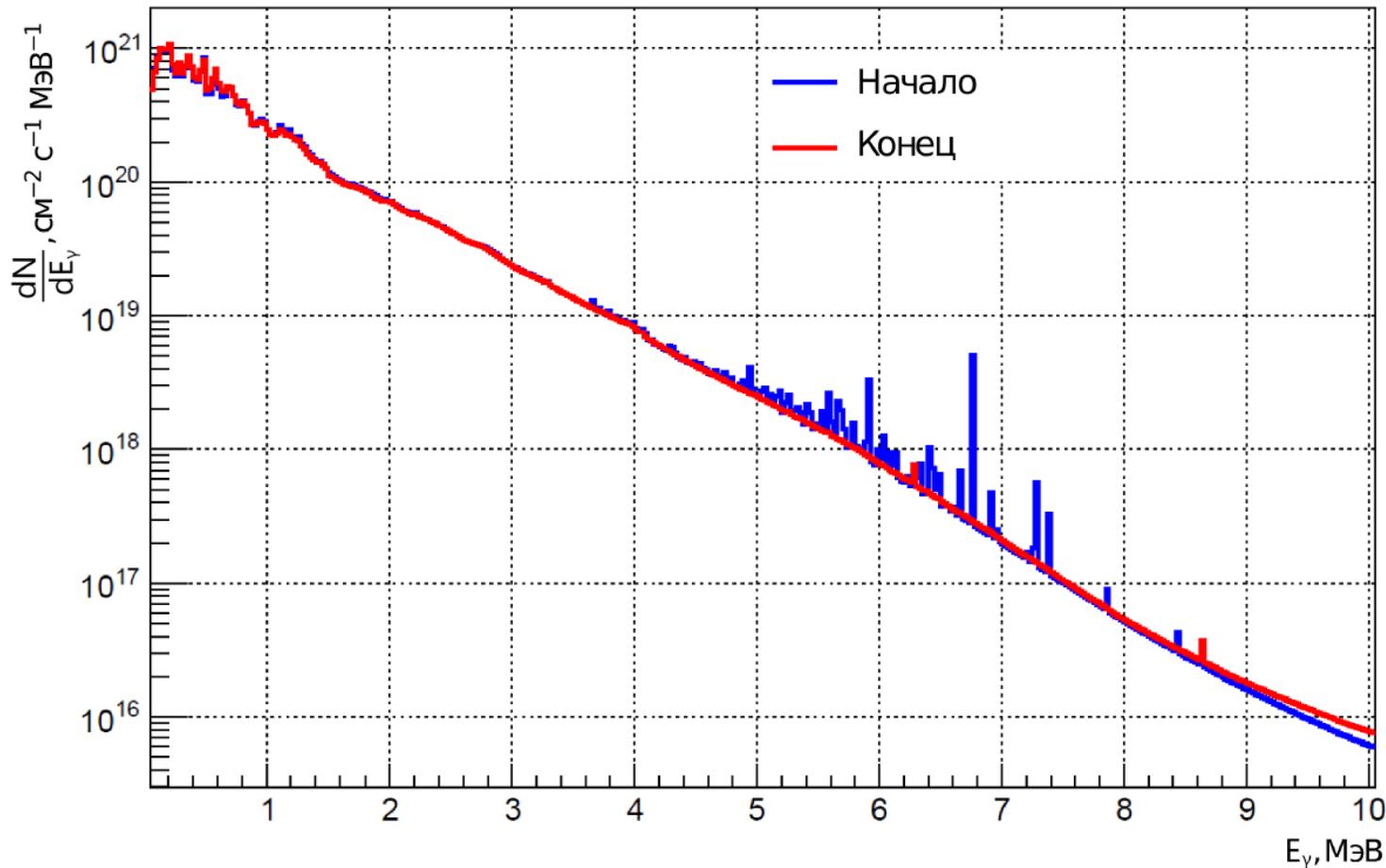
Gd-155 и **Gd-157** быстро «выгорают», что необходимо учитывать усреднением скорости счёта:

$$R_{Gd}(t) = R_{Gd}(0) \cdot e^{-\sigma_{i(n,\gamma)} \Phi t}$$

по периоду наблюдения:

$$\langle R_{Gd} \rangle = \frac{1}{T_{ON}} \int_0^{T_{ON}} R_{Gd}(t) dt$$

СПЕКТР γ -КВАНТОВ В АЗ РЕАКТОРА (РАССЧИТАН Д. ПОПОВЫМ)



$$\frac{dN}{dE_\gamma} = \frac{P_{th}}{\langle E_f \rangle} \sum_i \alpha_i S_p^i + \sum_j R_j S_{n\gamma}^j$$

Вклад погрешностей:

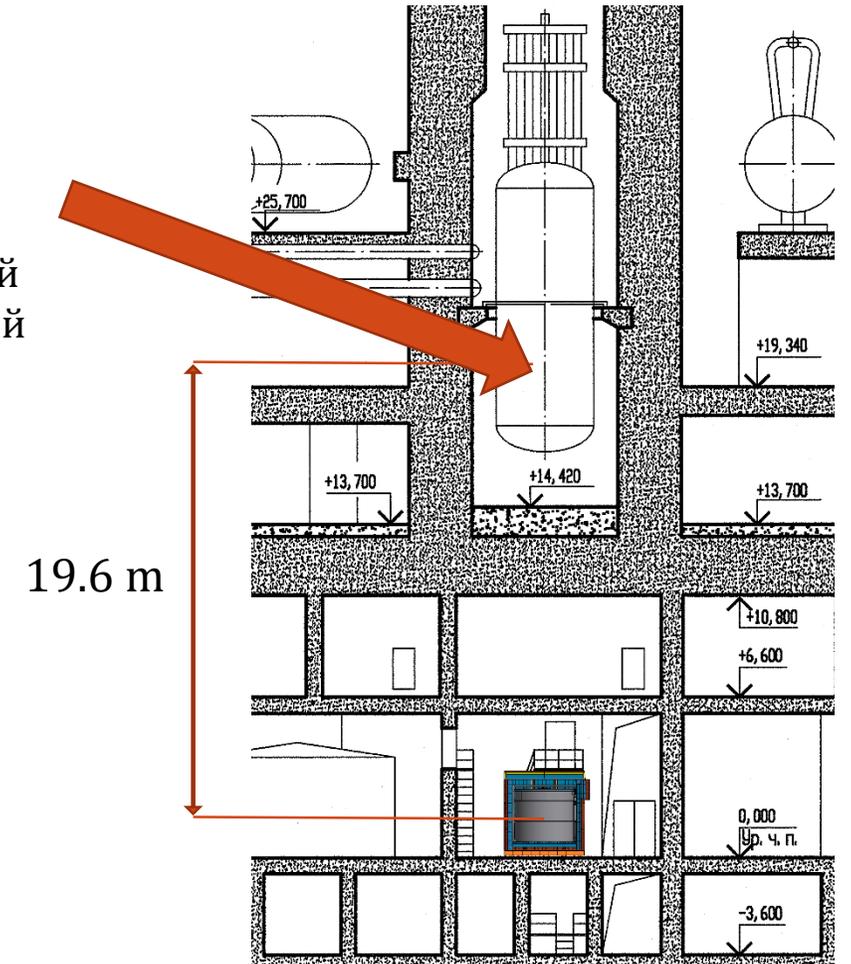
- Погрешности множественности γ -квантов ($\sim 7\%$)
- Ошибки долей деления α_i ($\sim 4\%$)
- Ошибки тепловой мощности P_{th} ($\sim 2\%$)
- Ошибки интенсивности линий (n, γ)-реакций ($\sim 2\%$)

Итог: 10% (консервативная оценка)

ДЕТЕКТОР IDREAM

- Экспериментальный образец промышленного сцинтилляционного детектора для мониторинга реакторных антинейтрино
- Разработан и реализован в НИЦ «Курчатовский Институт» совместно с НИИЯФ МГУ имени Д. В. Скобельцына
- Сбор данных начался в 2021 году

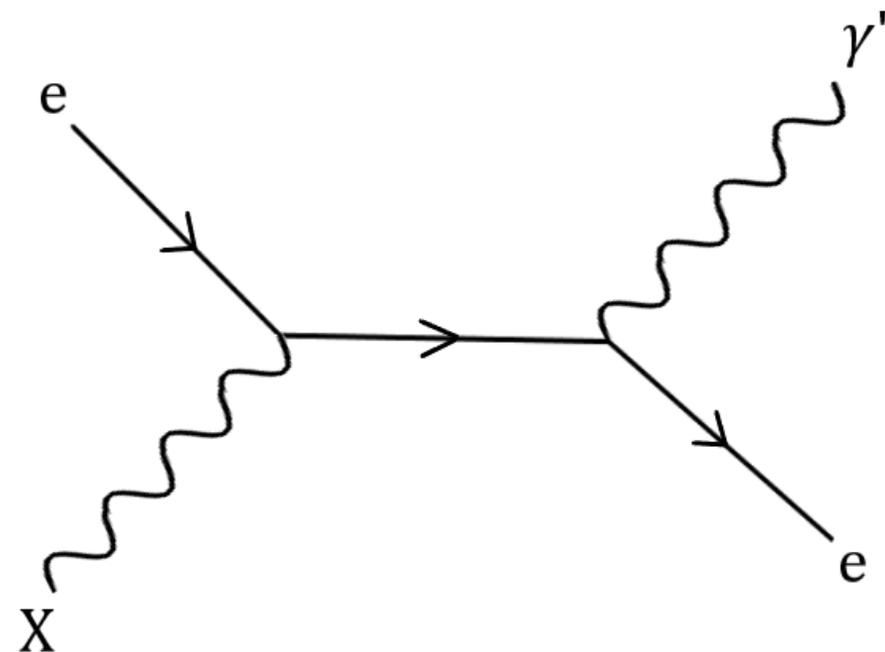
ВВЭР-1000
мощностью 3
ГВт,
установленный
на Калининской
АЭС



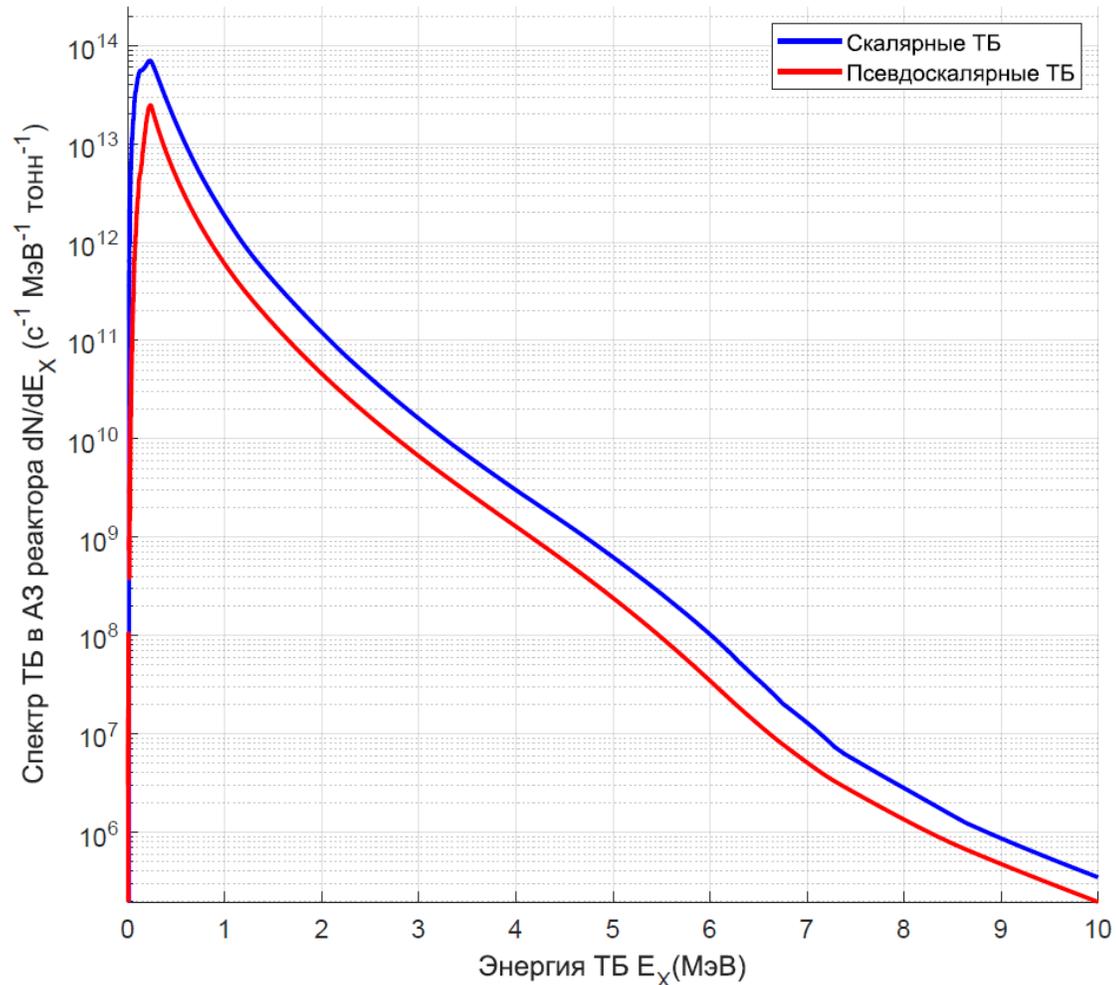
РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM

Тёмный бозон может быть зарегистрирован по событию обратного рассеяния на электронах в мишени детектора.

Предполагается, что в однородном сцинтилляционном детекторе вторичный γ -квант и электрон отдачи регистрируются как одно событие.



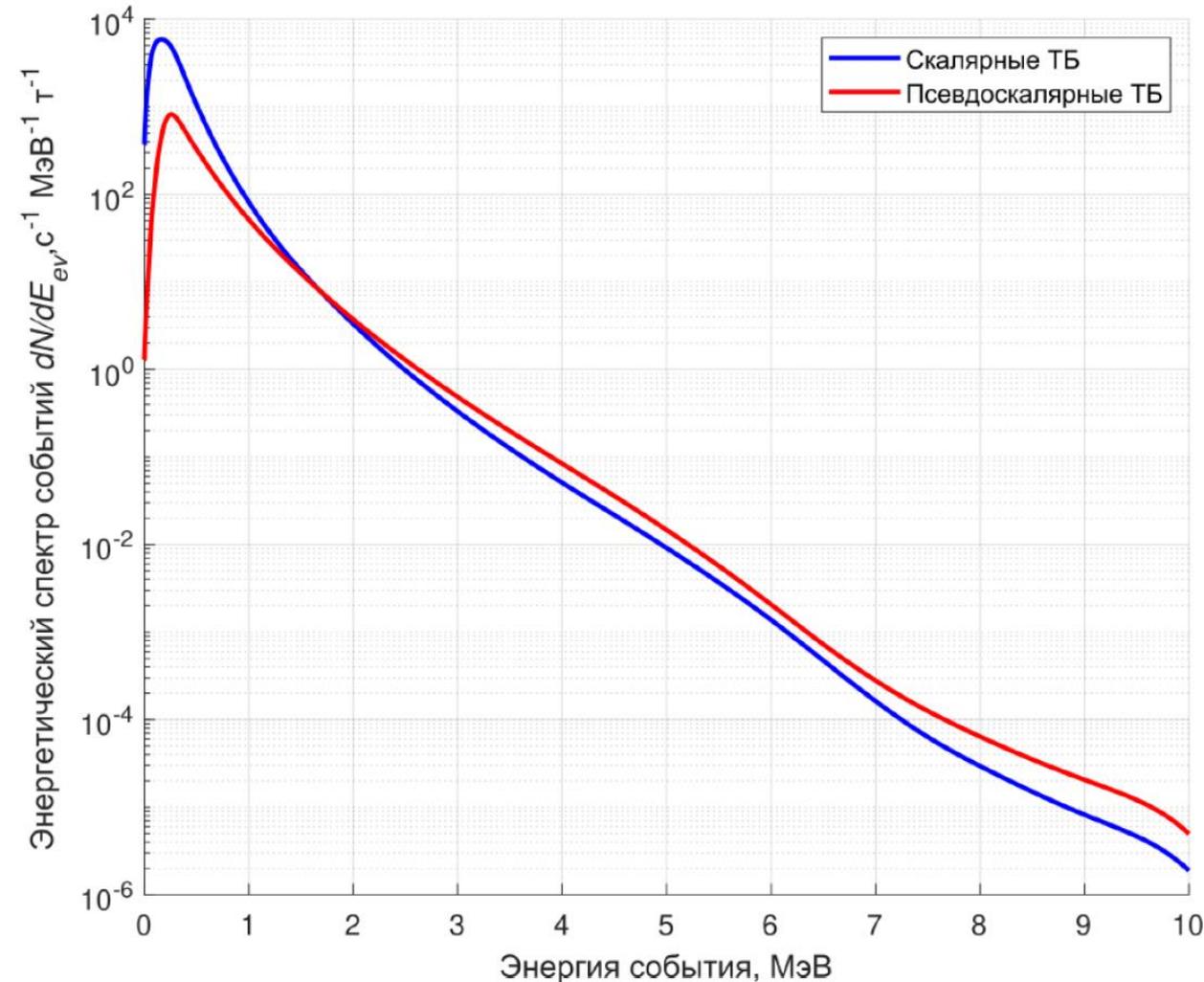
СПЕКТРЫ ТЁМНЫХ БОЗОНОВ В АЗ



Спектры тёмных бозонов, рождённых в АЗ

$$\frac{dN}{dE_X} = \int \frac{1}{\sigma_{\text{tot}} + \sigma_{\gamma e \rightarrow X e}} \frac{d\sigma_{\gamma e \rightarrow X e}}{dE_X} \frac{dN}{dE_\gamma} dE_\gamma$$

ОЖИДАЕМЫЕ СПЕКТРЫ СОБЫТИЙ В iDREAM



Ожидаемые спектры событий в iDREAM после учёта

- 1) ослабления потока тёмных бозонов в веществе между АЗ и детектором
- 2) энергетического разрешения iDREAM

$$\frac{dN}{dE_{ev}} = \frac{N_e T}{4\pi R^2} \int \frac{d\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e}}{dE_{\gamma'}} \frac{dN}{dE_X} \exp(-R\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e} n_e) dE_{\gamma'}$$

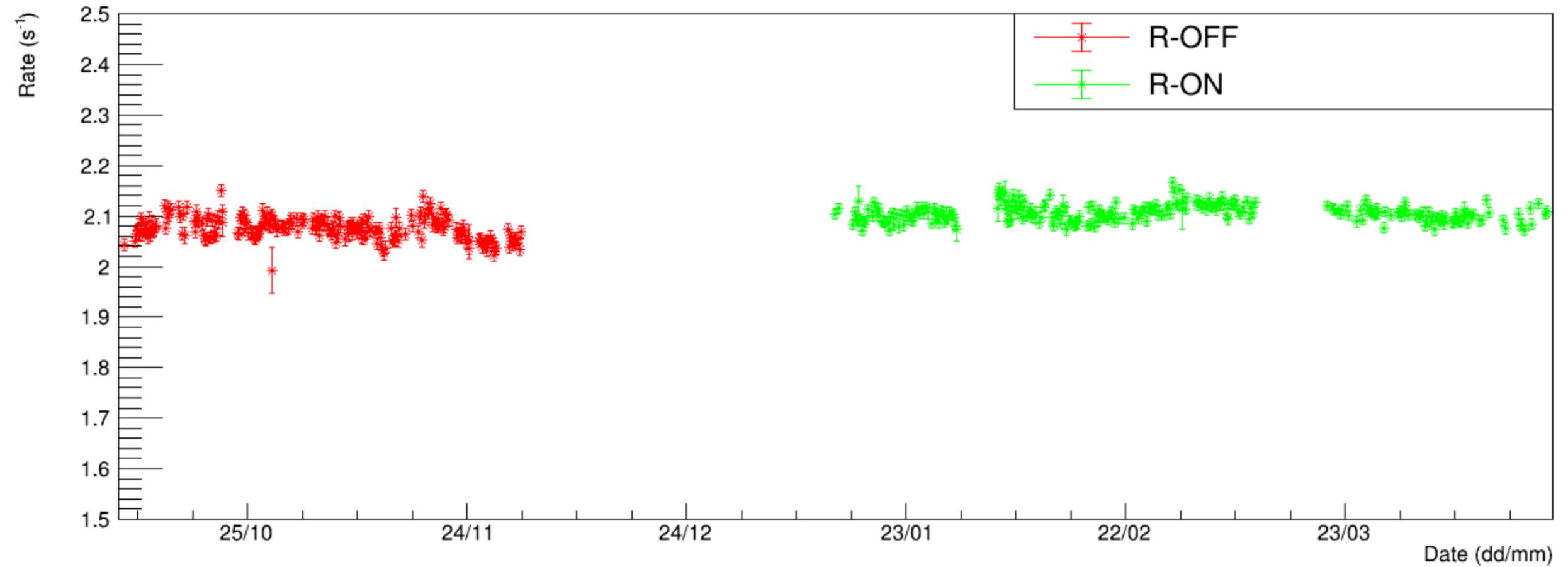
ОТБОР СОБЫТИЙ

Отбор событий кандидатов:

- Мюонное вето 150 мкс (мюон - сигнал в мюонных пластинах или "мюонная" форма импульса в мишени)
- Одиночные события (нет других событий до/после 100 мкс)
- Исследован один энергетический бин: 5-10 МэВ.

| | R-OFF | R-ON |
|--|---------------------------|---------------------------|
| Период сбора данных | 08.10.2022 – 27.12.2022 | 16.01.2023 – 20.04.2023 |
| Астрономическое время | 111 дней | 94 дня |
| Живое время | 37 дней | 47 дней |
| Скорость счёта одиночных событий, s^{-1} | 1.986 ± 0.001 (стат.) | 2.030 ± 0.001 (стат.) |

РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM



РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM

Поскольку скорость счёта фоновых одиночных событий не зависит от режима работы реактора, учёт фона можно произвести вычитанием скорости счёта детектора, измеренной при выключенном реакторе, из скорости счёта при включенном реакторе: $R_{exp} = R_{ON} - R_{OFF} = 0.044 \pm 0.001(\text{стат.}) \text{ c}^{-1}$

Систематика была извлечена эмпирически – из стабильности счёта одиночных событий. Было отмечено, что флуктуация скорости счёта одиночных событий $\Delta R_f \gg \Delta R_{stat}$, а значит в неё вносит вклад систематическая ошибка, которую можно оценить:

$$\Delta R_{syst} = \sqrt{\Delta R_f^2 - \Delta R_{stat}^2} = 0.038 \text{ c}^{-1}$$

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

$$R_{th} = R_{DB}(1 + \theta_{\gamma}\sigma_{\gamma}) + \Delta R_{syst}\theta_{syst}$$

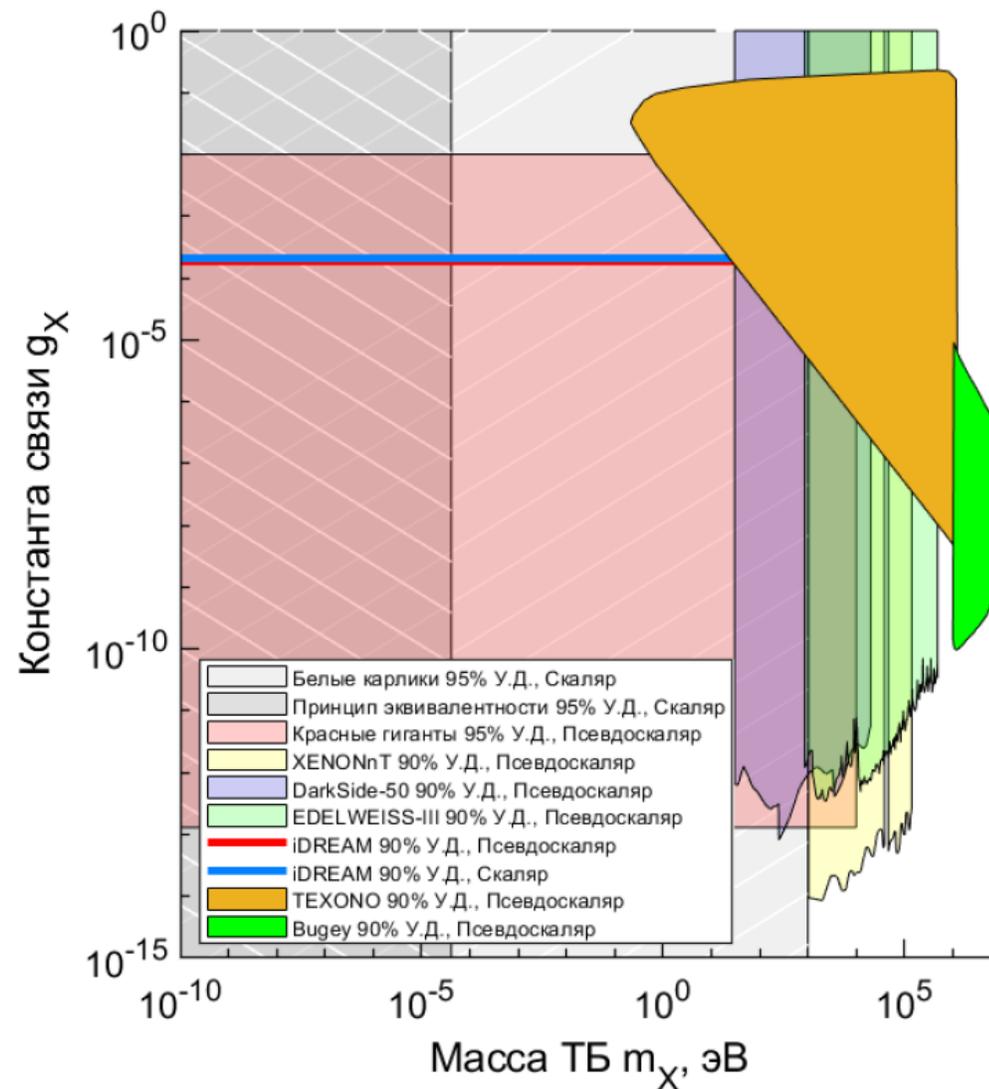
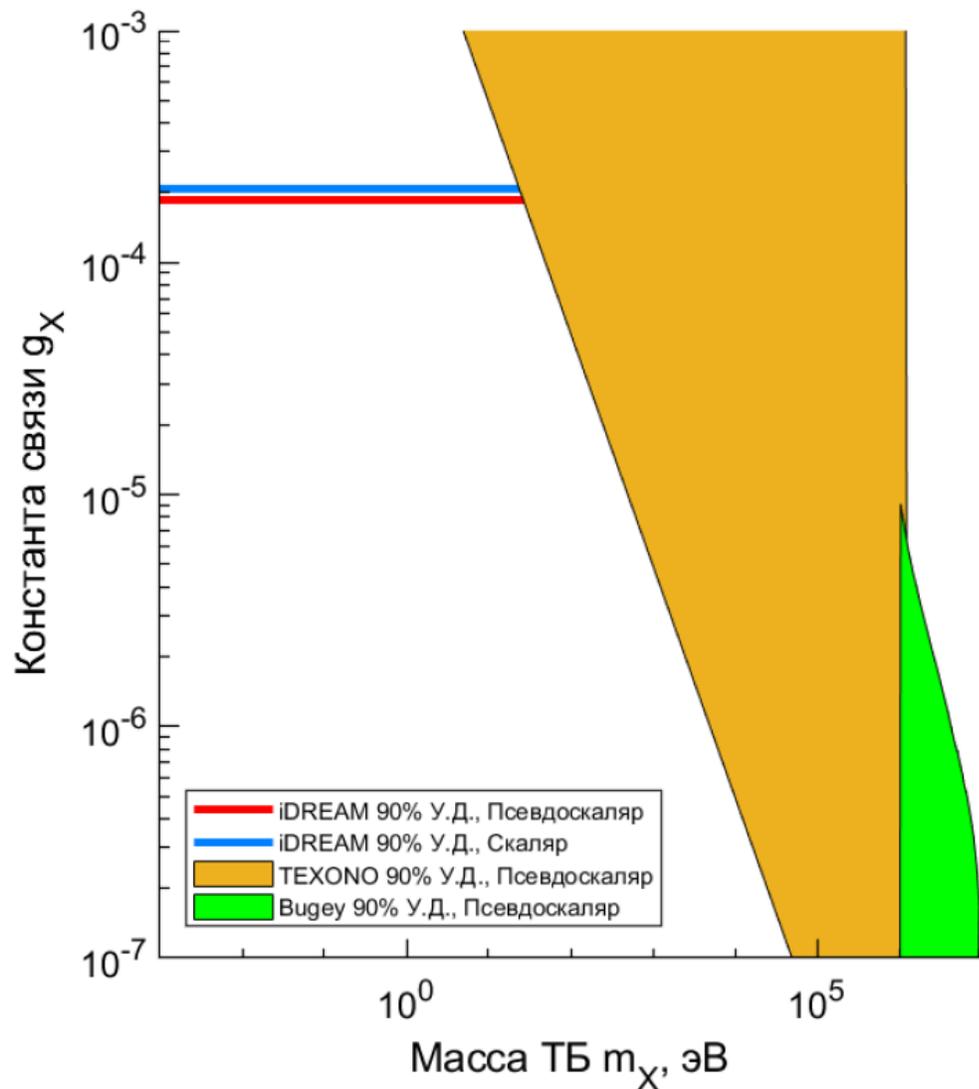
R_{th} - ожидаемая скорость счёта, $R_{DP}(m_X, g_X)$ - ожидаемая скорость счёта событий от ТБ, получаемая интегрированием энергетического спектра, $\sigma_{\gamma} = 10\%$ - относительная ошибка спектра γ -квантов, ΔR_{syst} - систематическая погрешность скорости счёта, θ_{γ} , θ_{syst} - штрафные параметры неопределённости спектра γ -квантов в АЗ и систематической ошибки ΔR_{syst} скорости счёта одиночных событий

ФУНКЦИЯ ПРАВДОПОДОБИЯ

$$L = \frac{R_{th}^{R_{exp}}}{R_{exp}!} e^{-R_{th}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_\gamma^2}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_{syst}^2}{2}}$$

Из максимизации L по всем параметрам $(m_X, g_X, \theta_\gamma, \theta_{syst})$ и условно (по штрафным параметрам $(\theta_\gamma, \theta_{syst})$ при фиксированных параметрах m_X, g_X и выбранного уровня достоверности (90%) можно получить ограничения на параметры модели ТБ

ПРЕДЕЛЫ



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- На основе данных нейтринного детектора iDREAM на Калининской АЭС установлены ограничения на константу связи псевдоскалярных $g_X < 1.9 \cdot 10^{-4}$ (90% У.Д.) и скалярных $g_X < 2.1 \cdot 10^{-4}$ (90% У.Д.) темных бозонов с заряженными лептонами Стандартной модели. В работе предполагалось, что темный бозон может образоваться в активной зоне ядерного реактора в процессе рассеяния гамма-квантов на электронах и быть зарегистрирован нейтринным детектором в обратном процессе. Для получения ограничений были использованы данные о составе активной зоны промышленного реактора и долях делений нуклидов, соответствующих выбранному для анализа периоду набора статистики.
- В диапазоне масс темного бозона $10^{-10} \leq m_X \leq 30$ эВ имеющиеся в литературе строгие ограничения на константу g_X , следующие из массива астрофизических данных, впервые дополнены экспериментальными результатами реакторного нейтринного эксперимента в рамках модельно-независимого подхода.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

