

ПОИСК БОЗОННОЙ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ НЕЙТРИННЫМ ДЕТЕКТОРОМ IDREAM НА КАЛИНИНСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Выполнил: Студент группы М23-114 Киселев Кирилл Клаудиович

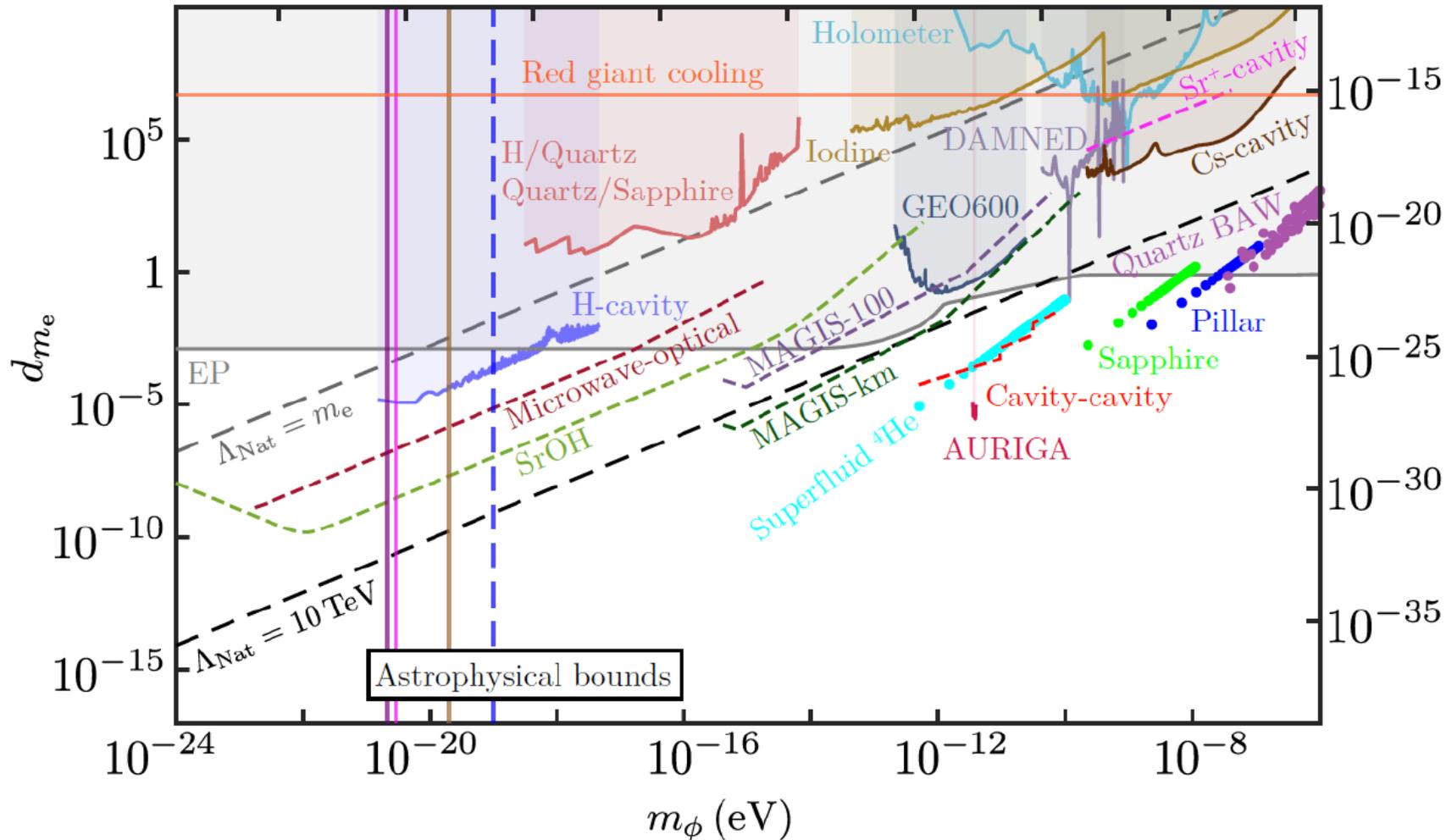
Научный руководитель: к.ф.-м.н. Литвинович Евгений Александрович



ЦЕЛЬ РАБОТЫ

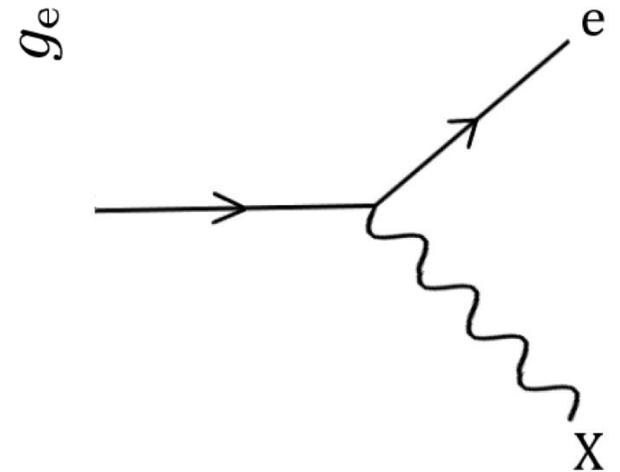
- **Цель работы:** исследовать чувствительность детектора **iDREAM** к тёмным бозонам.
- **Задачи:**
 - Рассмотреть модель тёмных бозонов (скалярных, псевдоскалярных и векторных) и рассчитать ожидаемый энергетический спектр событий для детектора **iDREAM**, предсказываемый этой моделью;
 - Получить ограничения на физические параметры модели тёмных бозонов: масса тёмного бозона m_χ , константа связи с заряженным током (электроном) Стандартной Модели g_χ .

(ПСЕВДО)СКАЛЯРНЫЕ ТЁМНЫЕ БОЗОНЫ



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

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



ТЁМНЫЕ ФОТОНЫ

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{1\mu\nu}^2 - \frac{1}{4} F_{2\mu\nu}^2 + \frac{1}{2} \mu_1^2 A_1^2 + \frac{1}{2} \mu_2^2 A_2^2 + j_\mu (e_1 A_{1\mu} + e_2 A_{2\mu})$$

Limits of electrodynamics: paraphotons. // Okun L. B. Gosudarstvennyj Komitet po Ispol'zovaniyu Atomnoj Ehnergii SSSR, 1982. - №. ITEP--48 (1982).

$$-4L_{\text{kin}}(\Lambda) = \chi_1 (F_1^{\mu\nu})^2 + \chi_2 (F_2^{\mu\nu})^2 + 2\chi F_1^{\mu\nu} F_{2\mu\nu}$$

Two U(1)'s and ϵ charge shifts // Holdom B. Physics Letters B. - 1986. - T. 166. - №. 2. - C. 196-198.

$$\mathcal{L}_0 = -\frac{1}{4} F_{a\mu\nu} F_a^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{b\mu\nu} F_b^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2} F_{a\mu\nu} F_b^{\mu\nu}$$

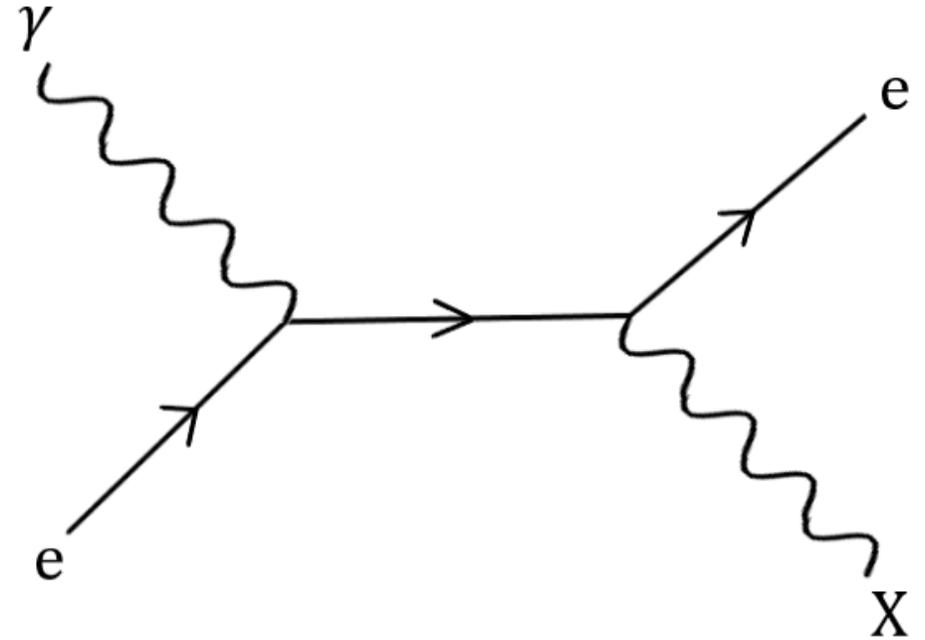
$$\mathcal{L} = e J_\mu A_b^\mu + e' J'_\mu A_a^\mu$$

The physics of the dark photon: a primer. // Fabbrichesì M., Gabrielli E., Lanfranchi G. Cham, Switzerland : Springer, 2021.

$$\mathcal{L} \supset -g_X \bar{\psi} \gamma^\mu \psi X_\mu$$

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

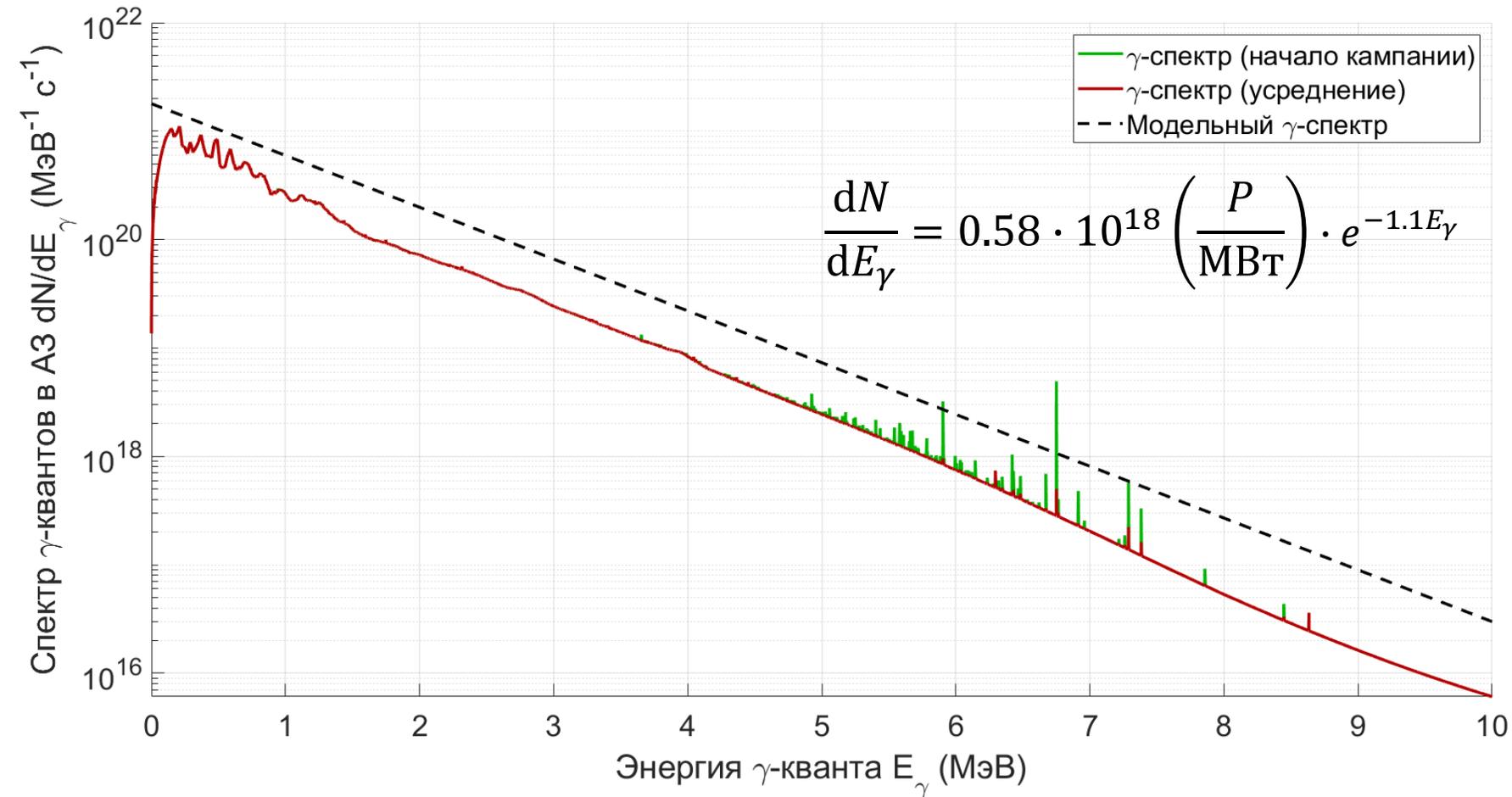
Gd-155 и **Gd-157** быстро «выгорают», что необходимо учитывать усреднением скорости счёта:

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

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



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

Вклад погрешностей:

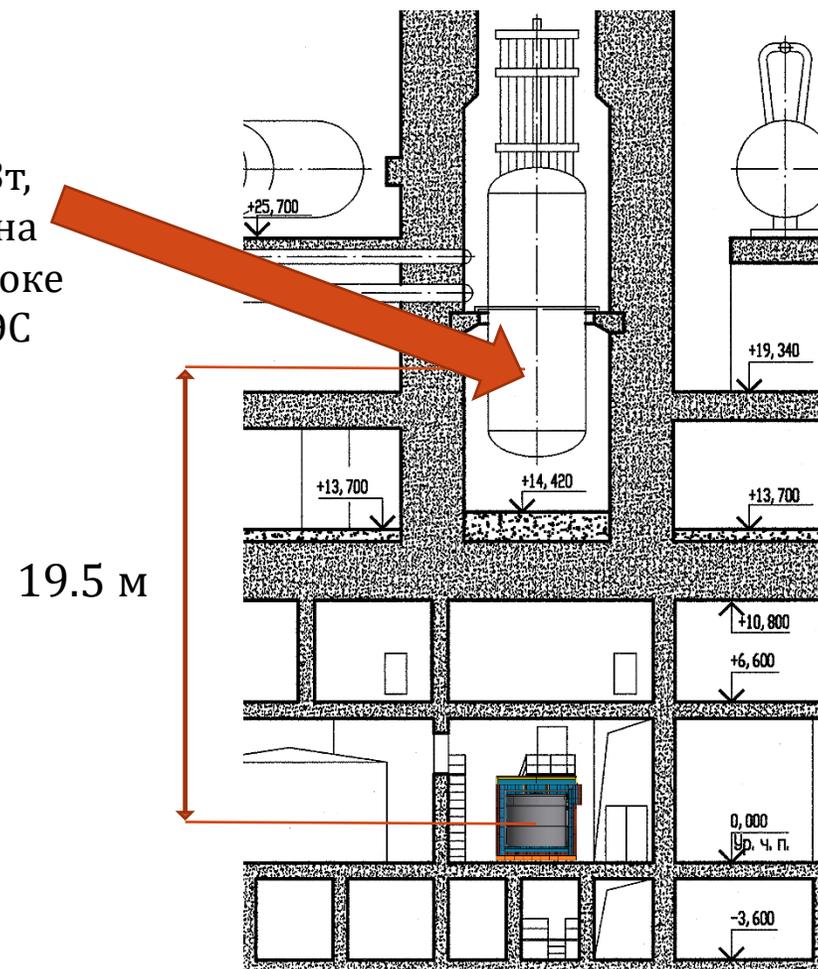
- Погрешности множественности γ -квантов ($\sim 7\%$)
- Ошибки долей деления α_i ($\sim 4\%$)
- Ошибки тепловой мощности P_{th} ($\sim 2\%$)
- Ошибки интенсивности линий (n, γ) -реакций ($\sim 2\%$)

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. Скобелева
- Мишень: 1 т гадолинизированного жидкого органического сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола (1.1 м³)
- Сбор данных начался в 2021 году

ВВЭР-1000
мощностью 3 ГВт,
установленный на
третьем энергоблоке
Калининской АЭС



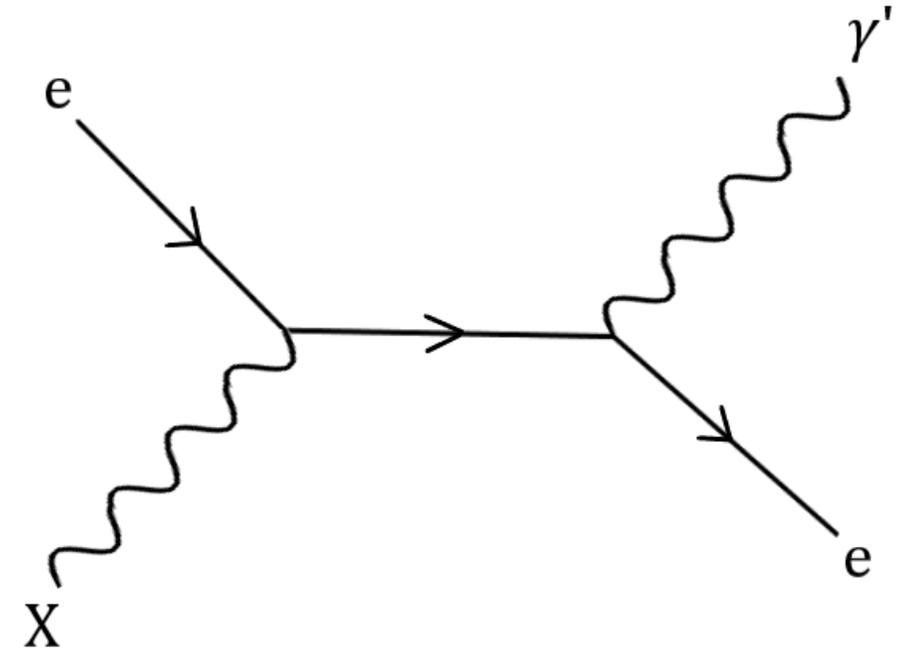
РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM

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

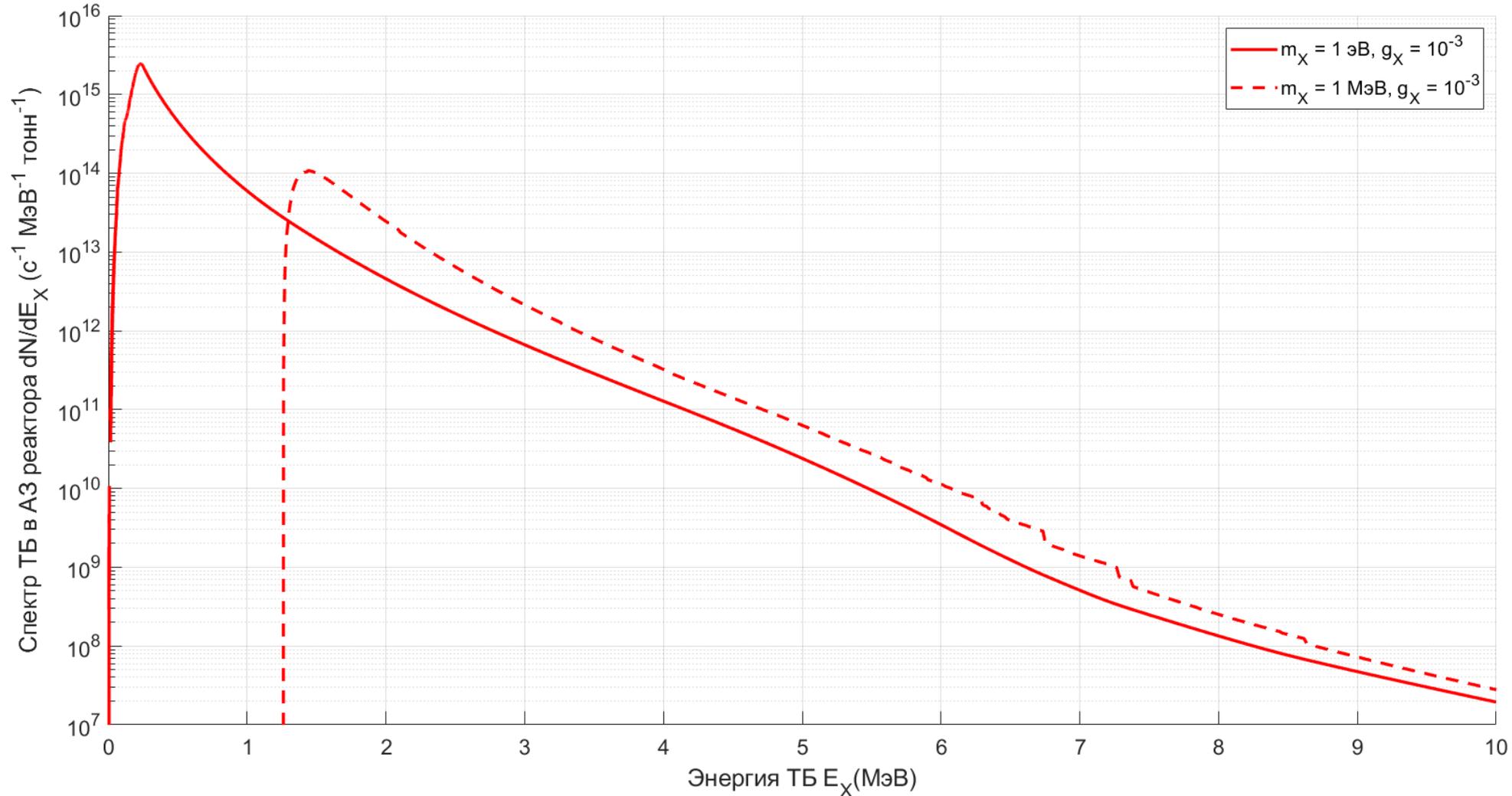
Предполагается, что в однородном сцинтилляционном детекторе вторичный γ -квант и электрон отдачи регистрируются как одно событие.

Спектры тёмных бозонов, рождённых в АЗ:

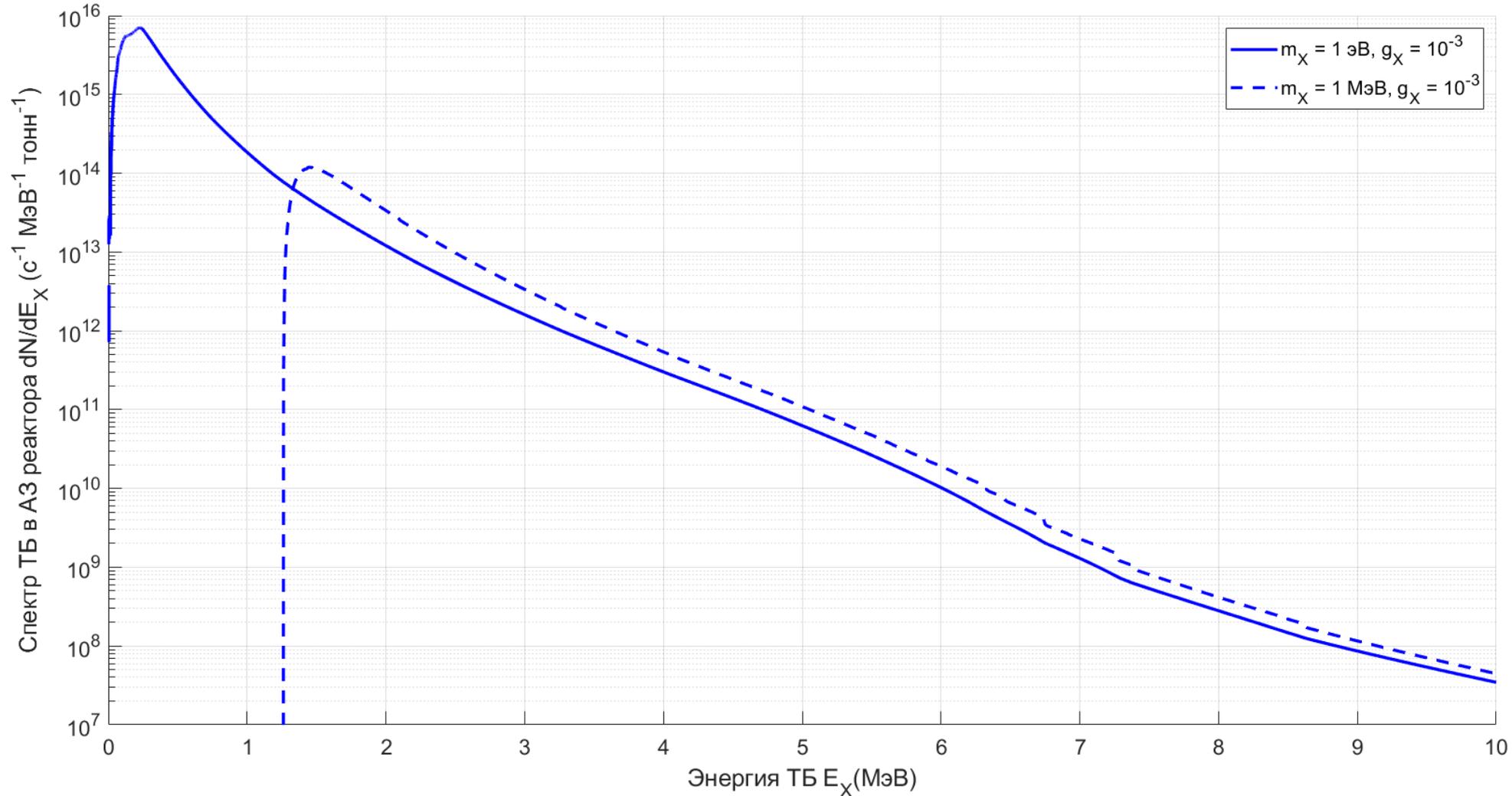
$$\frac{dN}{dE_X} = \int \frac{1}{\sigma_{\text{tot}} + \sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}} \frac{d\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}}{dE_X} \frac{dN}{dE_\gamma} dE_\gamma$$



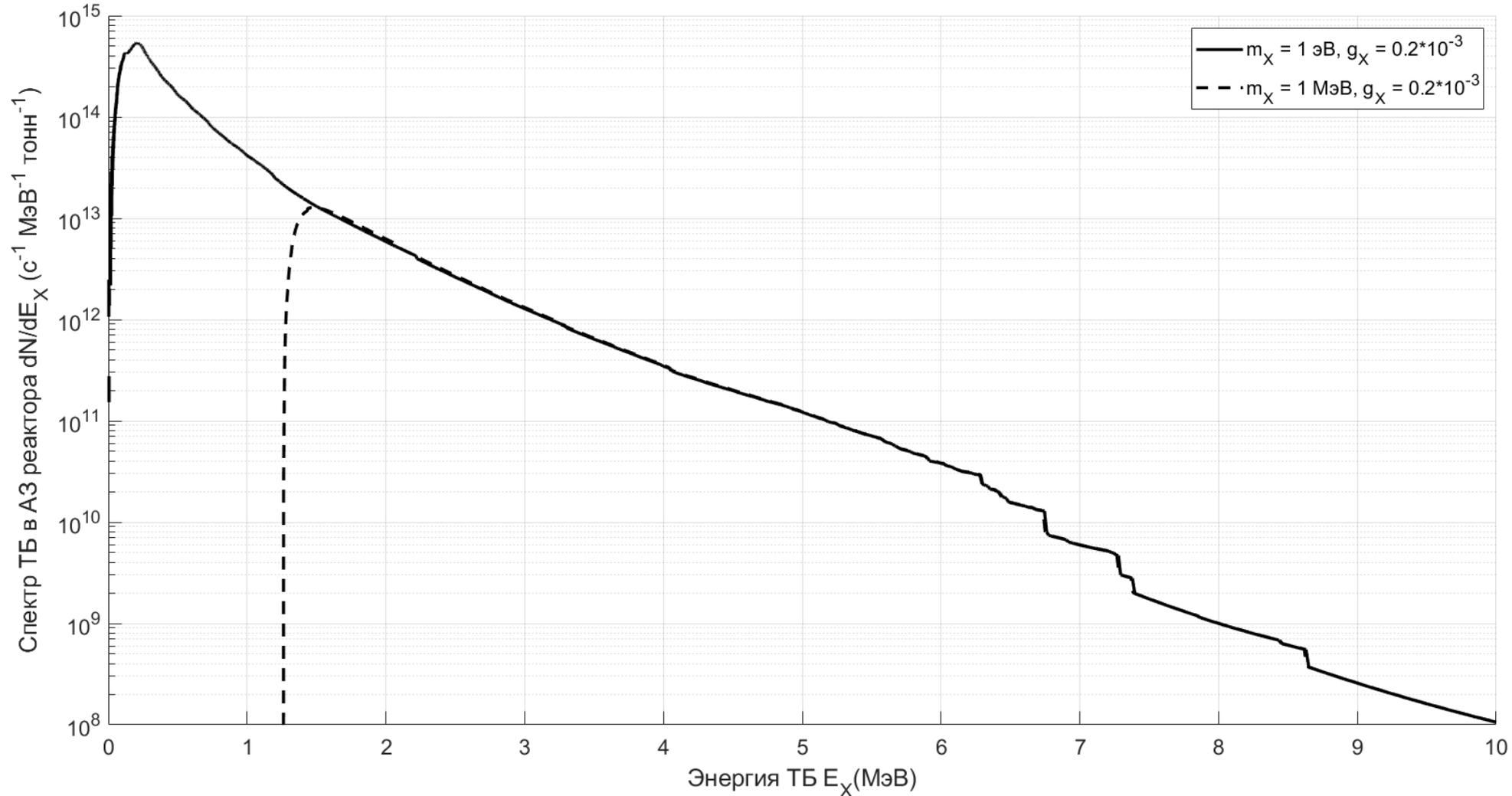
СПЕКТРЫ ТЁМНЫХ БОЗОНОВ В АЗ (ПСЕВДОСКАЛЯРЫ)



СПЕКТРЫ ТЁМНЫХ БОЗОНОВ В АЗ (СКАЛЯРЫ)



СПЕКТРЫ ТЁМНЫХ БОЗОНОВ В АЗ (ВЕКТОРЫ)

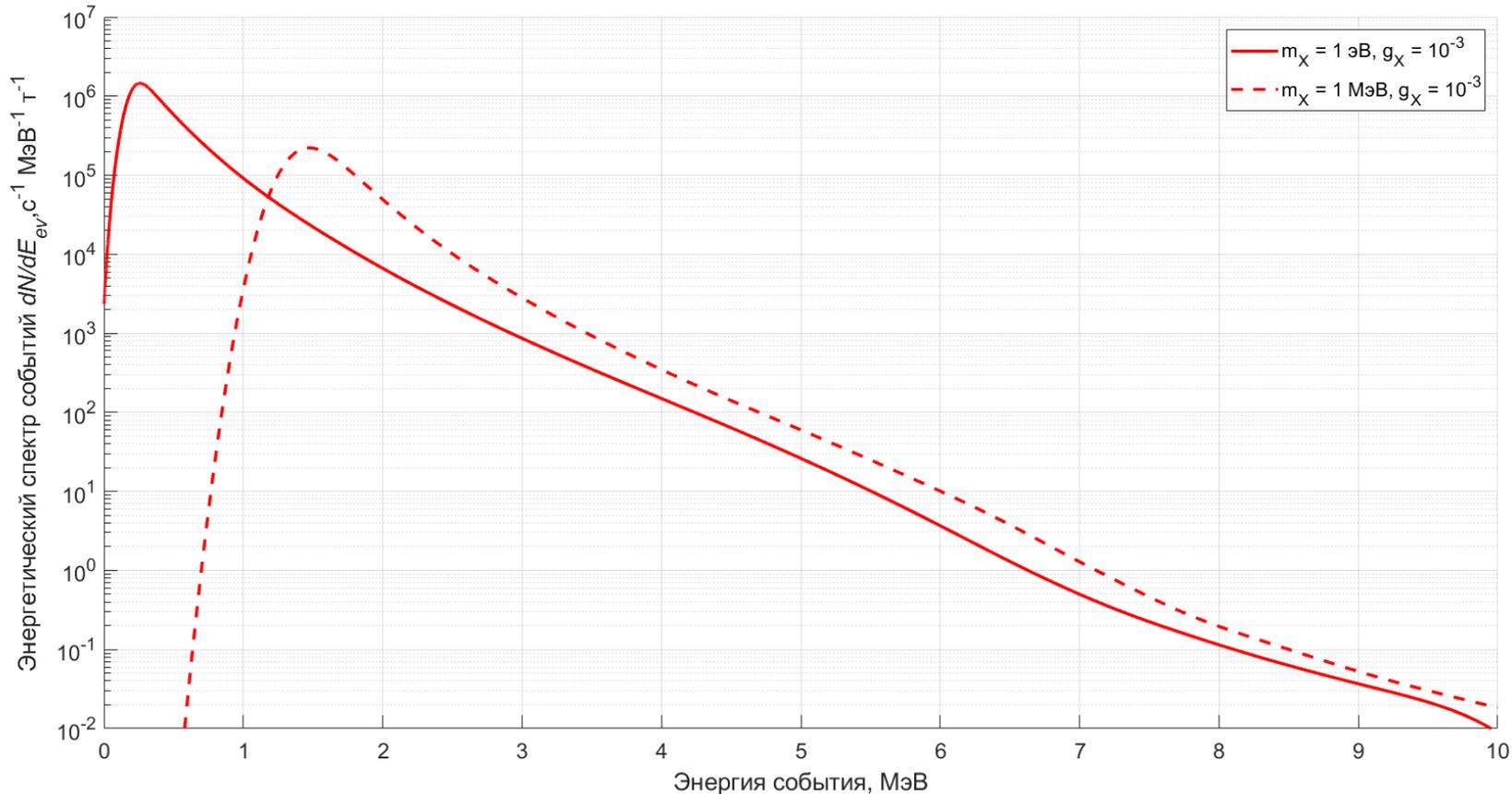


ОЖИДАЕМЫЕ СПЕКТРЫ СОБЫТИЙ В iDREAM

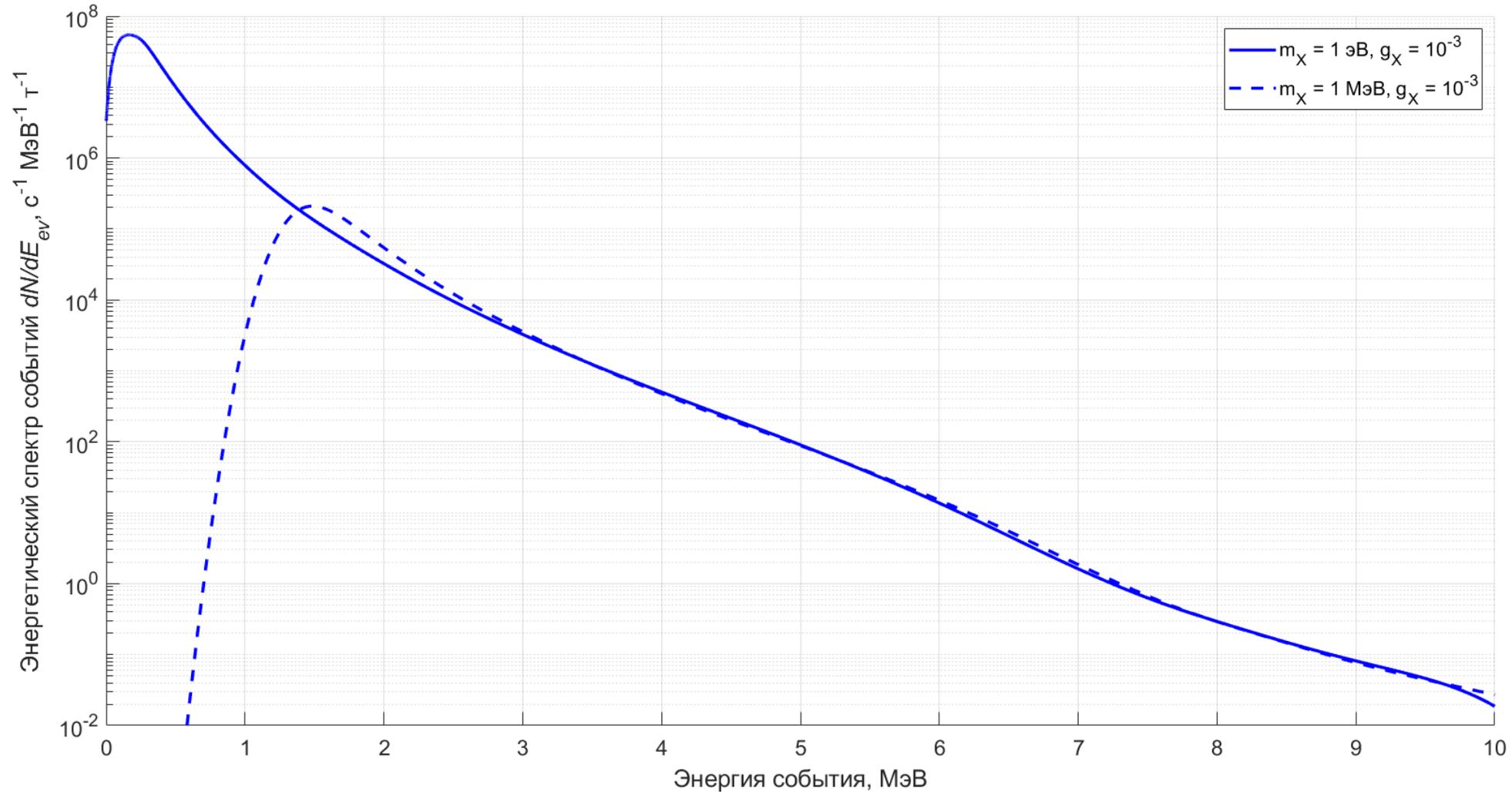
Ожидаемые спектры событий в iDREAM после учёта

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

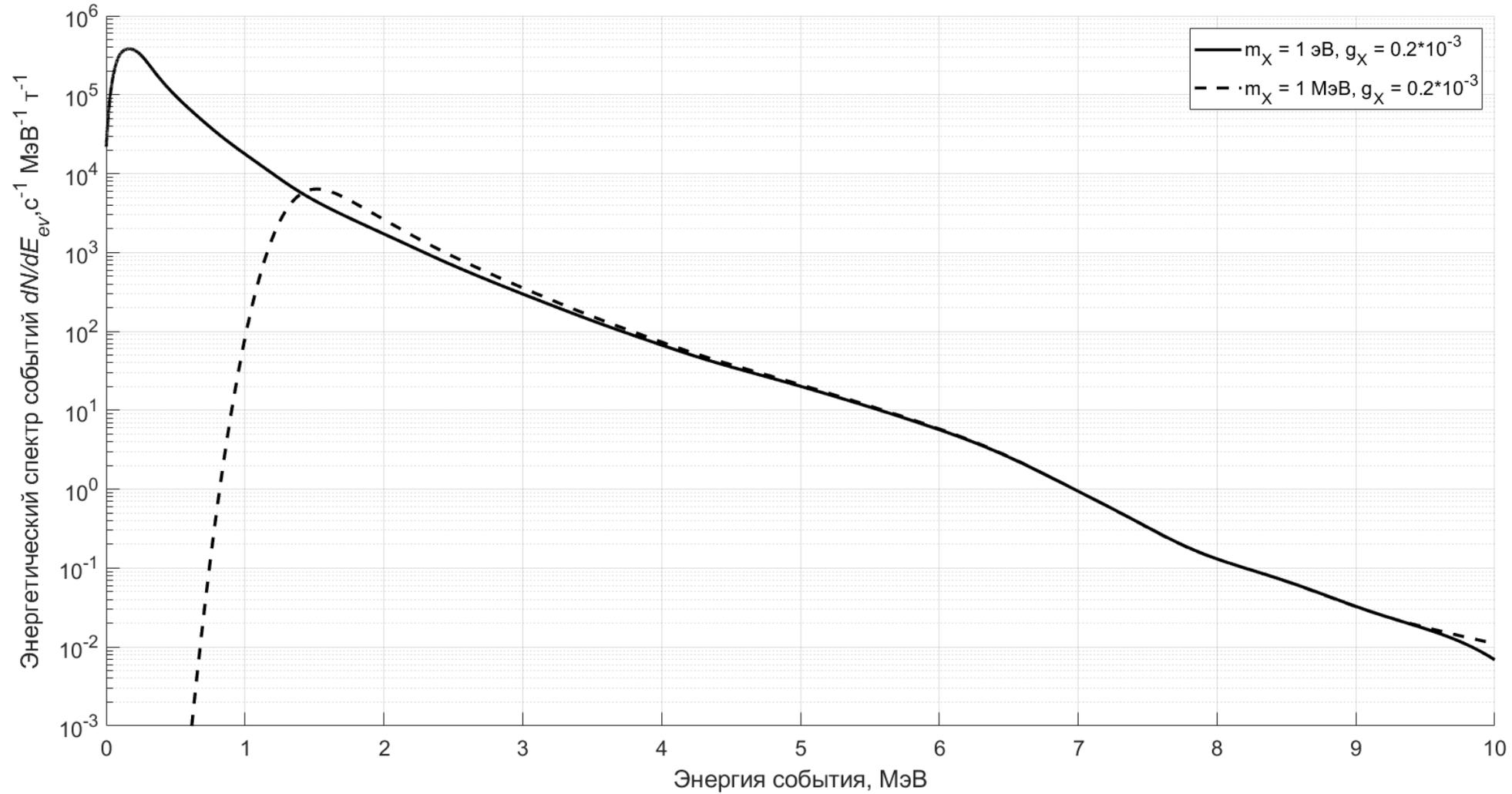
$$\frac{dN}{dE_{ev}} = \frac{N_e T}{4\pi R^2} \int \frac{d\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e}}{dE_{\gamma'}} \frac{dN}{dE_X} \exp(-R\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e} n_e) dE_{\gamma'}$$



ОЖИДАЕМЫЕ СПЕКТРЫ СОБЫТИЙ В IDREAM (СКАЛЯРЫ)



ОЖИДАЕМЫЕ СПЕКТРЫ СОБЫТИЙ В IDREAM (ВЕКТОРЫ)



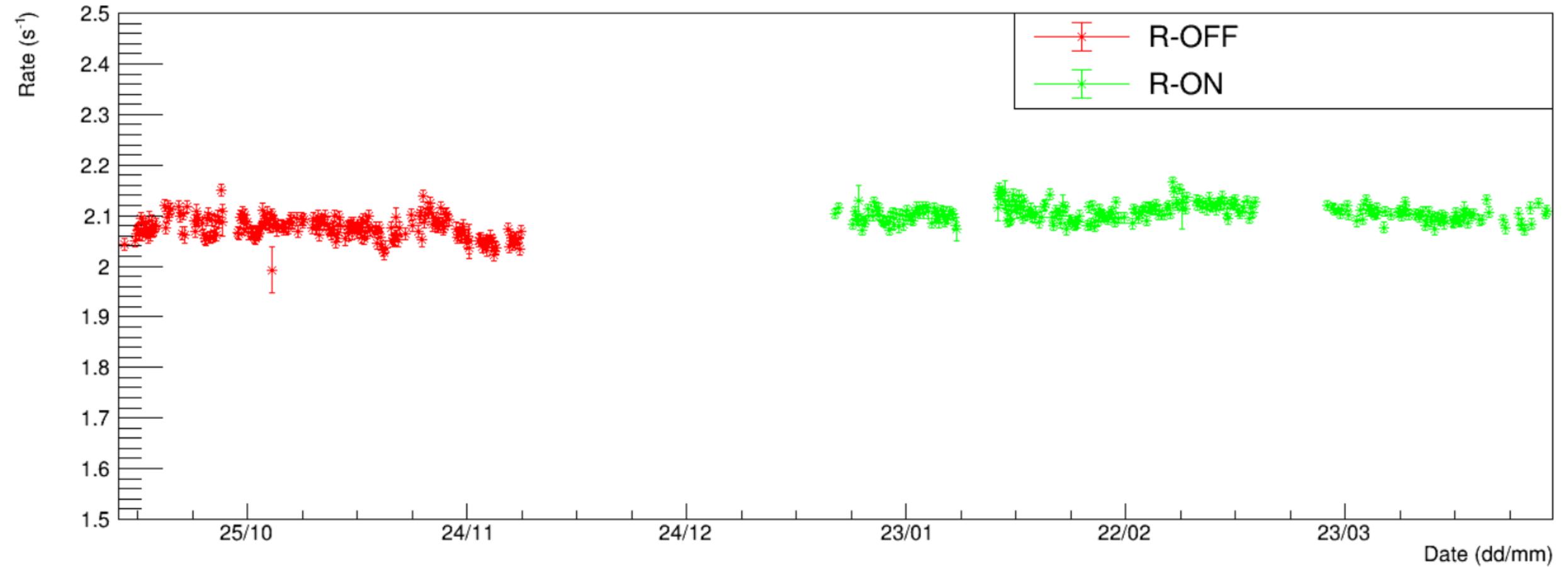
ОТБОР СОБЫТИЙ

Отбор событий кандидатов:

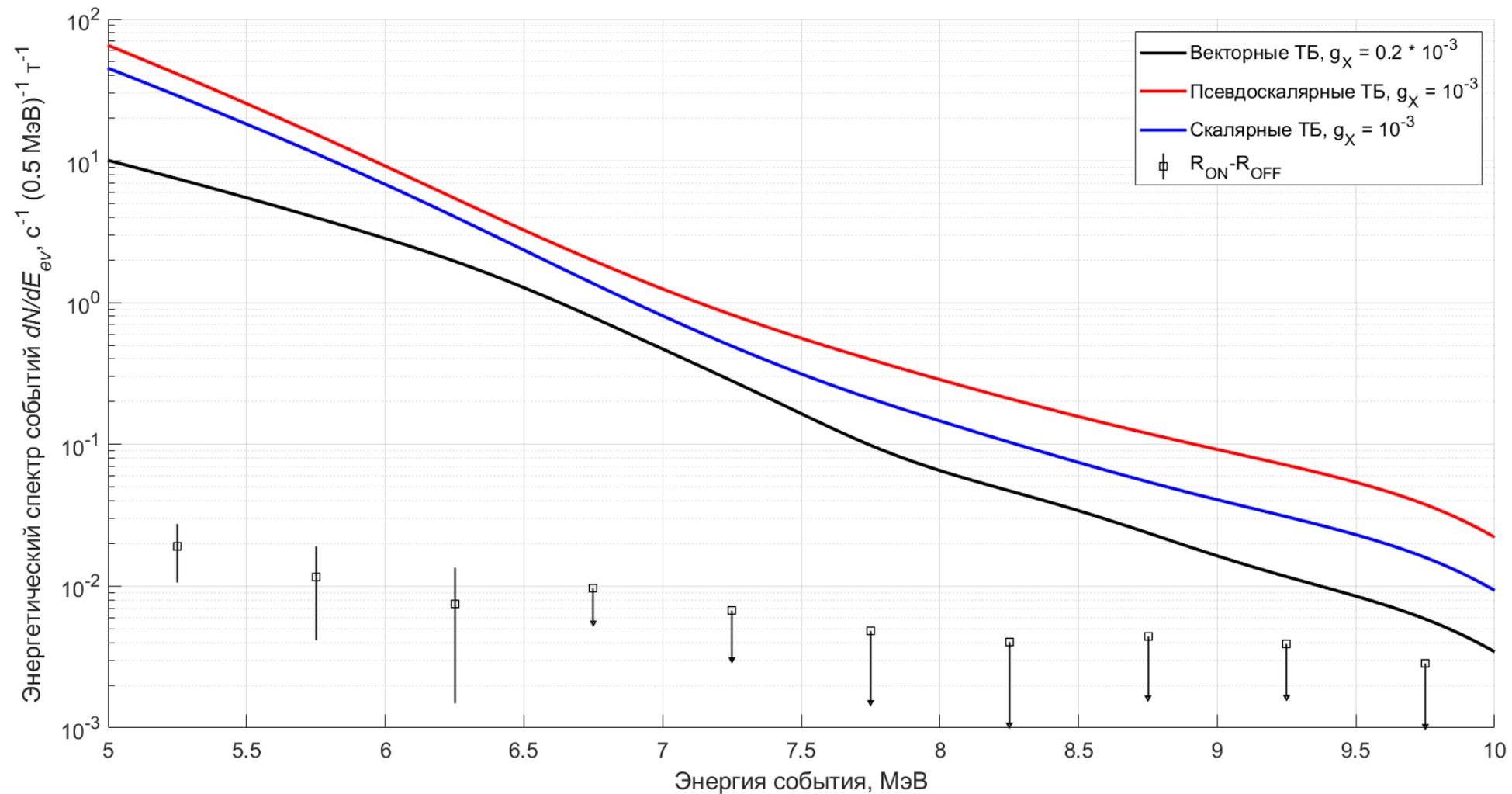
- Мюонное вето 150 мкс (мюон - сигнал в мюонных пластинах или "мюонная" форма импульса в мишени)
- Одиночные события (нет других событий до/после 100 мкс)
- Исследован один энергетический бин: 5-10 МэВ.

	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



ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДЕТЕКТОРА К ТЁМНЫМ БОЗОНАМ



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

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

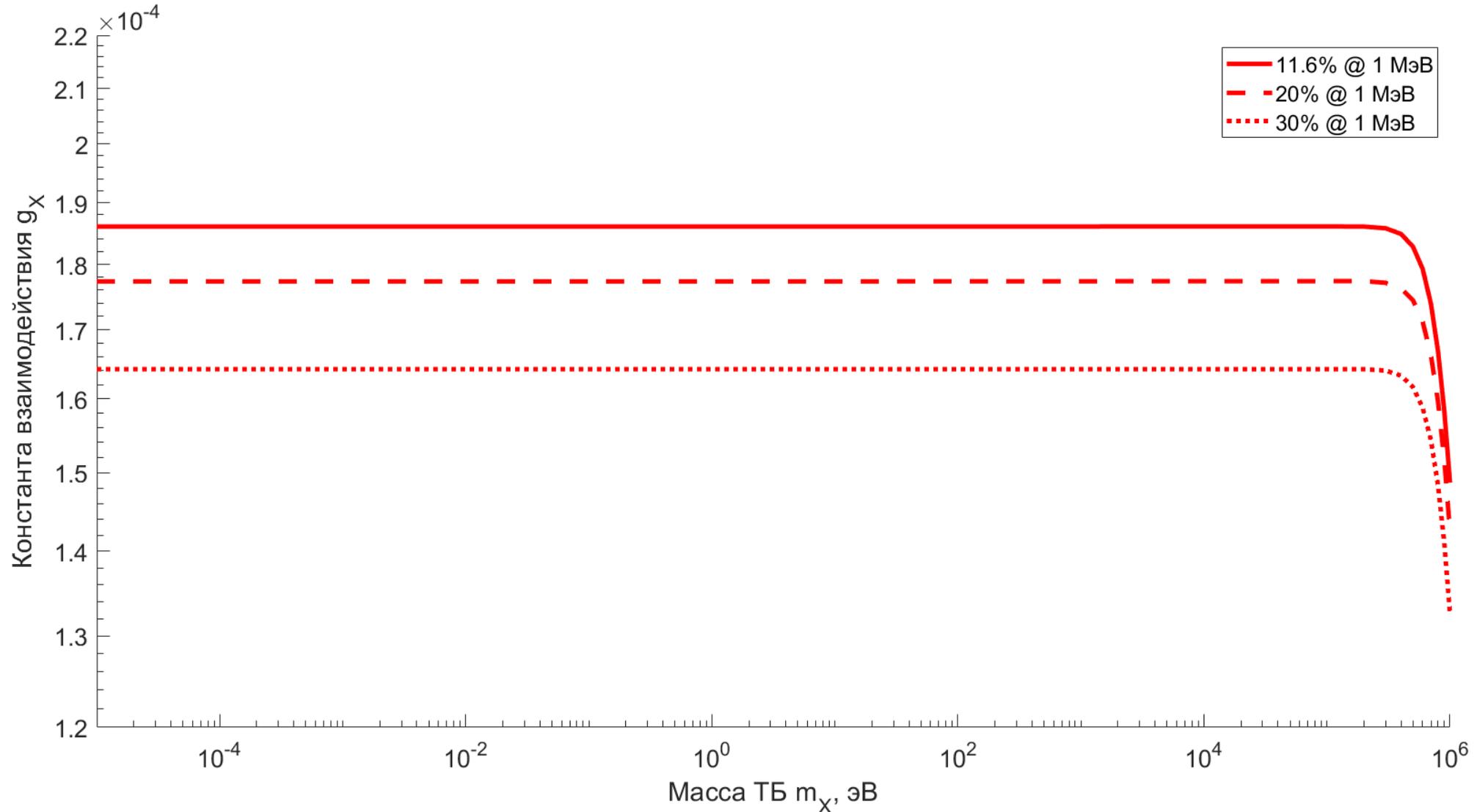
R_{th} - ожидаемая скорость счёта, $R_{DP}(m_X, g_X)$ - ожидаемая скорость счёта событий от ТБ, получаемая интегрированием энергетического спектра, $\sigma_{\gamma} = 10\%$ - относительная ошибка спектра γ -квантов, ΔR_{syst} - систематическая погрешность скорости счёта, θ_{γ} , θ_{syst} - штрафные параметры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

ФУНКЦИЯ ПРАВДОПОДОБИЯ

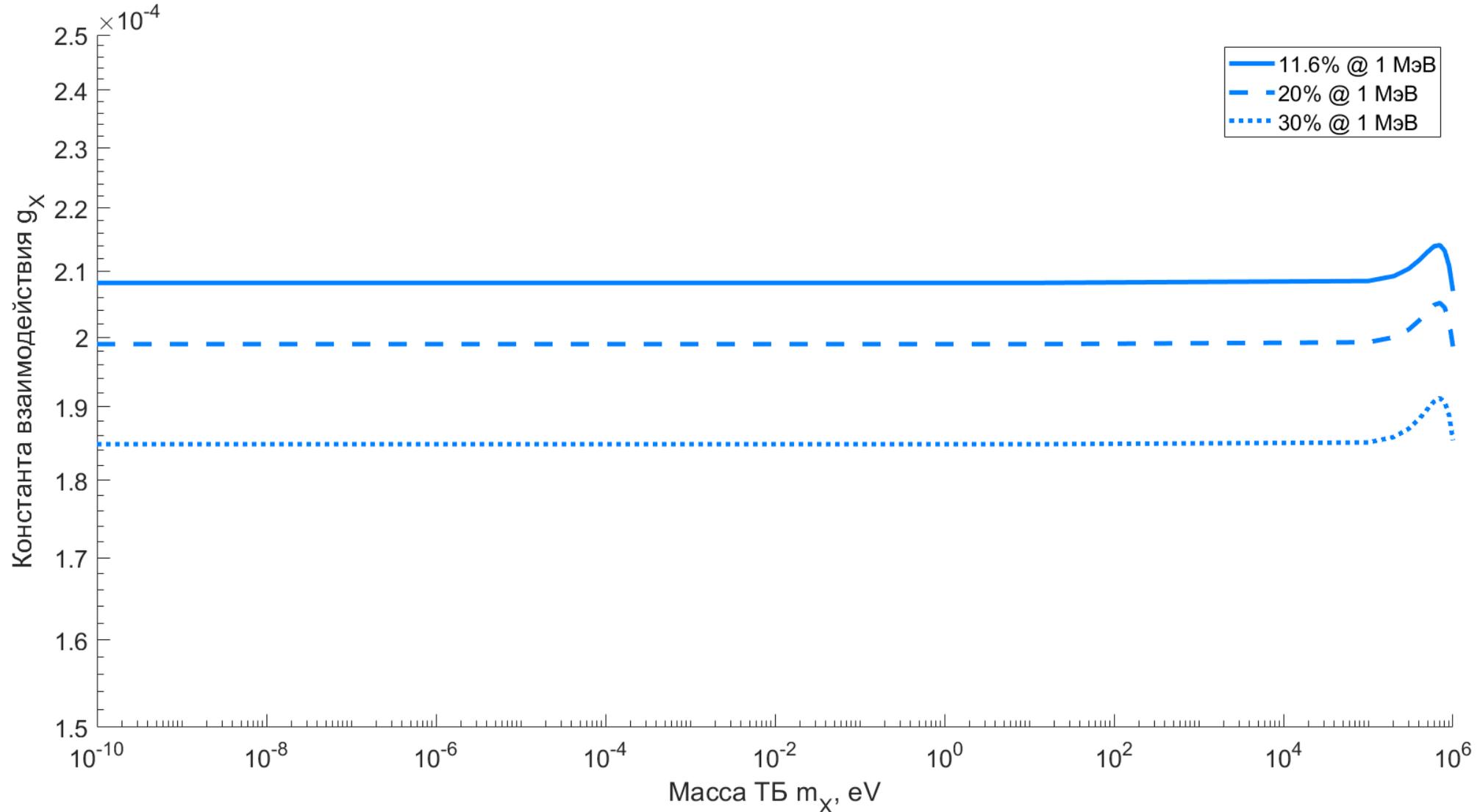
$$L = \frac{R_{th}^{R_{exp}}}{R_{exp}!} e^{-R_{th}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_\gamma^2}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_{syst}^2}{2}}$$

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

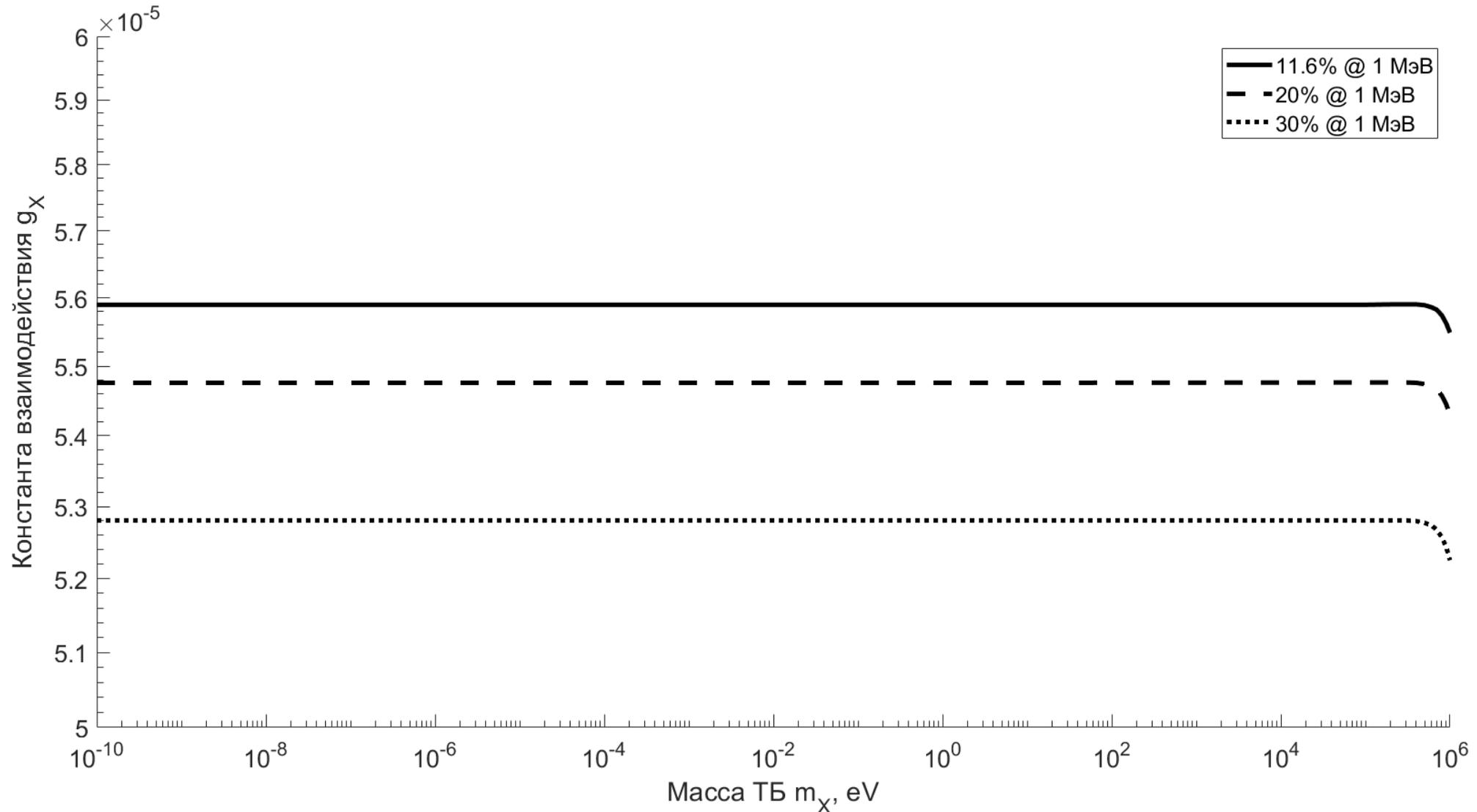
ОГРАНИЧЕНИЯ: ЭФФЕКТ РАЗРЕШЕНИЯ ДЕТЕКТОРА (ПСЕВДОСКАЛЯРЫ)



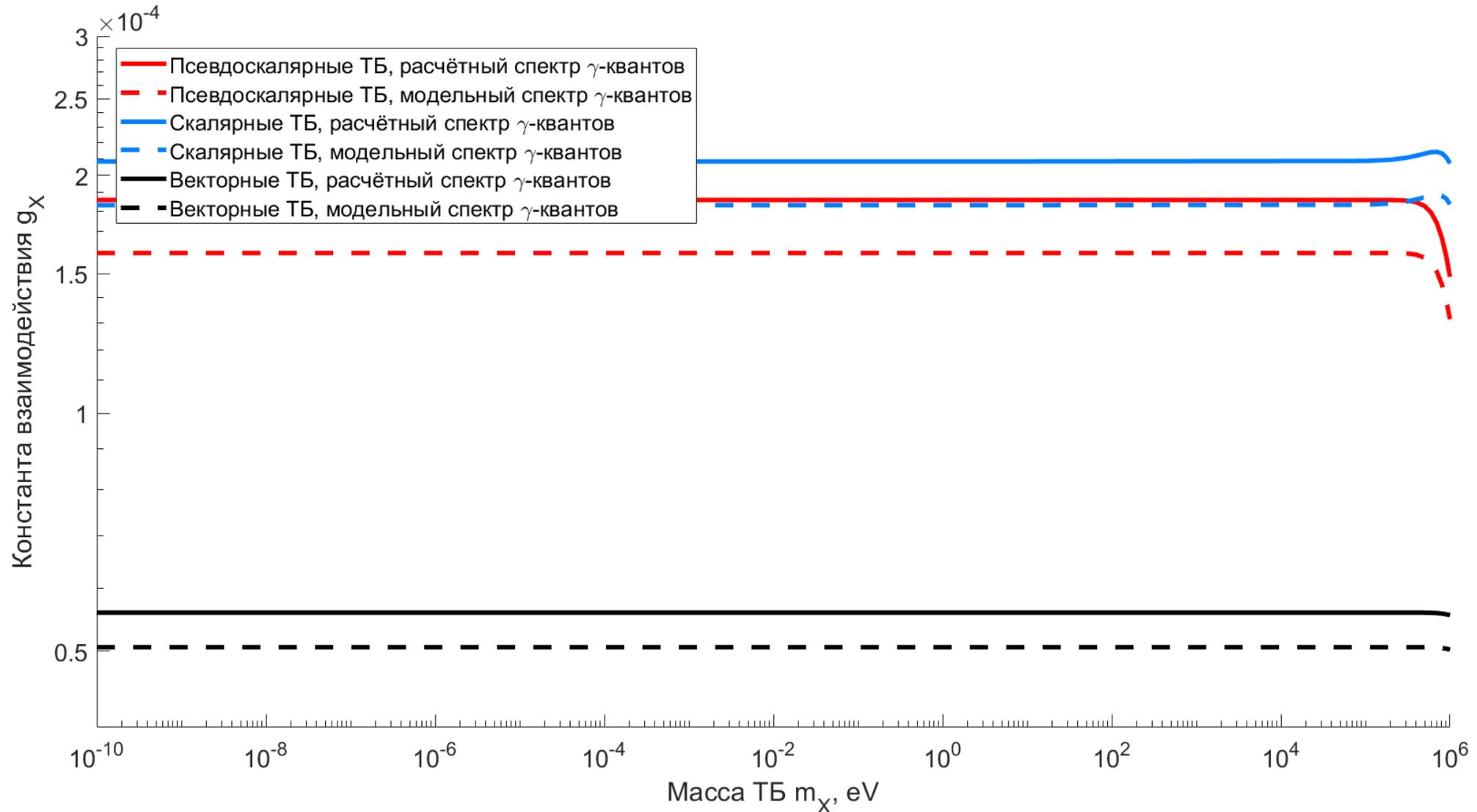
ОГРАНИЧЕНИЯ: ЭФФЕКТ РАЗРЕШЕНИЯ ДЕТЕКТОРА (СКАЛЯРЫ)



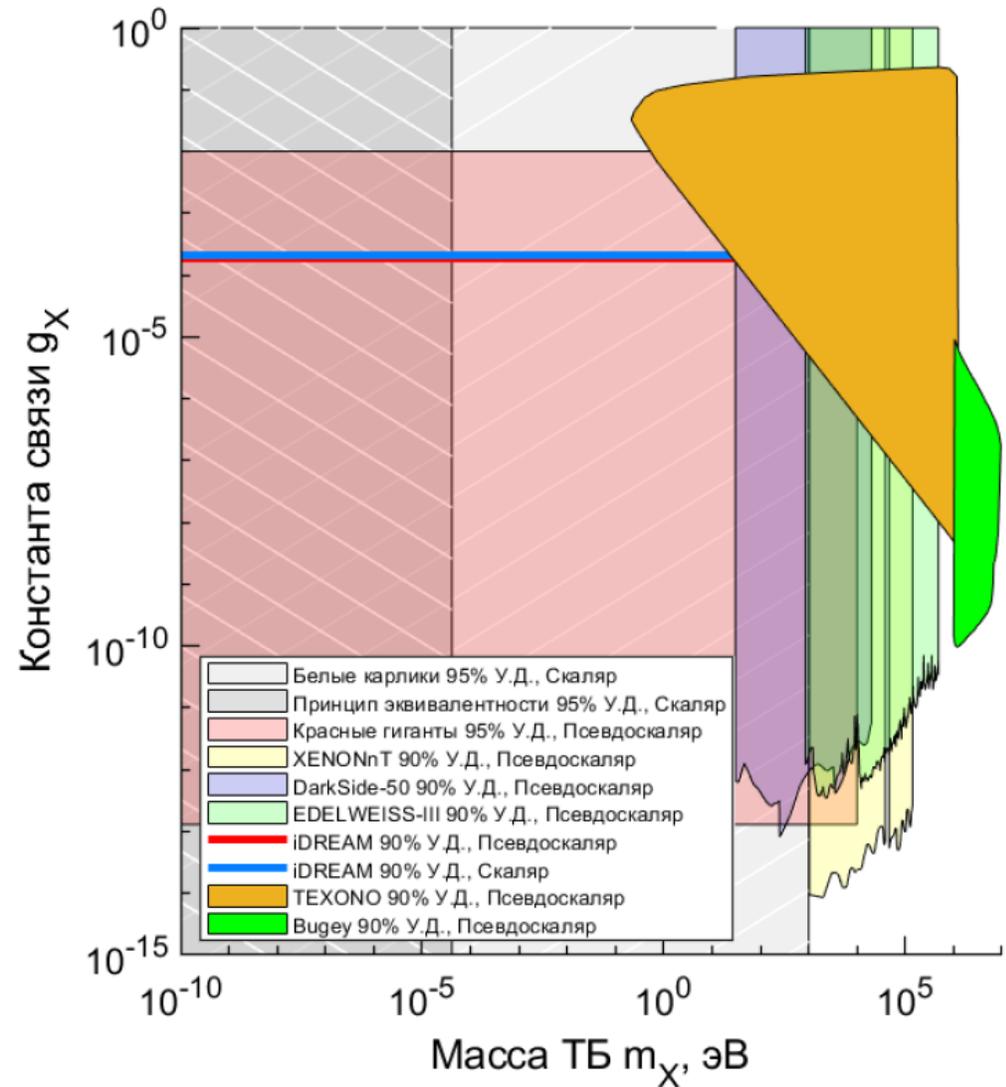
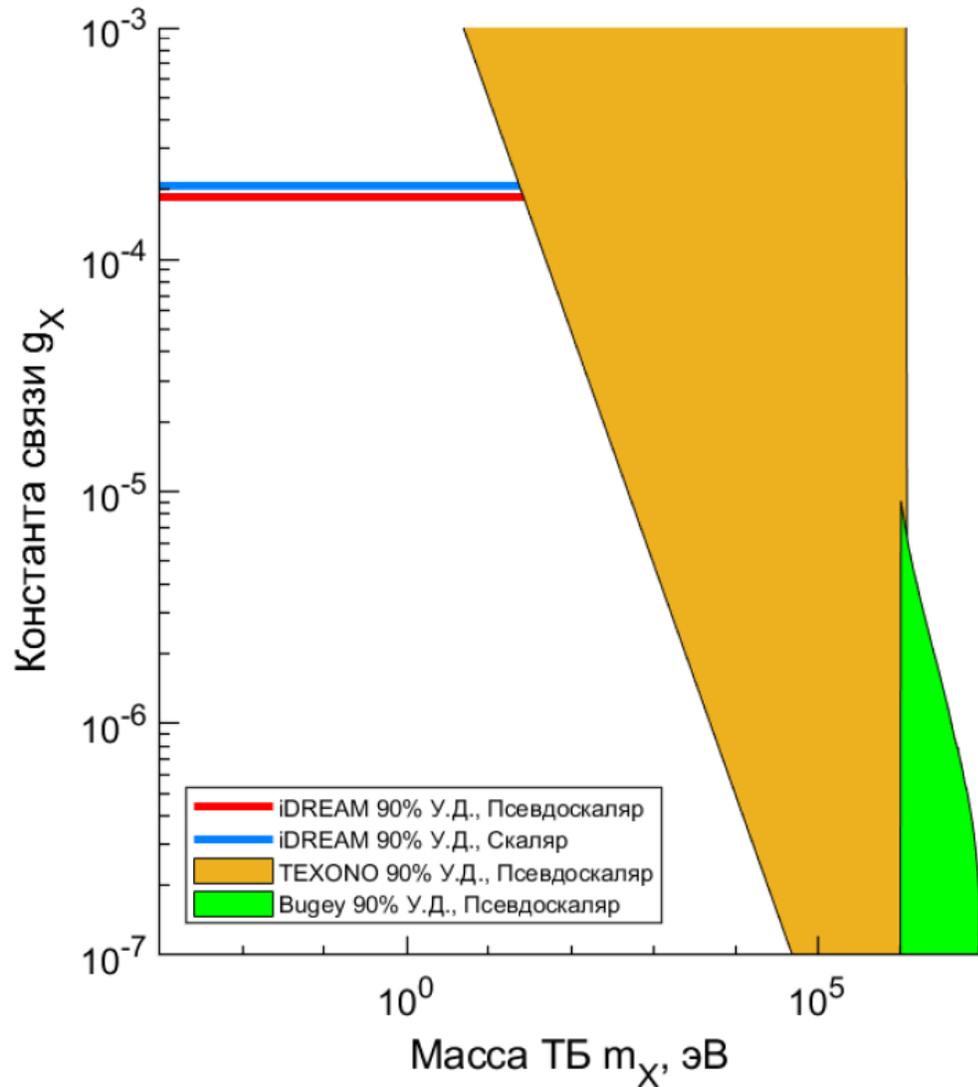
ОГРАНИЧЕНИЯ: ЭФФЕКТ РАЗРЕШЕНИЯ ДЕТЕКТОРА (ВЕКТОРЫ)



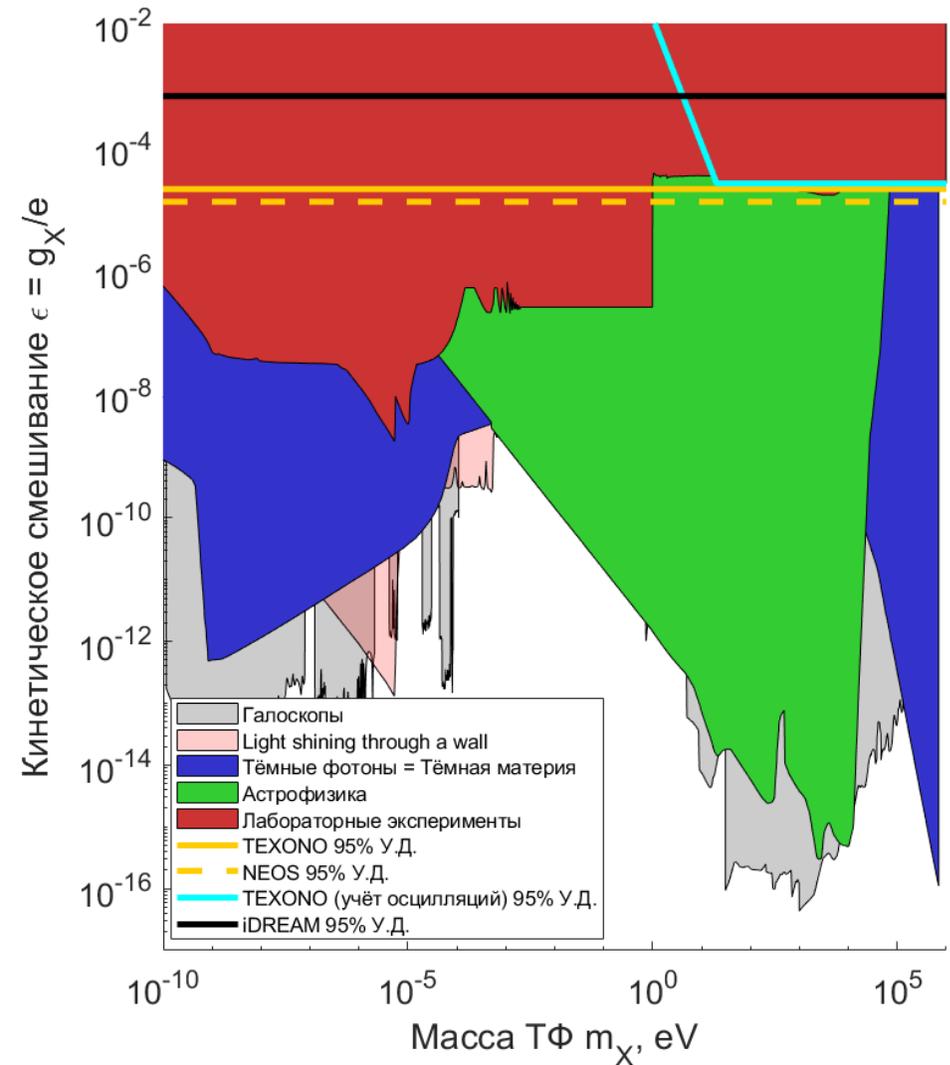
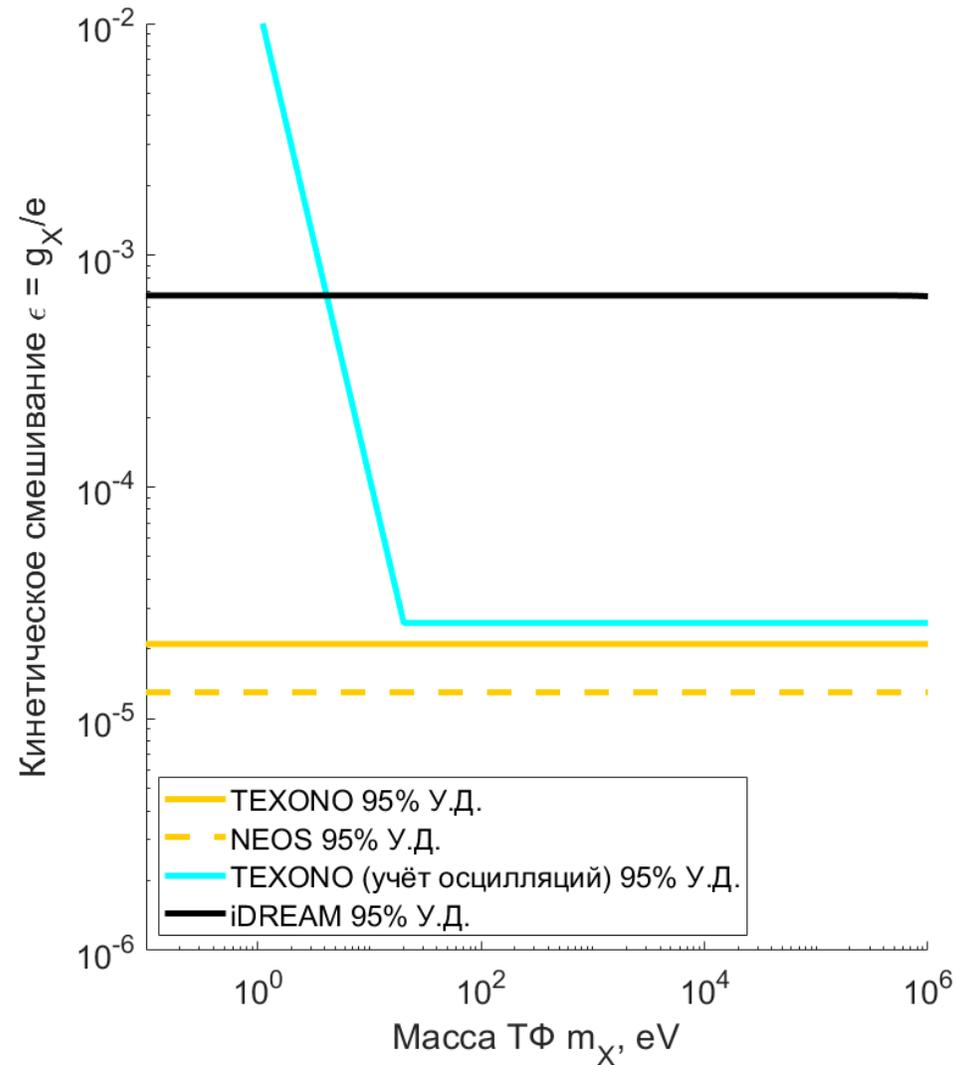
ОГРАНИЧЕНИЯ: СПЕКТРЫ γ -КВАНТОВ



ОГРАНИЧЕНИЯ: СКАЛЯРЫ И ПСЕВДОСКАЛЯРЫ



ОГРАНИЧЕНИЯ: ТЁМНЫЕ ФОТОНЫ



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Рассмотрены три модели тёмных бозонов: **псевдоскалярные и скалярные ТБ и ТФ (векторные ТБ)**; исходя из предположения, что ТБ может образоваться в активной зоне ядерного реактора в процессе рассеяния γ -квантов на электронах и быть зарегистрирован нейтринным детектором в обратном процессе, **рассчитаны ожидаемые скорости счёта событий взаимодействия ТБ в чувствительном объёме детектора iDREAM.**
- На основе данных нейтринного детектора iDREAM на Калининской АЭС для **псевдоскалярных и скалярных ТБ установлены ограничения на константу связи с заряженными лептонами Стандартной модели: $g_X < 1.9 \cdot 10^{-4}$ и $g_X < 2.1 \cdot 10^{-4}$ (90% У.Д.);** 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.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Аналогичные **ограничения** получены для модели **векторных ТБ (тёмных фотонов)**: $g_X < 5.6 \cdot 10^{-5}$; однако, вследствие необходимости учёта осцилляций ТБ и фотонов СМ, полученные ограничения только подтверждают результаты предыдущих экспериментов.
- Исследовано влияние неоднородности светосбора в детекторе iDREAM, выражающейся в изменении энергетического разрешения в зависимости от положения события в чувствительном объёме детектора, на получаемые результаты; **ограничения на параметры трёх моделей ТБ** получены для трёх значений относительного энергетического разрешения: **11.6%, 20% и 30%**.
- Для трёх моделей ТБ также **получены ограничения с использованием широко применяемой модели энергетического спектра γ -квантов в АЗ ядерного реактора**.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ



РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM

Run rate histogram

