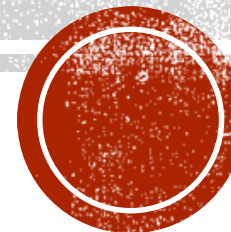


# ПОИСК СВЕРХЛЁГКИХ ТЁМНЫХ ФОТОНОВ ДЕТЕКТОРОМ IDREAM НА КАЛИНИНСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

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



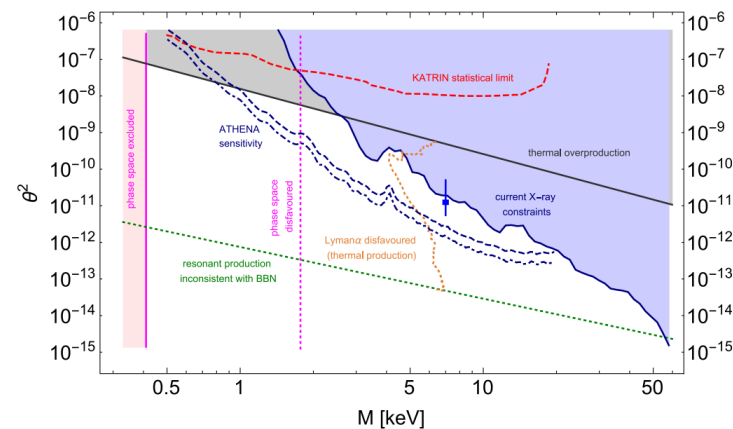
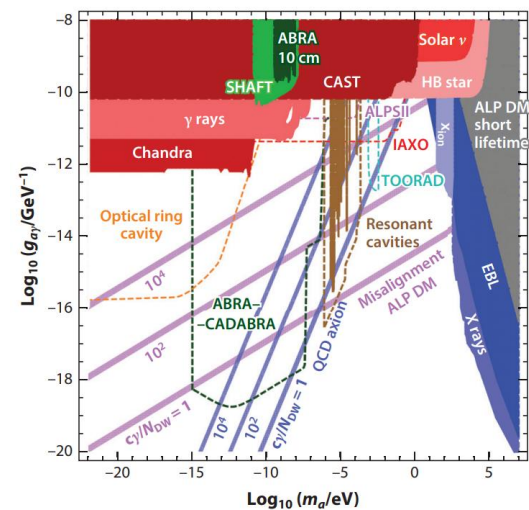
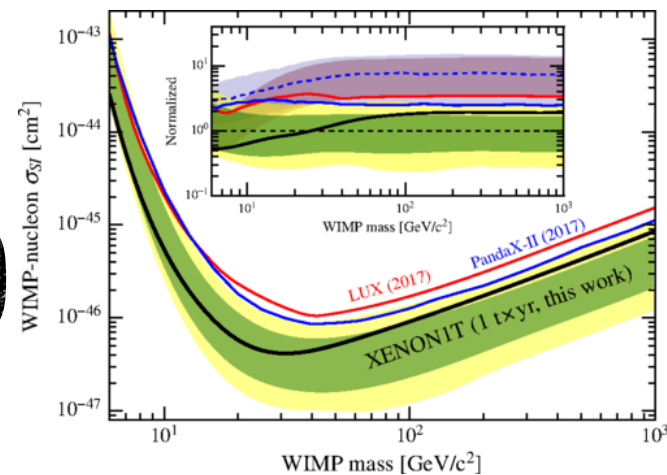
# ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- **Цель работы:** исследовать чувствительность детектора **iDREAM** к тёмным фотонам.
- **Задачи:**
  - Рассмотреть модель тёмных фотонов и рассчитать ожидаемый энергетический спектр событий для детектора **iDREAM**, предсказываемый этой моделью;
  - Разработать критерии отбора и произвести отбор событий-кандидатов в данных **iDREAM**;
  - Оценить вклад фона в измеряемую скорость счёта;
  - Получить ограничения на физические параметры модели тёмных фотонов: масса тёмного фотона  $m_\chi$ , константа связи с заряженным током Стандартной Модели  $g_\chi$ .

# КАНДИДАТЫ В ТМ (PDG)

R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022) and 2023 update

- WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)
- Аксионы и АПЧ (аксионо-подобные частицы)
- **Тёмные фотоны – кандидат в ТМ!**
- Стерильные нейтрино
- Скрытый сектор частиц и взаимодействий

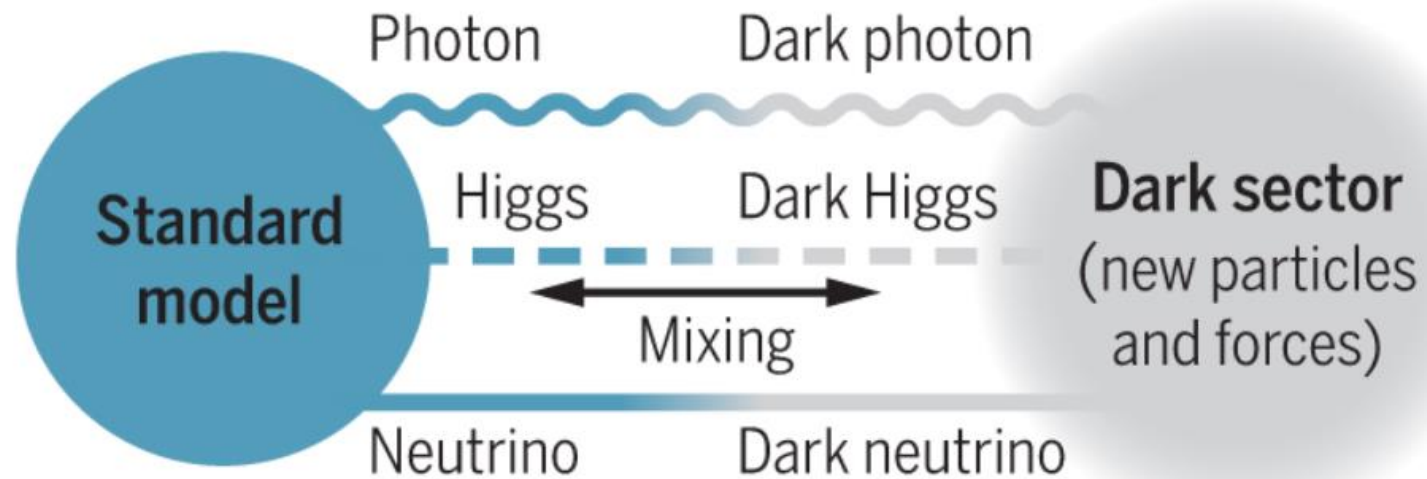


**Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T** // E. Aprile *et al.* (XENON Collaboration) Phys. Rev. Lett. **121**, 111302

**Recent progress in the physics of axions and axion-like particles** // Choi K., Im S. H., Shin C. S. Annual Review of Nuclear and Particle Science. – 2021. – T. 71. – C. 225-252.

**Sterile neutrino dark matter** // Boyarsky A. *et al.* Progress in Particle and Nuclear Physics. – 2019. – T. 104. – C. 1-45.

# ТЁМНЫЙ (СКРЫТЫЙ) СЕКТОР



Portal	Particles	Operator(s)
“Vector”	Dark photons	$-\frac{\epsilon}{2 \cos \theta_W} B_{\mu\nu} F'^{\mu\nu}$
“Axion”	Pseudoscalars	$\frac{a}{f_a} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}, \frac{a}{f_a} G_{i\mu\nu} \tilde{G}_i^{\mu\nu}, \frac{\partial_\mu a}{f_a} \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma^5 \psi$
“Higgs”	Dark scalars	$(\mu S + \lambda S^2) H^\dagger H$
“Neutrino”	Sterile neutrinos	$y_N L H N$

In search for unseen matter, physicists turn to dark sector // *SCIENCE* 24 Mar 2017 Vol 355, Issue 6331  
 Dark Sectors and New, Light, Weakly-Coupled Particles // Essig R. et al. arXiv preprint arXiv:1311.0029. – 2013.

# ВОЗМОЖНЫЕ ЗАПИСИ ЛАНГРАНЖИАНА ТЁМНЫХ ФОТОНОВ

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

**Limits of electrodynamics: paraxotons.** // 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  $\epsilon$  charge shifts** // Holdom B. Physics Letters B. - 1986. - T. 166. - №. 2. - C. 196-198.

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

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

$$\mathcal{L}_m = \frac{M_a^2}{2} A_a^\mu A_{a\mu} + \epsilon_m A_{a\mu} A_b^\mu + \frac{M_b^2}{2} A_b^\mu A_{b\mu}$$

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

# СПОСОБЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЁМНОГО ФОТОНА С СМ

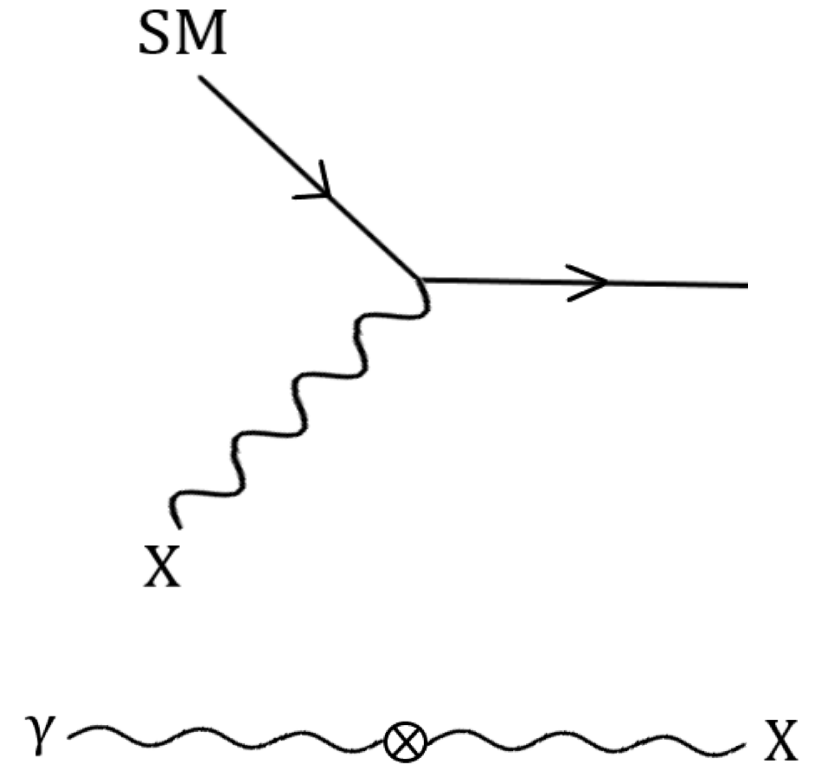
$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_X^2 X^\mu X_\mu - g_X J_\mu X^\mu$$

**Light dark bosons in the JUNO-TAO neutrino detector** // Smirnov M. et al.  
Physical Review D. – 2021. – Т. 104. – №. 11. – С. 116024.

**Detecting dark photons with reactor neutrino experiments** // Park H. K.  
Physical Review Letters. – 2017. – Т. 119. – №. 8. – С. 081801.

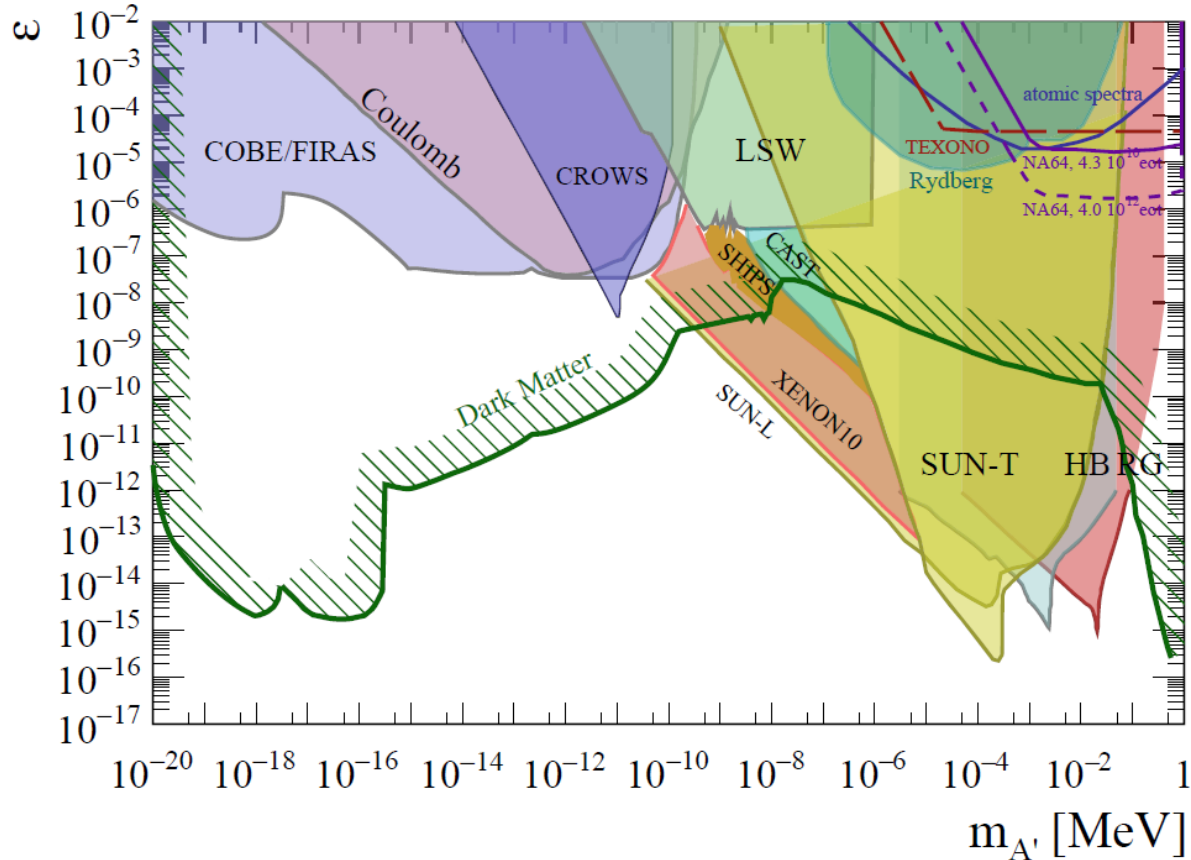
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}A_{\mu\nu}A^{\mu\nu} - \frac{1}{4}S_{\mu\nu}S^{\mu\nu} + \frac{m^2}{2}(S_\mu - \chi A_\mu)^2$$

[7] in **Constraints on hidden photons produced in nuclear reactors** // Danilov M.,  
Demidov S., Gorbunov D. Physical Review Letters. – 2019. – Т. 122. – №. 4. – С. 041801.

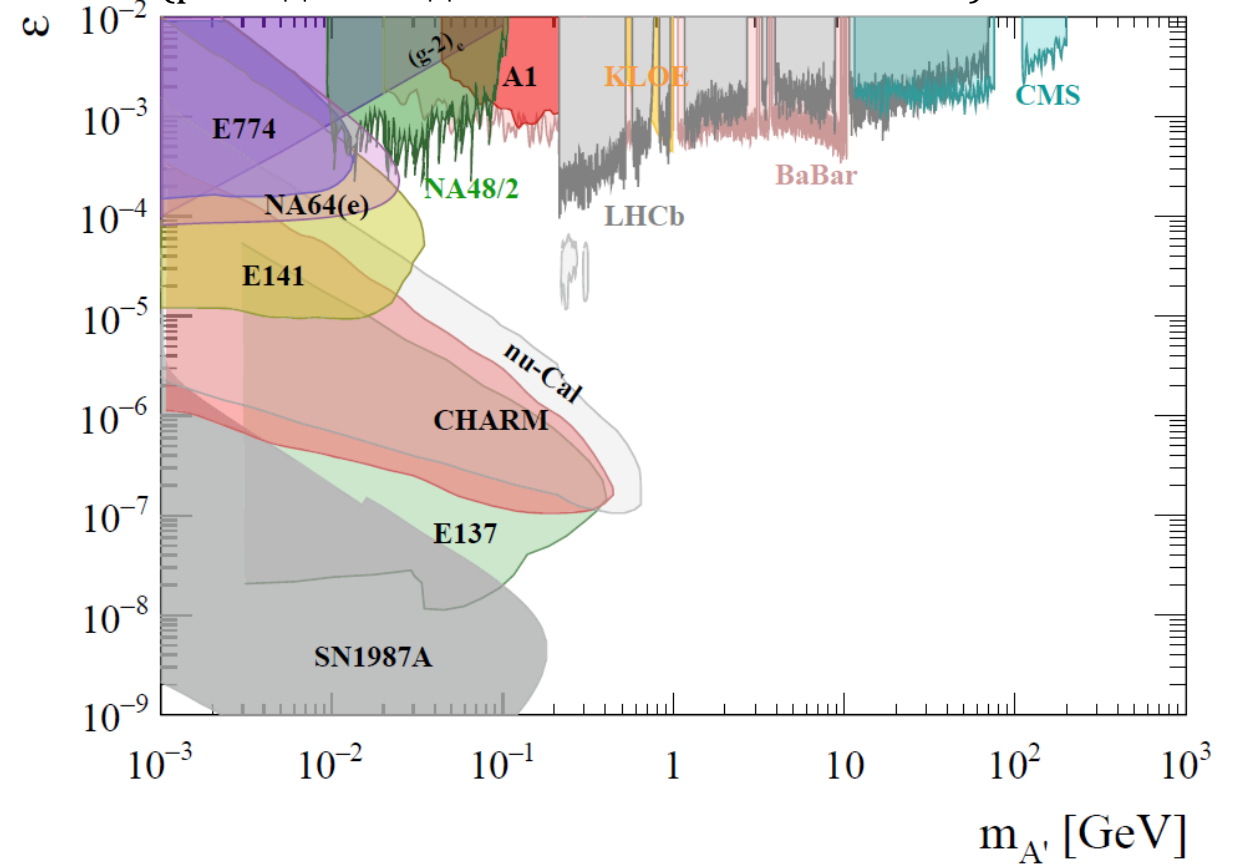


# ОГРАНИЧЕНИЯ НА ТЁМНЫЙ ФОТОН (ОТ ВСЕХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ)

Малые массы:  $m_\chi \in [10^{-20}; 1]$  МэВ

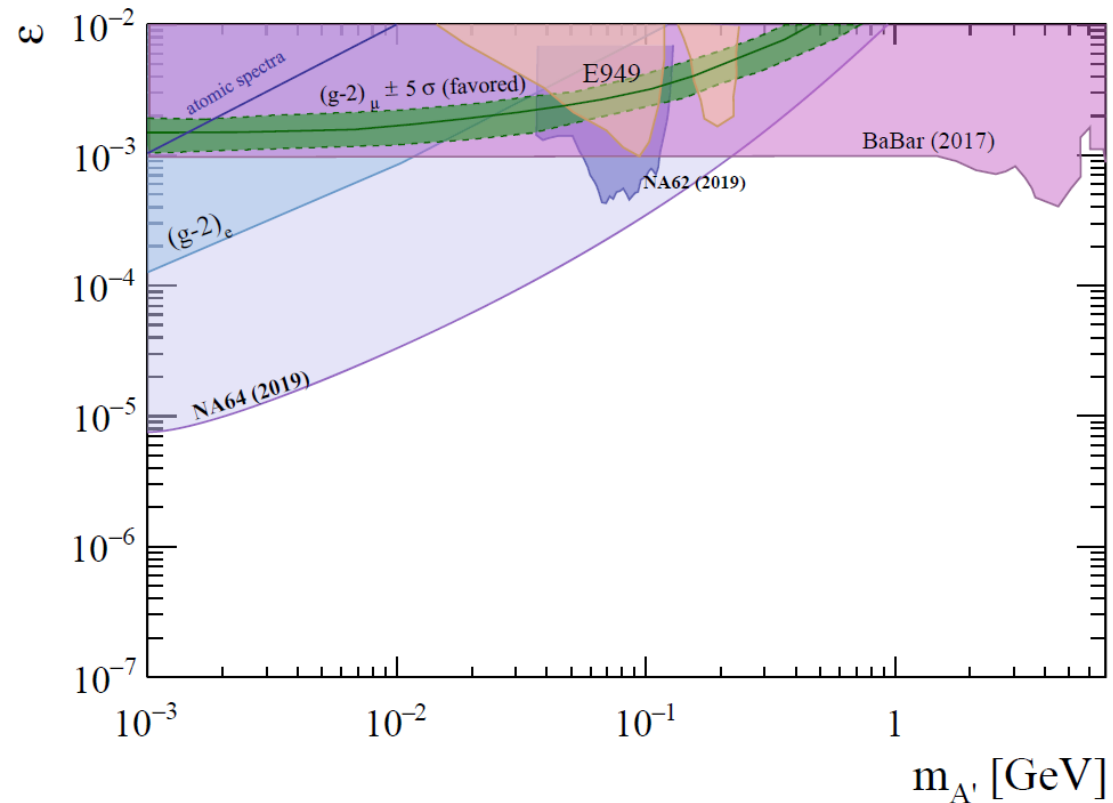


Большие массы:  $m_\chi \in [10^{-3}; 10^3]$  ГэВ  
(распады в видимые конечные состояния)



# ОГРАНИЧЕНИЯ НА ТЁМНЫЙ ФОТОН (ОТ ВСЕХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ)

Большие массы:  $m_{\chi} \in [10^{-3}; 10^3]$  ГэВ  
(распады в невидимые конечные состояния)





# ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОИСКУ ТЁМНОГО ФОТОНА

Малые массы,  $m_\chi < 1$  МэВ

- Атомные эксперименты (модификация силы Кулона)
- Ограничения из экспериментов по поиску аксионов и АПЧ
- Ограничения из астрофизики (перенос энергии в звёздах)
- Ограничения из космологии

Малые массы,  $m_\chi < 1$  МэВ  
(тёмный фотон составляет 100% ТМ)

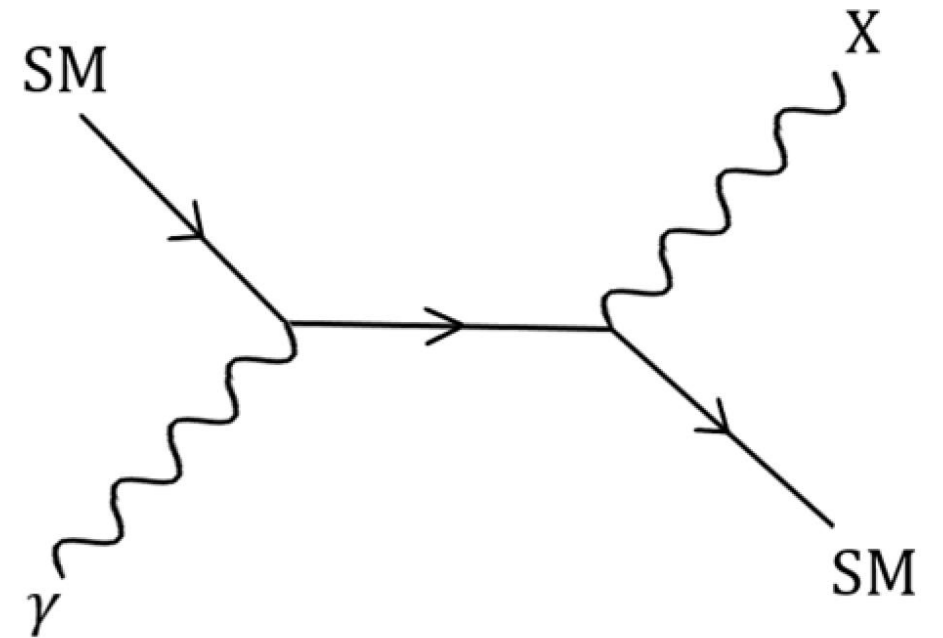
- Эксперименты по прямому поиску ТМ
- Галоскопы

Большие массы,  $m_\chi > 1$  МэВ

- Коллайдерные эксперименты (пучок-пучок)
- Beam-dump эксперименты (пучок-мишень)
- Потери энергии в сверхновых
- Измерение магнитного момента электрона

# МЕХАНИЗМ РОЖДЕНИЯ ТЁМНЫХ ФОТОНОВ В АЗ

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



# ИСТОЧНИКИ $\gamma$ -КВАНТОВ В АЗ РЕАКТОРА

Источники  $\gamma$ -квантов:

- Мгновенное  $\gamma$ -излучение деления (**prompt**)
- $\gamma$ -излучение коротко- и долгоживущих продуктов деления (**delayed**)
- Захватное  $\gamma$ -излучение от реакции (**n,  $\gamma$** ): большой вклад от захвата на  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$  в начале кампании
- Излучение при неупругом рассеянии нейтронов
- $\gamma$ -излучение продуктов реакций
- $\gamma$ -излучение продуктов активации
- Аннигиляционное  $\gamma$ -излучение
- Тормозное  $\gamma$ -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 <sup>2</sup> ]	Скорость реакции ( $n, \gamma$ ) [с <sup>-1</sup> ] (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
<b>Gd-155 (14,80%)</b>	<b>2,261E+18</b>	<b>60900</b>	<b>6,09E-20</b>	<b>3,813E+19</b>
Gd-156 (20,47%)	3,128E+18	1,8	1,8E-24	1,559E+15
<b>Gd-157 (15,65%)</b>	<b>2,391E+18</b>	<b>254000</b>	<b>2,54E-19</b>	<b>1,682E+20</b>
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 ( $n, \gamma$ )-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

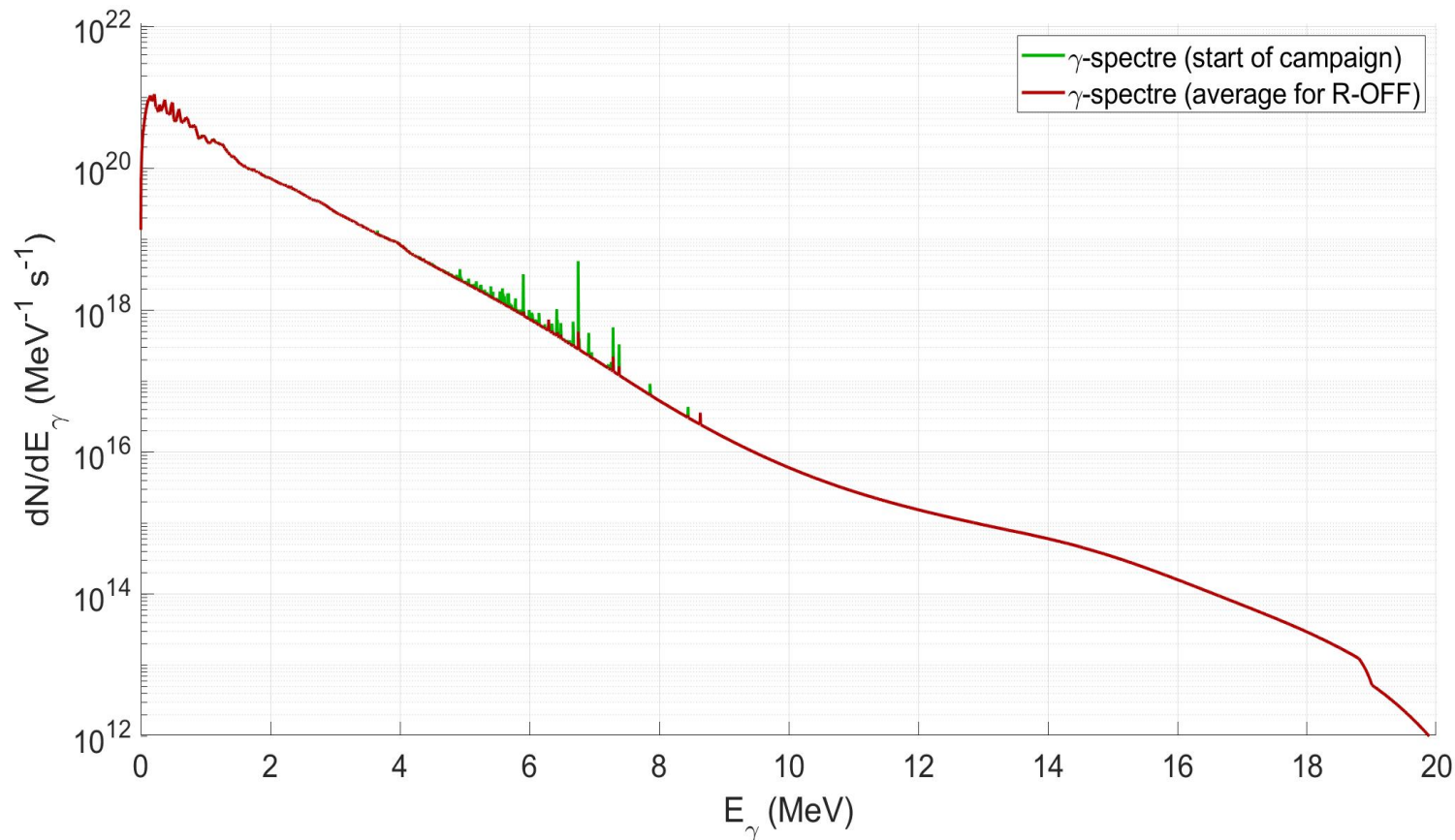
**Gd-155** и **Gd-157** быстро «выгорают», что необходимо учитывать усреднением скорости счёта:

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

по периоду наблюдения:

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

# СПЕКТР $\gamma$ -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:

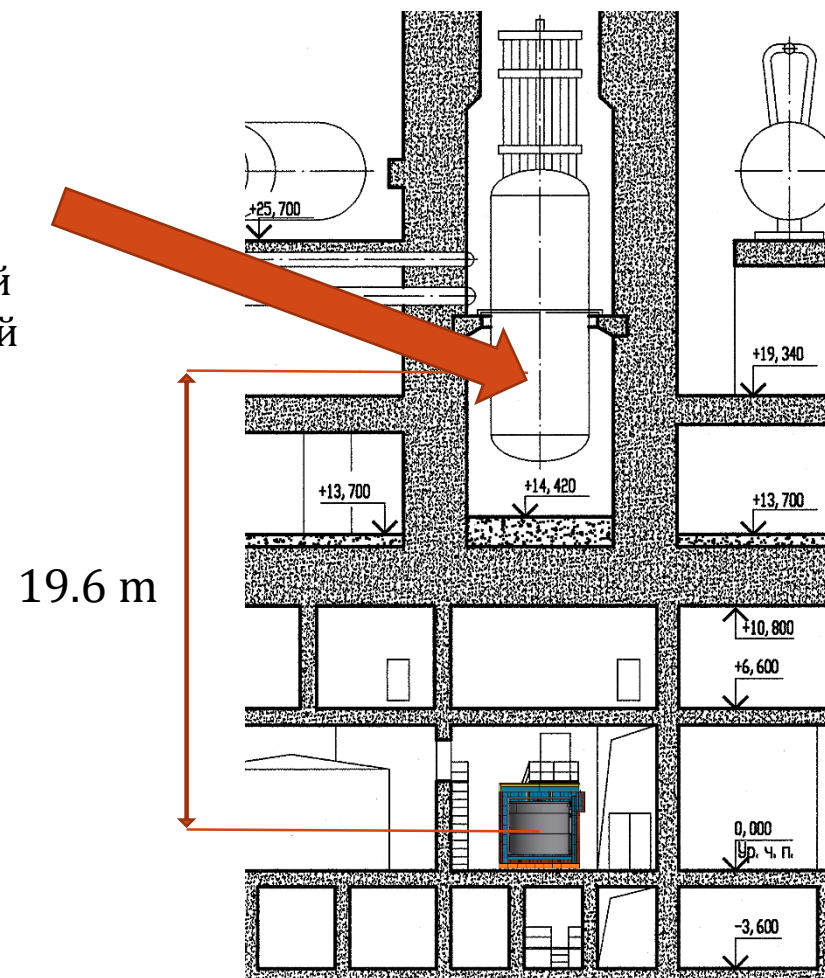
- Погрешности множественности  $\gamma$ -квантов ( $\sim 7\%$ )
- Ошибки долей деления  $\alpha_i$  ( $\sim 4\%$ )
- Ошибки тепловой мощности  $P_{th}$  ( $\sim 2\%$ )
- Ошибки интенсивности линий ( $n, \gamma$ )-реакций ( $\sim 2\%$ )

**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. Скобелевца
- Сбор данных начался в 2021 году

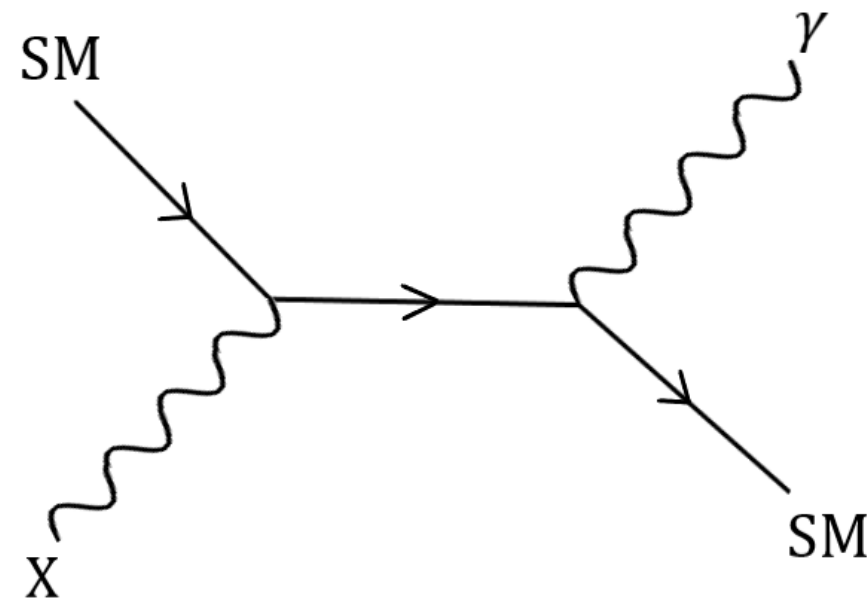
ВВЭР-1000  
мощностью 3  
ГВт,  
установленный  
на Калининской  
АЭС



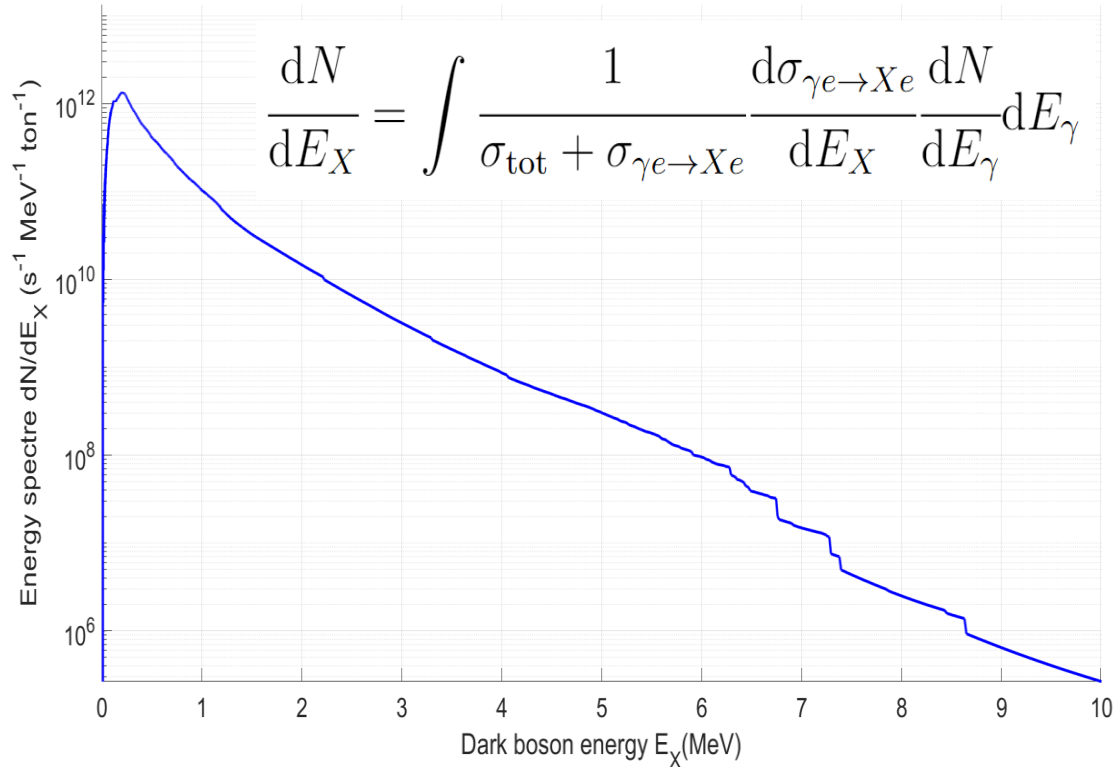
# РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM

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

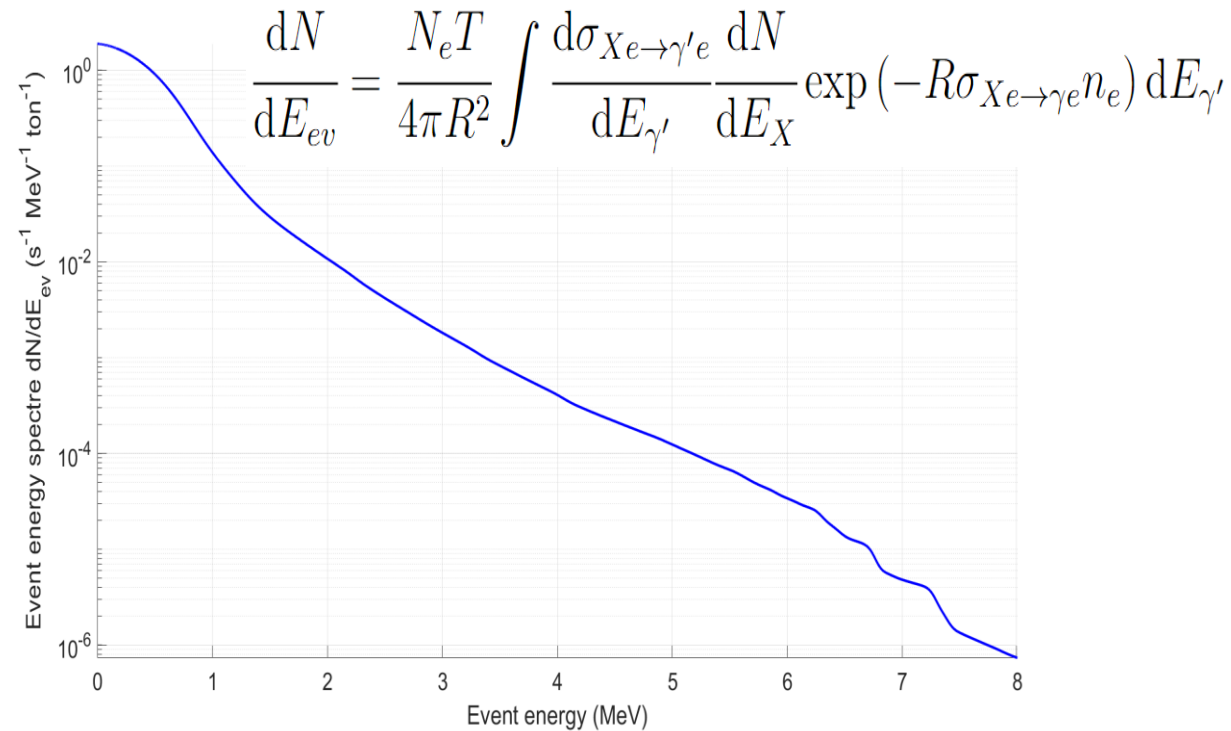
Предполагается, что в однородном сцинтилляционном детекторе вторичный  $\gamma$ -квант и электрон отдачи регистрируются как одно событие.



# СПЕКТРЫ ТЁМНЫХ ФОТОНОВ



Спектр тёмных фотонов, рождённых в АЗ



Ожидаемый спектр событий в **iDREAM** после учёта  
 1) ослабления потока тёмных фотонов в веществе между АЗ и детектором  
 2) энергетического разрешения **iDREAM**



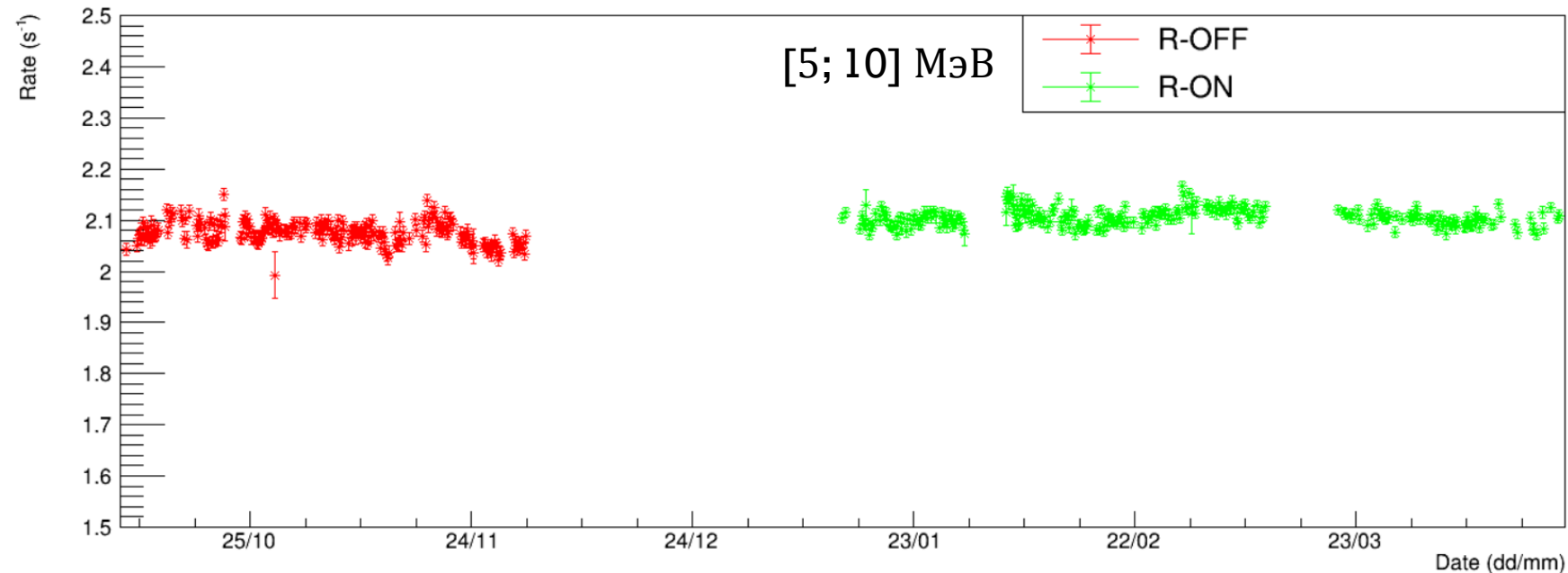
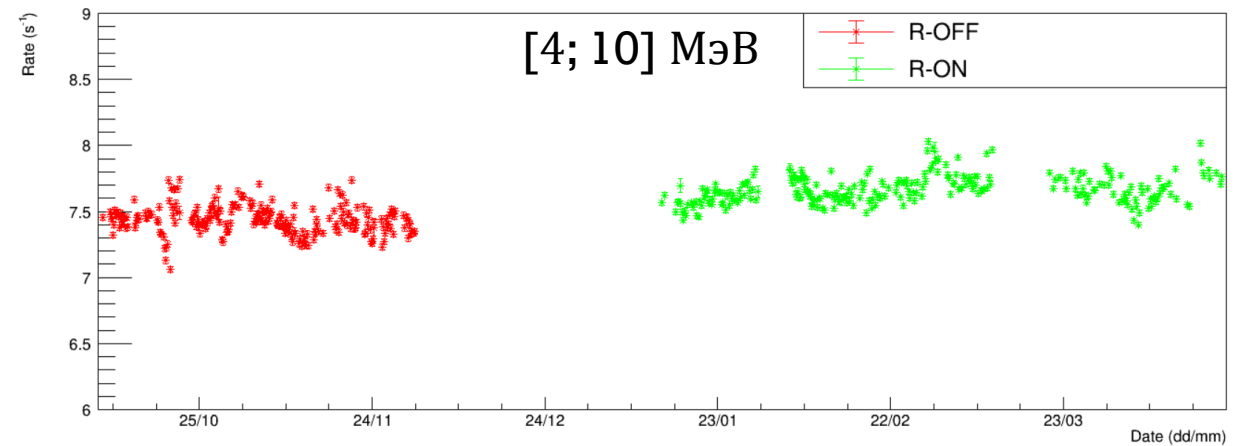
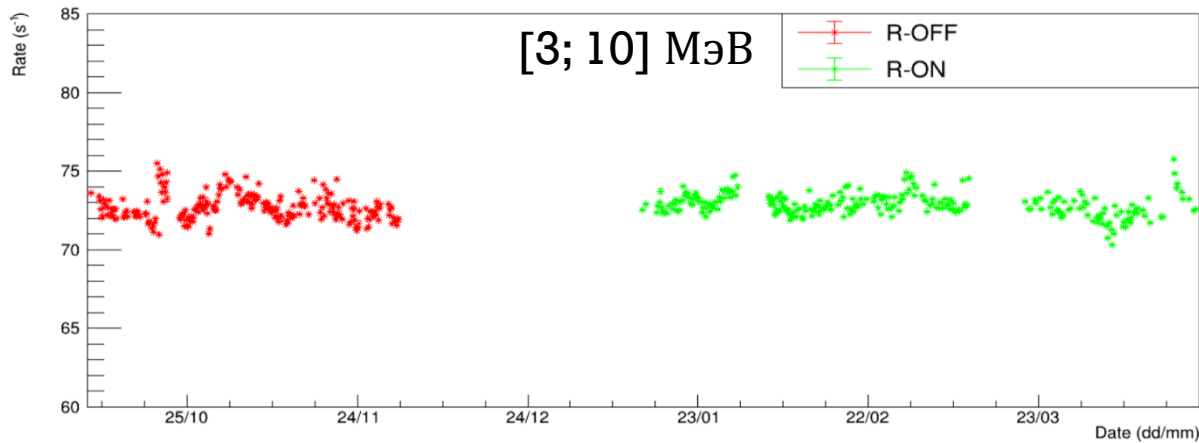
# РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM

		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	60 дней
Скорость счёта одиначных событий	[3; 10] МэВ	72.672 ± 0.005(стат.)	72.882 ± 0.004(стат.)
	[4; 10] МэВ	7.435 ± 0.002(стат.)	7.666 ± 0.001(стат.)
	[5; 10] МэВ	2.075 ± 0.001(стат.)	2.106 ± 0.001(стат.)

Отбор событий кандидатов:

- Мюонное вето 150 мкс (мюон - сигнал в мюонных пластинах или "мюонная" форма импульса в мишени)
- Одиначные события (нет других событий до/после 100 мкс)
- Исследованы три энергетических бина: 3-10 МэВ, 4-10 МэВ, 5-10 МэВ.

# РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM



Систематическая погрешность скорости счёта  $\Delta R_f$ , связанная с флуктуацией, определялась как среднеквадратичное отклонение распределения скорости счёта.

# РЕЗУЛЬТАТЫ IDREAM

Бин, МэВ	$R_{OFF}, c^{-1}$	$R_{ON}, c^{-1}$	$R_{exp}, c^{-1}$
[3; 10]	$72.672 \pm 0.005$ (стат.) $\pm 0.819$ (сист.)	$72.882 \pm 0.004$ (стат.) $\pm 0.710$ (сист.)	$0.210 \pm 0.006$ (стат.) $\pm 1.084$ (сист.)
[4; 10]	$7.435 \pm 0.002$ (стат.) $\pm 0.107$ (сист.)	$7.666 \pm 0.001$ (стат.) $\pm 0.106$ (сист.)	$0.232 \pm 0.002$ (стат.) $\pm 0.151$ (сист.)
[5; 10]	$2.075 \pm 0.001$ (стат.) $\pm 0.021$ (сист.)	$2.106 \pm 0.001$ (стат.) $\pm 0.017$ (сист.)	$0.031 \pm 0.001$ (стат.) $\pm 0.027$ (сист.)

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:  $R_{exp} = R_{ON} - R_{OFF}$

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

$$R_{th} = R_{DP}(1 + \theta_\gamma \sigma_\gamma) + \Delta R_f \theta_f$$

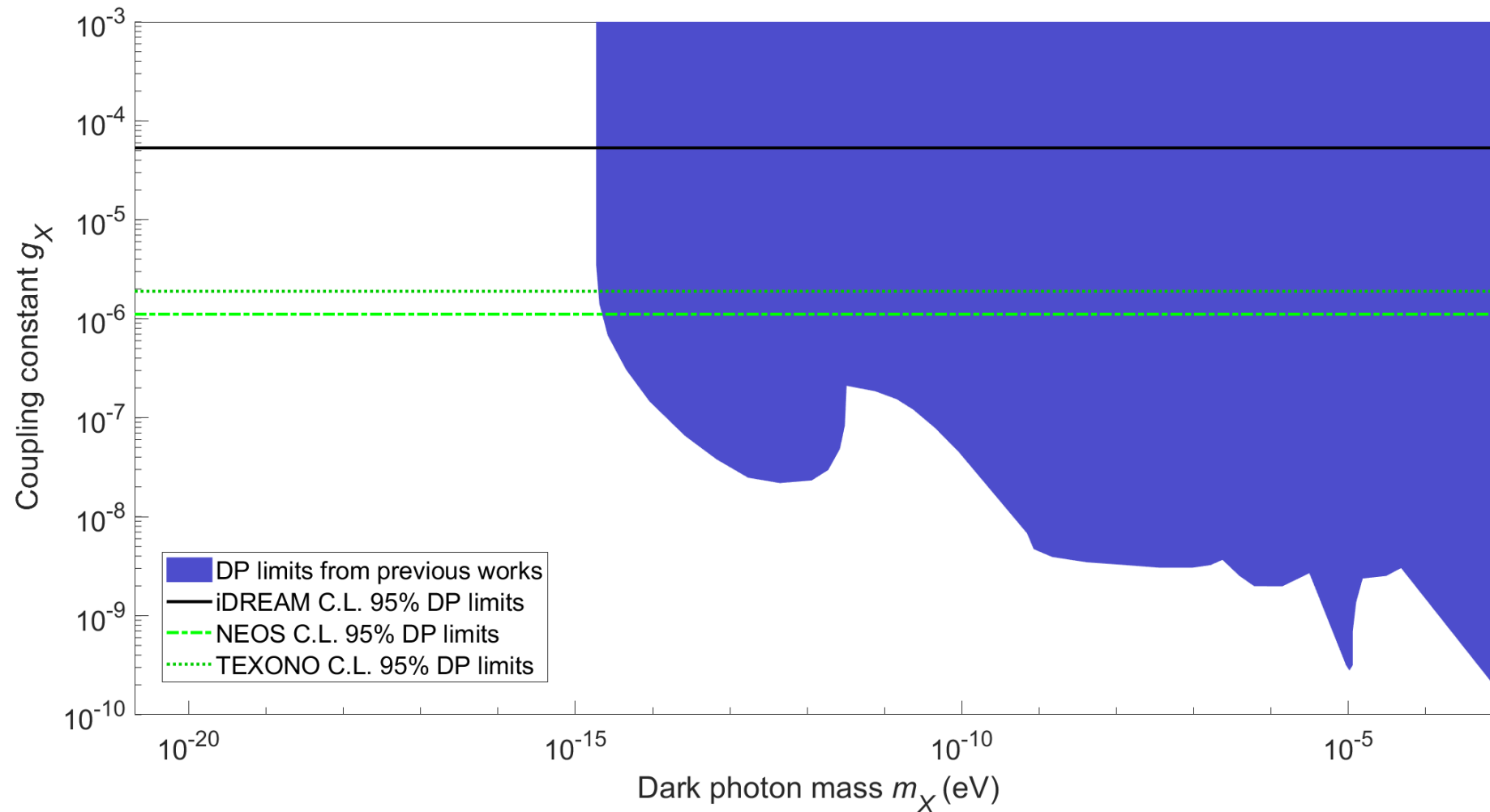
$R_{th}$  - ожидаемая скорость счёта,  $R_{DP}(m_X, g_X)$  - ожидаемая скорость счёта событий от ТФ, получаемая интегрированием энергетического спектра,  $\sigma_\gamma = 10\%$  - относительная ошибка спектра  $\gamma$ -квантов,  $\Delta R_f$  - систематическая погрешность скорости счёта,  $\theta_\gamma, \theta_f$  - параметры неопределённости спектра  $\gamma$ -квантов в АЗ и флуктуации  $\Delta R_f$  скорости счёта одиночных событий

# ФУНКЦИЯ ПРАВДОПОДОБИЯ

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

Из максимизации  $L$  по всем параметрам  $(m_X, g_X, \theta_\gamma, \theta_{bkg})$  и условно (по параметрам неопределённости  $(\theta_\gamma, \theta_{bkg})$  при фиксированных параметрах  $m_X, g_X$  и выбранного уровня достоверности (95%) можно получить ограничения на параметры модели ТФ

# ПРЕДЕЛЫ



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Впервые использованы точные данные о составе активной зоны промышленного реактора и долях делений нуклидов, соответствующих выбранному для анализа периоду набора статистики.
- Использован спектр гамма-квантов для промышленного реактора ВВЭР-1000 с учётом долей деления радиоактивных изотопов и состава АЗ
- Для однородного сцинтилляционного детектора впервые учтены систематические ошибки скорости счёта детектора.
- Установлено ограничение на константу связи ТФ с заряженными токами  $СМ g_X$ .

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

