

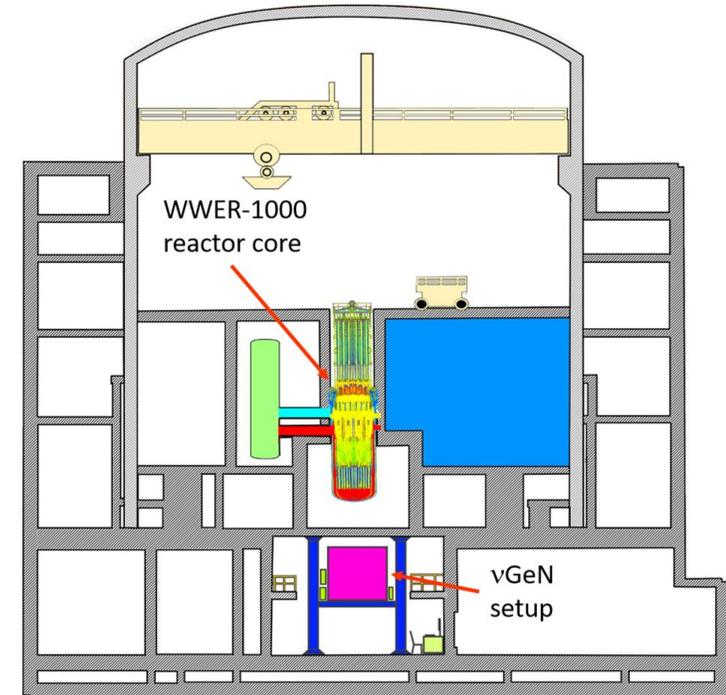
19.02.2025

Расчёт ожидаемого сигнала от упругого когерентного рассеяния нейтрино в эксперименте νGeN

Сессия-конференция секции ядерной физики
ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова

*Докладчик: Саутнер Даниил (МФТИ, ФИАН)
Для коллаборации νGeN*

Эксперимент ν GeN



4 реактора ВВЭР-1000

Мощность реактора: 3.1 ГВт

Расстояние до детектора: 11 м

Поток антинейтрино: $4.4 \cdot 10^{13} \bar{\nu} / \text{см}^2 / \text{с}$

Упругое когерентное рассеяние нейтрино

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2}{4\pi} M Q_w^2 \left(1 - \frac{T}{T_{max}} \right) F_{nuc}^2(Q^2)$$

$$Q_w = [Z(1 - 4\sin^2\theta_w) - N]$$

$$T_{max} = \frac{2E_\nu^2}{M + 2E_\nu}$$

$$\sin^2\theta_w = 0.23867 \pm 0.00016 [*]$$

Для энергий реакторных антинейтрино:

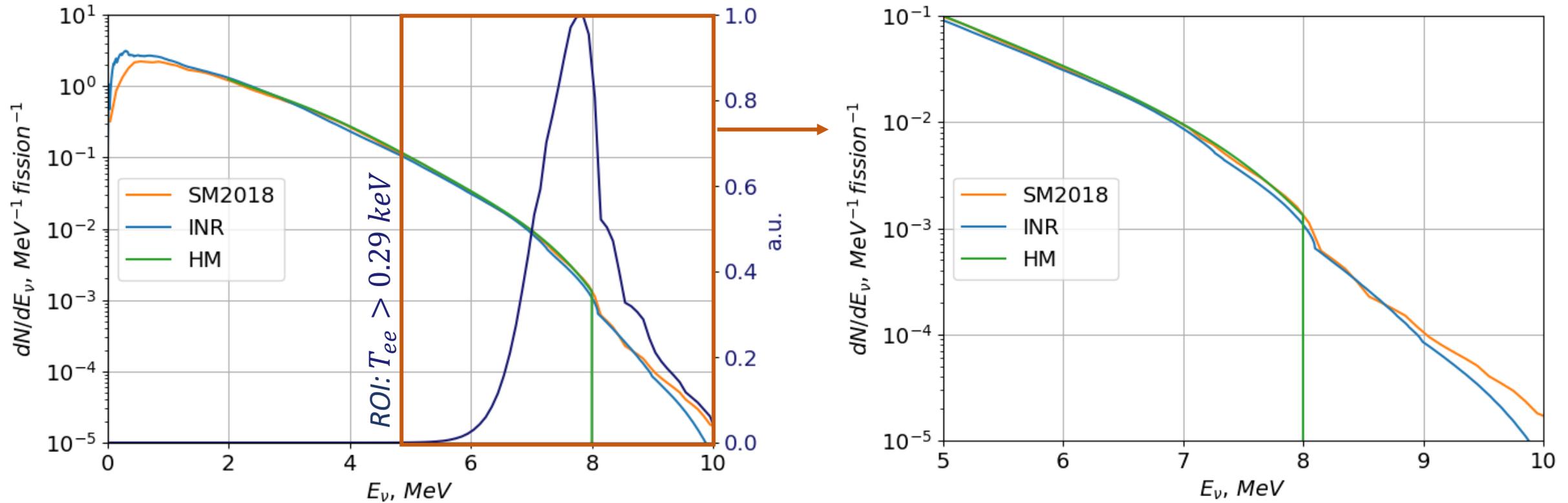
$$F_{nuc}^2(Q^2) \equiv 1$$

М HPGe PPC, 1.4 кг активной массы
 М Подъемный механизм (12.5 → 11 м)

^{70}Ge	^{72}Ge	^{73}Ge	^{74}Ge	^{76}Ge
21.23%	27.66%	7.73%	35.94%	7.44%

Ядро	T_{max} , кэВ ($E_\nu = 1$ МэВ)	T_{max} , кэВ ($E_\nu = 5$ МэВ)	T_{max} , кэВ ($E_\nu = 8$ МэВ)
^{12}C	0.18	4.44	11.44
^{74}Ge	0.03	0.72	1.86
^{133}Cs	0.02	0.40	0.99

Спектр антинейтрино



**Здесь и далее использован
«стандартный» состав топлива [*]**

^{235}U	58%
^{239}Pu	30%
^{238}U	7%
^{241}Pu	5%

[INR] Vlasenko A. P. et al. Antineutrino Spectra of U and Pu Taken from the Double Chooz Experiment // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2023. – T. 86. – №. 6. – С. 1178-1188.

[SM2018] Estienne M. et al. Updated summation model: an improved agreement with the Daya Bay antineutrino fluxes // *Physical review letters*. – 2019. – T. 123. – №. 2. – С. 022502.

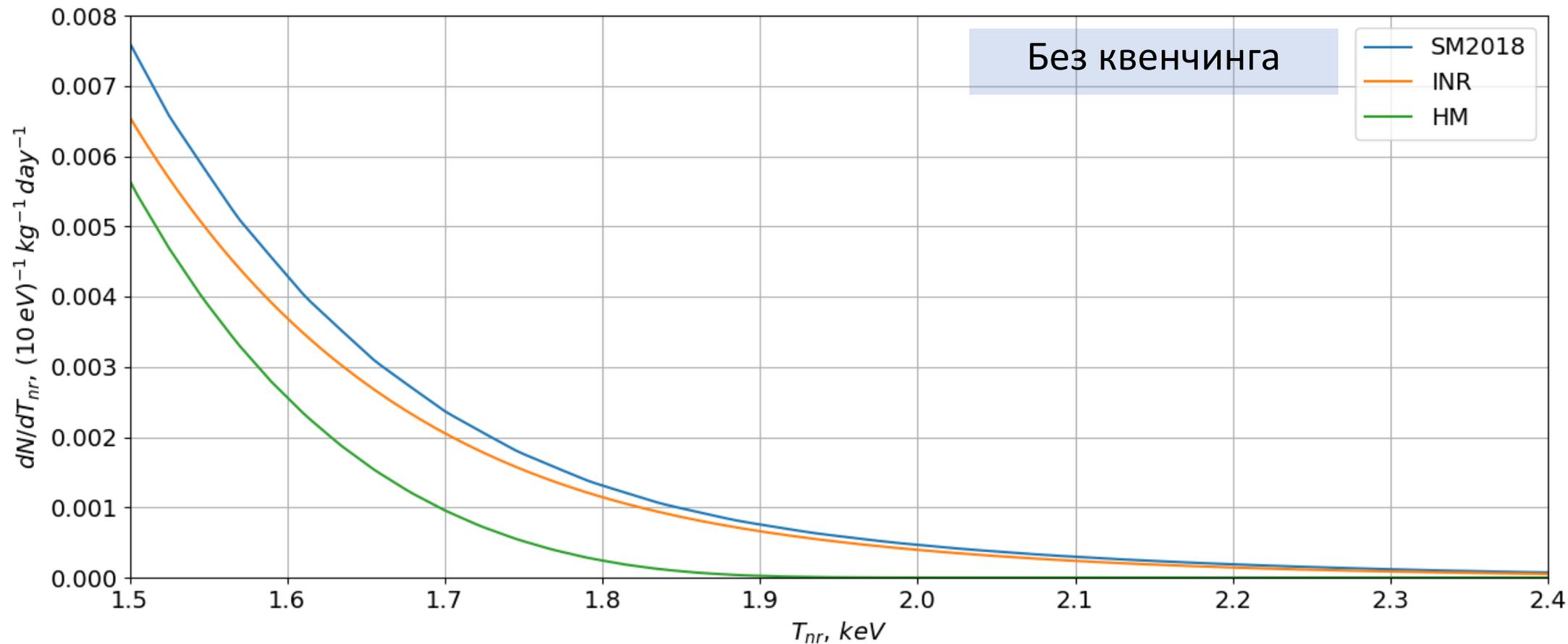
[HM] Huber, Patrick. "Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors." *Physical Review C — Nuclear Physics* 84.2 (2011): 024617.

[HM] Mueller, Th A., et al. "Improved predictions of reactor antineutrino spectra." *Physical Review C — Nuclear Physics* 83.5 (2011): 054615.

[*] A. G. Beda et al., "First result for the neutrino magnetic moment from measurements with the gamma spectrometer," *Physics of Atomic Nuclei*, vol. 70, pp. 1873–1884, Nov 2007.

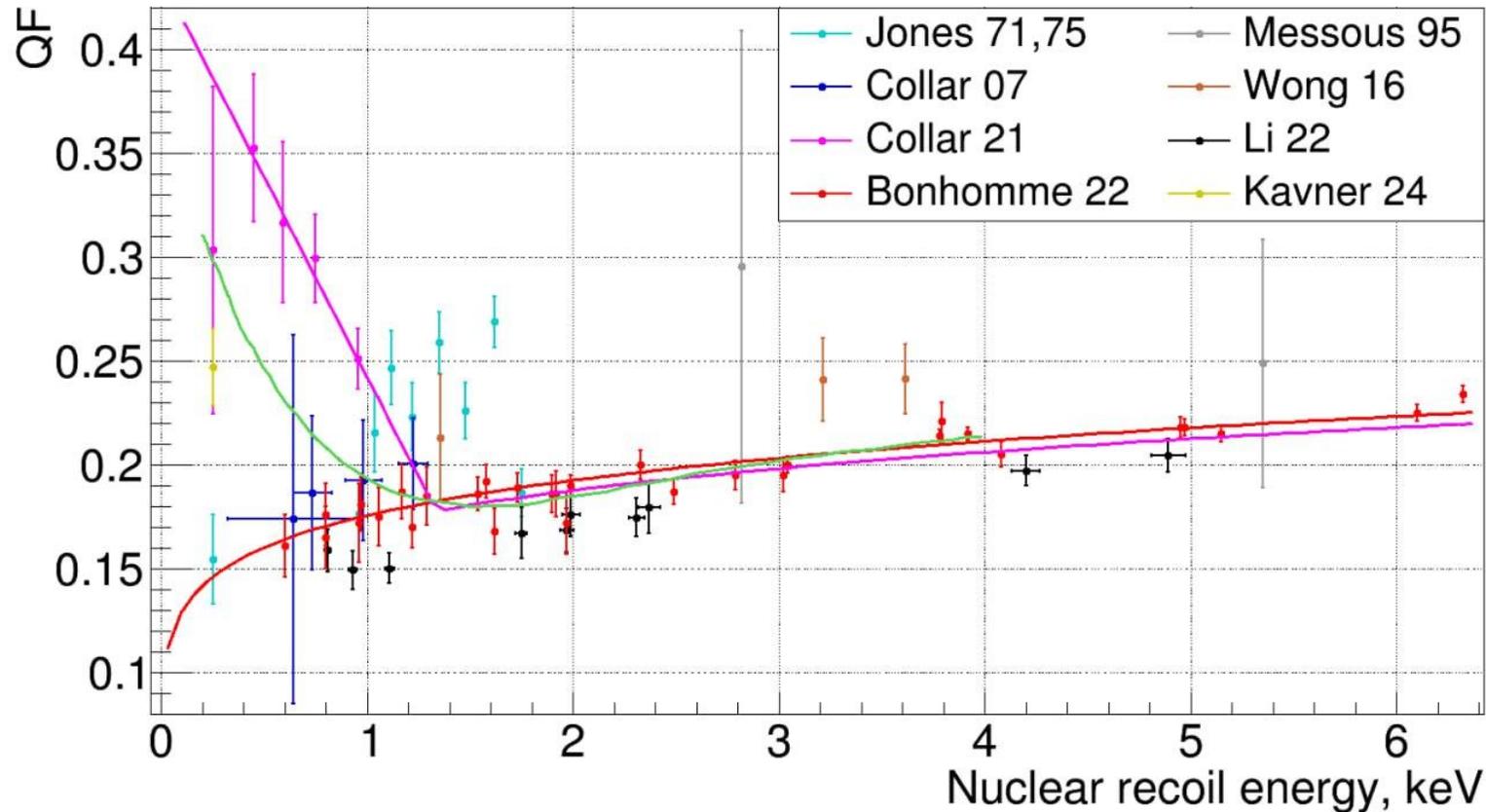
Скорость счёта

$$\left\langle \frac{dN}{dT} \right\rangle = \frac{G_F^2}{4\pi} \sum_i \int n_i M_i N_i Q_{w,i}^2 \left(1 - \frac{T}{T_{max,i}} \right) f(E_\nu) dE_\nu$$



Отклик германия на ядра отдачи

$$\text{Квенчинг: } q(T_{nr}) = \frac{T_{ee}}{T_{nr}}$$



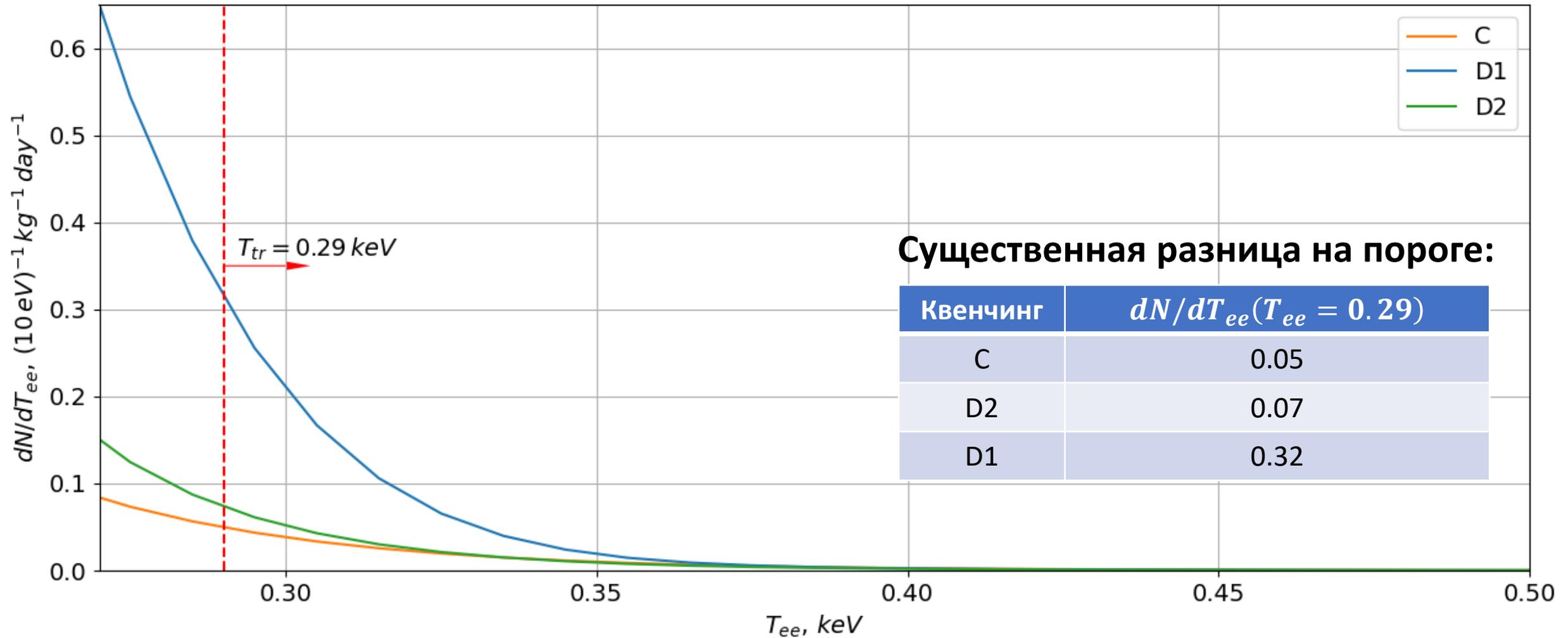
- Lindhard (C), $k_q = 0.162$ [1]
- Dresden-II (D1) [2]
- Dresden-II (D2) [2]

[1] A. Bonhomme et al., "Direct measurement of the ionization quenching factor of nuclear recoils in germanium in the keV energy range," *Eur. Phys. J. C*, vol. 82, no. 9, p. 815, 2022

[2] J. I. Collar et al., "Germanium response to sub-keV nuclear recoils: A multipronged experimental characterization," *Phys. Rev. D*, vol. 103, p. 122003, Jun 2021.

Скорость счёта

С учётом квенчинг-фактора (SM2018)

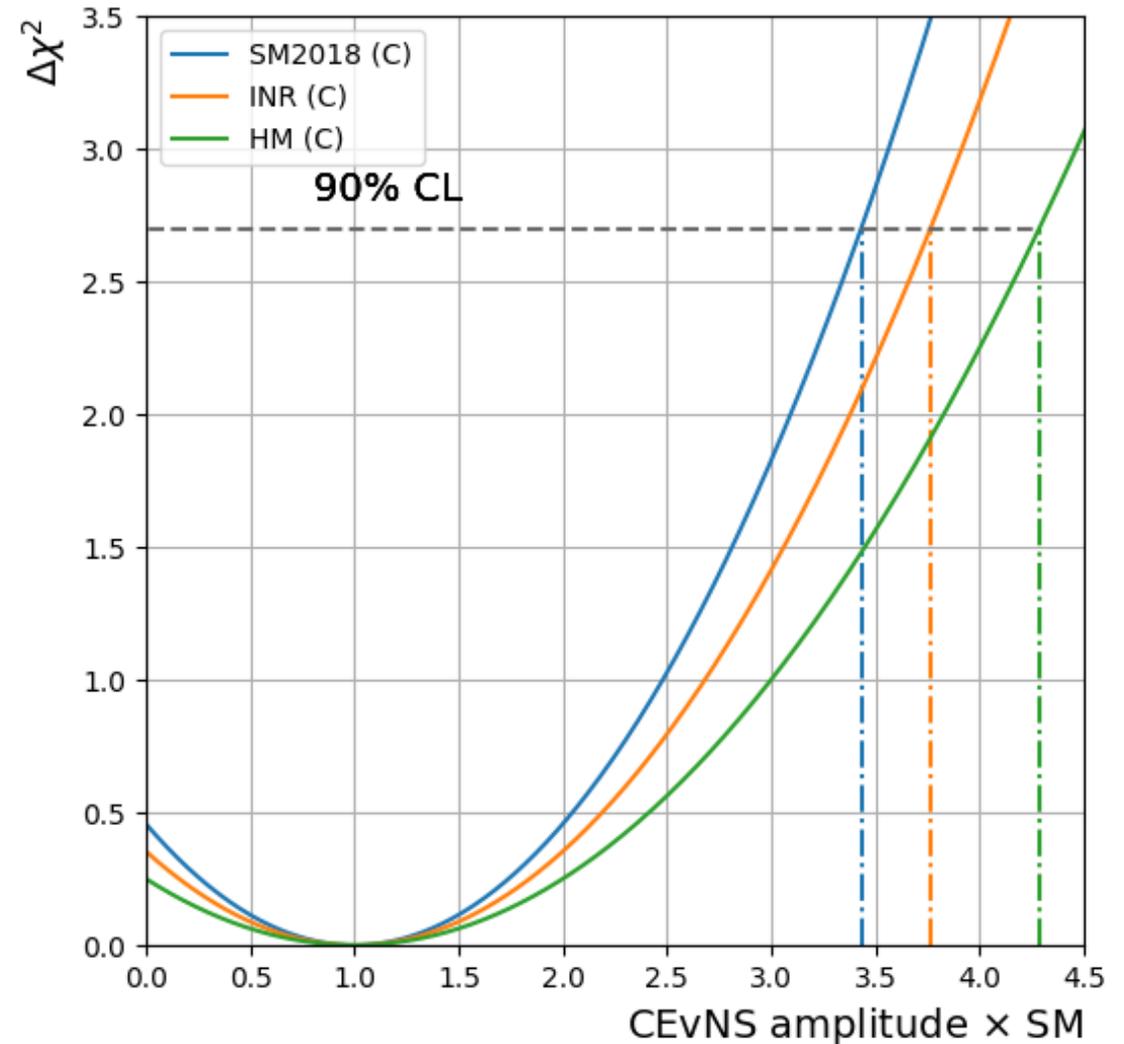
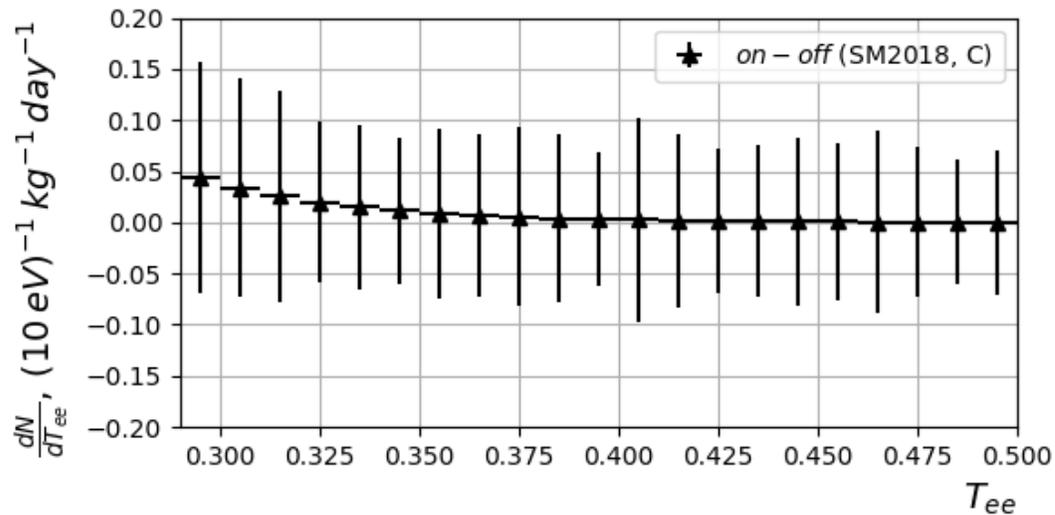
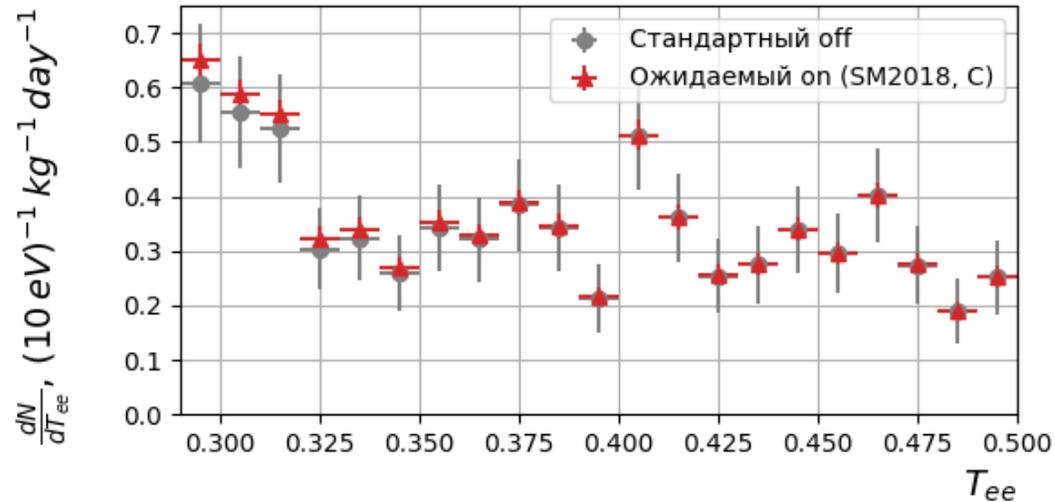


Существенная разница на пороге:

Квенчинг	$dN/dT_{ee}(T_{ee} = 0.29)$
C	0.05
D2	0.07
D1	0.32

Чувствительность эксперимента

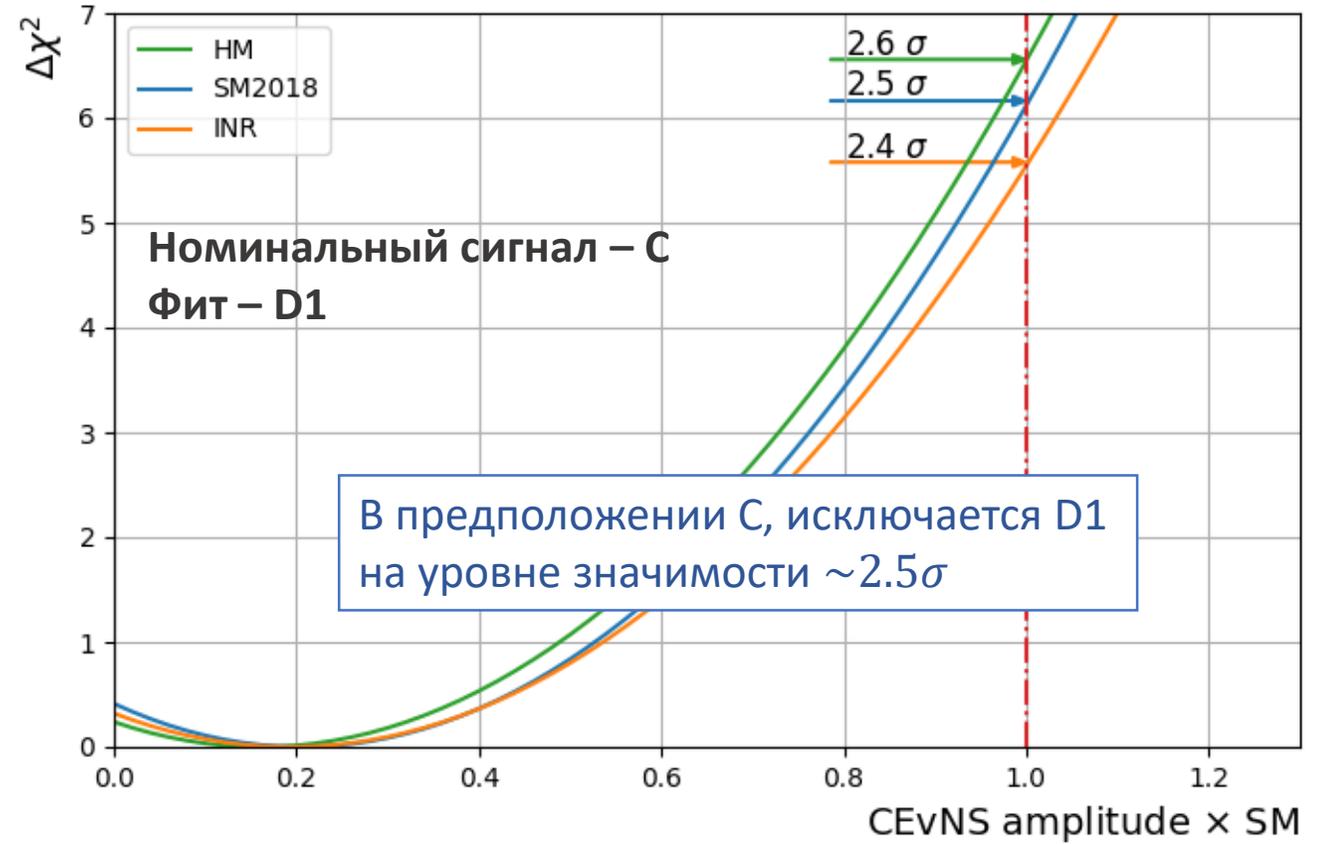
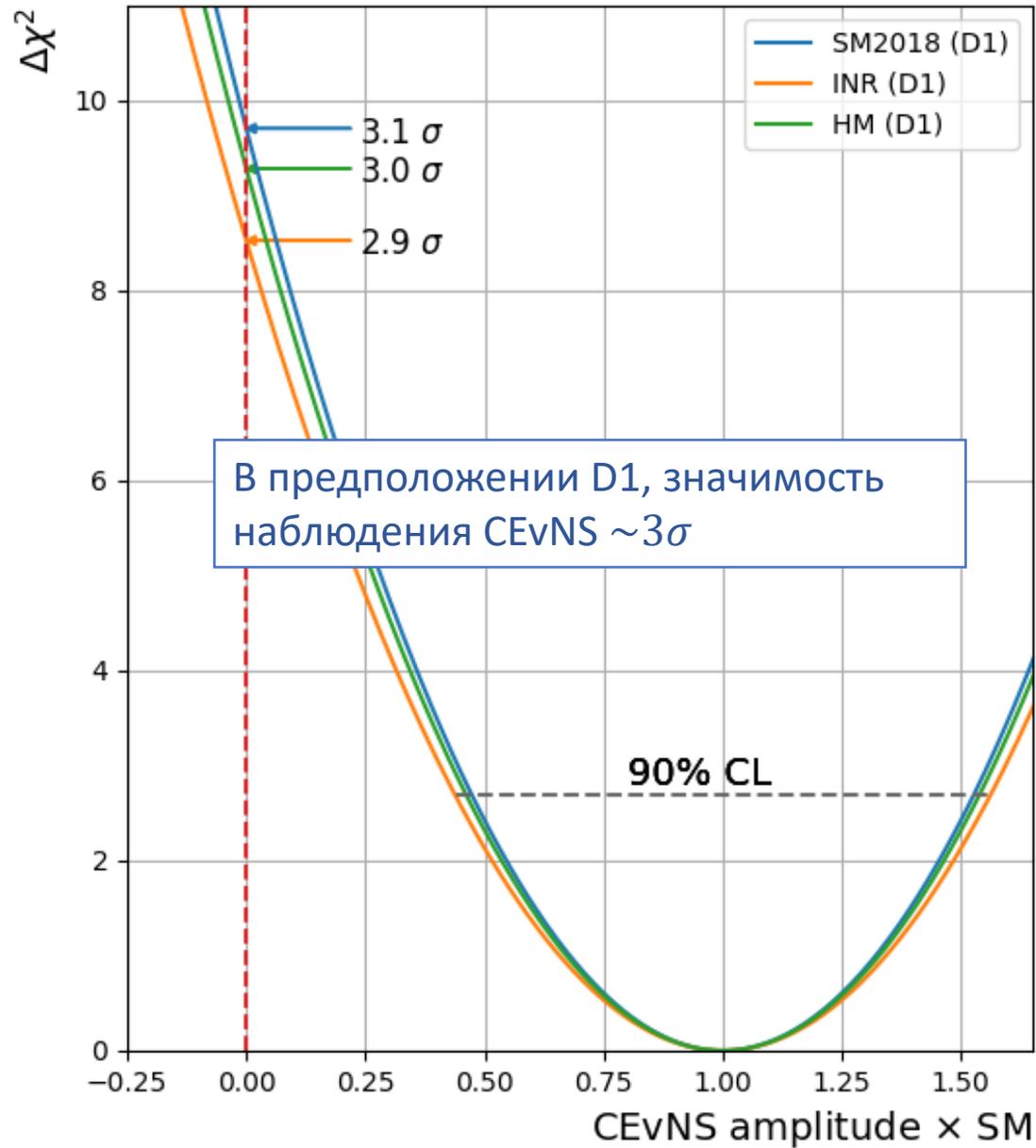
Типичный реакторный цикл 18 месяцев ($T_{on} = 16.5$ месяцев)



Заложен номинальный сигнал в рамках
Стандартной модели

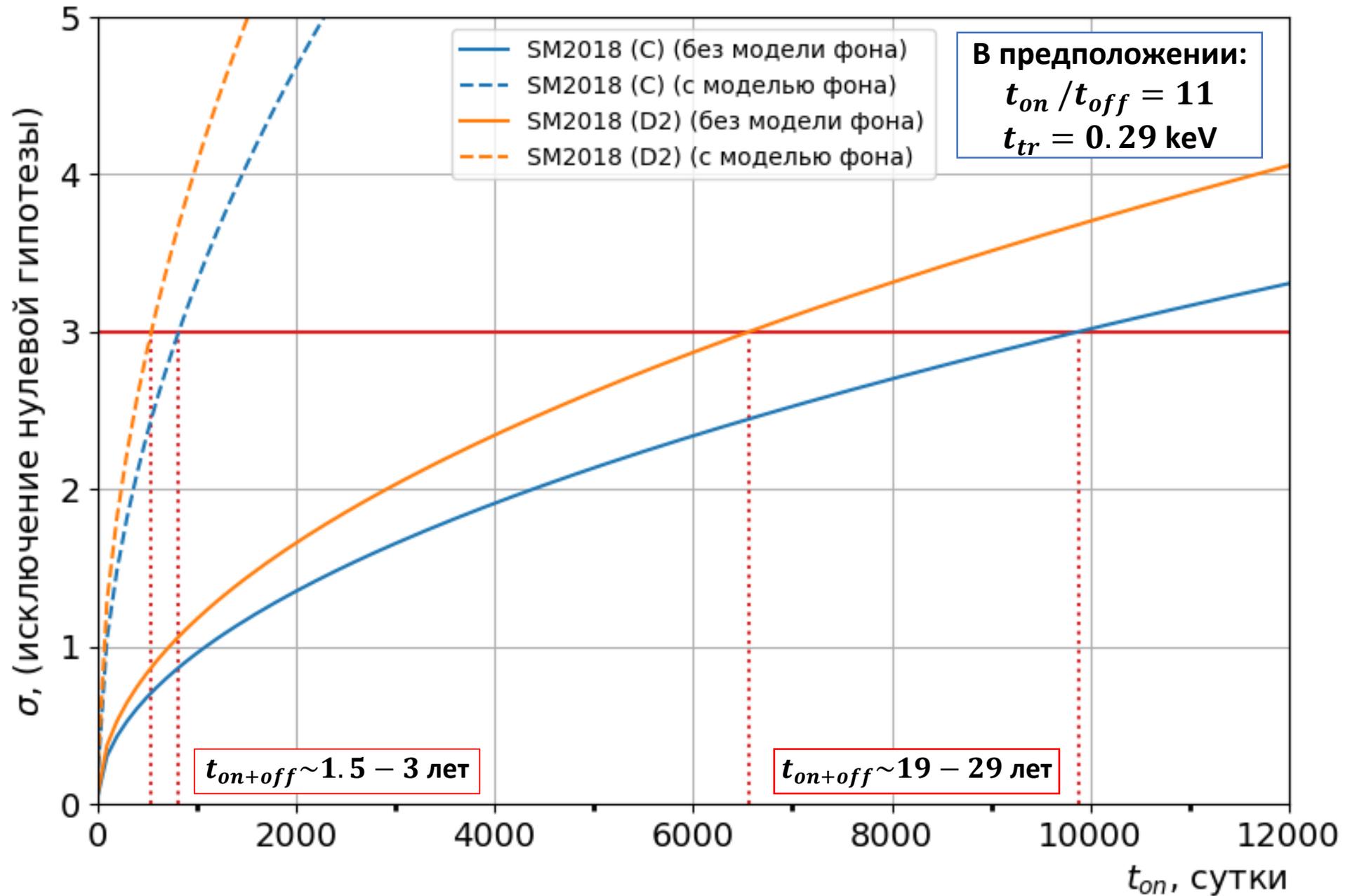
$T_{off} = 63 \text{ kg} \cdot \text{days}$ $T_{on} = 703 \text{ kg} \cdot \text{days}$

Чувствительность эксперимента



Чувствительность, \times SM (90% CL)	Спектр	D1	D2	C
	SM2018	1.5	3.0	3.4
	INR	1.6	3.2	3.8
	HM	1.5	3.5	4.3

Чувствительность эксперимента



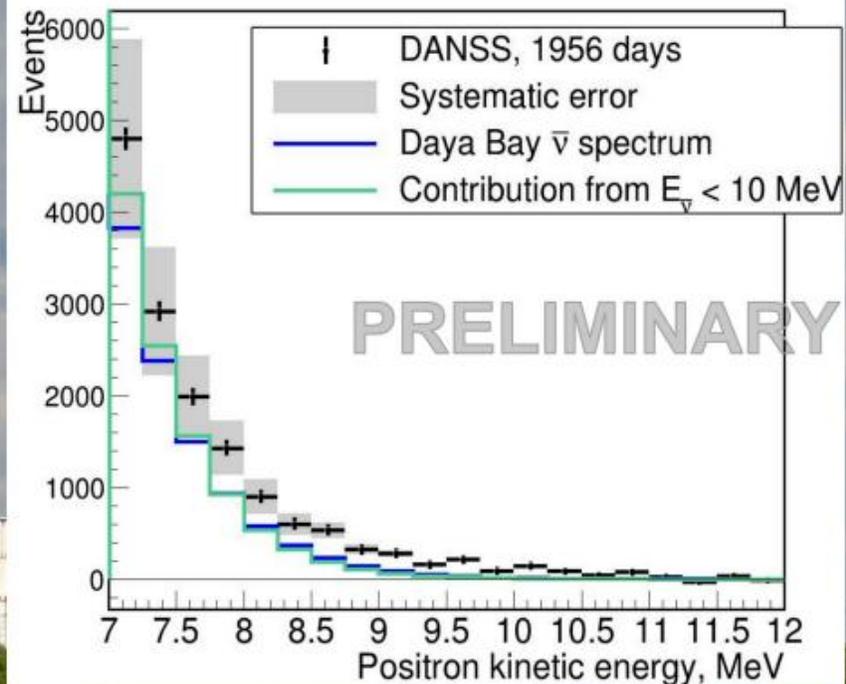
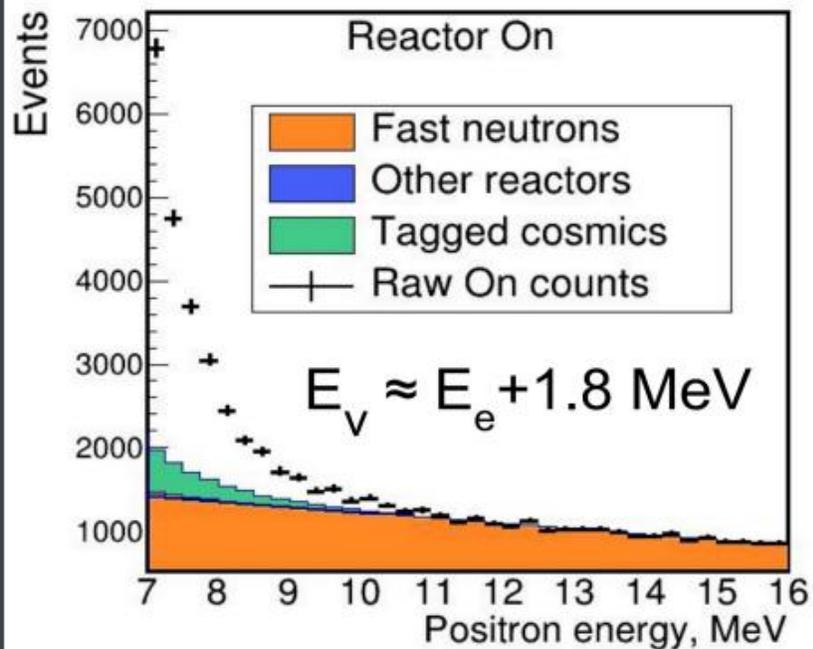
Заключение

- лм Рассчитаны спектры ядер отдачи для различных моделей спектров антинейтрино и квенчинга
- лм Обнаружена существенная зависимости чувствительности от модели спектра и квенчинга. [См. также доклад А. Лукьяшина](#)
- лм Требуются более точные модели и измерения для описания спектров антинейтрино. [См. доклад И. Алексеева \(DANSS\) на ICPPA-2024](#)

Приложения



High energy antineutrinos



Background subtraction is based on 5 “reactor off” periods

DANSS observes antineutrino with energy $> 10 \text{ MeV}$: $1561 \pm 157_{\text{stat}} \pm 168_{\text{sys}} \text{ ev. } (6.8\sigma)$

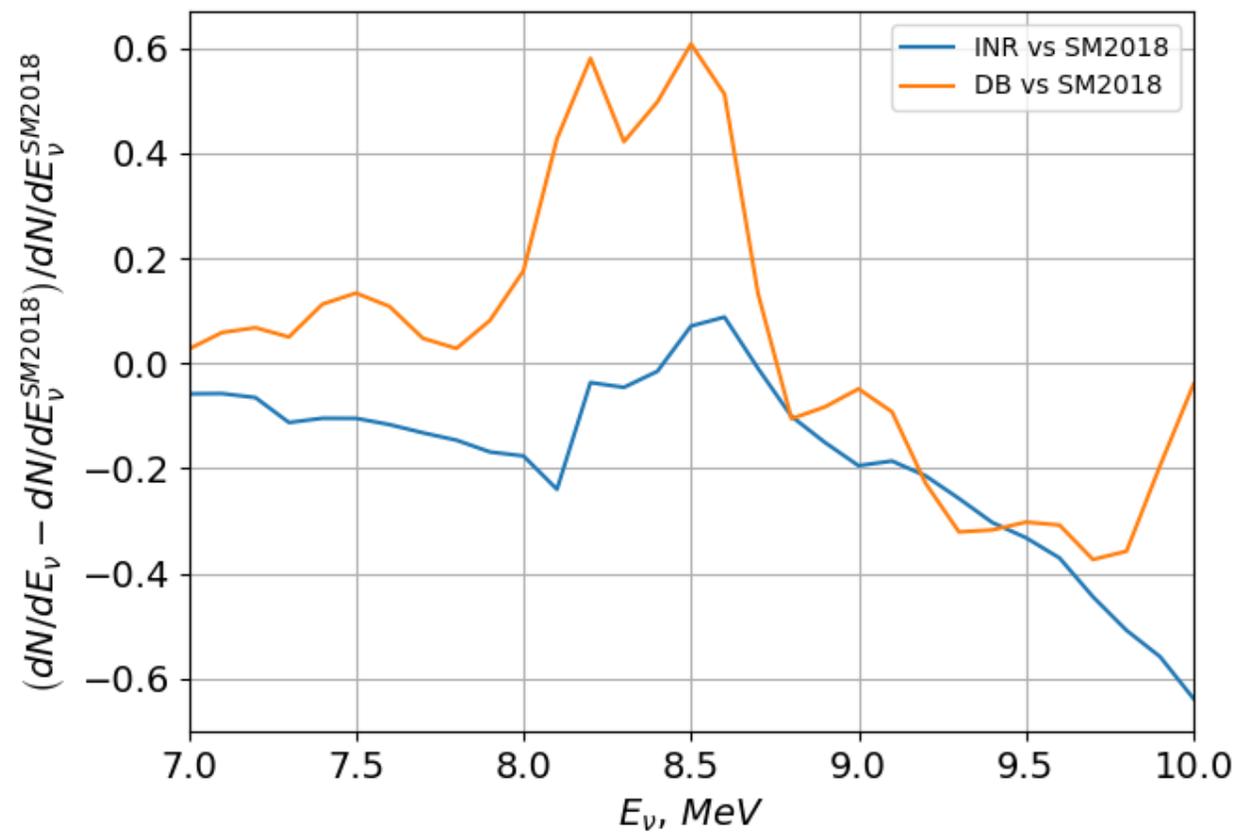
Scale uncertainty makes the largest contribution to the systematic error

Fraction of high energy events is somewhat larger than at Daya Bay [[PhysRevLett.129.04180](#)]

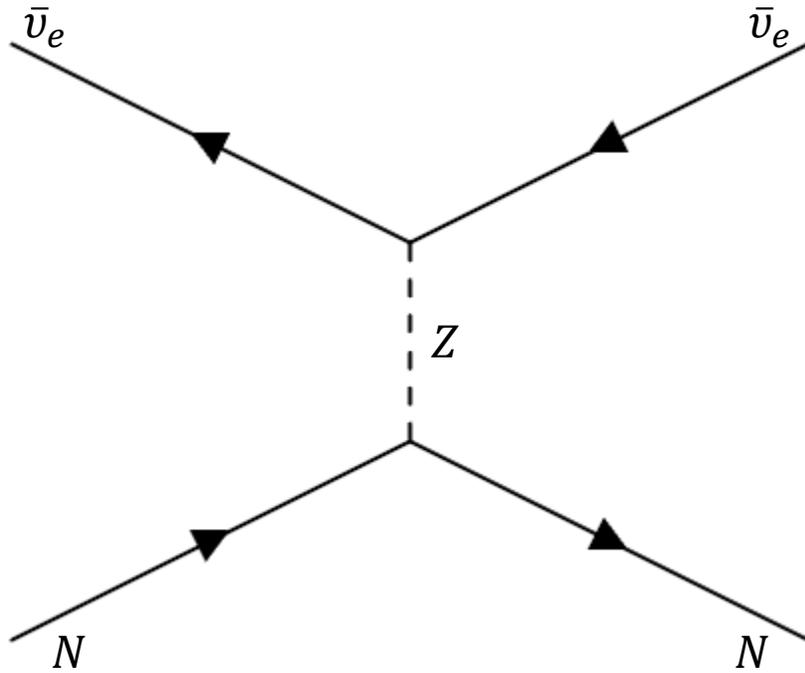
Igor Alekseev for the DANSS Collaboration

10

Относительная разность спектров $\bar{\nu}$



Когерентное упругое рассеяние нейтрино



Предсказано в 1974 г.

Первое наблюдение на ускорителе 2017 г.

$$F(k', k) = \sum_{j=1}^A f_j(k', k) e^{i(k' - k)x_j} \quad [1]$$

k, k' — импульс нейтрино до и после рассеяния

x_j — координата нуклона

f_j — амплитуда рассеяния на отдельном нуклоне

A — число нуклонов в ядре

Условие когерентности:

$$qR \ll 1$$

$$R = \max_{i,j} |x_i - x_j|$$

$$q = |k - k'|$$

Мотивация исследования CEvNS

- Поиск новой физики в нейтринном секторе [1, 2]
- Перенос энергии при звёздном коллапсе [3, 4]
- Измерение ядерного форм-фактора [5]
- Измерение угла э/с смешивания ($q \sim 10$ МэВ) [6]
- Мониторинг состояния ядерных реакторов [7]
- Фон в экспериментах по поиску тёмной материи [8]

[1] K. Scholberg, PRD 73 033005 (2016)

[2] P. Coloma, T. Schwetz, PRD 94 055005 (2016)

[3] J.R. Wilson, PRL 34 113 (1974)

[4] D.N. Schramm, W.D. Arnett, PRL 34, 113 (1975)

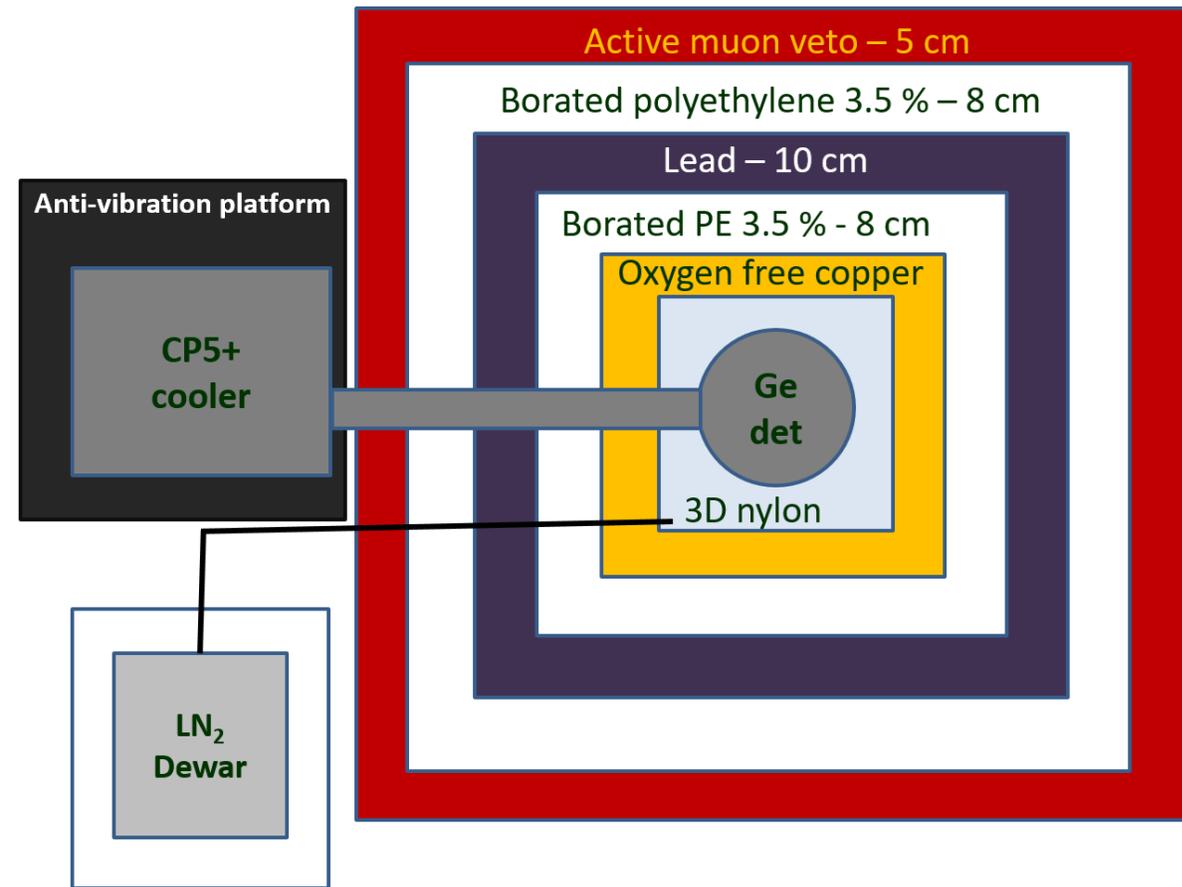
[5] K. Patton et al., PRC 86, 024216 (2012)

[6] L.M. Krauss, Phys. Lett. B 269 407 (1991)

[7] Y. Kim, Nucl. Eng. Tech. 48, 285 (2016)

[8] J. Billard et al., PRD 89 (2014)

Эксперимент ν GeN

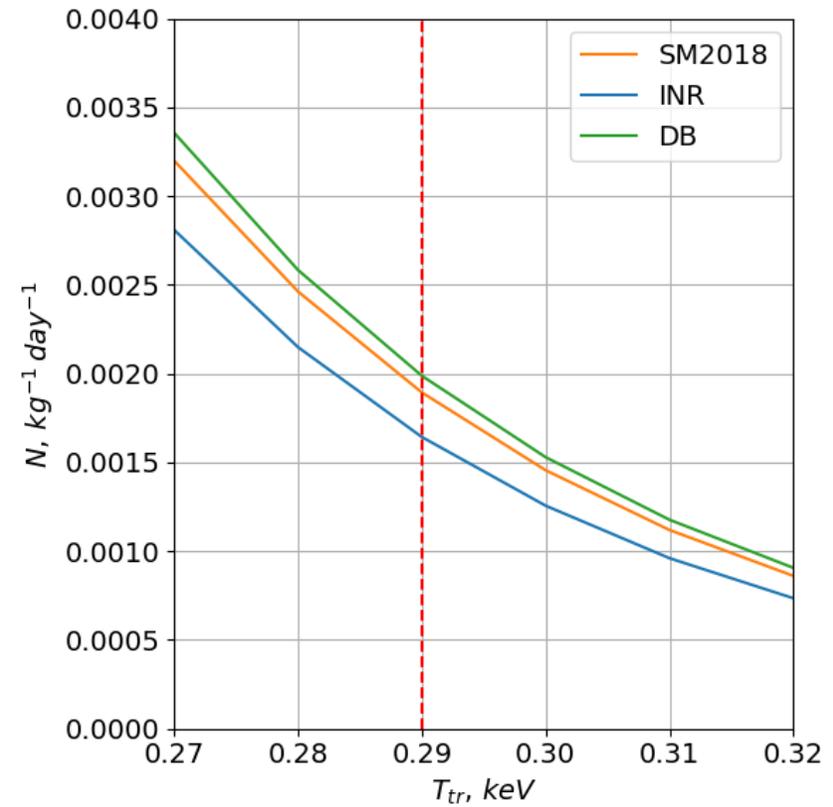
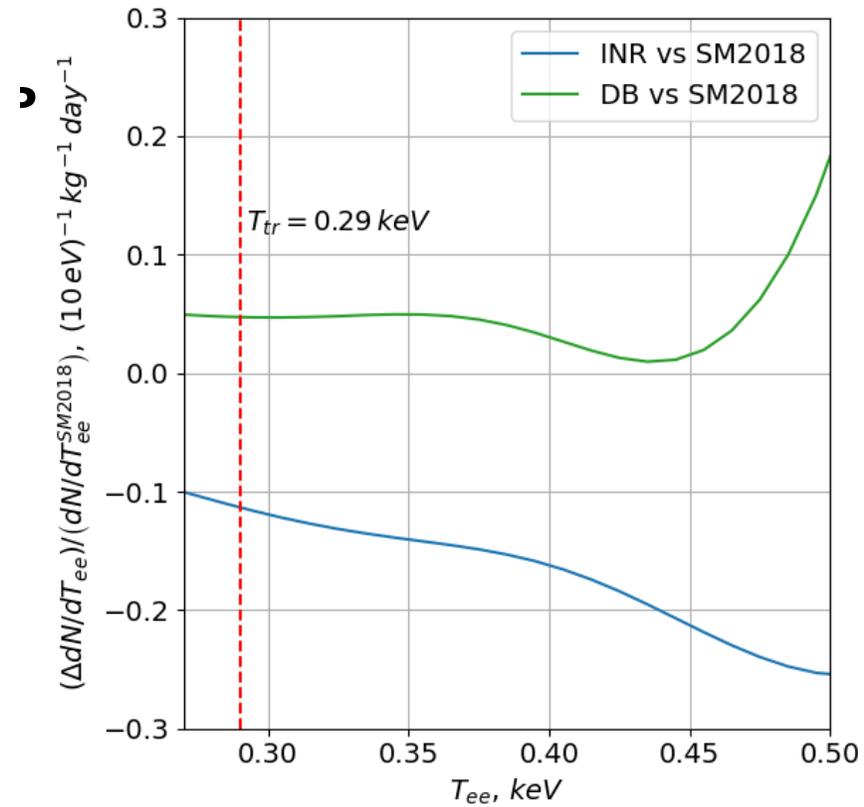
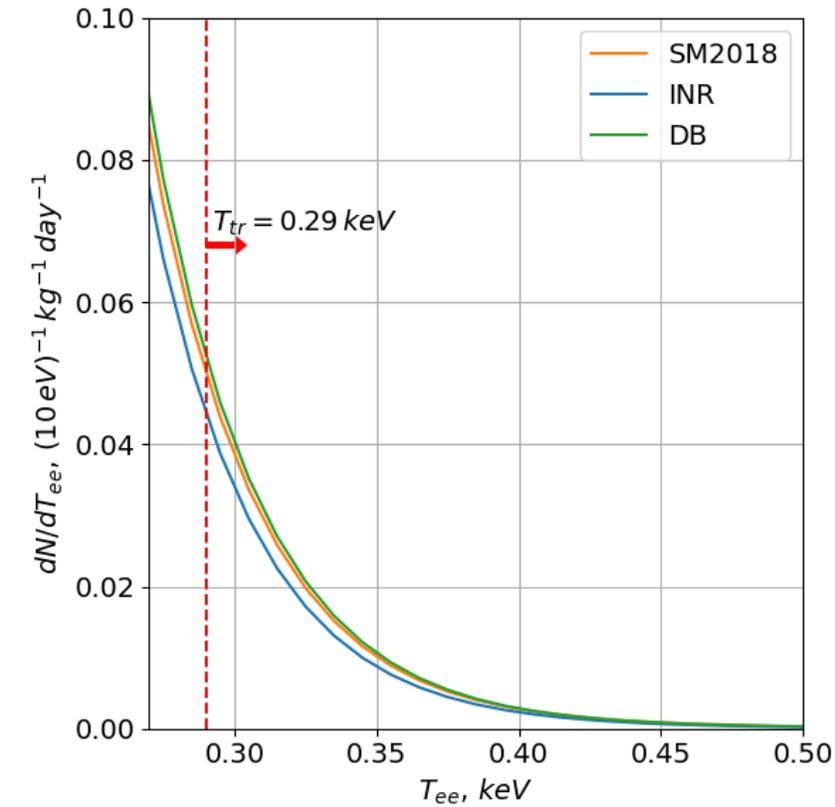


M Детектор CANBERRA (Mirion, Lingosheim)
 M HPGe PPC, 1.4 кг активной массы
 M Подъемный механизм (12.5 → 11 м)

Ge_{70}	Ge_{72}	Ge_{73}	Ge_{74}	Ge_{76}
21.23%	27.66%	7.73%	35.94%	7.44%

Результаты расчётов

Спектр ядер отдачи в диапазоне 0.27 – 0.5 кэВ



$$N(T_{tr}) = \int_{T_{tr}}^{T_{max}} \frac{dN}{dT_{ee}} dT_{ee}$$