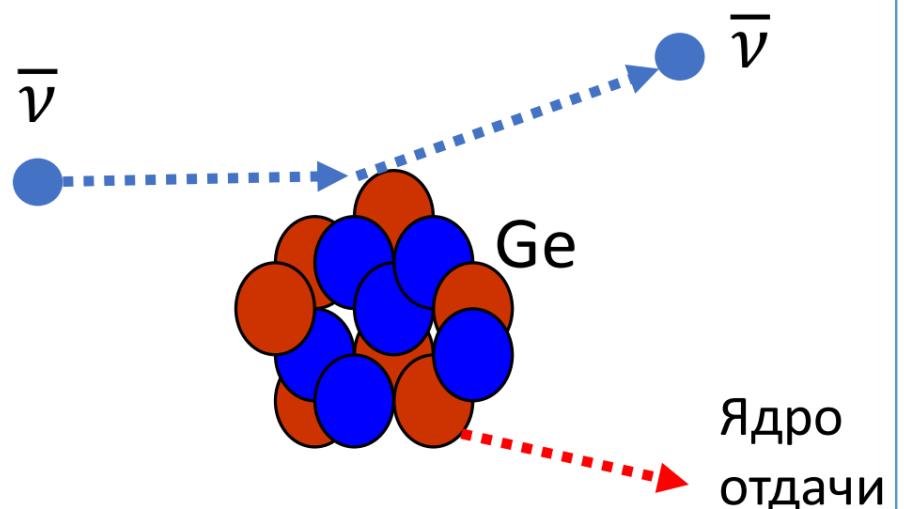


# Результаты и планы по поиску упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах германия в эксперименте vGeN

Молодежная конференция  
«Физика элементарных частиц и космология 2025»

Докладчик: Саутнер Даниил (МФТИ, ФИАН)  
Для коллаборации vGeN

# Когерентное упругое рассеяние нейтрино



- 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]

Предсказано в 1974 г.

Первое наблюдение на ускорителе 2017 г.

[\*] Freedman D. Z., Schramm D. N., Tubbs D. L. Weak neutral current and its effects in stellar collapse // Annu. Rev. Nucl. Sci.;(United States). – 1977. – T. 27.

- [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)

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

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

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

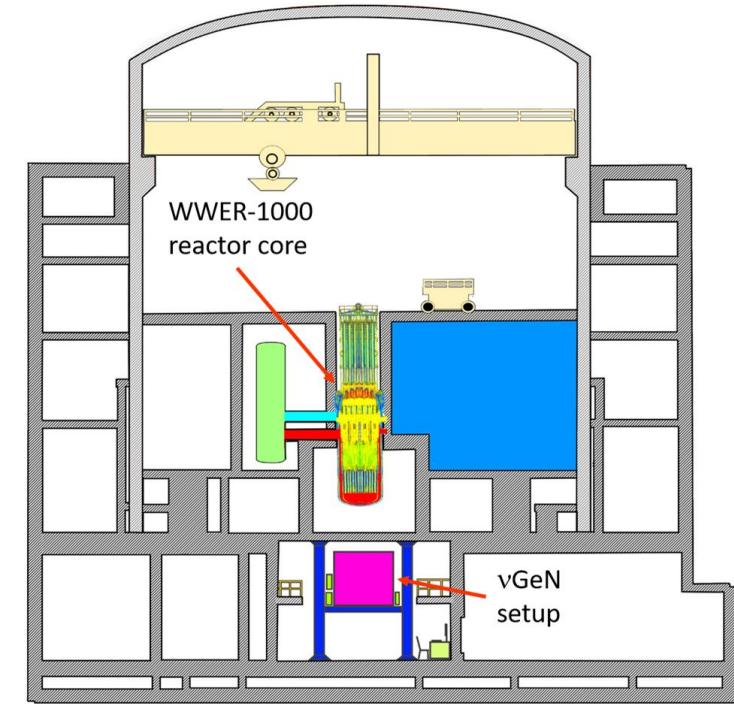
$$\sin^2\theta_w = 0.23867 \pm 0.00016 [*]$$

$M$	Масса ядра
$T$	Энергия отдачи ядра
$E_\nu$	Начальная энергия нейтрино

Для энергий реакторных антинейтрино:

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

# Эксперимент vGeN



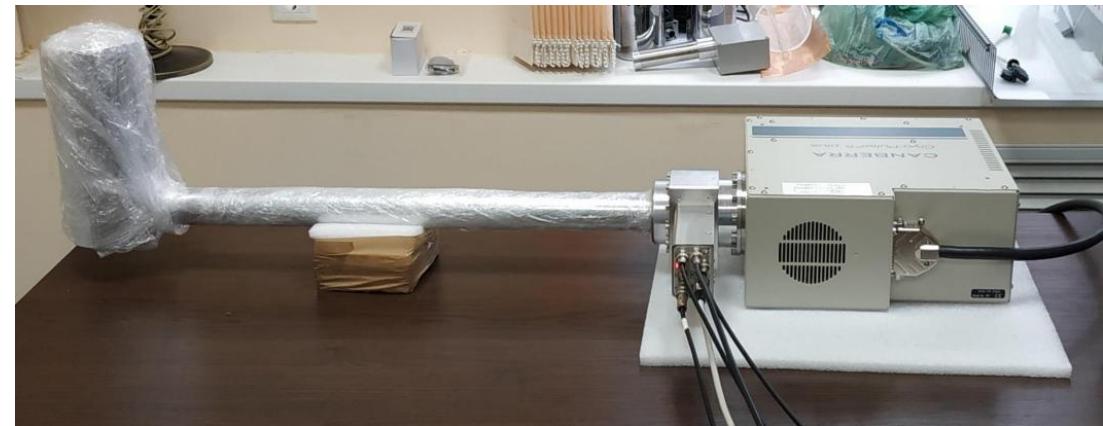
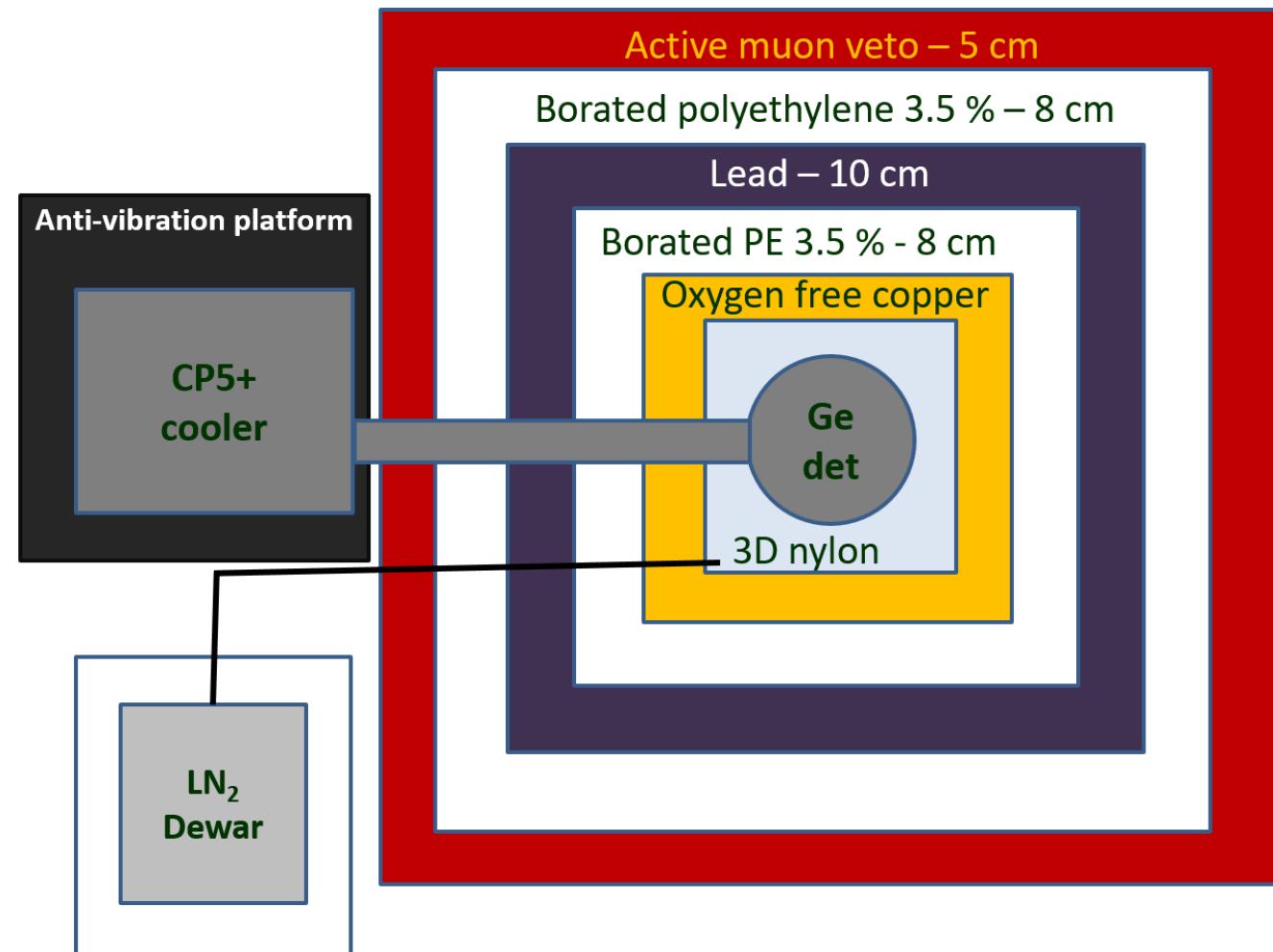
4 реактора ВВЭР-1000

Λ Мощность реактора: 3.1 ГВт

Λ Расстояние до детектора: 11 м

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

# Эксперимент vGeN

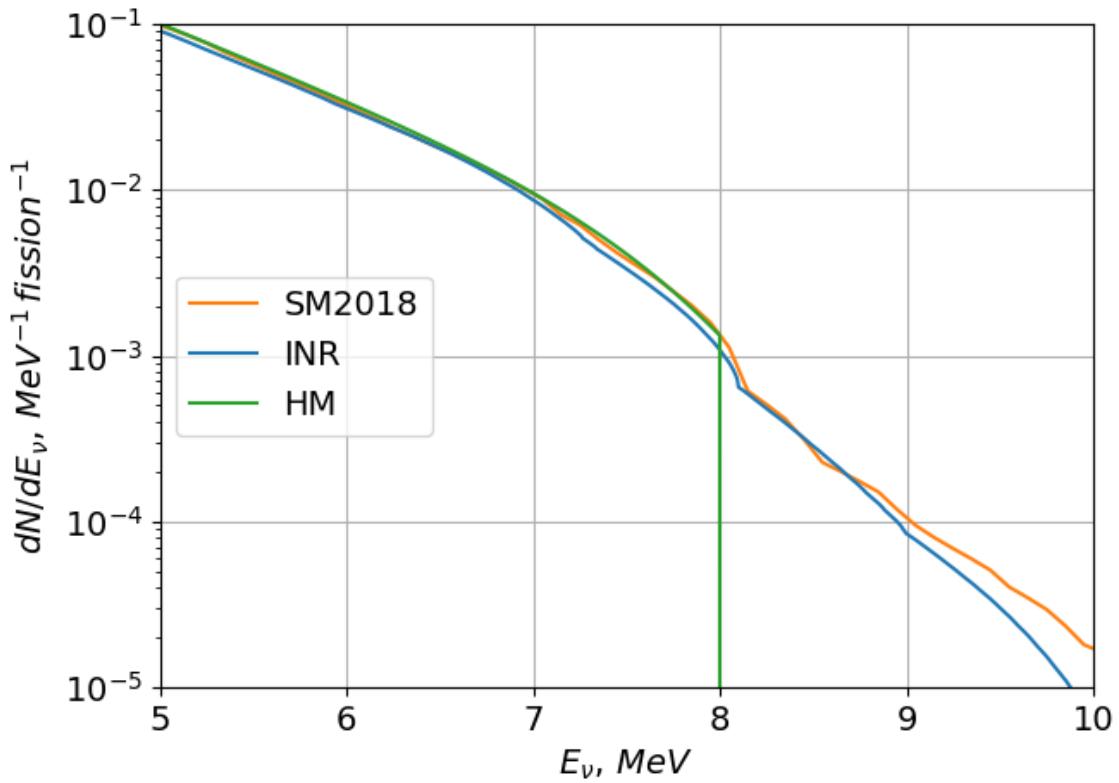
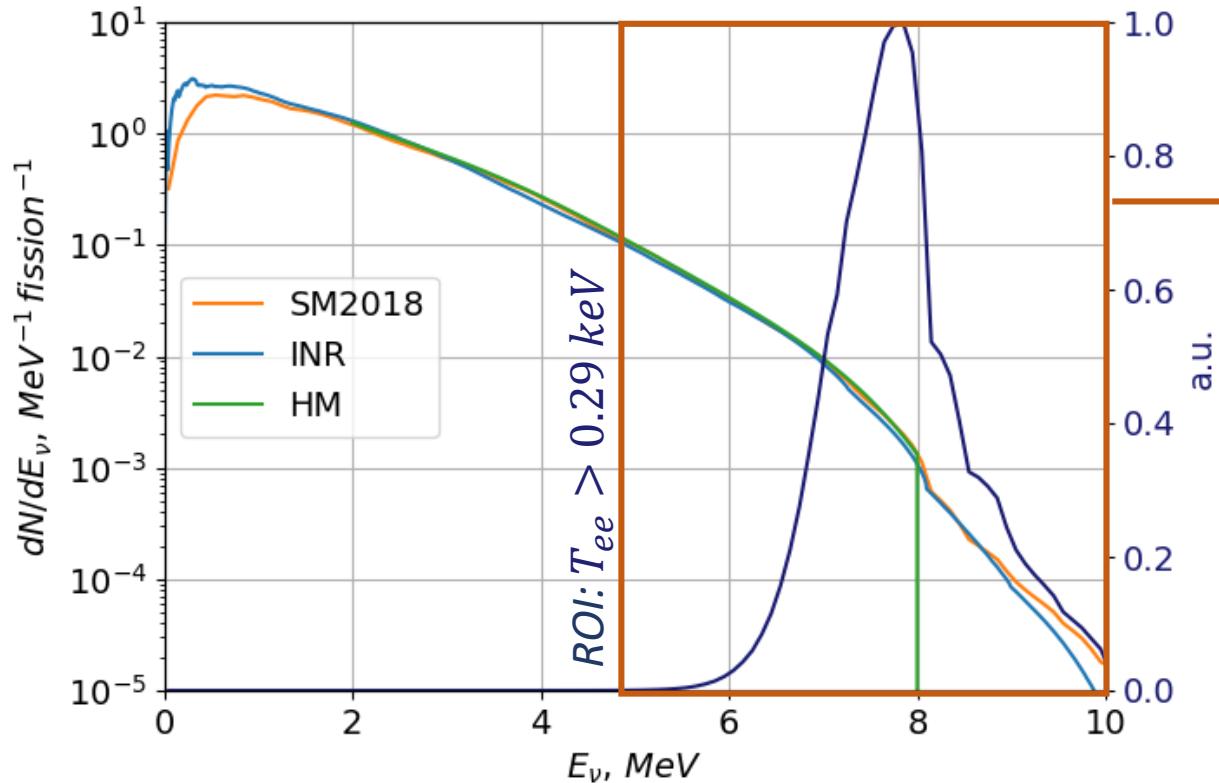


- М Детектор CANBERRA (Mirion, Lingosheim)
- М HPGe PPC, 1.4 кг активной массы
- М Подъемный механизм (12.5 → 11 м)

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

Полная набранная статистика: 2000 кг·дней

# Спектр антинейтрино



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

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

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

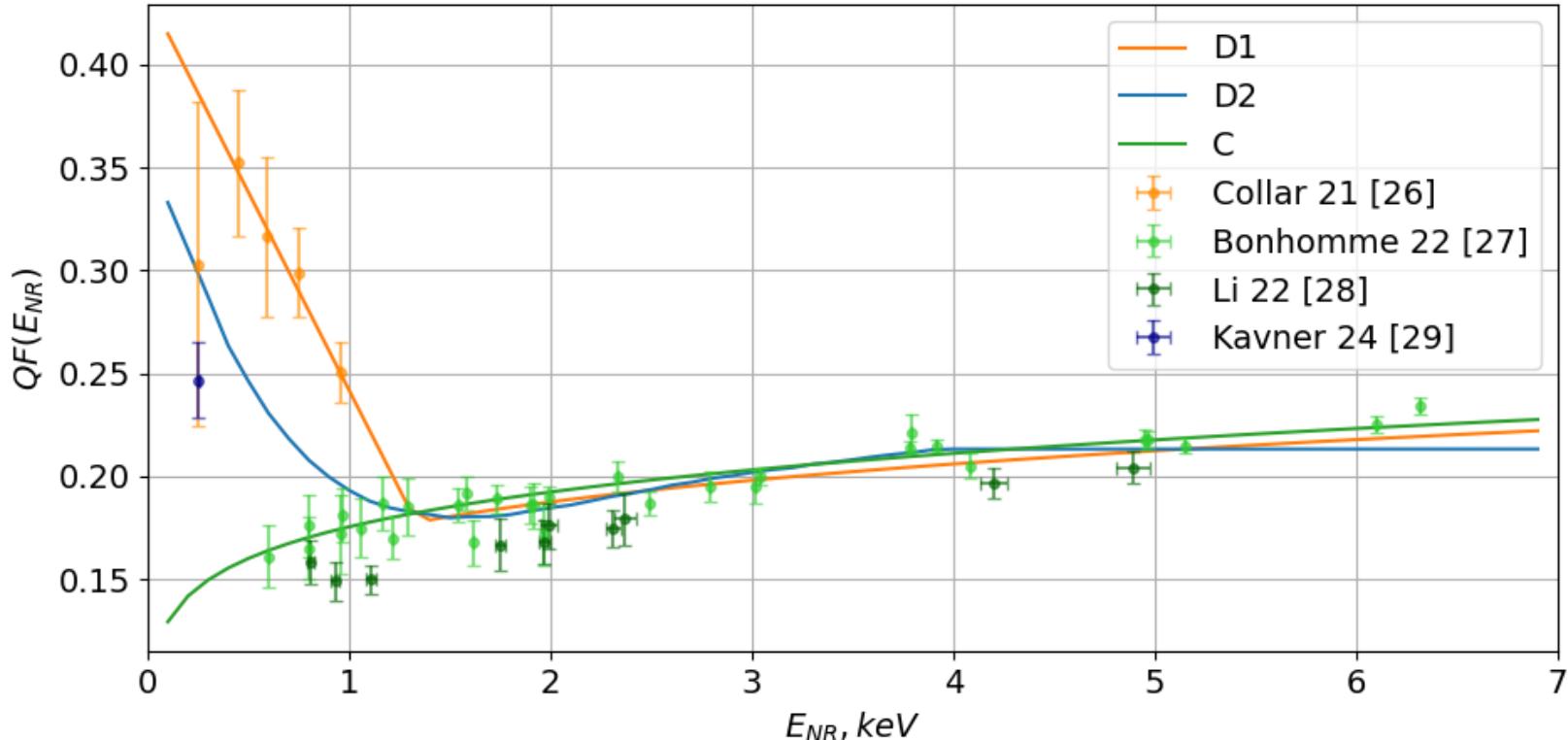
[SM2018] Estienne M. et al. Updated summation model: an improved agreement with the Daya Bay antineutrino fluxes //Physical review letters. – 2019. – Т. 123. – №. 2. – С. 022502.

[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 gemma spectrometer," Physics of Atomic Nuclei, vol. 70, pp. 1873–1884, Nov 2007.

# Отклик германия на ядра отдачи



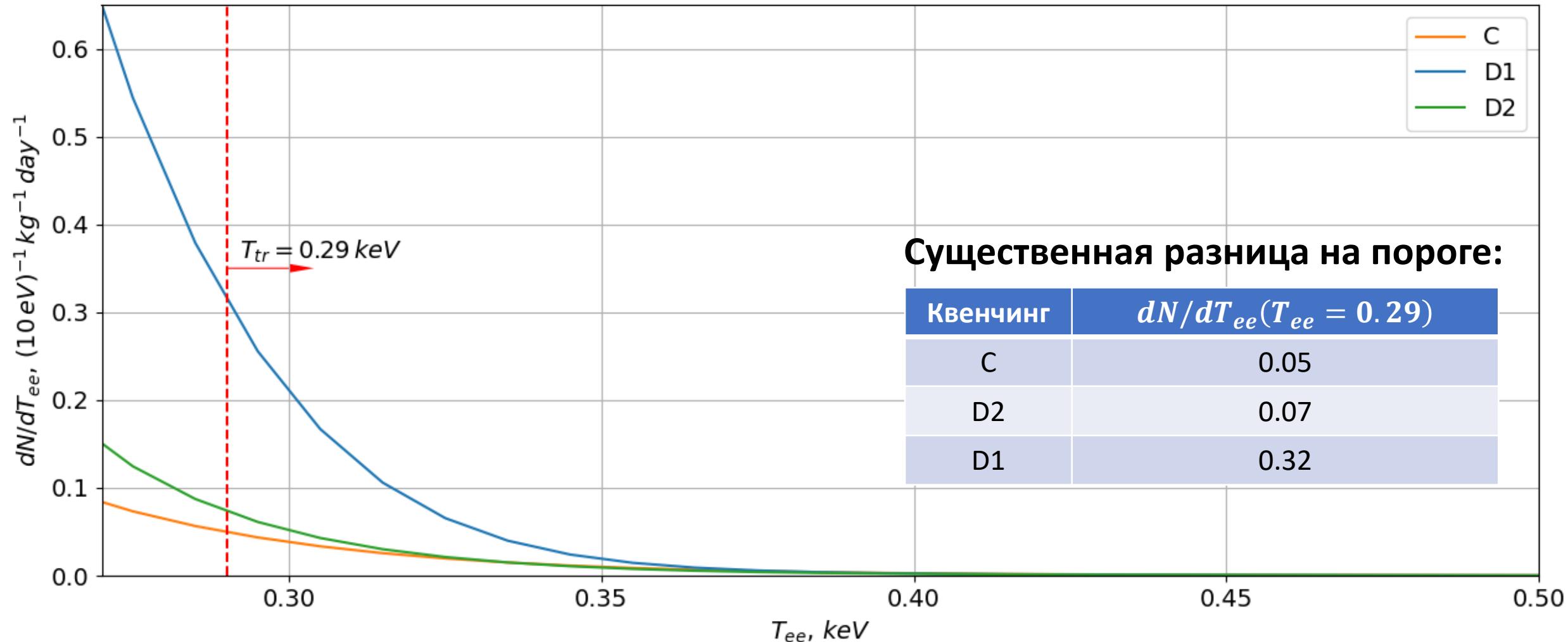
$$QF(E_{NR}) = \left. \frac{E_{det}(E_{NR})}{E_{det}(E_{ee})} \right|_{E_{ee}=E_{NR}}$$

[C] 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

[D1, D2] 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

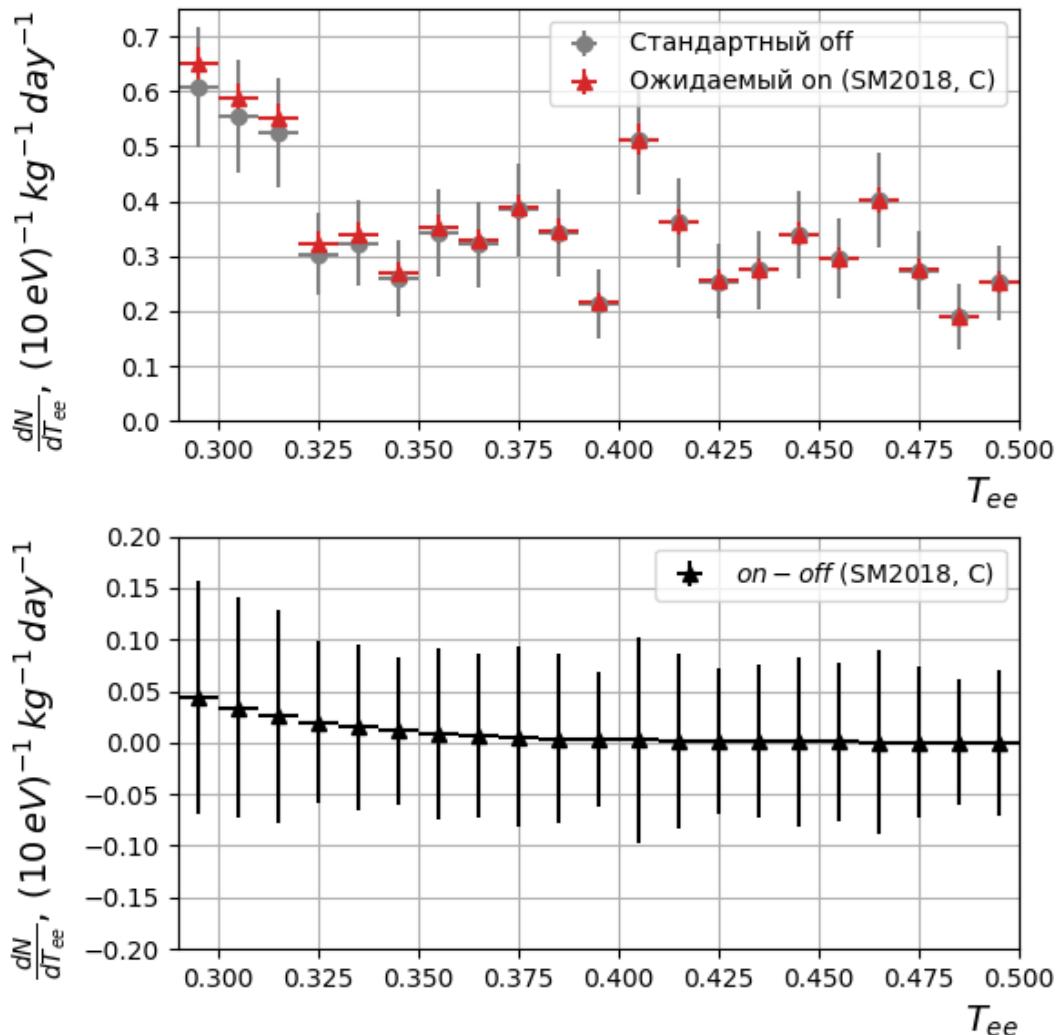
С учётом квенчинг-фактора (SM2018)



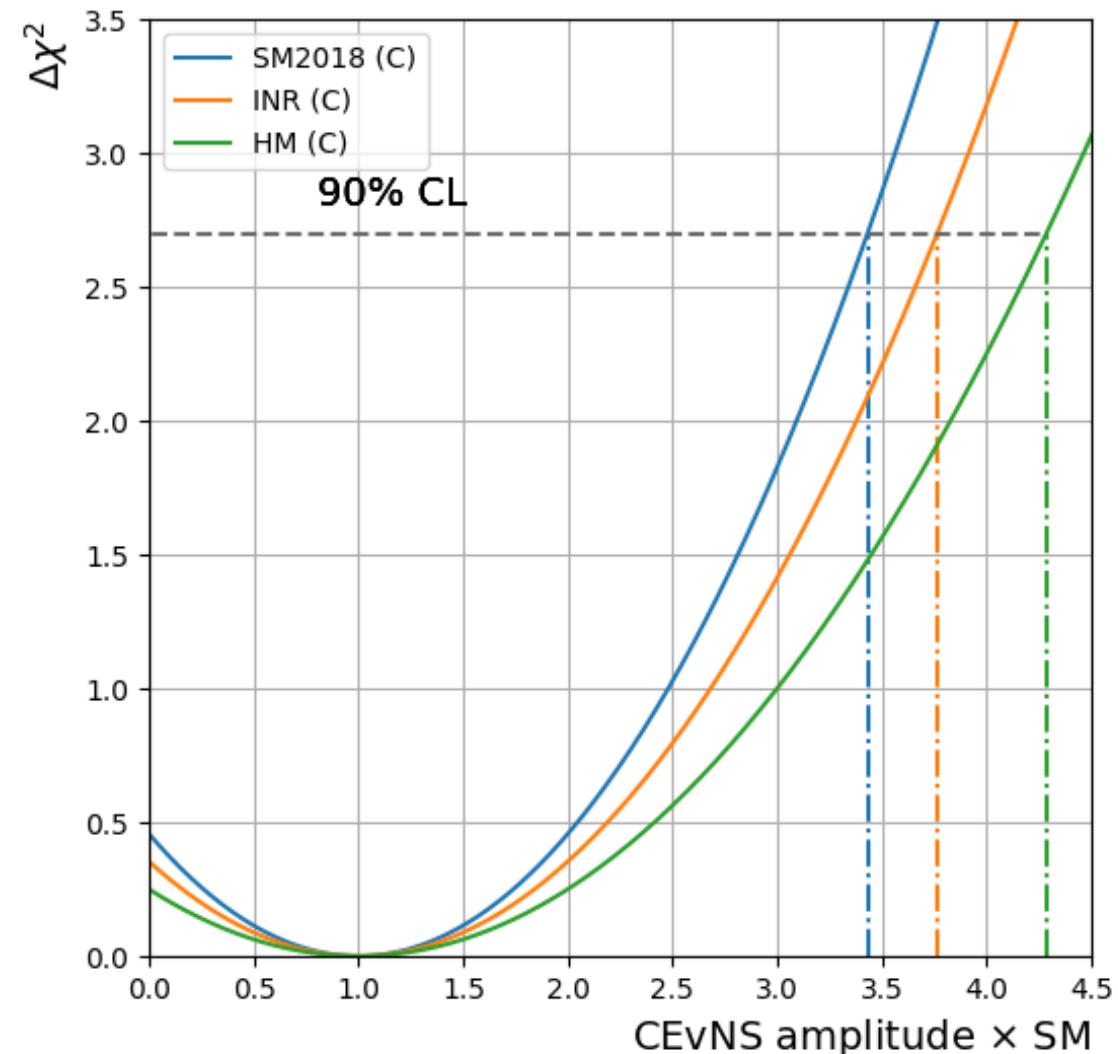
Существенная разница на пороге:

# Чувствительность эксперимента

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

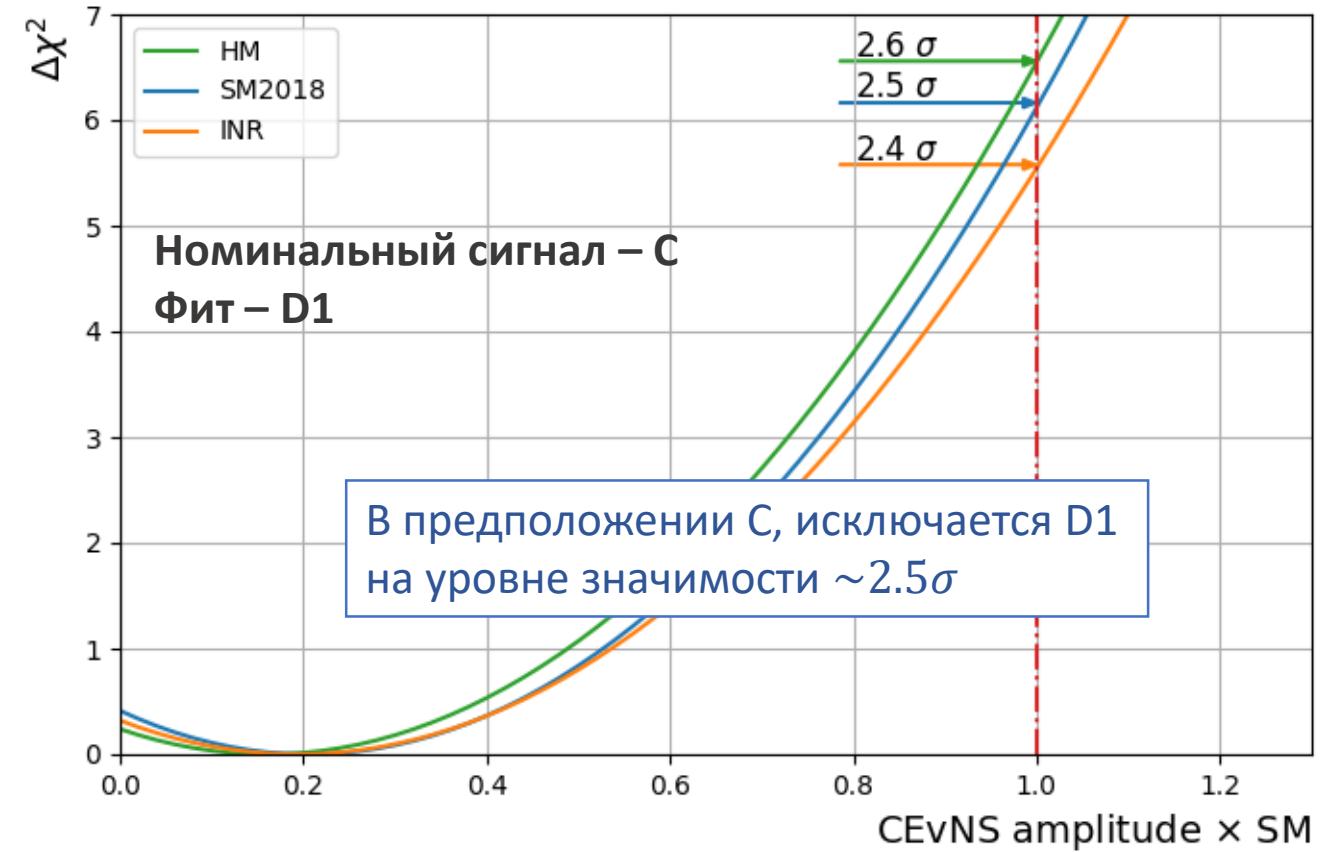
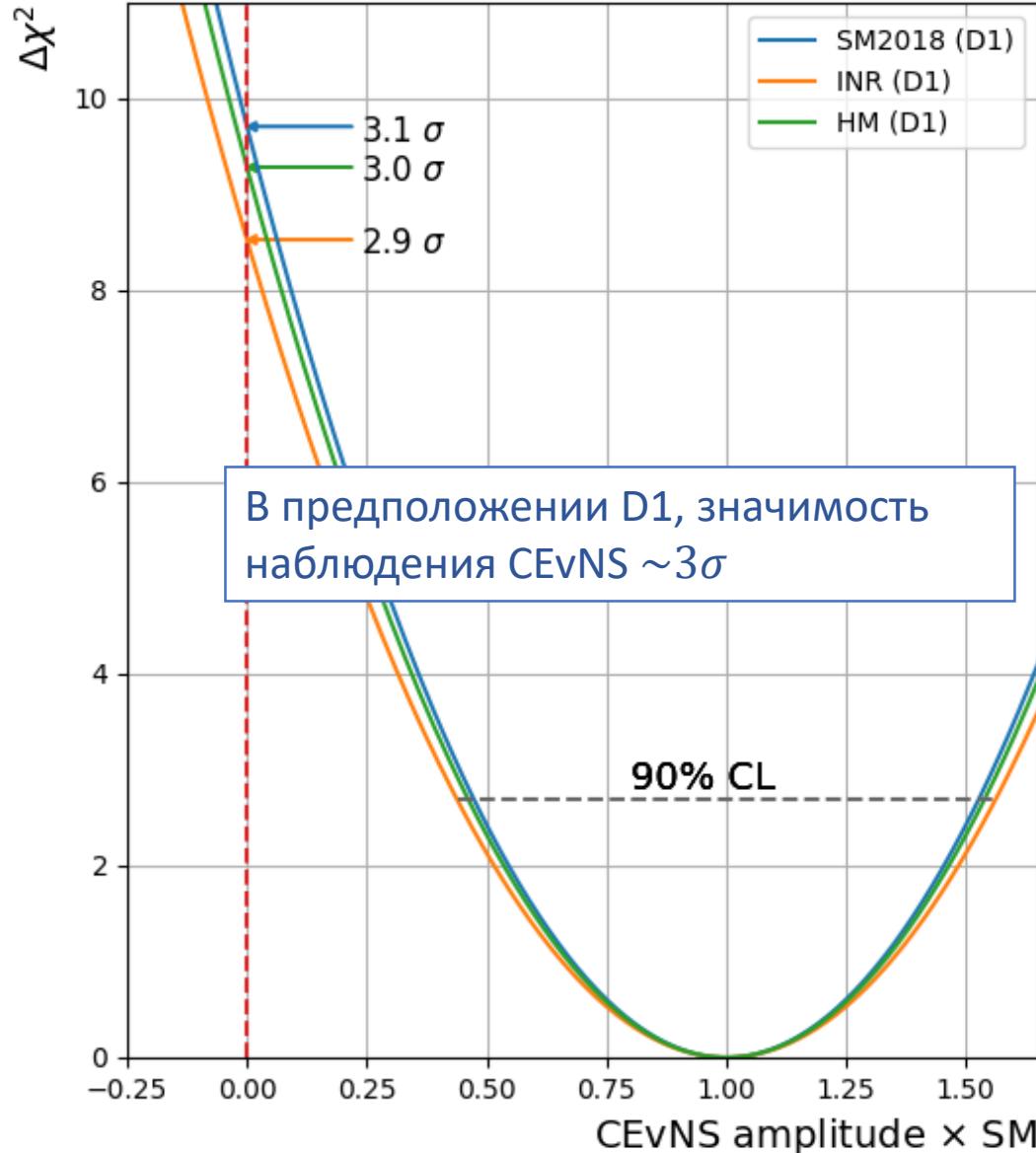


Заложен номинальный сигнал в рамках  
Стандартной модели



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

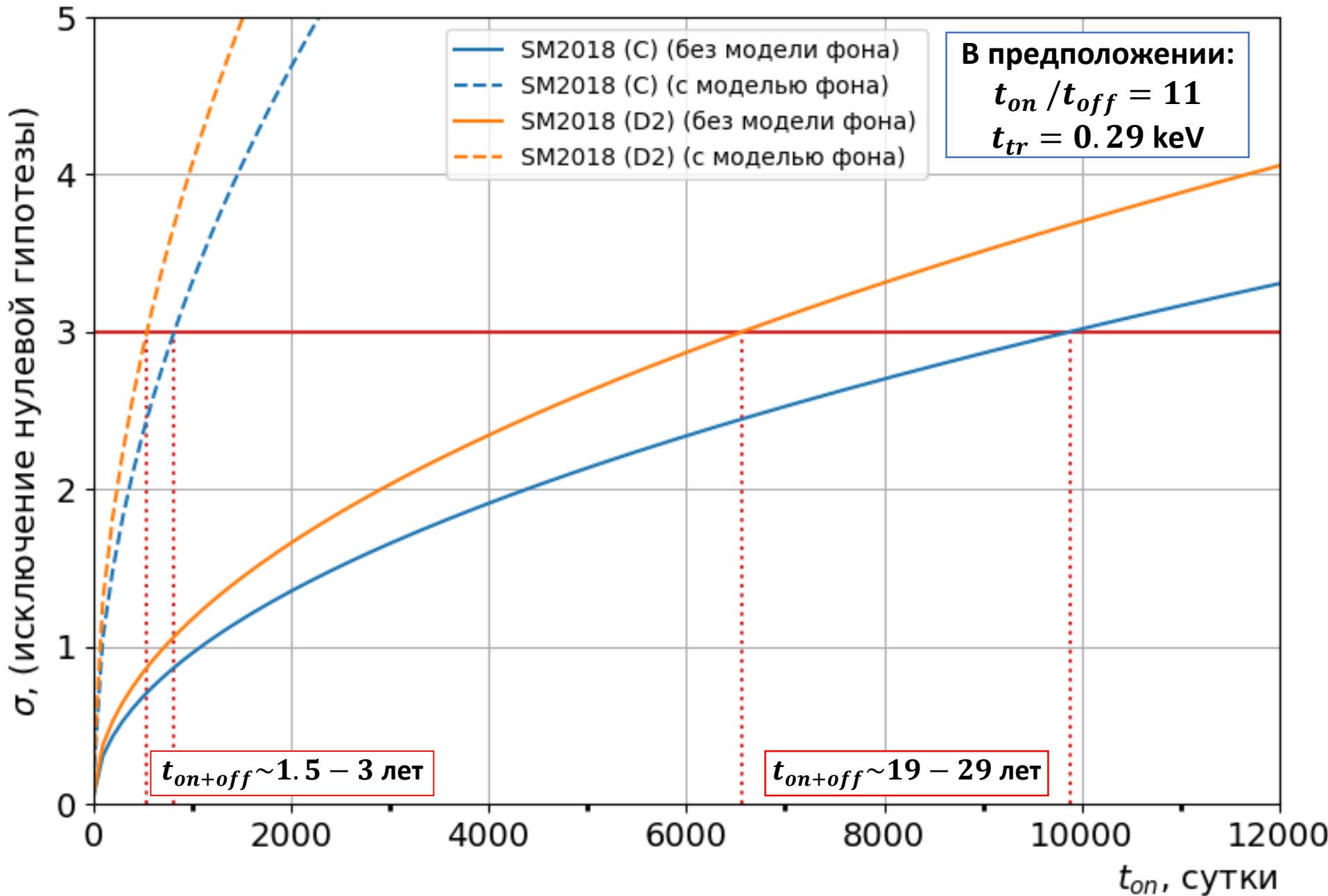
# Чувствительность эксперимента



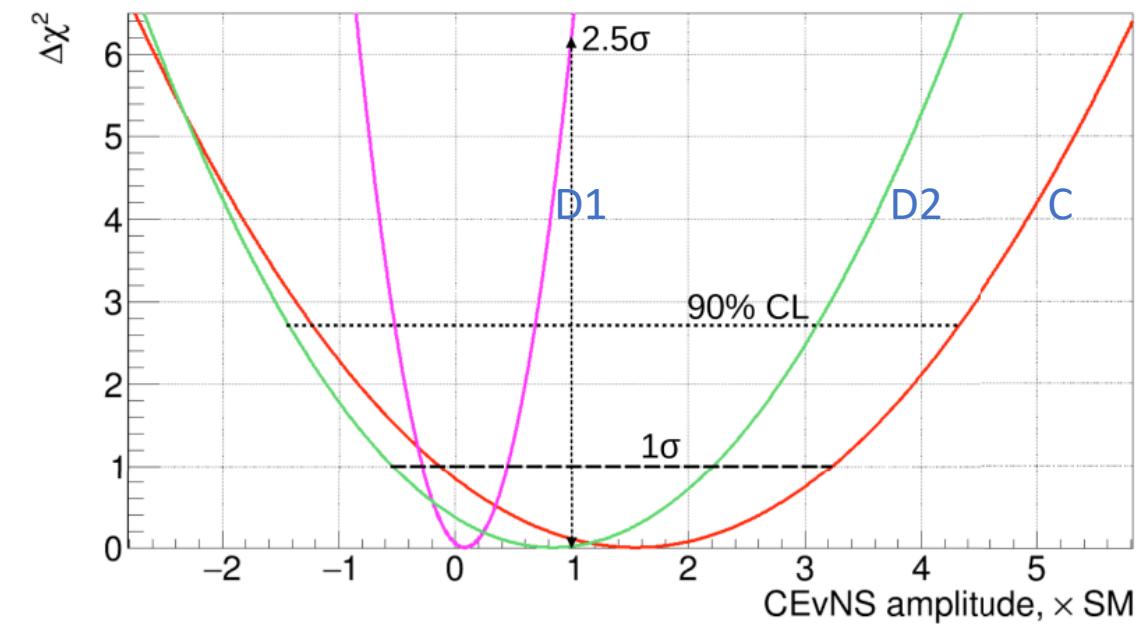
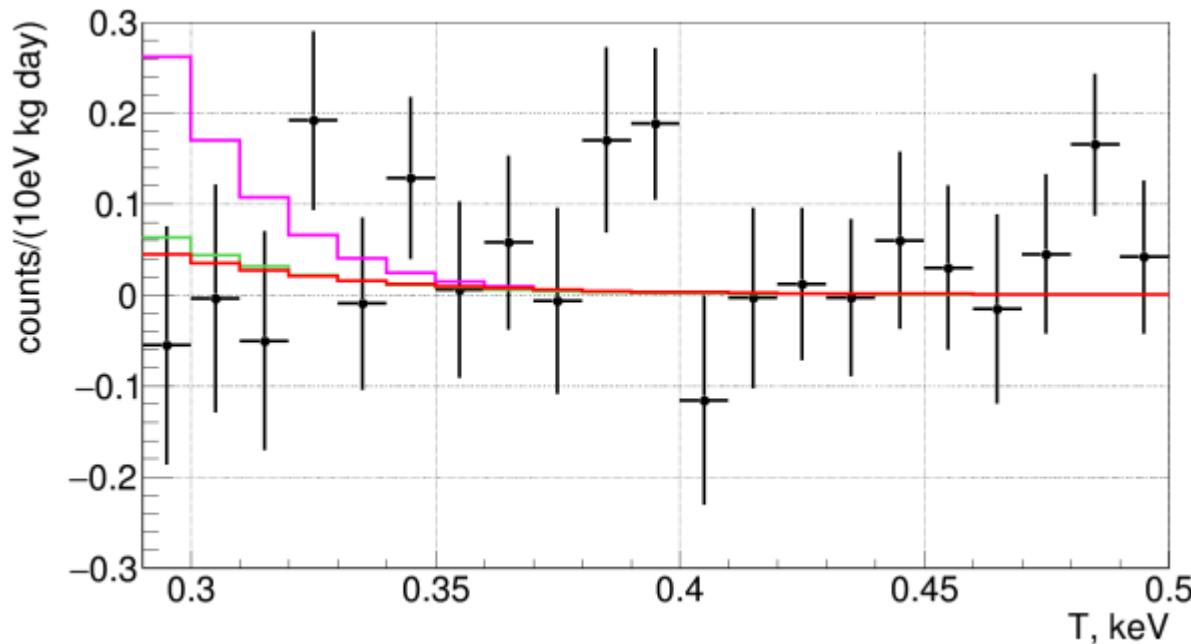
Чувствительность  
 $\times \text{SM} (90\% \text{ CL})$

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



# Результаты vGeN



Belov V. et al. New constraints on coherent elastic neutrino–nucleus scattering by the vGeN experiment // Chinese Physics C. – 2025. – Т. 49. – №. 5. – С. 053004.

# Модернизация vGeN

1. «Комptonовское вето»: ~30 кг NaI для подавления гамма-фона (2x-кратное подавление фона с защитой и мюонным вето — тесты в лаборатории ОИЯИ БНО)

2. Модификация DAQ (запись формы сигнала):

- Дискриминация приповерхностных событий
- Дискриминация шумов электроники вблизи порога

3. Модификация криокулера:

Снижение энергопотребления



Уменьшение вибрации



Снижение уровня шума



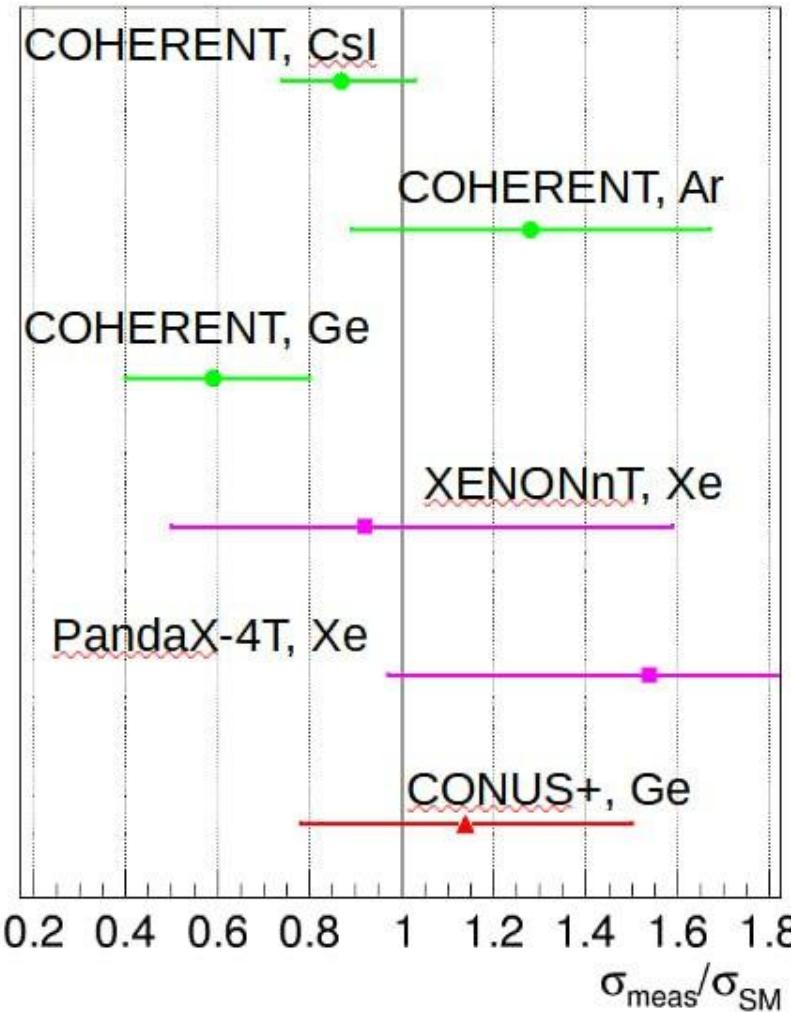
# Заключение

- Рассчитаны спектры ядер отдачи для различных моделей спектров антинейтрино и квенчинга
- Обнаружена существенная зависимость чувствительности от модели спектра и квенчинга
- Поставлены ограничения на величину сечения CEvNS в  $4.3 \times \text{CM}$
- Идёт работа над модернизацией vGeN
- Результаты расчёта, представленные в докладе вошли в статьи:
  - А. М. Коновалов, А. В. Лубашевский, А. В. Лукьяшин, Д. О. Саутнер. **Влияние моделей энергетических спектров реакторных антинейтрино на чувствительность эксперимента vGeN к когерентному рассеянию нейтрино на ядрах германия // Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук.** – 2025. – Т. 52. – №. 11. – С. 46-62.
  - Belov V. et al. **New constraints on coherent elastic neutrino–nucleus scattering by the vGeN experiment // Chinese Physics C**. – 2025. – Т. 49. – №. 5. – С. 053004.

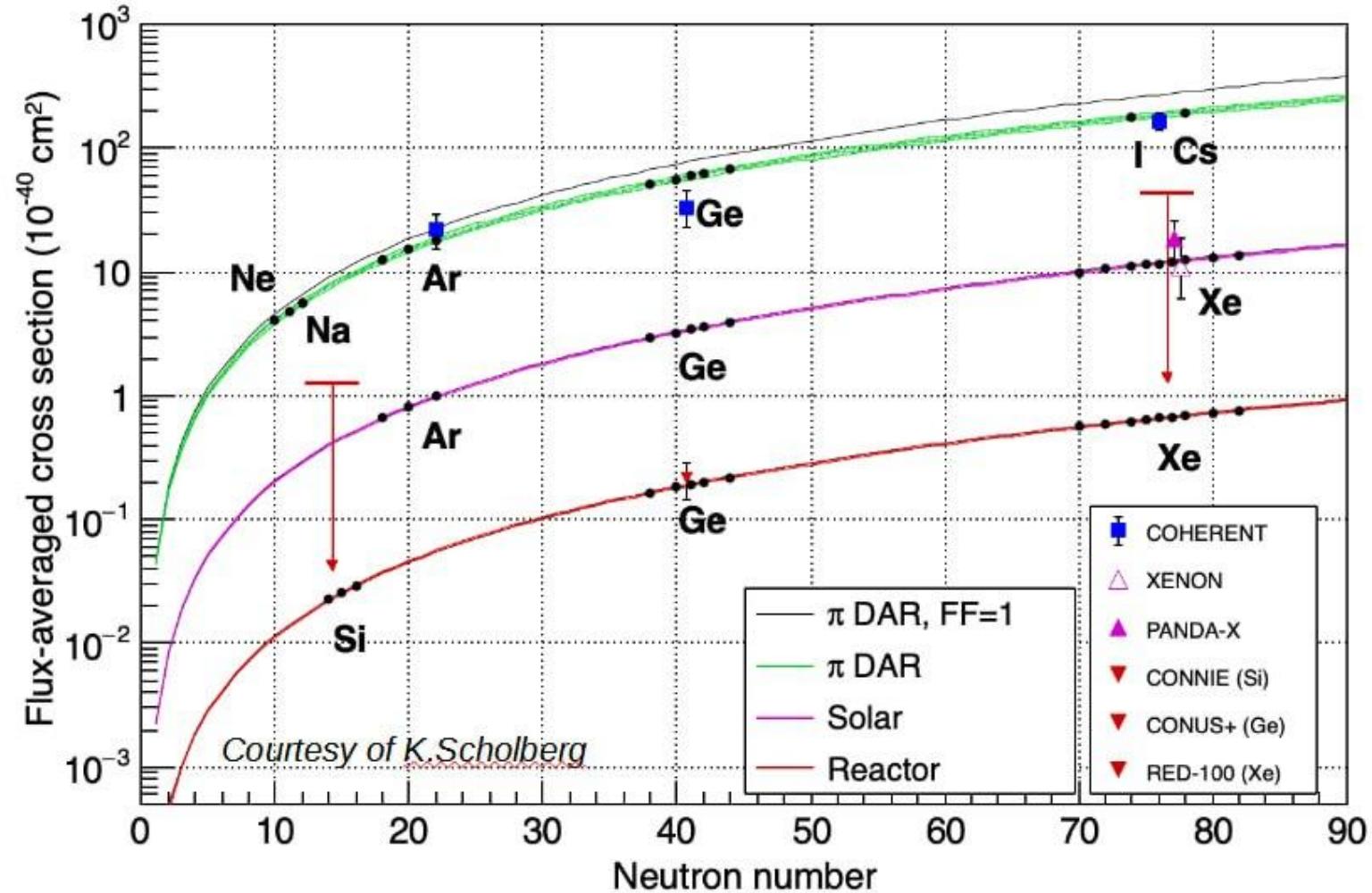
# Приложения

# Текущий статус измерения сечения УКРН

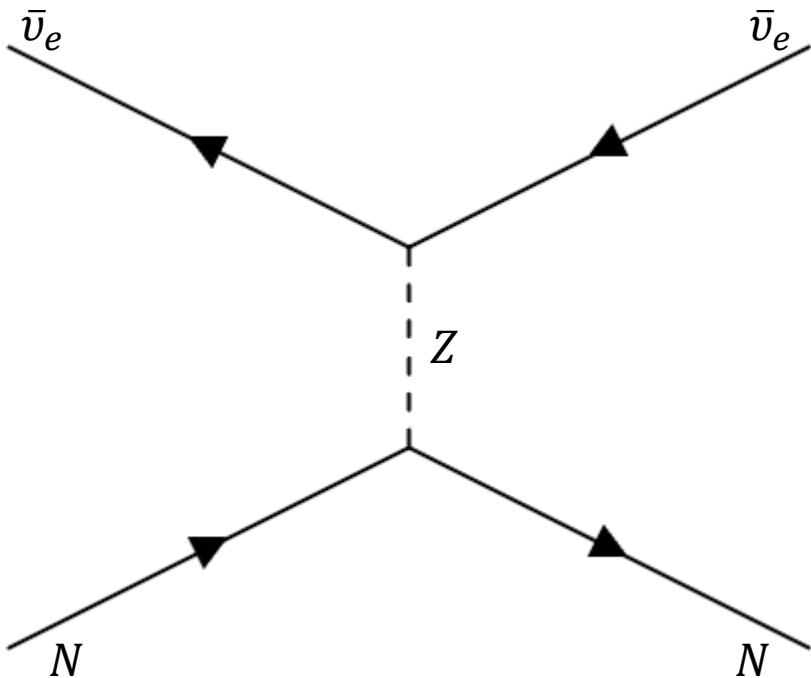
Ratio to SM



Best results for source/target



# Когерентное упругое рассеяние нейтрино



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

$k, k'$  — импульс нейтрино до и после рассеяния  
 $x_j$  — координата нуклона  
 $f_j$  — амплитуда рассеяния на отдельном нуклоне  
 $A$  — число нуклонов в ядре

**Условие когерентности:**

$$qR \ll 1$$

Предсказано в 1974 г.

Первое наблюдение на ускорителе 2017 г.

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

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

[1] Freedman D. Z., Schramm D. N., Tubbs D. L. Weak neutral current and its effects in stellar collapse // Annu. Rev. Nucl. Sci.;(United States). – 1977. – T. 27.