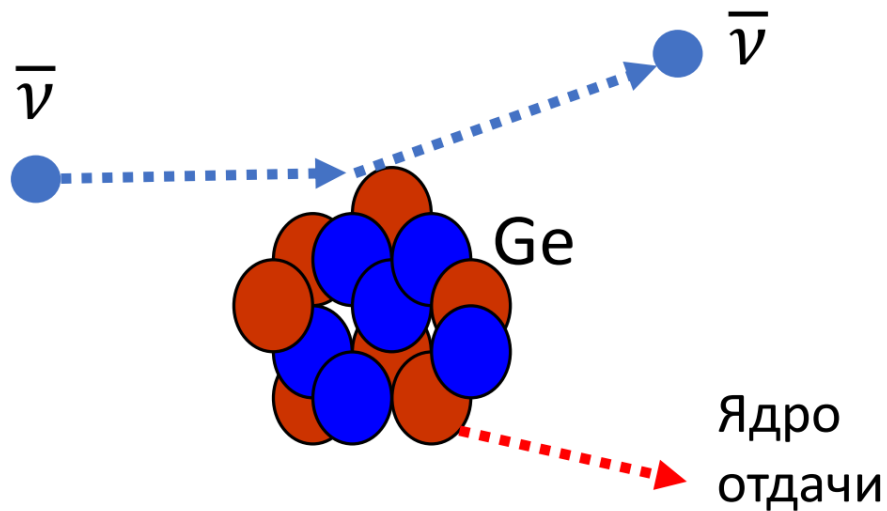


Результаты и планы по поиску упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах германия в эксперименте ν GeN

Молодежная конференция
«Физика элементарных частиц и космология 2025»

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

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. – Т. 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)

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

M	Масса ядра
T	Энергия отдачи ядра
E_ν	Начальная энергия нейтрино

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

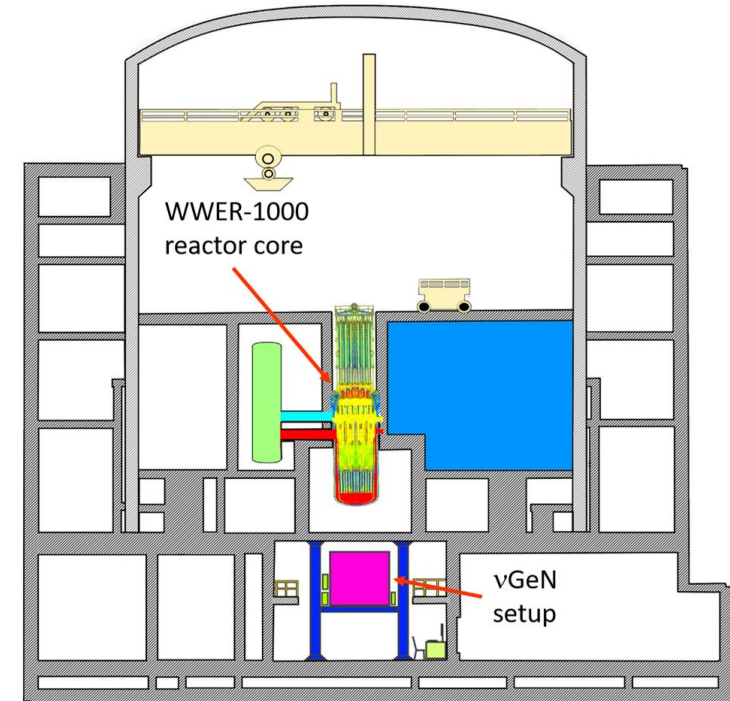
$$T_{max} = \frac{2E_\nu^2}{M + 2E_\nu}$$

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

Для энергий реакторных антинейтрино:

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

Эксперимент ν GeN



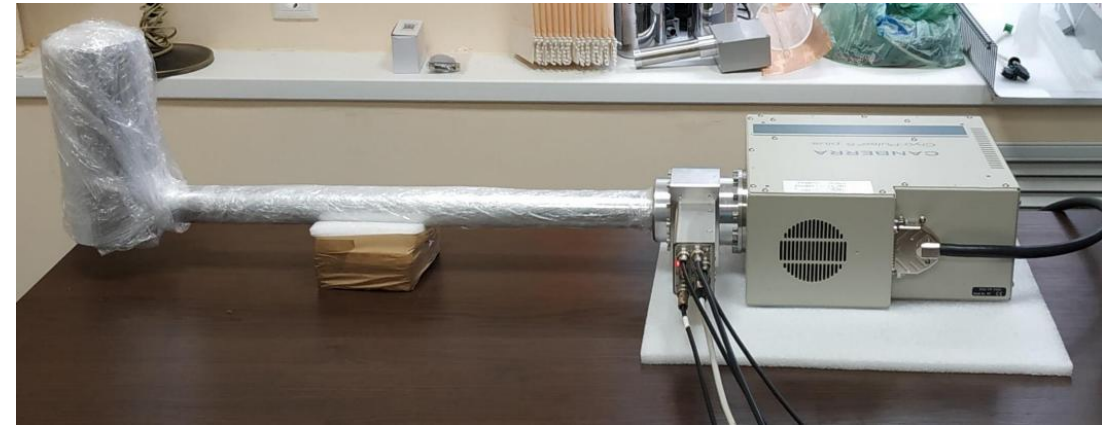
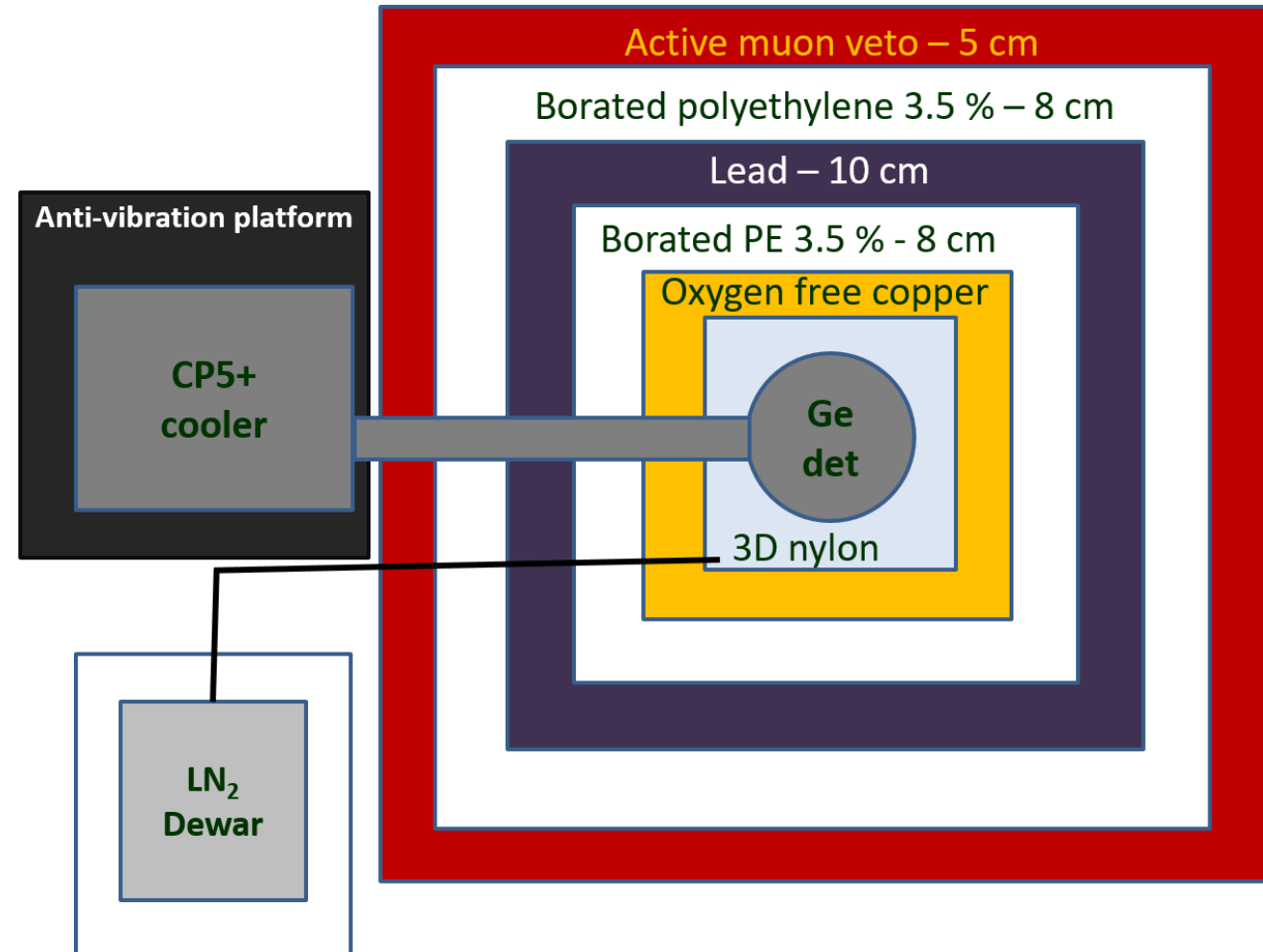
4 реактора ВВЭР-1000

Мощность реактора: 3.1 ГВт

Расстояние до детектора: 11 м

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

Эксперимент vGeN

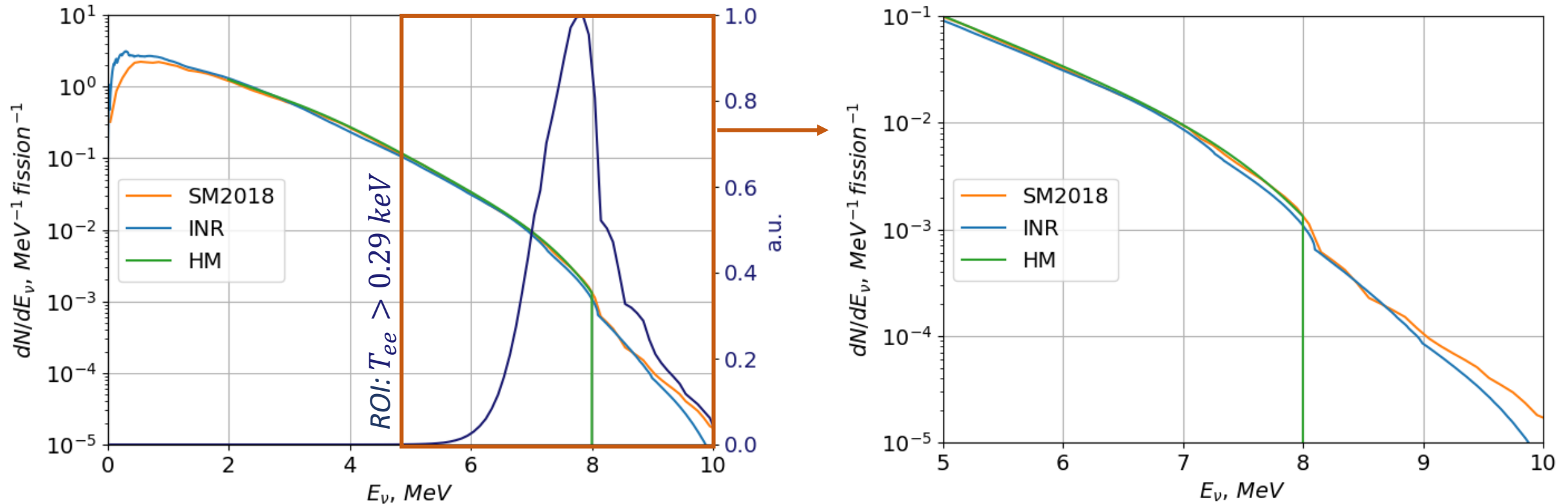


Λ Детектор CANBERRA (Mirion, Lingosheim)
Λ HPGe PPC, 1.4 кг активной массы
Λ Подъемный механизм (12.5 → 11 м)

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}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.

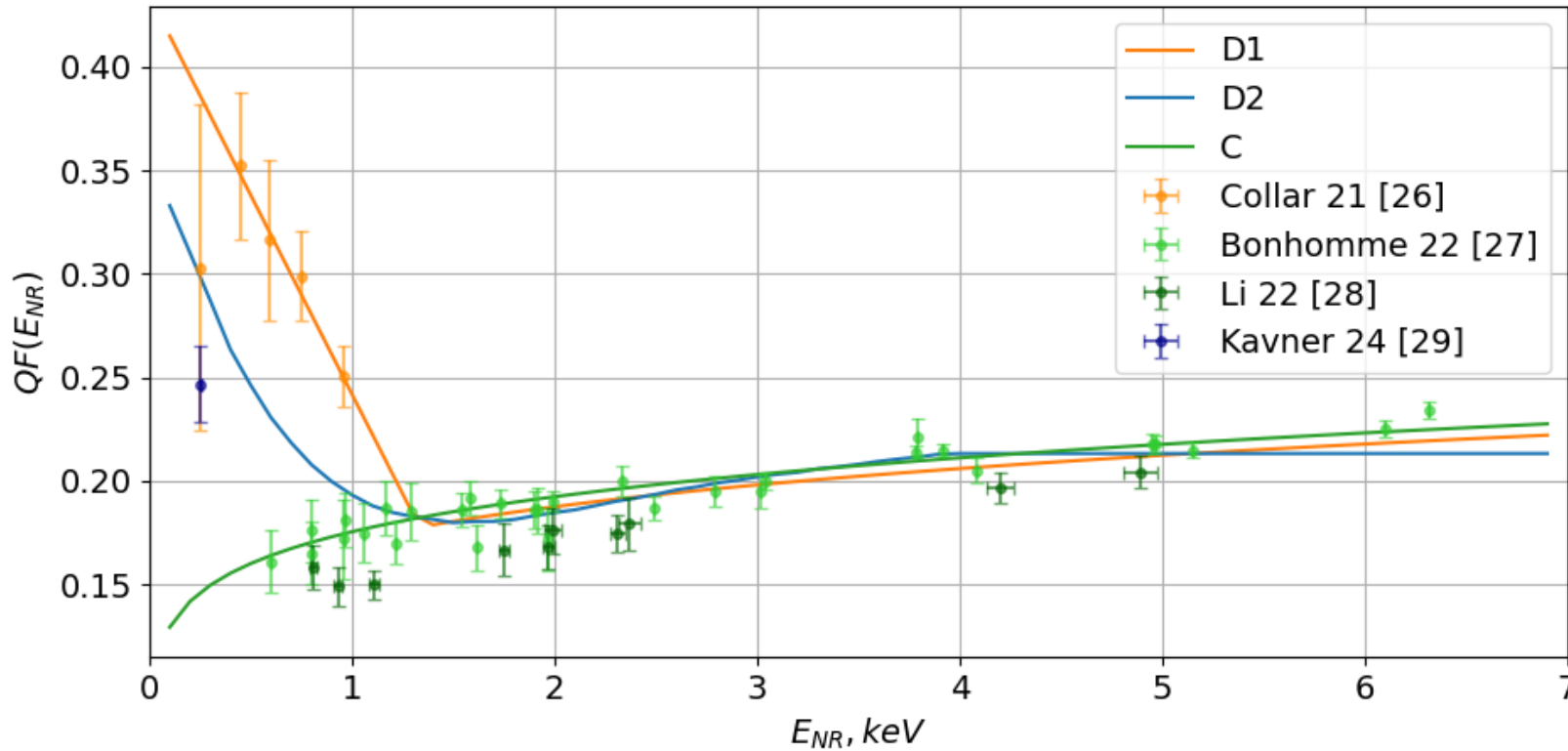
[SM2018] Estienne M. et al. Updated summation model: an improved agreement with the Daya Bay antineutrino fluxes // *Physical review letters*. – 2019. – T. 123. – №. 2. – С. 022502.

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

Отклик германия на ядра отдачи



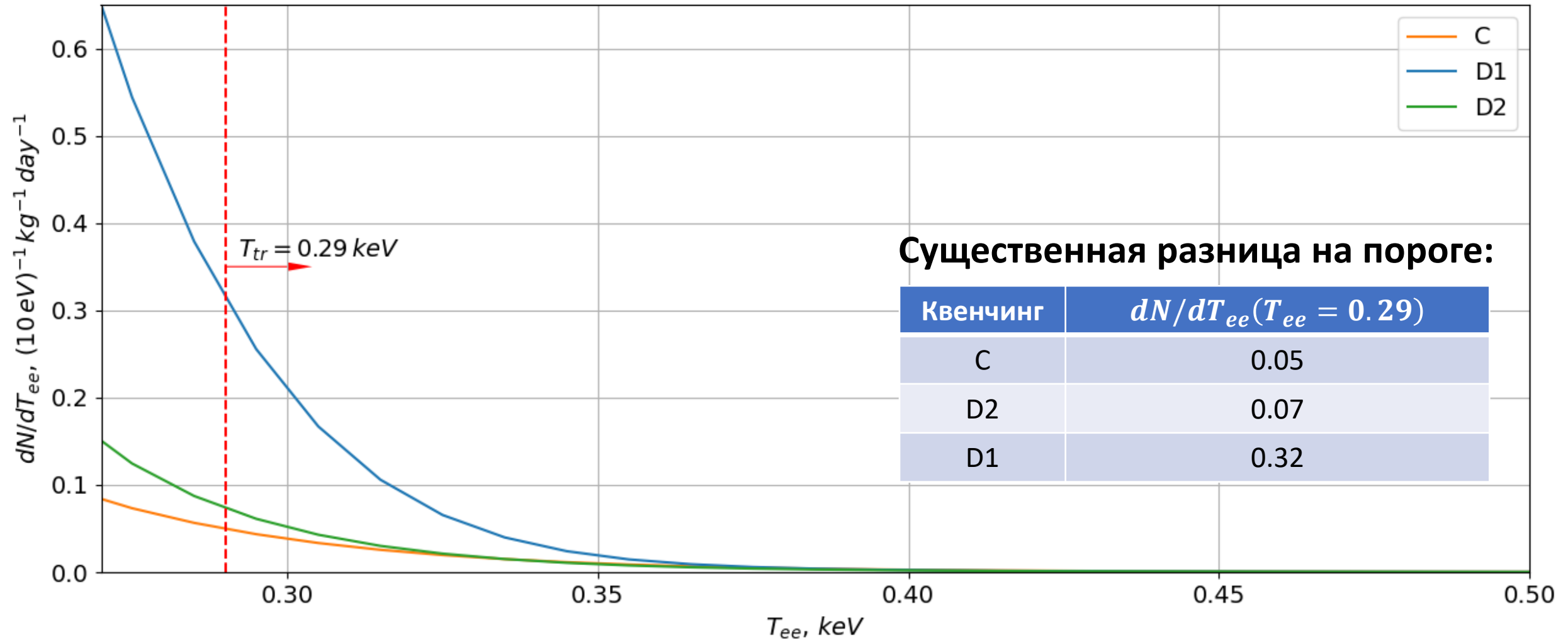
$$QF(E_{NR}) = \left. \frac{E_{det}(E_{NR})}{E_{det}(E_{ee})} \right|_{E_{ee}=E_{NR}}$$

[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)

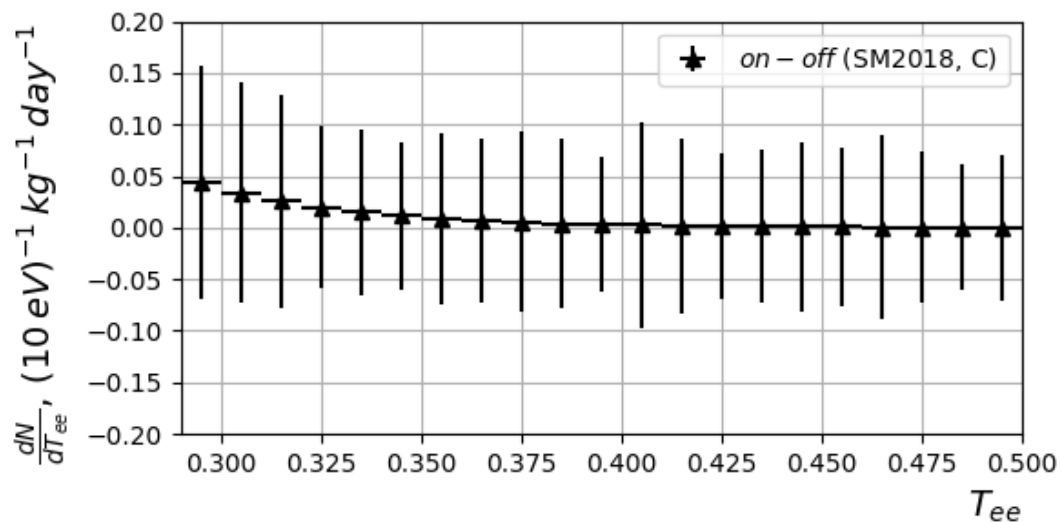
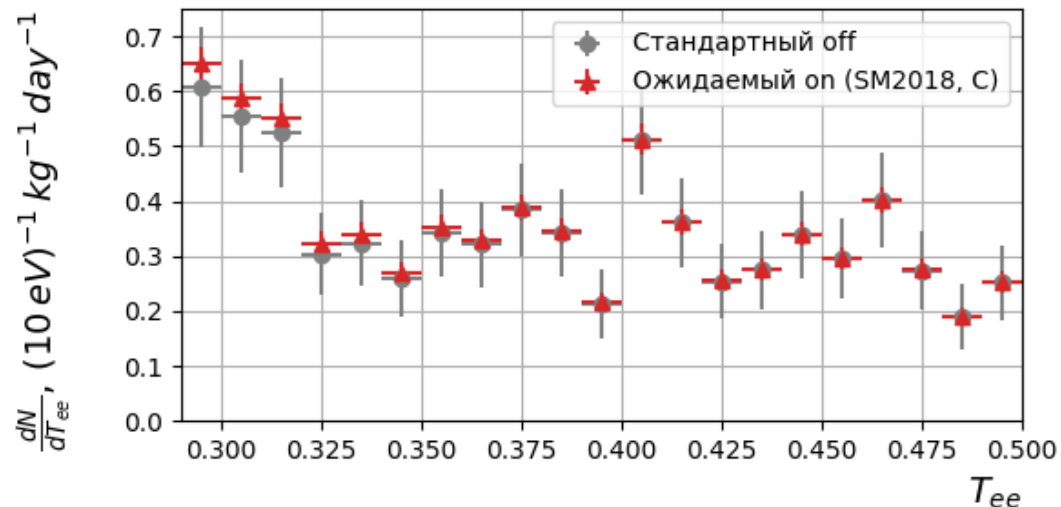


Существенная разница на пороге:

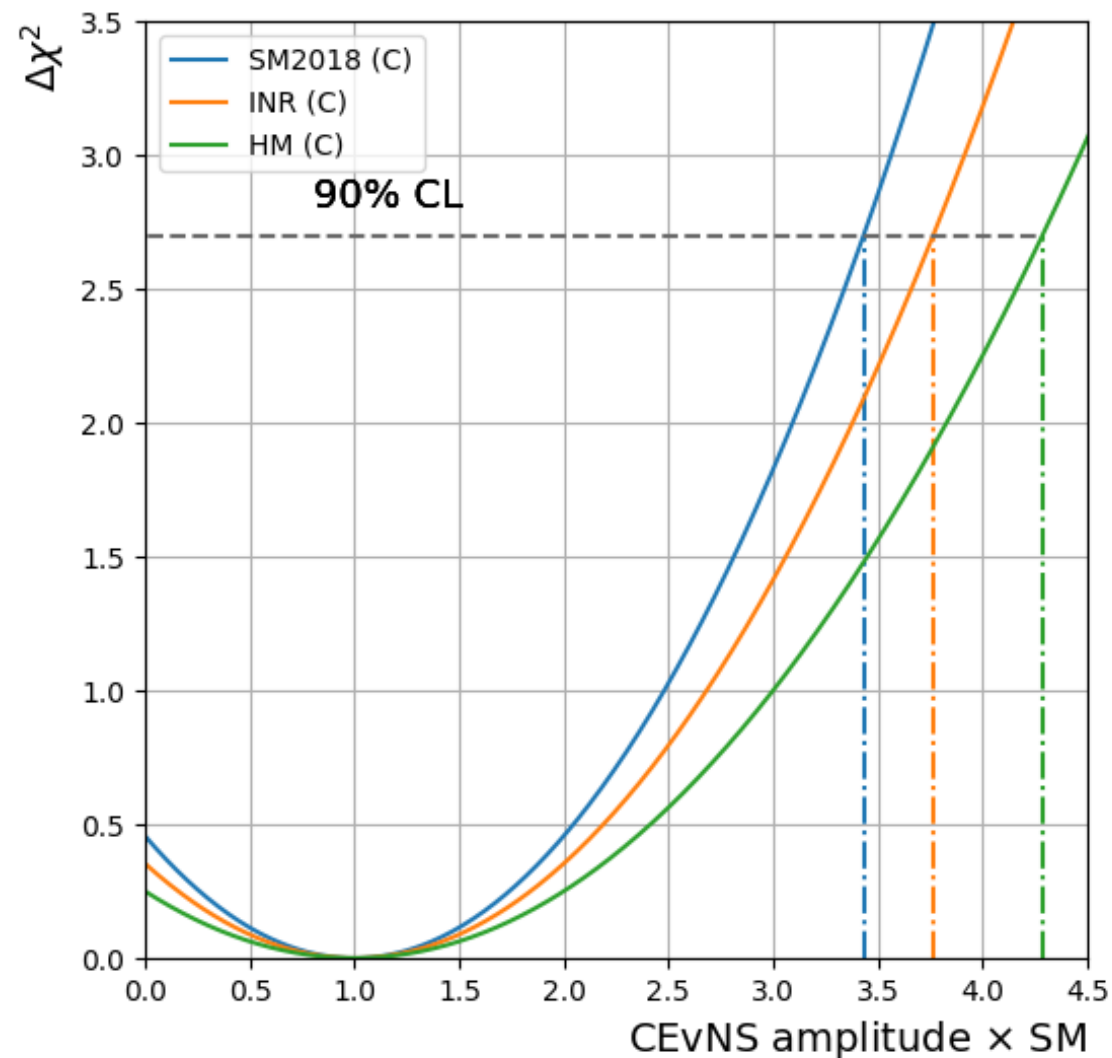
Квенчинг	$dN/dT_{ee}(T_{ee} = 0.29)$
C	0.05
D2	0.07
D1	0.32

Чувствительность эксперимента

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

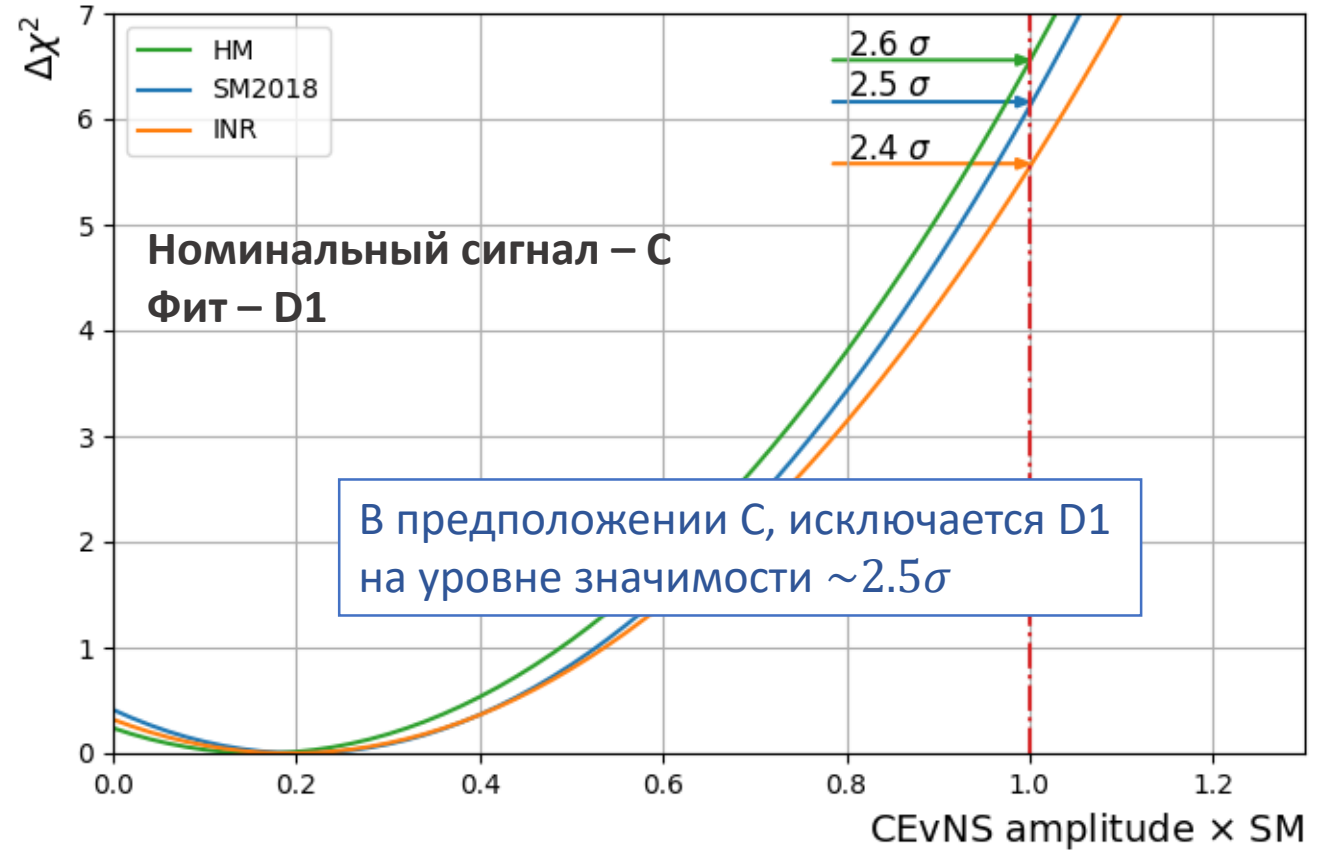
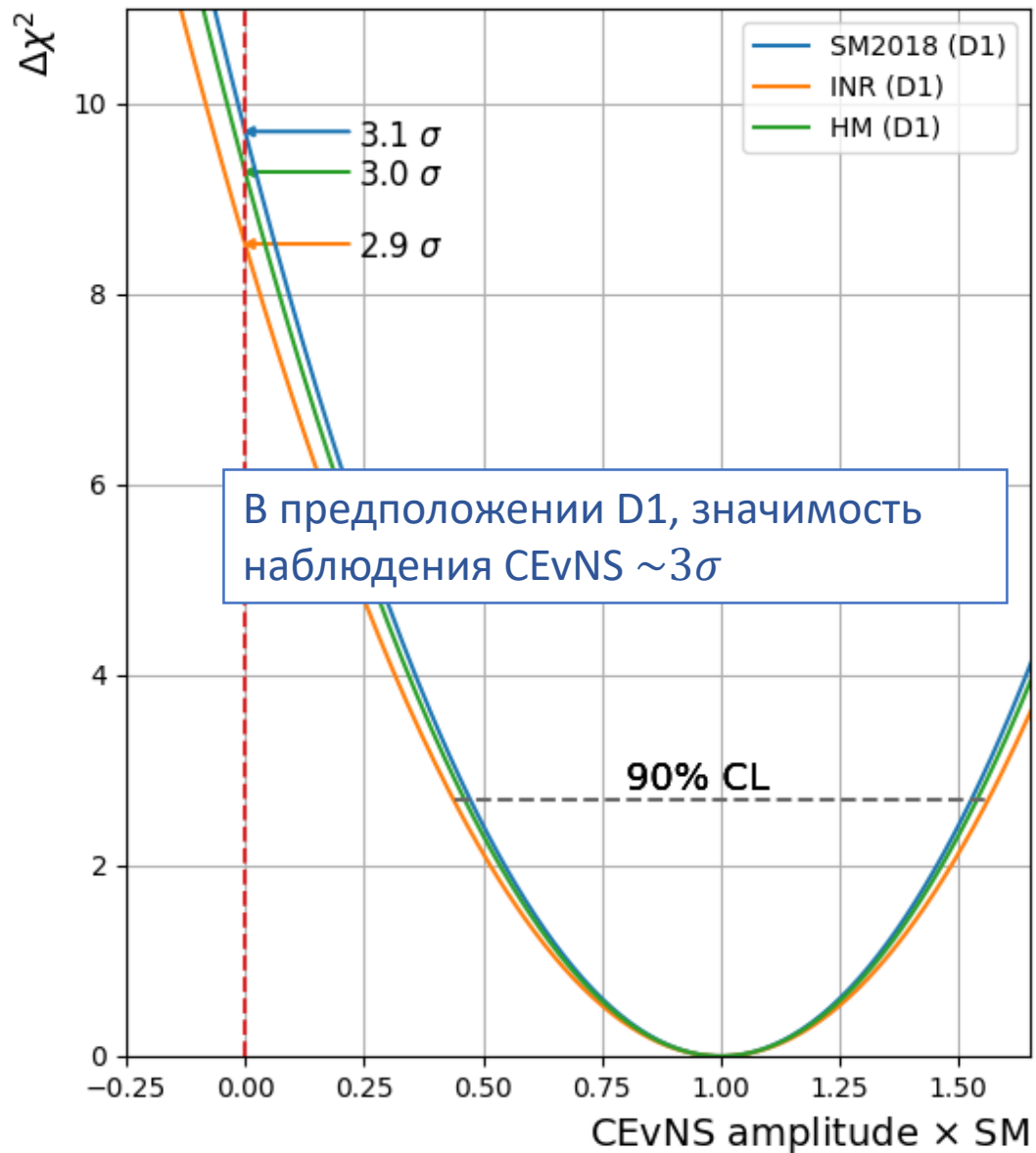


Заложен номинальный сигнал в рамках
Стандартной модели



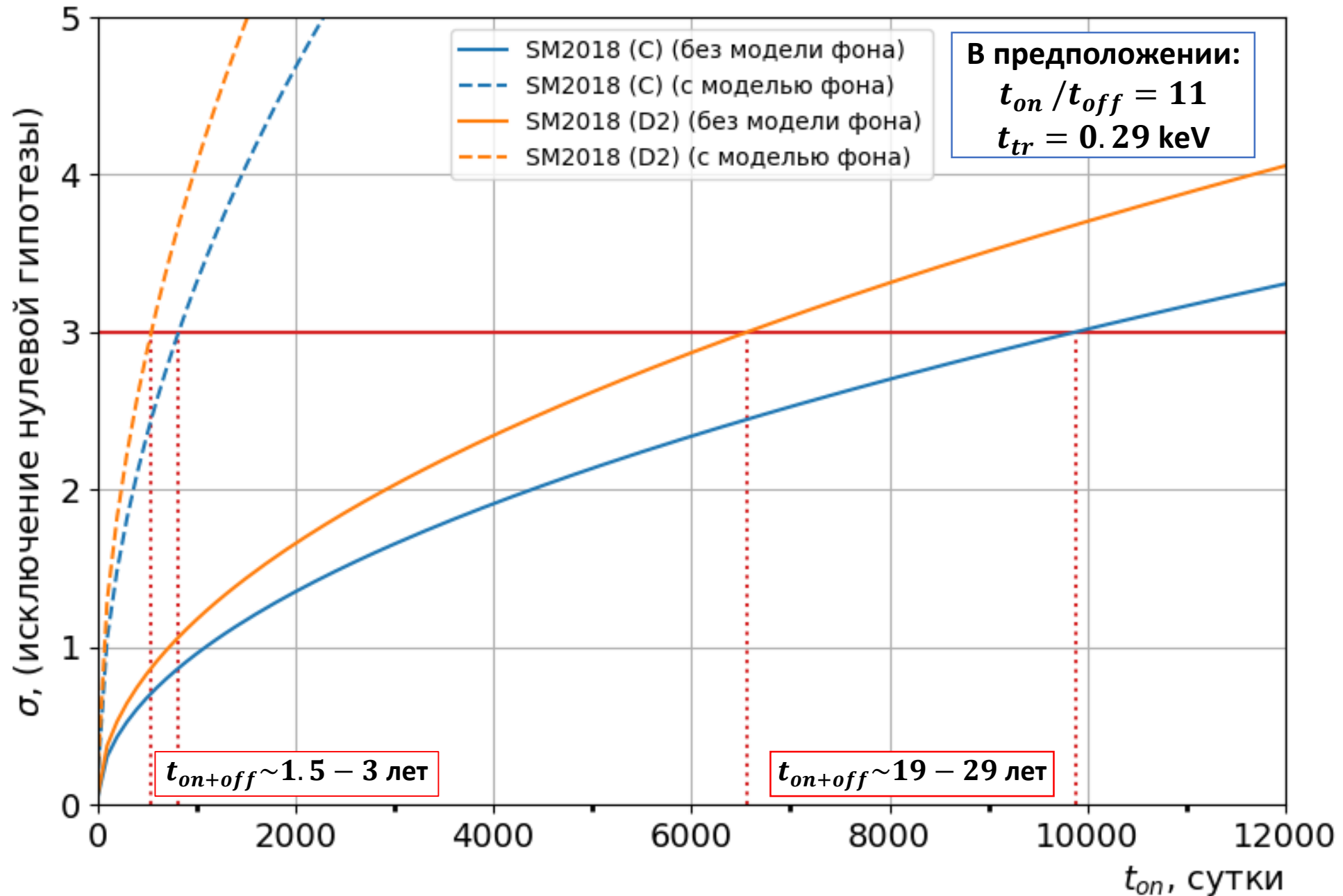
$T_{off} = 63 \text{ kg} \cdot \text{days}$ $T_{on} = 703 \text{ kg} \cdot \text{days}$

Чувствительность эксперимента

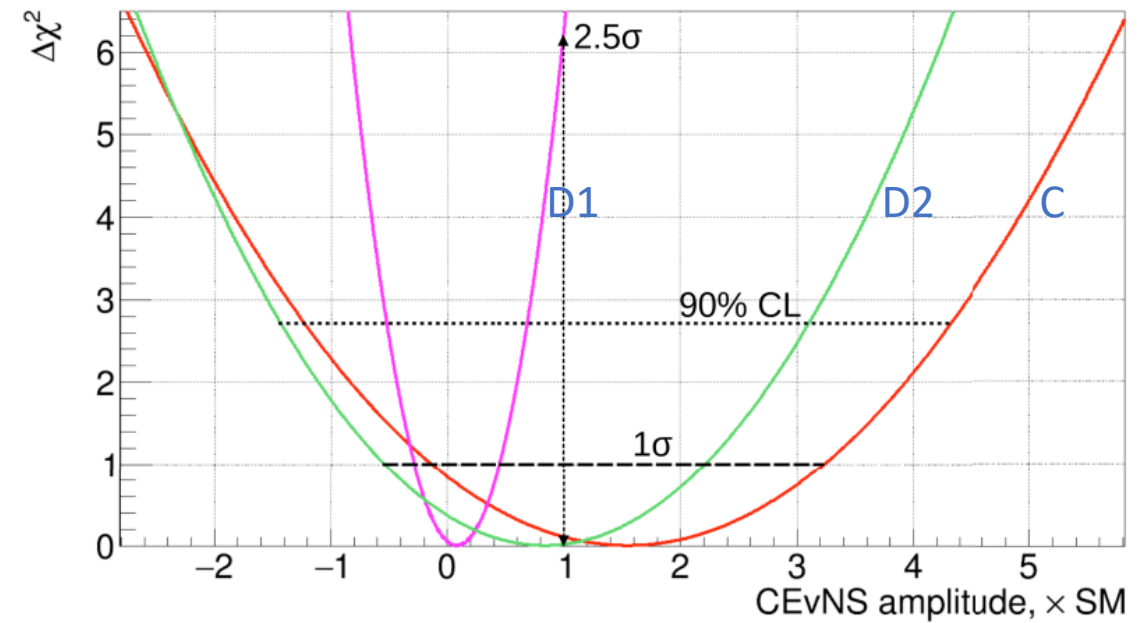
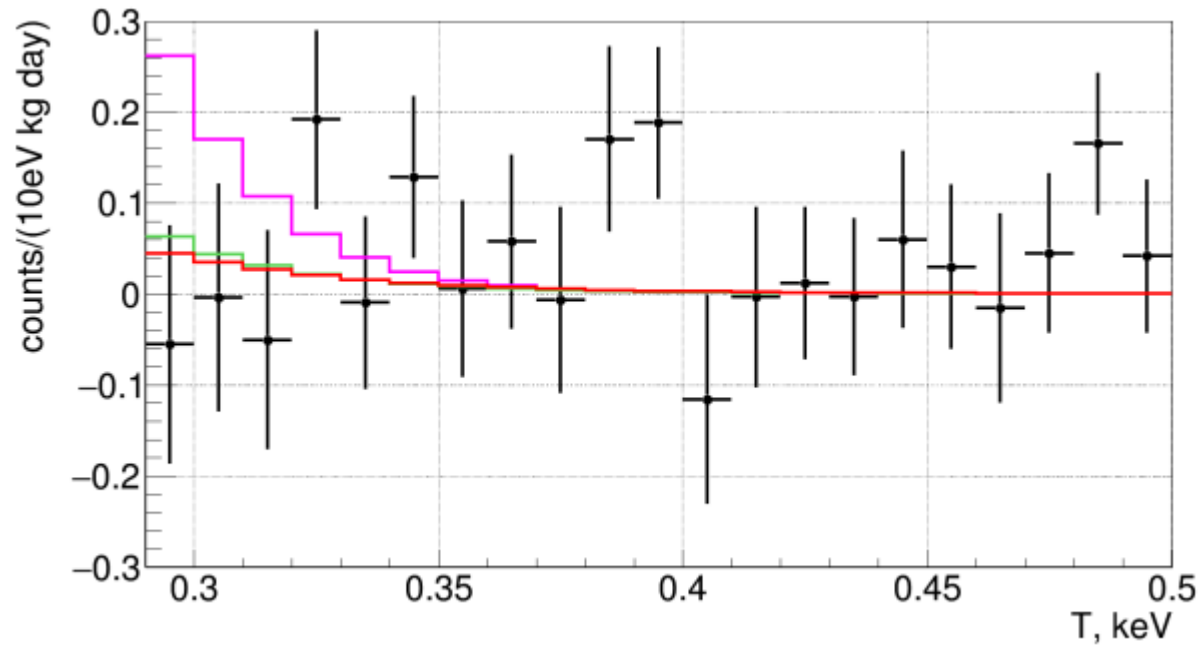


Чувствительность, \times SM (90% CL)	Спектр	D1	D2	C
	SM2018	1.5	3.0	3.4
	INR	1.6	3.2	3.8
	HM	1.5	3.5	4.3

Чувствительность эксперимента



Результаты vGeN



QF	$A_{\text{best}} \pm \sigma_A, \times \text{SM}$	χ^2_{best} (ndf=10)	$S, \times \text{SM}$	$L, \times \text{SM}$
<i>C</i>	1.5 ± 1.7	13.6	3.8	4.3
<i>D1</i>	0.1 ± 0.4	14.4	1.6	0.7
<i>D2</i>	0.8 ± 1.4	14.1	3.3	3.1

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

Модернизация vGeN

1. «Комптовское вето»: ~30 кг NaI для подавления гамма-фона (2х-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



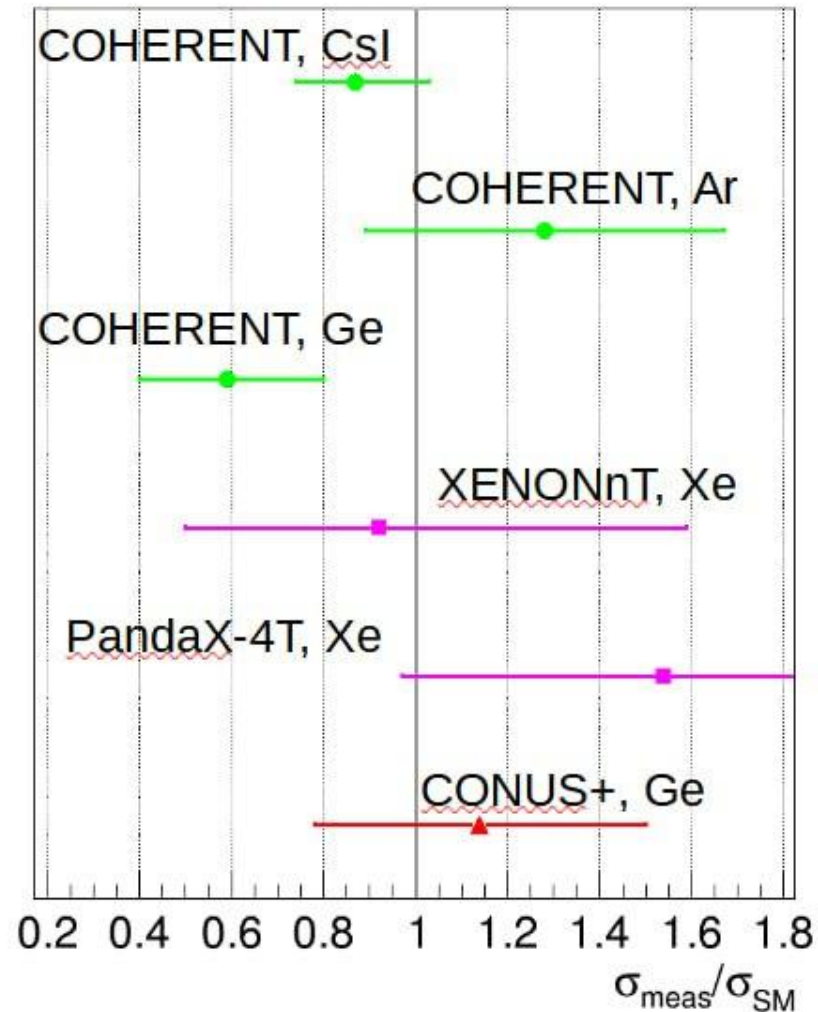
Заключение

- м Рассчитаны спектры ядер отдачи для различных моделей спектров антинейтрино и квенчинга
- м Обнаружена существенная зависимости чувствительности от модели спектра и квенчинга
- м Поставлены ограничения на величину сечения CEvNS в $4.3 \times \text{CM}$
- м Идёт работа над модернизацией νGeN
- м 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 νGeN 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 νGeN experiment** // Chinese Physics C. – 2025. – Т. 49. – №. 5. – С. 053004.

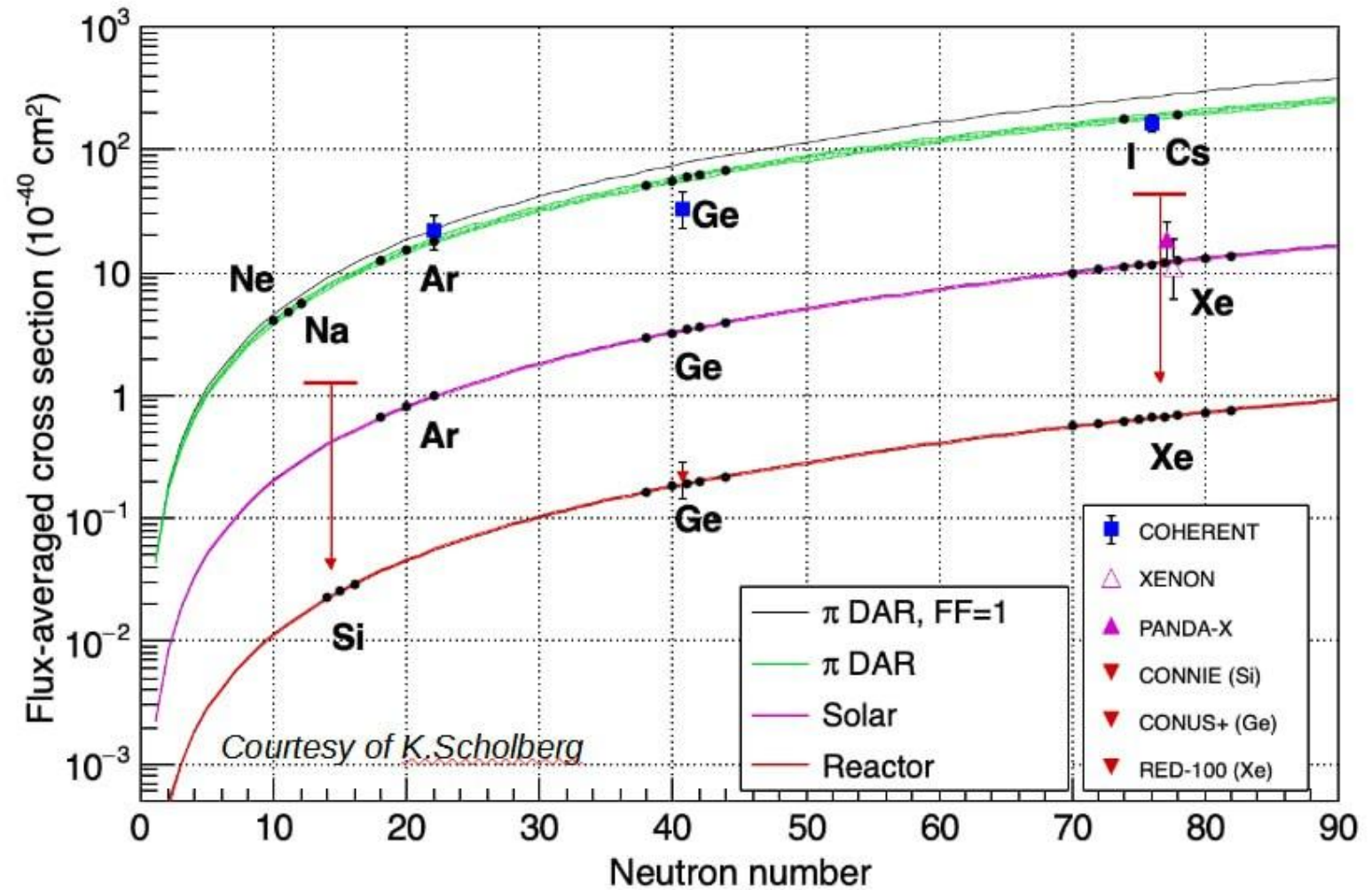
Приложения

Текущий статус измерения сечения УКРН

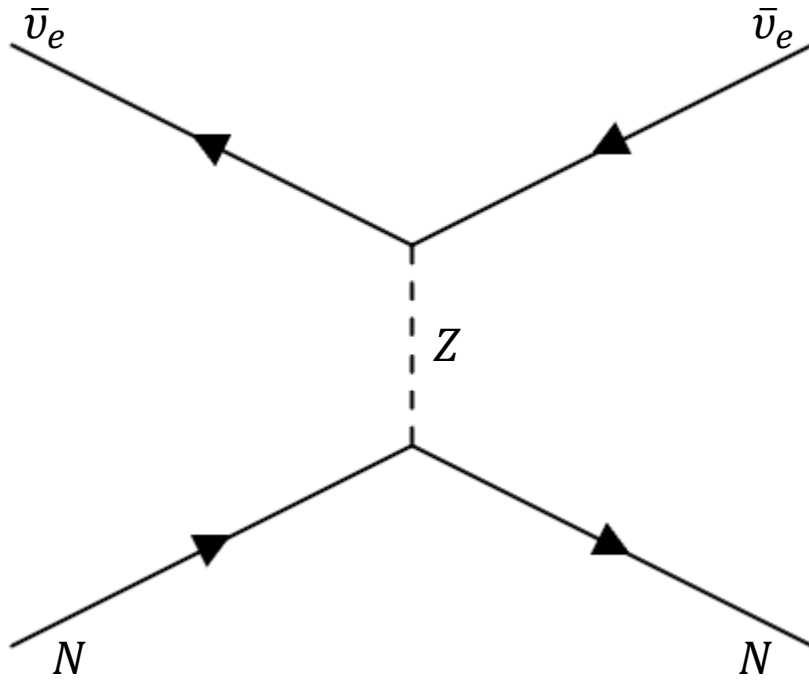
Ratio to SM



Best results for source/target



Когерентное упругое рассеяние нейтрино



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:

$$qR \ll 1$$

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

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