



Российская Академия Наук



**Влияние энергетических спектров реакторных
антинейтрино на чувствительность к амплитуде
упругого когерентного рассеяния нейтрино на
ядрах**

Лукияшин Антон Викторович
от коллаборации РЭД

Научная сессия секции ядерной физики отделения физических наук РАН
Российская Академия Наук Москва 2025



Российская Академия Наук



The influence of reactor neutrino energy spectra for constraints on amplitude of sensitivity for coherent elastic neutrino nucleus scattering

Anton Lukyashin

on behalf of the RED Collaboration

Scientific Session of Nuclear Physics Section of Physics Division of RAS
Russian Academy of Science Moscow 2025

План

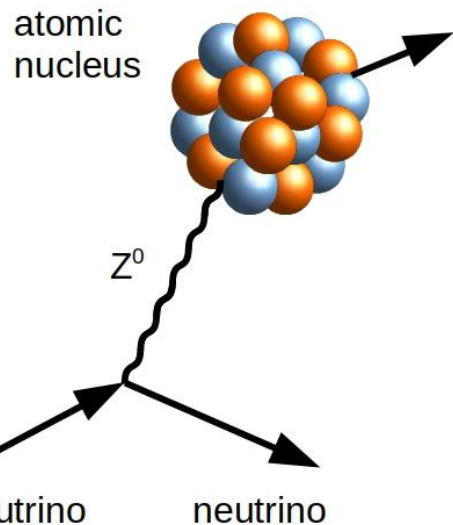
1. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре
2. Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100
3. Спектры реакторных антинейтрино
4. Расчёт спектра ядер отдачи в детекторе инициированных потоком антинейтрино от реактора
5. Расчёт дифференциального темпа счёта единичных электронов ионизации
6. Влияние энергетического спектра нейтрино на ограничение величины амплитуды когерентного рассеяния
7. Заключение

Упругое когерентное рассеяние нейтрино

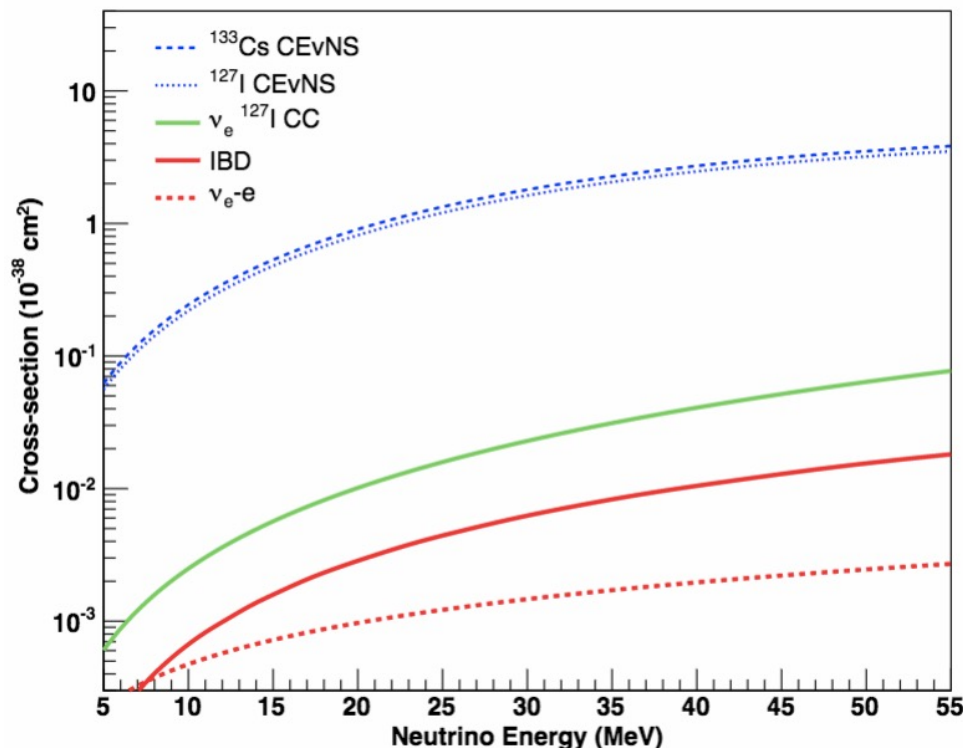
- Coherent Elastic ν -Nucleus Scattering (CEvNS)
- Упругое Когерентное Рассеяние Нейтрино на атомном ядре (УКРН)

$$\frac{d\sigma}{dT}(E, T) \simeq \frac{G_F^2}{4\pi} M Q_W^2 F^2(q^2) \left[1 - \frac{MT}{2E^2} \right] \quad T_{max} = \frac{2E^2}{2E+M}$$

$$\sigma(E) \simeq \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 F^2(q^2) E^2$$



$$Rq \sim 1 \\ E \lesssim 50 \text{ MeV}$$

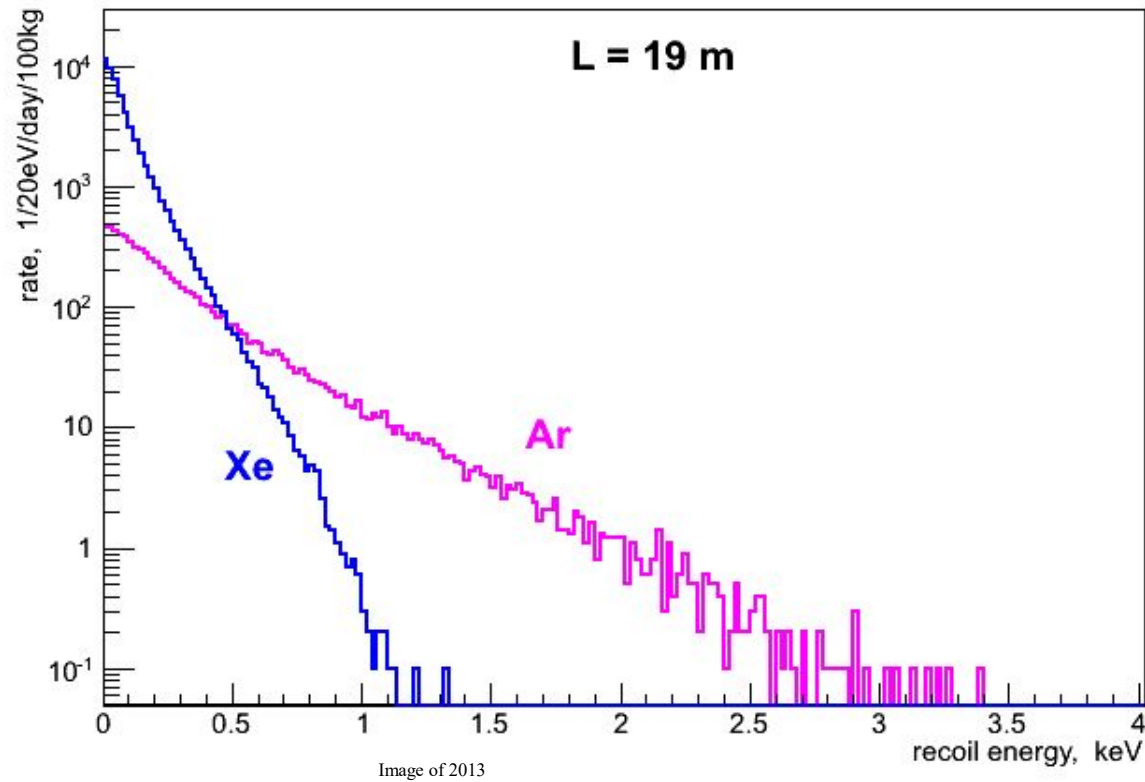


D.Z. Freedman, Phys. Rev. D 9 (1974) 1389.;

V.B. Kopeliovich and L.L. Frankfurt, JETP Lett. 19 (1974) 145

Отклик детектора на события когерентного рассеяния

- Взаимодействия от нейтрино (УКРН) порождают ядра отдачи
- Детектор должен быть чувствителен к малым энергиям ядер отдачи $< 1 \text{ keV}_{\text{NR}}$
- Для двухфазных эмиссионных детекторов это компактное (точечное) событие!



E_ν [MeV]	^{132}Xe T_{max} [keV]	^{40}Ar T_{max} [keV]
2	0.06	0.21
4	0.26	0.85
6	0.58	1.92
8	1.03	3.41
10	1.61	5.32
12	2.32	7.66
14	3.16	10.13
16	4.13	13.62

Духфазный эмиссионный детектор РЭД-100

Российский Эмиссионный Детектор (РЭД); [~ 100 кг ксенона внутри доверительного объёма]

«First ground-level laboratory test of the two-phase xenon emission detector RED-100». Collaboration. RED-100 // *Akimov D. et al.* JINST. V. 15 2020. P02020.

Титановый
криостат

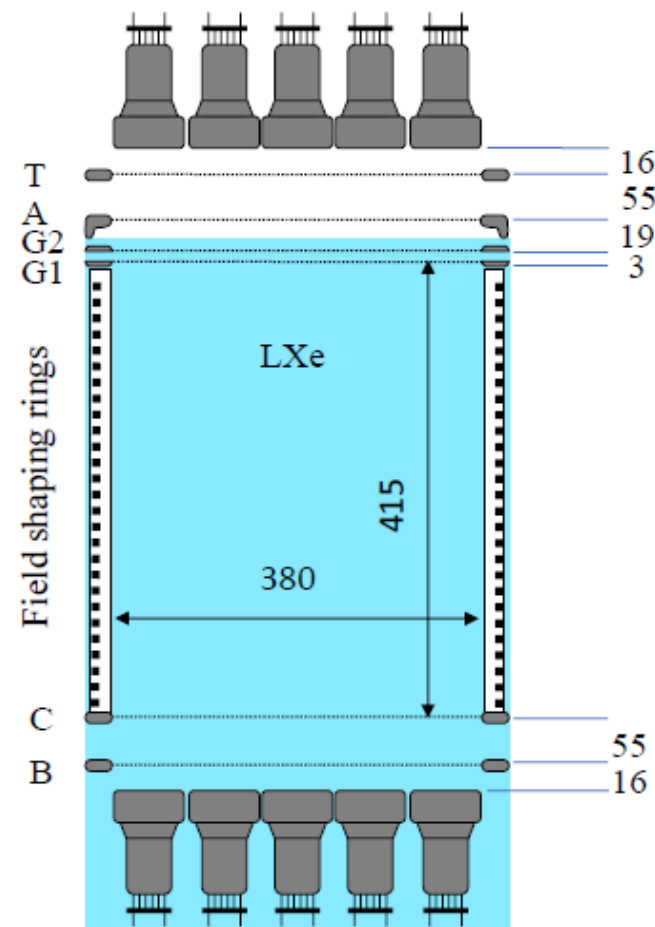
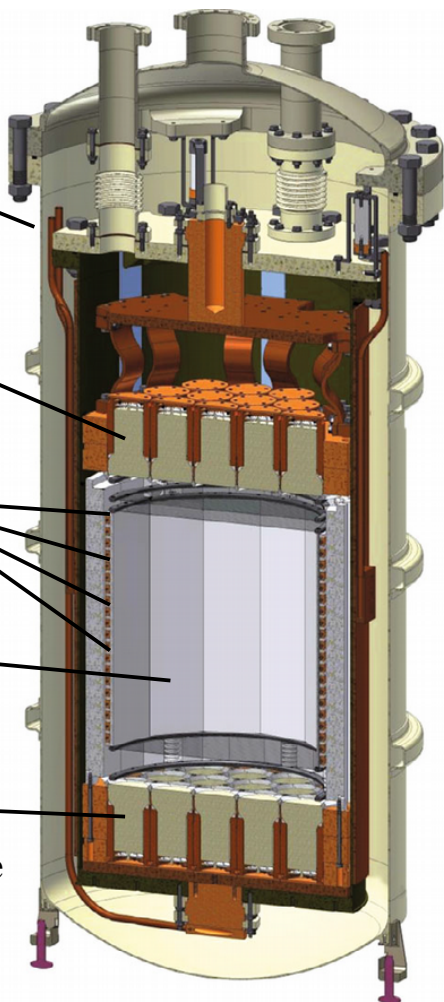
Верхняя
матрица ФЭУ

Электроды и
полезадающие
кольца

Чувствительный
объём LXe

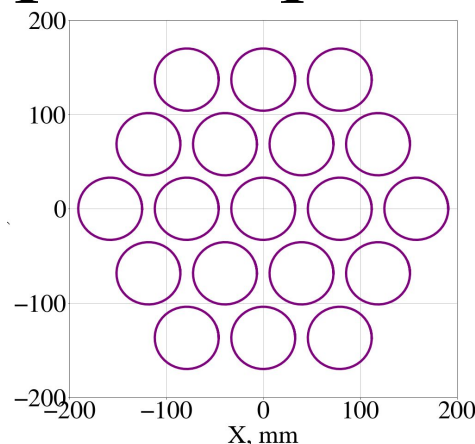
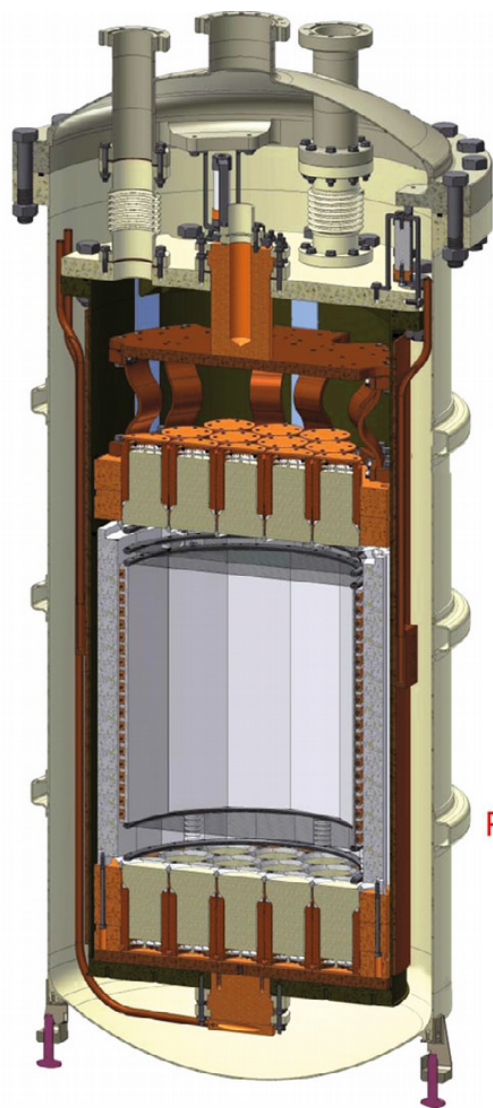
Нижняя матрица
ФЭУ

2x19 низкофоновые
ФЭУ Hamamatsu
R11410-20

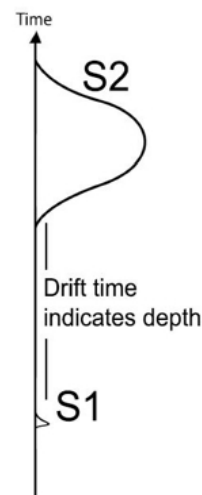
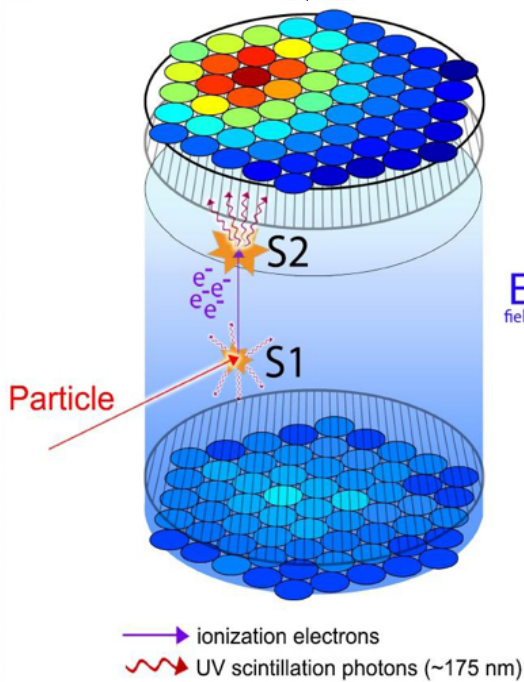


Все размеры в [мм]

Методика регистрации событий в РЭД-100



- Детектор обладает высокой чувствительностью к малым ионизационным сигналам (вплоть до единичных электронов ионизации SE)
- Для реакторных антинейтрино УКРН-подобные события в РЭД-100 ожидаются вплоть до $\sim 10SE$
- Порог регистрации $\geq 4SE$ (для газовой фазы) $\sim 35\%$ прозрачность барьера (жидкость-газ)



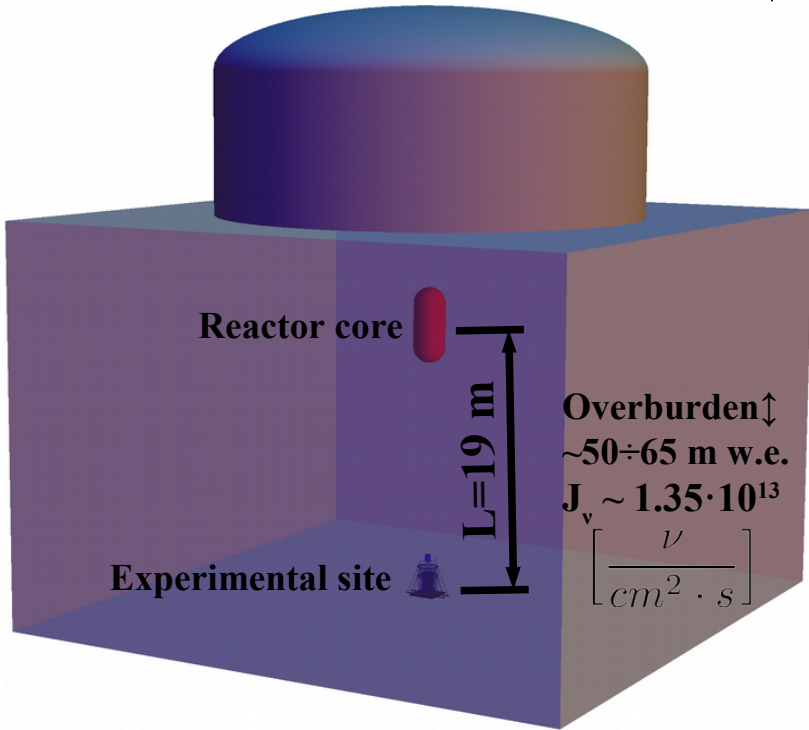
Компактное (точечное) событие только лишь с S2-сигналом, S1-сигнал будет незначителен (для энергий характерных для реакторных антинейтрино).

- S1 — сцинтилляционный сигнал (в жидкой фазе)
- S2 — электролюминесцентный сигнал (в газообразной фазе)

Credit: Image by EON collaboration

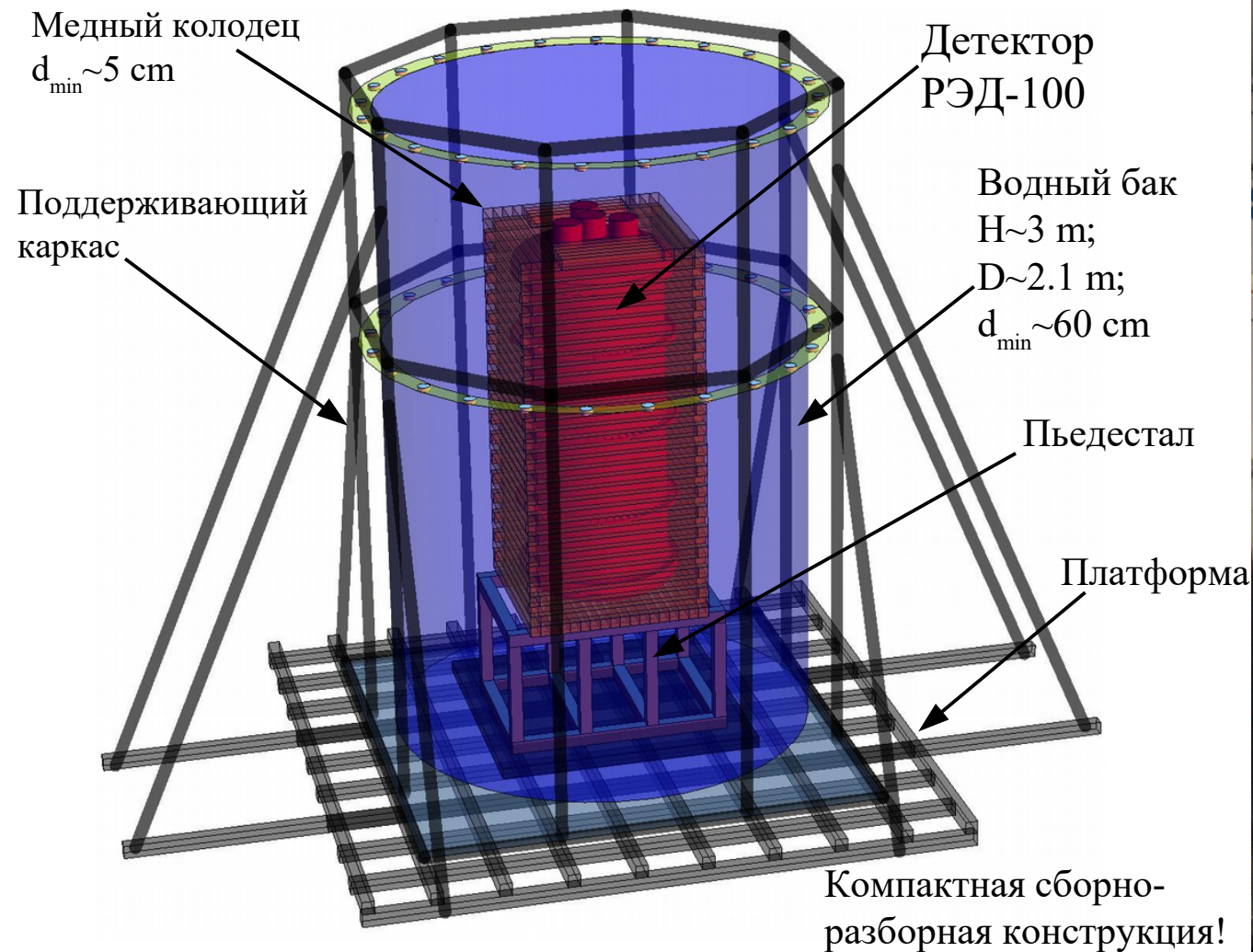
Расположение детектора РЭД-100 на КАЭС

Площадка Калининской АЭС



- Экспериментальный сеанс: 2021-2022
- Реактор ВВЭР-1000
- $P_{th} \sim 3000\text{ MW}_T$

Пассивная защита детектора РЭД-100



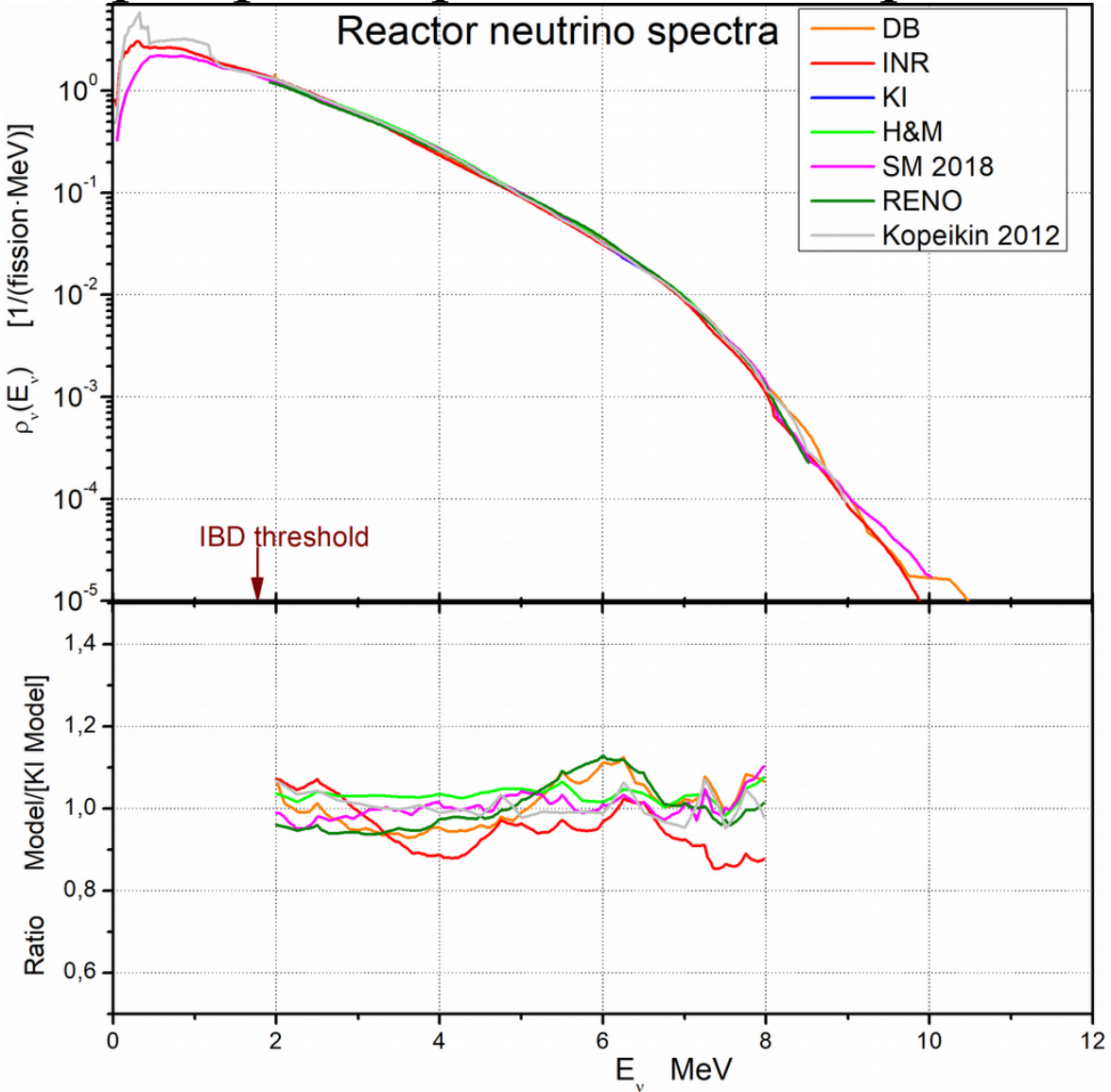
- «Passive shielding of the RED-100 detector in an experiment to study the CENNS process» Lukyashin A.V. @NPhE-2020
- «A Passive Shield for the RED-100 Neutrino Detector» Instrum Exp Tech 64, 202–208 (2021).

Модели энергетических спектров реакторных антинейтрино

Model	E_ν range	Partial SP*
Huber & Muller (H&M) [2011]	2÷8 MeV	YES
Kopeikin [2012]	0÷9 MeV	NO
Kurchatov Institute (KI) [2023]	2÷8 MeV	YES
Institute for Nuclear Research (INR) [2024]	0÷13 MeV	YES
Summation Model 2018 and 2023	0.05÷10.75 MeV	YES
Daya Bay (DB) [2022]	2÷10.75 MeV	NO
RENO [2021]	1.8÷8.5 MeV	NO

*- парциальные спектры от компонент топлива

	DB	RENO	Kopeikin
^{235}U	56.4%	57.1%	~57.0%
^{238}U	7.6%	7.3%	~7.0%
^{239}Pu	30.4%	30.0%	~31.0%
^{241}Pu	5.6%	5.6%	~6.0%

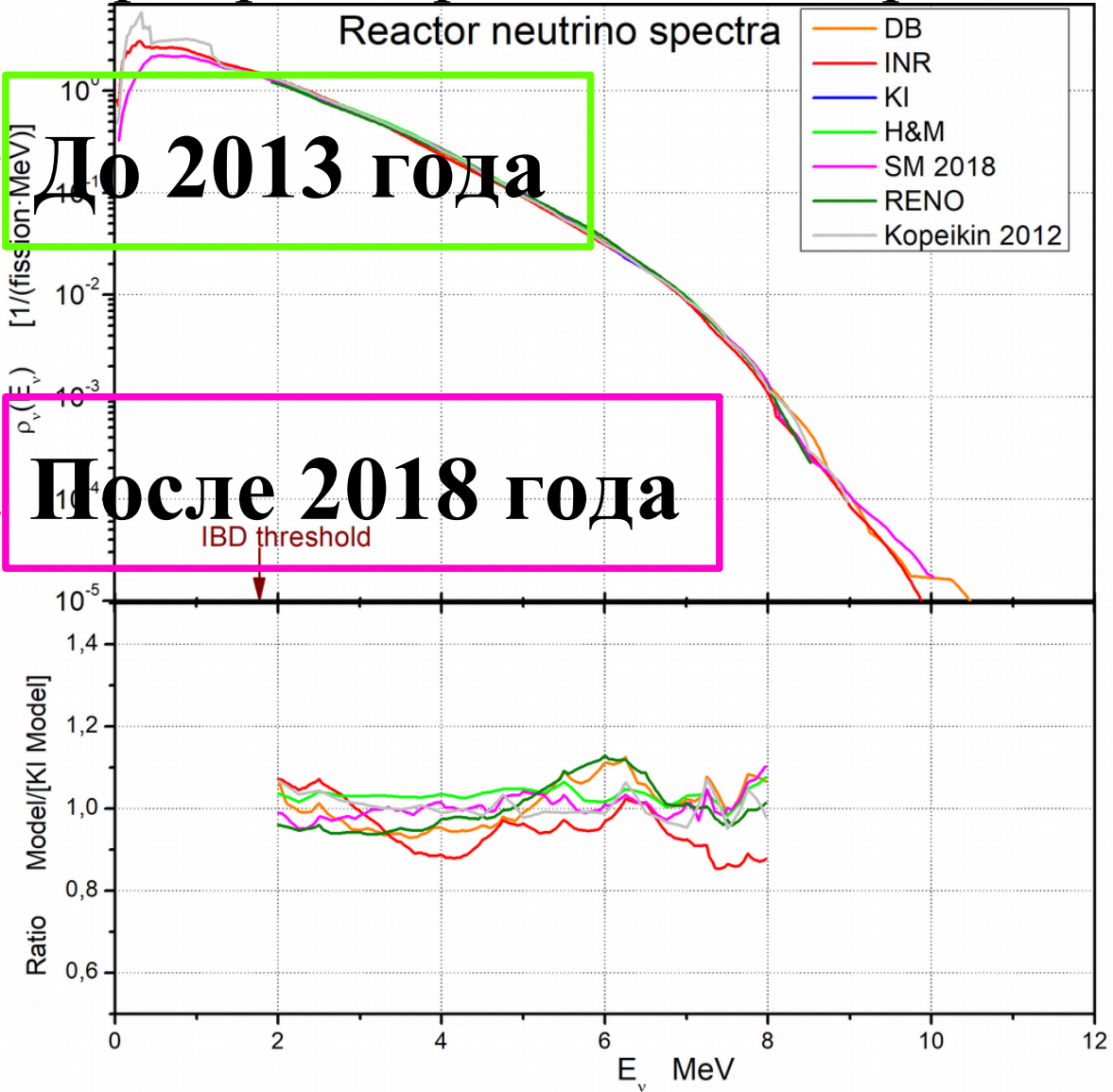


Модели энергетических спектров реакторных антинейтрино

Model	E_ν range	Partial SP*
Huber & Muller (H&M) [2011]	2÷8 MeV	YES
Kopeikin [2012]	0÷9 MeV	NO
Kurchatov Institute (KI) [2023]	2÷8 MeV	YES
Institute for Nuclear Research (INR) [2024]	0÷13 MeV	YES
Summation Model 2018 and 2023	0.05÷10.75 MeV	YES
Daya Bay (DB) [2022]	2÷10.75 MeV	NO
RENO [2021]	1.8÷8.5 MeV	NO

*- парциальные спектры от компонент топлива

	DB	RENO	Kopeikin
^{235}U	56.4%	57.1%	~57.0%
^{238}U	7.6%	7.3%	~7.0%
^{239}Pu	30.4%	30.0%	~31.0%
^{241}Pu	5.6%	5.6%	~6.0%



Данные по спектрам реакторных антинейтрино

- 1) T. A. Mueller et al., Improved predictions of reactor antineutrino spectra, Phys. Rev. C 83, 054615 (2011), arXiv:1101.2663 [hep-ex]. (H&M)
- 2) P. Huber, Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors, Phys. Rev. C 84, 024617 (2012), arXiv:1106.0687 [hep-ph]. (H&M)
- 3) V. I. Kopeikin, Flux and Spectrum of Reactor Antineutrinos, Physics of Atomic Nuclei 75, 143–152 (2012). (Kopeikin2012)
- 4) V. I. Kopeikin, M. D. Skorokhvatov, and O. A. Titov, Reevaluating reactor antineutrino spectra with new measurements of the ratio between ^{235}U and ^{239}Pu β spectra, Phys. Rev. D 104, L071301 (2021), arXiv:2103.01684 [nucl-ex]. (KI)
- 5) D. V. Popov and M. D. Skorokhvatov, Model for the Conversion of Beta Spectra from Fission Products of Uranium and Plutonium Isotopes into Antineutrino Spectra, Physics of Particles and Nuclei Letters 20, 1 (2023). (KI)
- 6) M. Estienne et al., Updated Summation Model: An Improved Agreement with the Daya Bay Antineutrino Fluxes, Phys. Rev. Lett. 123, 022502 (2019), Supplemental Material, arXiv:1904.09358v1 [nucl-ex]. See Supplemental Material for Summation Model 2018 at <http://link.aps.org/supplemental/10.1103/PhysRevLett.123.022502>, which provides the antineutrino energy spectra for $^{235,238}\text{U}$ and $^{239,241}\text{Pu}$, [Extra Material: Table PDF](#). (SM 2018)
- 7) S. G. Yoon et al. (RENO Collaboration), Measurement of reactor antineutrino flux and spectrum at RENO, Phys. Rev. D 104, L111301 (2021), arXiv:2010.14989v3 [hepex]. See Supplemental Material for the RENO at <http://link.aps.org/supplemental/10.1103/PhysRevD.104.L111301>, for RENO 2021 Supplementary Data Release, [Extra Material: Table TXT](#). (RENO)
- 8) F. P. An et al. (Daya Bay Collaboration), Antineutrino energy spectrum unfolding based on the Daya Bay measurement and its applications, Chinese Physics C 45, 073001 (2021), arXiv:2102.04614 [hep-ex]. (DB)
- 9) F. P. An et al. (Daya Bay Collaboration), First Measurement of High-Energy Reactor Antineutrinos at Daya Bay, Phys. Rev. Lett. 129, 041801 (2022), arXiv:2203.06686 [hep-ex]. (DB)
- 10) A. P. Vlasenko et al., Antineutrino Spectra of $^{235,238}\text{U}$ and $^{239,241}\text{Pu}$ Taken from the Double Chooz Experiment, Physics of Atomic Nuclei 87, 1178–1188 (2024). (INR)

Расчёт спектра ядер отдачи в детекторе

- Принимая во внимание порог регистрации событий в РЭД-100 ($\geq 4e^-$) важно учесть высокоэнергетическую часть спектра реакторных антинейтрино ($E_\nu > 8 \text{ MeV}$)!
- Также необходимо учитывать парциальные спектры (для основных горящих изотопов ядерного топлива ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu)!

$$R(T) = \int \frac{d\sigma}{dT}(E_\nu, T) \cdot \rho(E_\nu) \cdot dE_\nu$$

- Спектр ядер отдачи можно как свёртку дифференциального сечения УКРН-процесса с дифференциальным энергетическим спектром реакторных антинейтрино.

Расчёт спектра ядер отдачи в детекторе

$$\frac{d\sigma}{dT}(E_\nu, T) = \frac{G_F^2}{4\pi} M Q_W^2 F(q^2) \left[1 - \frac{MT}{2E_\nu^2} \right]$$

- Учёт количества атомов вещества в доверительном объёме РЭД-100
- Учёт изотопного состава вещества-мишени РЭД-100

$$T \in [0, T_{max}]$$

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

Реакторный спектр $\rho_\nu(E_\nu)$

- Учёт долей выгорания 4-х основных компонент ядерного топлива
- Учёт единицы времени
- Учёт тепловой мощности реактора
- Учёт среднего значения энергии, приходящейся на акт деления топлива
- Учёт среднего значения расстояния между детектором и реактором

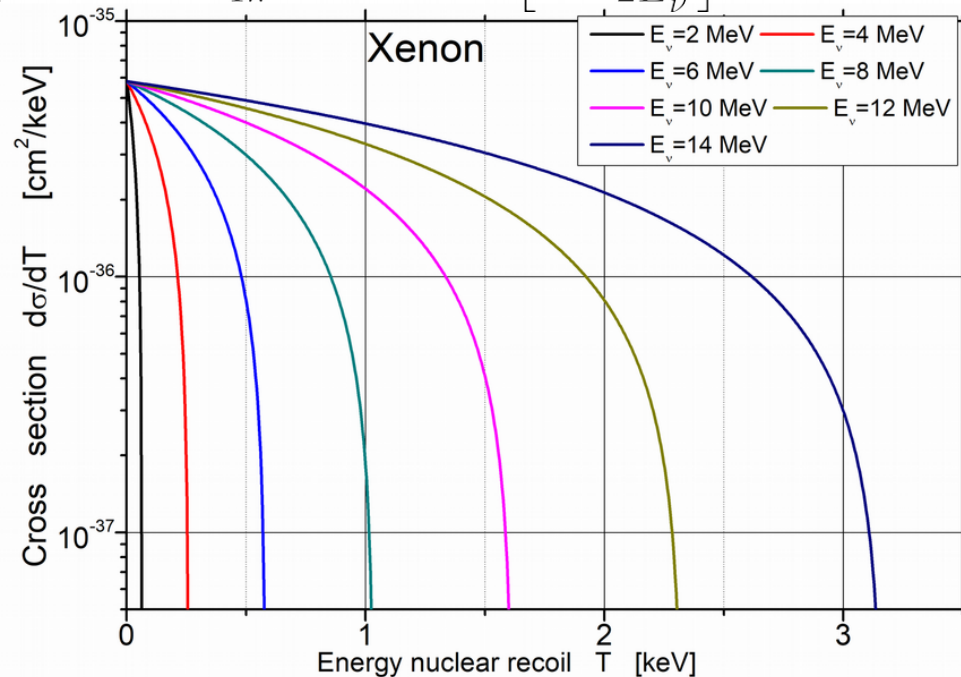
$$R(T) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{d\sigma}{dT}(E_\nu, T) \cdot \rho(E_\nu) \cdot dE_\nu$$

Расчёт спектра ядер отдачи в детекторе

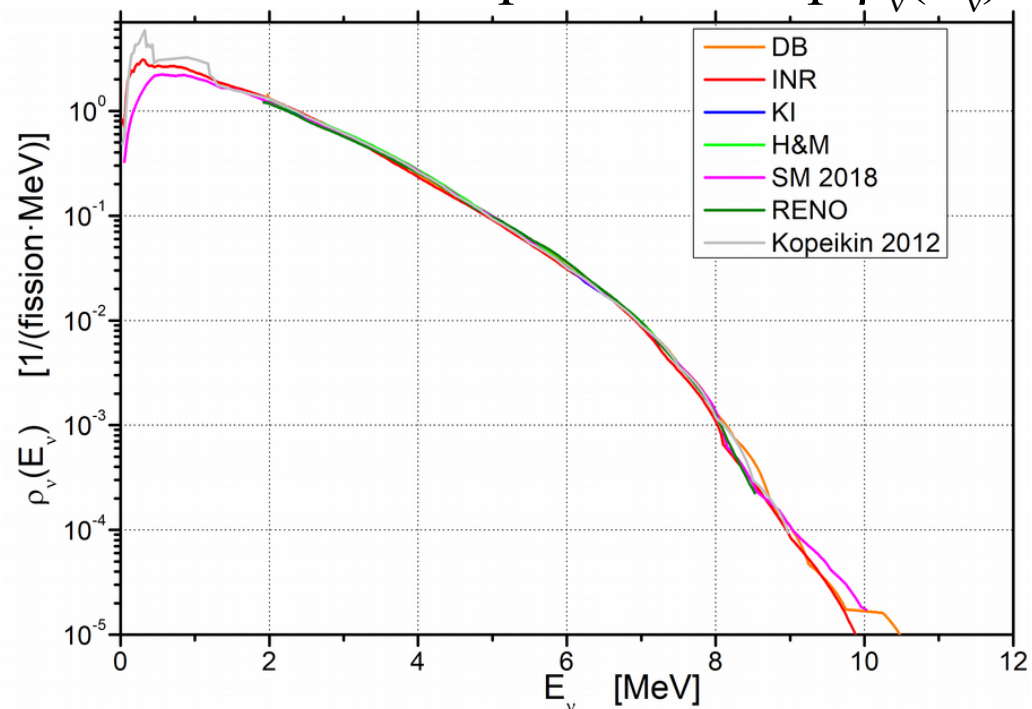
$$R(T) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{d\sigma}{dT}(E_\nu, T) \cdot \rho(E_\nu) \cdot dE_\nu$$

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

$$\frac{d\sigma}{dT}(E_\nu, T) = \frac{G_F^2}{4\pi} M Q_W^2 F(q^2) \left[1 - \frac{MT}{2E_\nu^2} \right] \cdot [\theta(T) - \theta(T - T_{max})]$$



Реакторный спектр $\rho_\nu(E_\nu)$

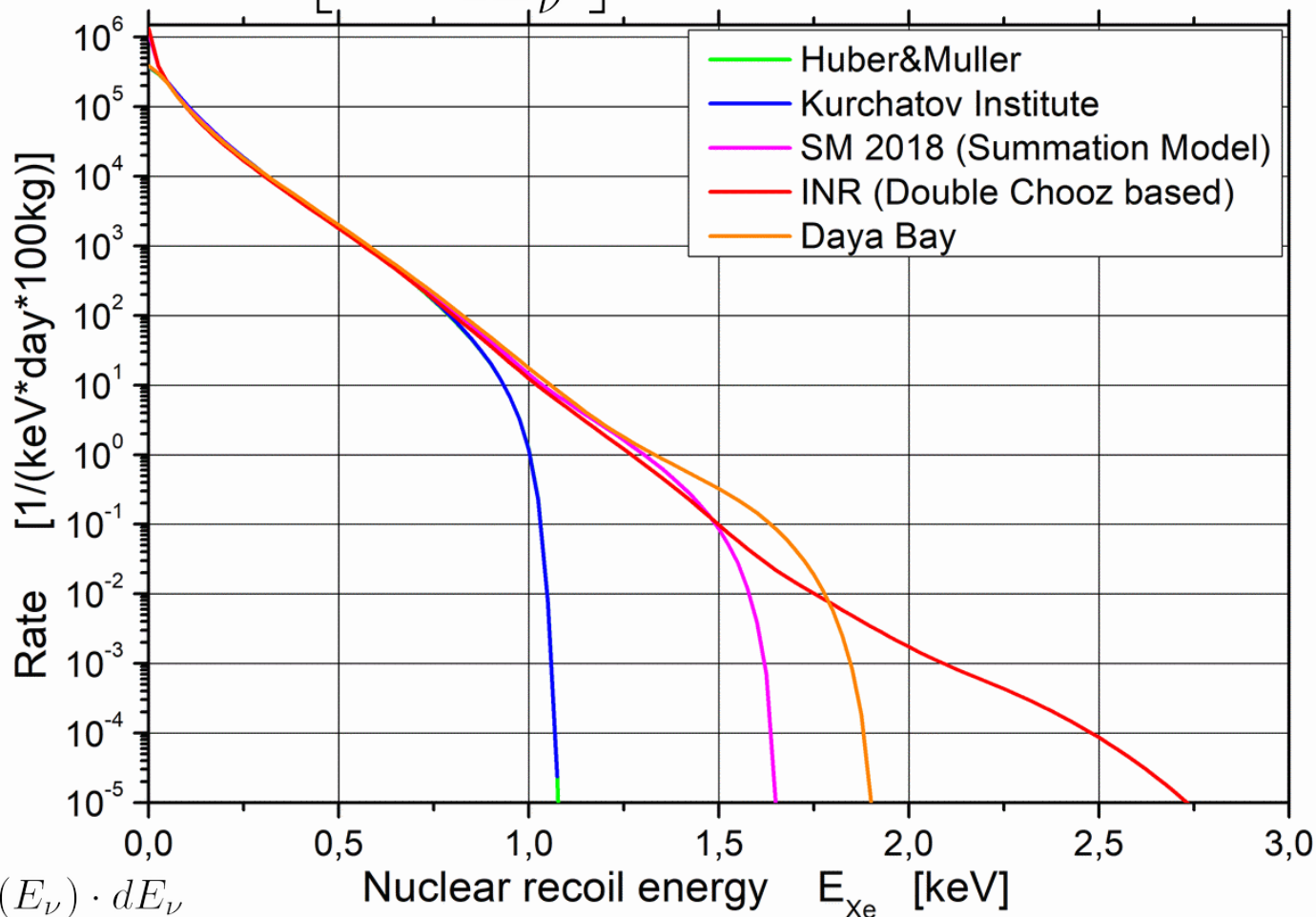


Расчёт спектра ядер отдачи в детекторе РЭД-100

$$\left[\frac{d\sigma}{dT}(E_\nu, T) \right]_k = \frac{G_F^2}{4\pi} M_k Q_{W_k}^2 F(q^2) \left[1 - \frac{M_k T}{2E_\nu^2} \right] \cdot [\theta(T) - \theta(T - T_{max_k})]$$

Расчёт выполнен для
изотопного состава Хе в
РЭД-100

$$R_{Total}(T) = \sum_k R_k(T)$$



$$R_k(T) = A_k \int_{E_{min}}^{E_{max}} \left[\frac{d\sigma}{dT}(E_\nu, T) \right]_k \cdot \rho(E_\nu) \cdot dE_\nu$$

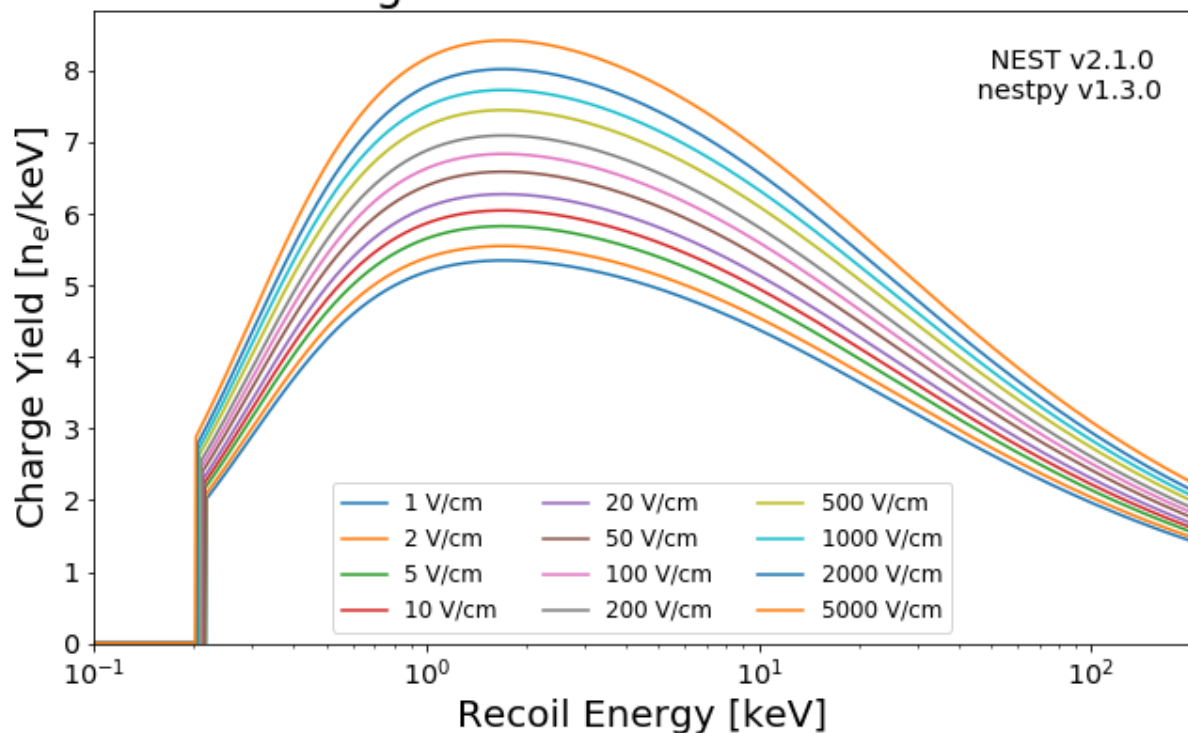
Расчёт темпа счёта единичных электронов ионизации

Дифференциальный темп счёта единичных электронов ионизации можно представить как свёртку спектра ядер отдачи с функцией удельного зарядового выхода в жидком ксеноне.

$$D(N_e) = \int_{T_{min}}^{T_{max}} Y_{Charge}(N_e, T) \cdot R_{Total}(T) \cdot dT$$

$$D(N_e) = \sum_{i=1}^N [Y_{Charge}(N_e, T_i)]_i \cdot [R_{Total}(T_i) \cdot \Delta T]_i$$

Charge Yields for Nuclear Recoils

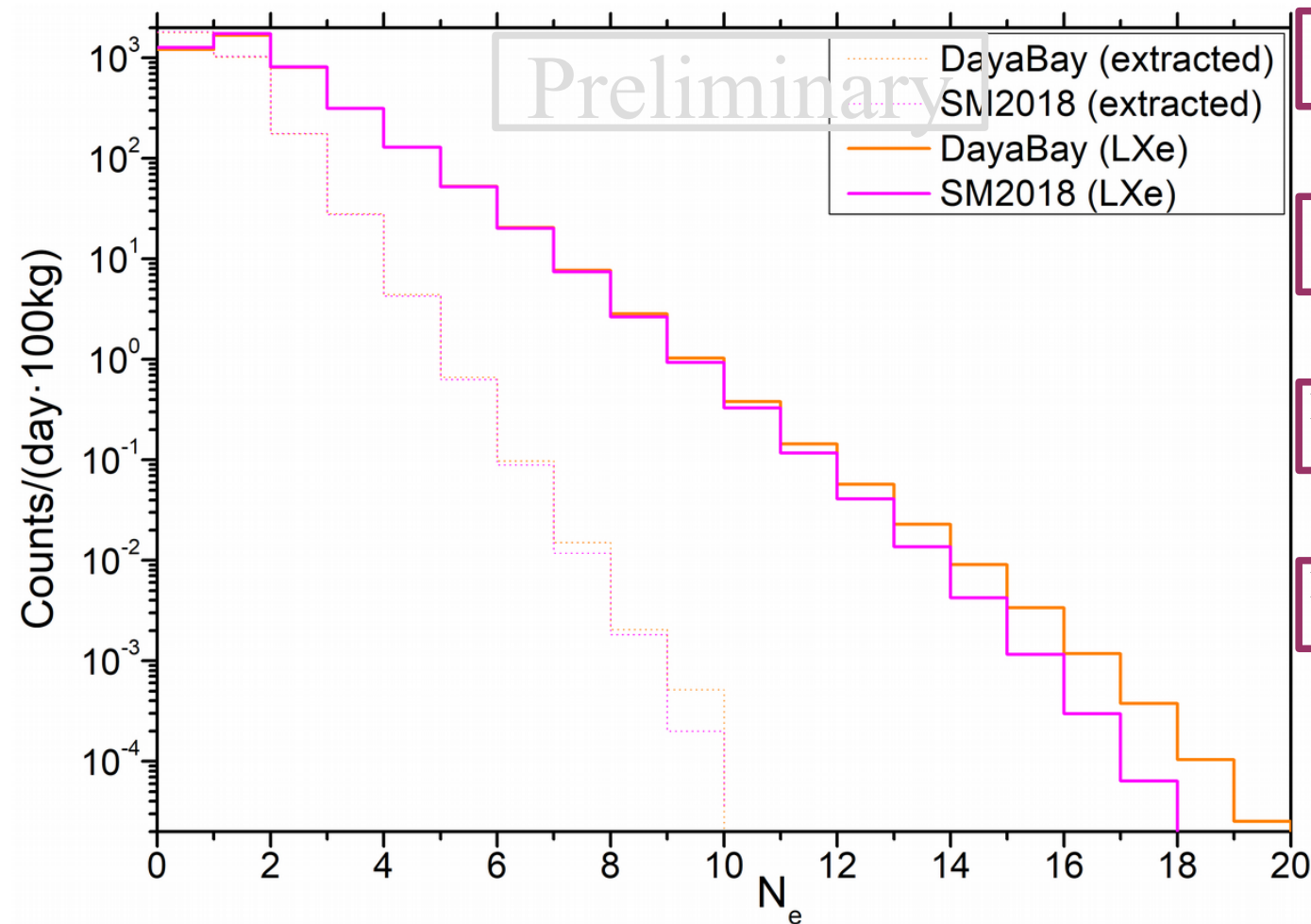


- Noble Element Simulation Technique (NEST <https://nest.physics.ucdavis.edu>)

Генерация удельного зарядового выхода электронов в жидком ксеноне (от ядер отдачи) осуществлялась с помощью пакета программ NEST

M. Szydagis et al «A review of NEST models for liquid xenon and an exhaustive comparison with other approaches» (2025) Front. Detect. Sci. Technol 2:1480975.

Расчёт темпа счёта единичных электронов ионизации



Спектр реакторных нейтрино

Свёртка $d\sigma/dT$

Спектр ядер отдачи

NEST

Распределение по количеству электронов
в жидком ксеноне

Экстракция

Распределение по количеству электронов
в газообразном ксеноне

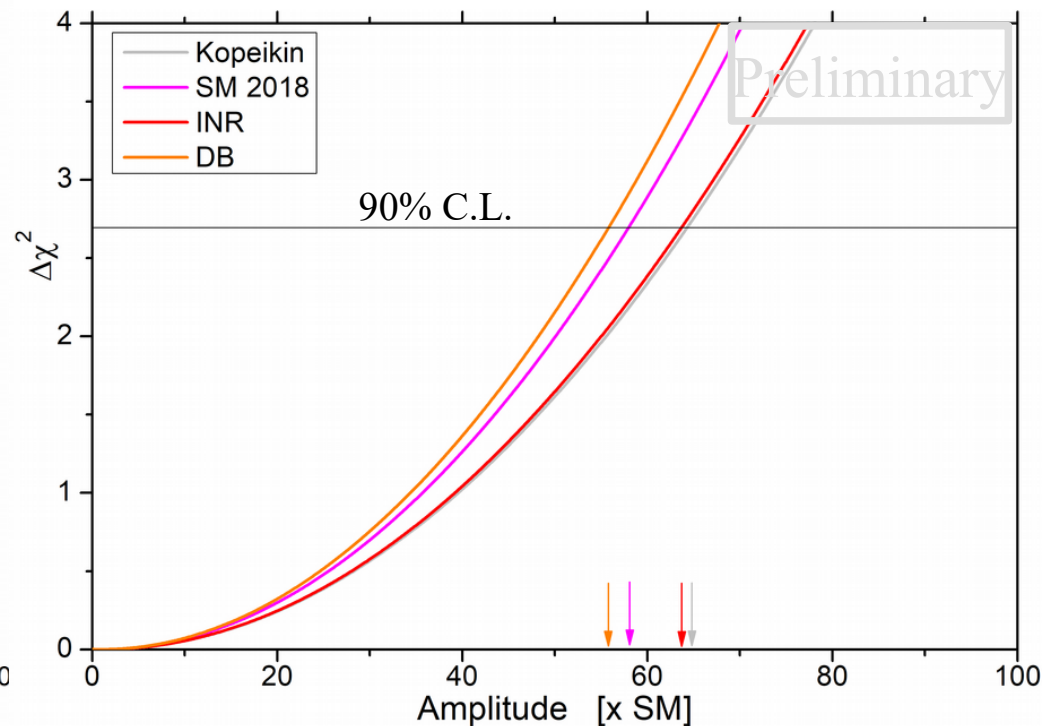
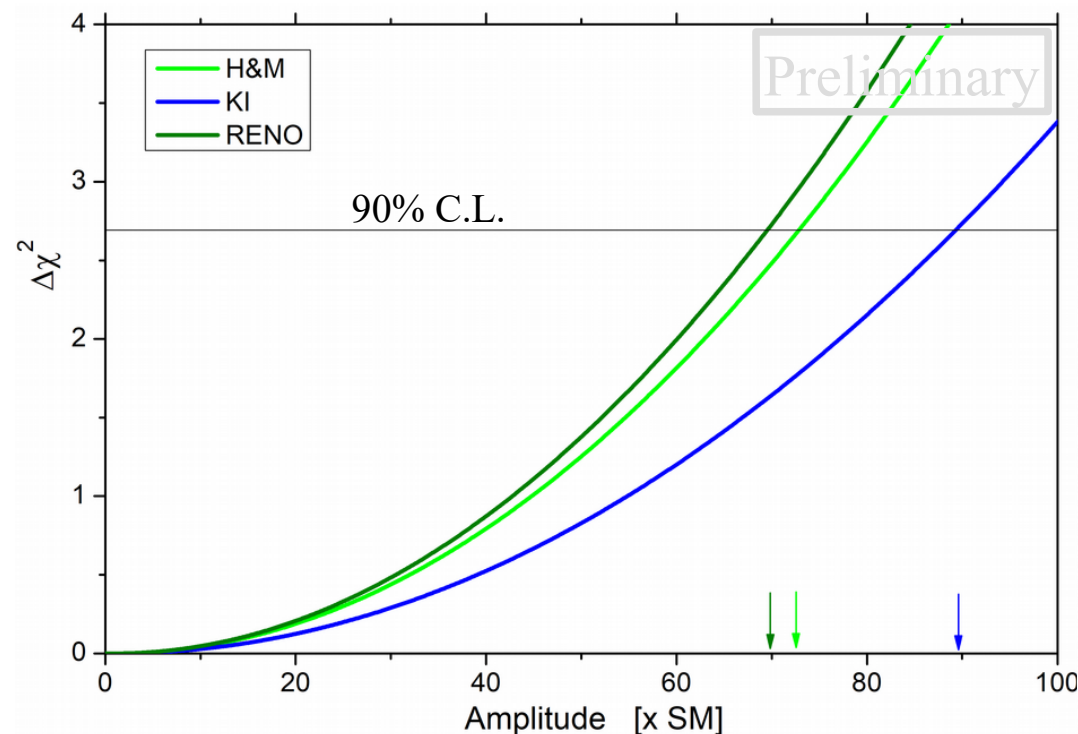
Данные

Сопоставление

Кривые чувствительности

- См. доклад Ольги Разуваевой «Поиск упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона в эксперименте РЭД-100»

Влияние реакторных антинейтринных спектров



- Модели H&M, KI, INR и SM 2018 содержат кумулятивные спектры для 4-х основных изотопов ядерного топлива!
- Коэффициенты выгорания топлива для модели реакторного спектра DayaBay отличаются от тех, что были во время экспозиции РЭД-100 на КАЭС!

Reactor ON: 331 kg·day

Reactor OFF: 106 kg·day

DayaBay	Kopeikin	RENO	H&M	KI	INR	SM 2018
56	70	70	73	90	64	58

Заключение

- Модели дифференциальных энергетических спектров реакторных антинейтрино влияют на форму кривых чувствительности.
- Особенно, сильное влияние оказывает высокоэнергетическая часть спектра реакторных нейтрино ($E > 8$ МэВ): масштабный фактор меняется от 90 до 58 единиц (в ~ 1.6 раз!)
- Для эксперимента РЭД-100 с жидким ксеноном это влияние даёт дополнительный вклад в ожидаемое число событий на $\delta \sim 10 \div 24\%$ больше! (При этом доля антинейтрино с энергией > 8 МэВ в реакторном спектре составляет менее чем 0.1%)

См. также доклады

Валерий Синёв «Расчетные спектры антинейтрино изотопов ядерного топлива, согласованные с экспериментальными»

Даниил Саутнер «Расчёт ожидаемого сигнала от упругого когерентного рассеяния нейтрино в эксперименте νGeN »

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность:

- АО «Наука и инновации» Госкорпорации «Росатом» (Договор № 313/1679-Д от 16.09.2019) за сотрудничество и поддержку постановки эксперимента на базе Калининской АЭС
- Российскому Научному Фонду за финансовую поддержку работ по модернизации установки РЭД- 100 в рамках контракта №22-12-00082 от 13 мая 2022 года для проведения второго раунда испытаний на АЭС с жидким аргоном в качестве рабочей среды
- Директору Института Промышленных Ядерных Технологий (ИПЯТ) НИЯУ МИФИ Глаговскому Эдуарду Михайловичу и руководству Института Ядерной Физики и Технологий (ИЯФИТ) НИЯУ МИФИ за помощь в проведении работ
- Научной программе «Нейтринные детекторы для дистанционного контроля ядерных реакторов и астрофизических установок» (FSWU-2022-0018)
- Научной программе «Фундаментальные свойства элементарных частиц и космология» (№ 0723-2020-0041)
- Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Новые явления в физике элементарных частиц и ранняя Вселенная» FSWU-2023-0073.
- При проведении работ были использованы ресурсы высокопроизводительного вычислительного центра НИЯУ МИФИ

Спасибо за внимание!