

# Поиск легких стерильных нейтрино

Igor Alekseev (ИИЦ КМ)



Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»,  
посвященная 70-летию со дня рождения академика РАН  
Валерия Анатольевича Рубакова

Москва 17-21 февраля 2025 года



# Появление и исчезновение



**В отсутствие CP-нарушений:**

$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right)$$

**Если существенны только два типа нейтрино:**

**Появление  
(appearance)**

$$P_{\alpha \rightarrow \beta, \alpha \neq \beta} = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 L [\text{eV}^2] [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right)$$

**Исчезновение  
(disappearance)**

$$P_{\alpha \rightarrow \alpha} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 L [\text{eV}^2] [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right)$$

$|\Delta m_{31}^2| = (2.455 \pm 0.028) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2 \implies L/E \sim 500 \text{ км/ГэВ (м/МэВ)}$

$\Delta m_{12}^2 = (7.53 \pm 0.18) \cdot 10^{-5} \text{ эВ}^2 \implies L/E \sim 1.6 \cdot 10^4 \text{ км/ГэВ (м/МэВ)}$

**Число нейтрино в СМ из измерений ширины Z:  $2.9963 \pm 0.0074$**

**Эксперимент KATRIN — ограничение на массу нейтрино  $< 0.45 \text{ эВ (90\% CL)}$**



# Эксперимент $LSND$



“Evidence for neutrino oscillations from the observation of anti-neutrino(electron) appearance in a anti-neutrino(muon) beam”, A. Aguilar et al., Phys. Rev. D 64 (2001) 112007

Протонный пучок 800 МэВ, 1 мА,  
Лос Аламос

Распад пионов и мюонов в покое:

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ;  $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu$  – **нет**

**электронных антинейтрино**

Детектор – 167 тонн жидкого  
сцинтиллятора

Реакция обратного  $\beta$ -распада:

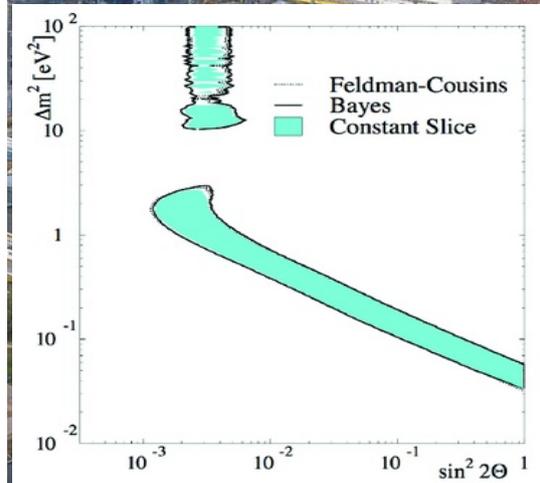
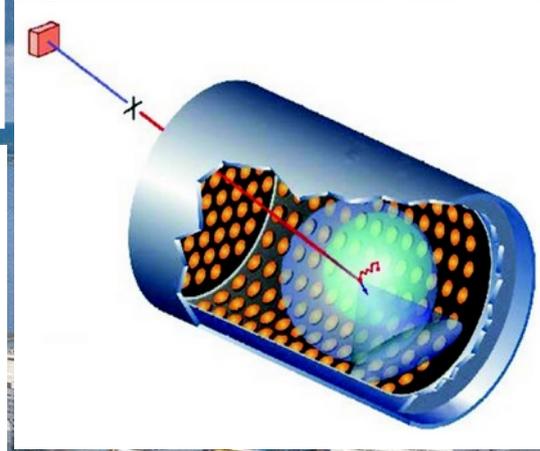
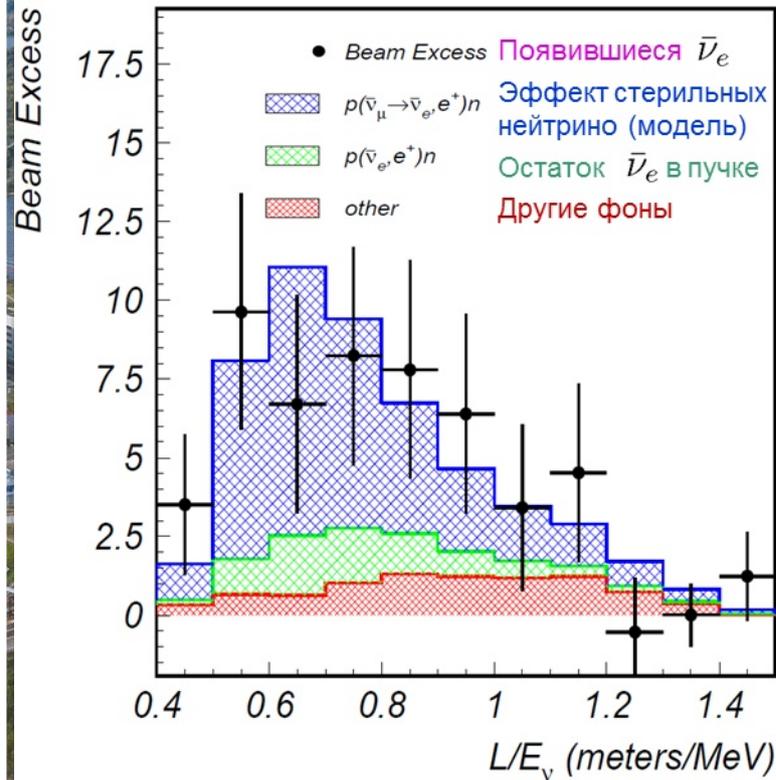
$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ , чувствительная к

**электронным антинейтрино.**

**Избыток событий  $87.9 \pm 22.4 \pm 6.0$ .**

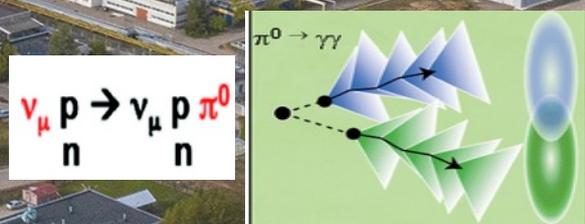
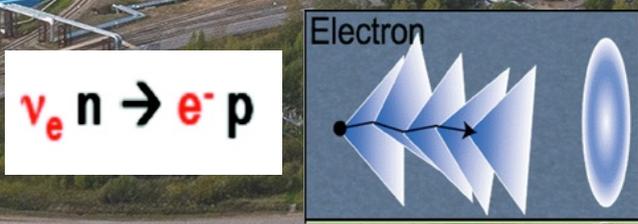
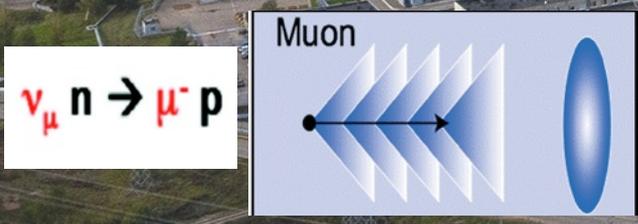
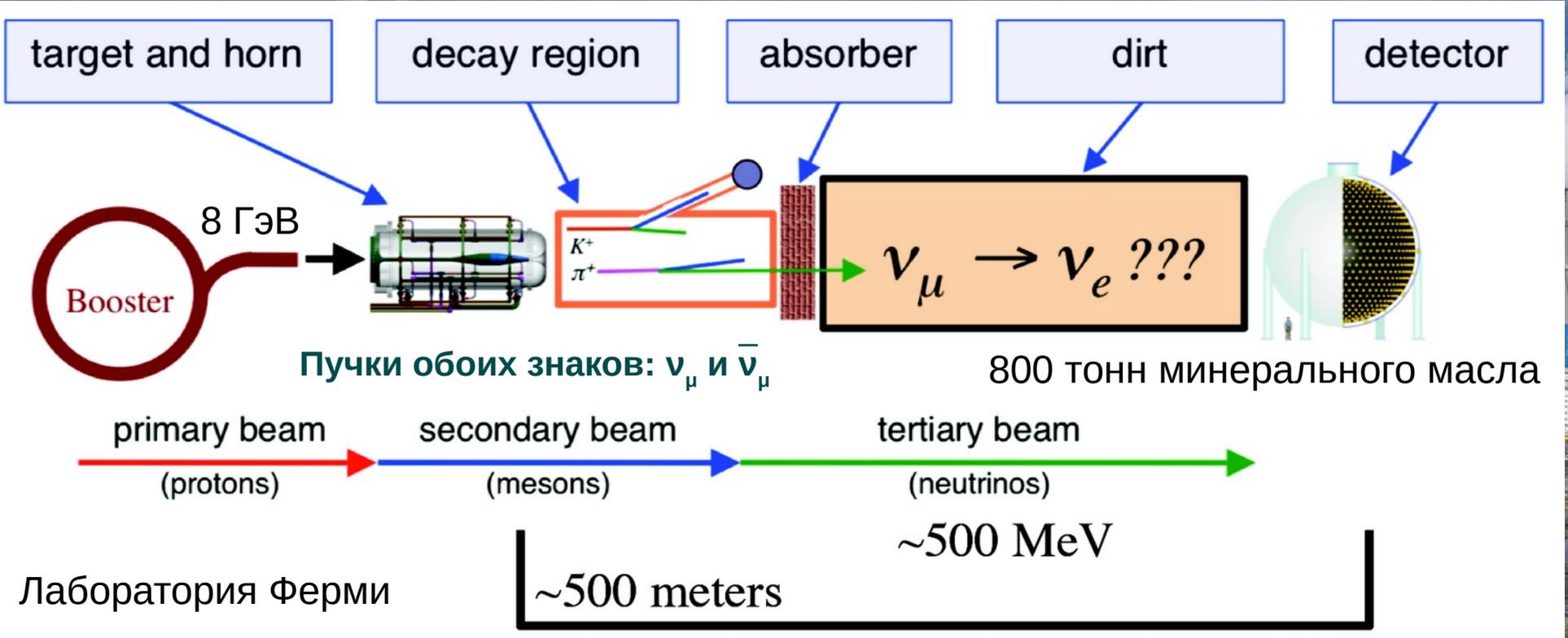
$L=30$  м,  $E=10-50$  МэВ  $\implies \Delta m^2$

$= 0.2-10$   $eV^2$



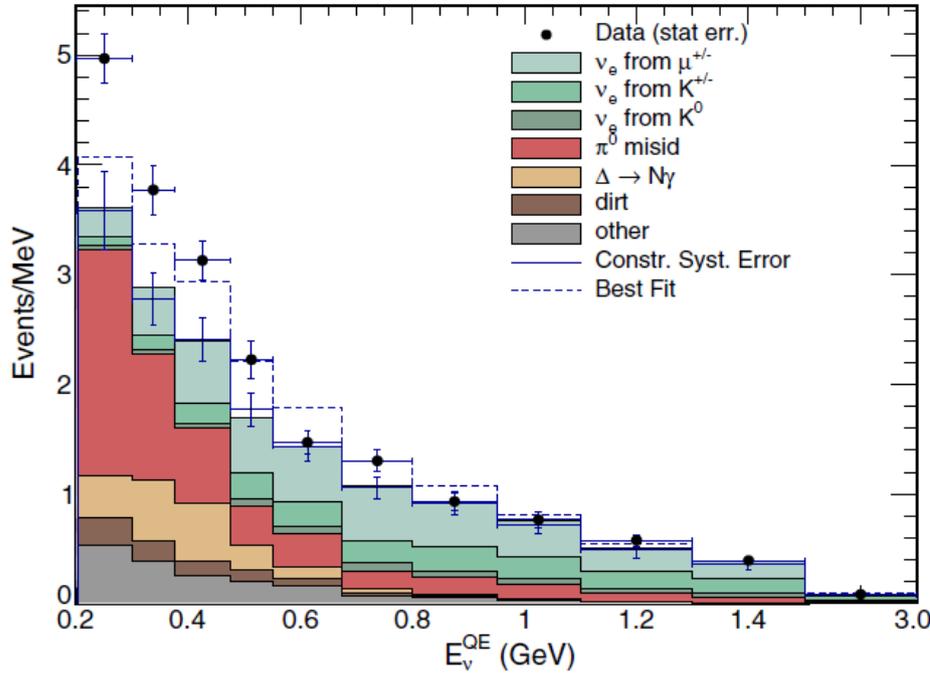


# MiniBooNE





# MiniBooNE



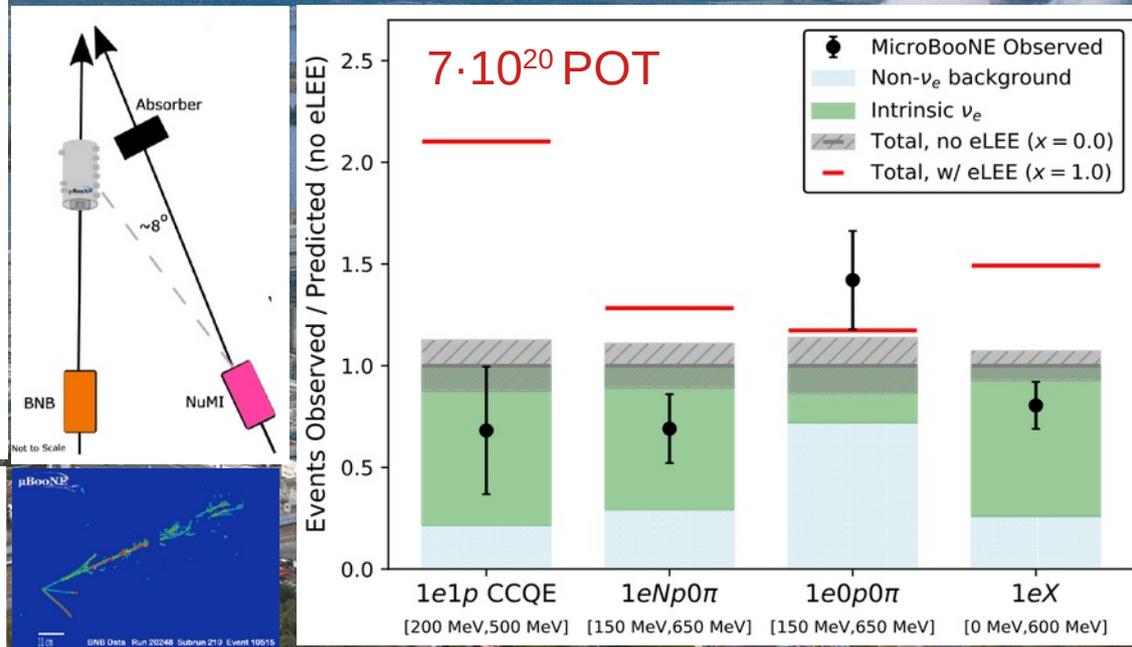
Вместе по нейтринно и антинейтринно избыток событий  $\nu_e$   $460.5 \pm 99.0$  ( $4.7 \sigma$ )  
 Суммарная значимость MiniBoone+LSND  $> 6\sigma$   
 “Significant Excess of Electronlike Events in the MiniBooNE Short-Baseline Neutrino Experiment”.  
 A.A. Aguilar-Arevalo et al. Phys. Rev. Lett. 121, 221801 (2018)

18 февраля 2025

# MicroBooNE



- Время-проекционная камера, 85 тонн жидкого аргона, на том же нейтринном пучке BNB что и MiniBooNE.
- Детальная реконструкция топологии событий.
- 3 варианта анализа. 4 разных топологии.

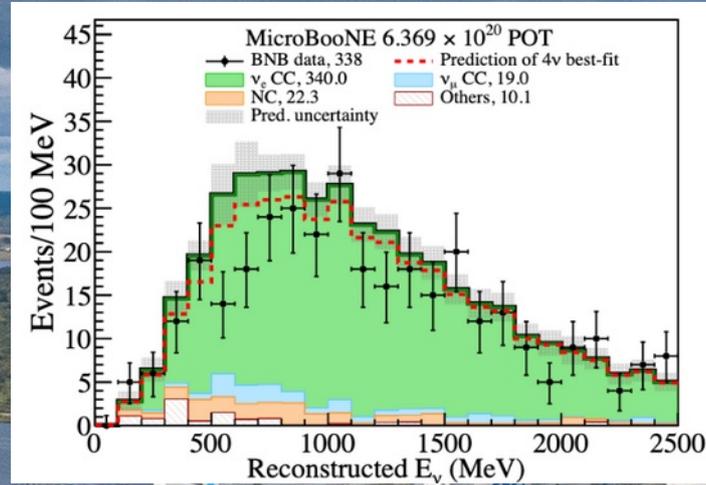
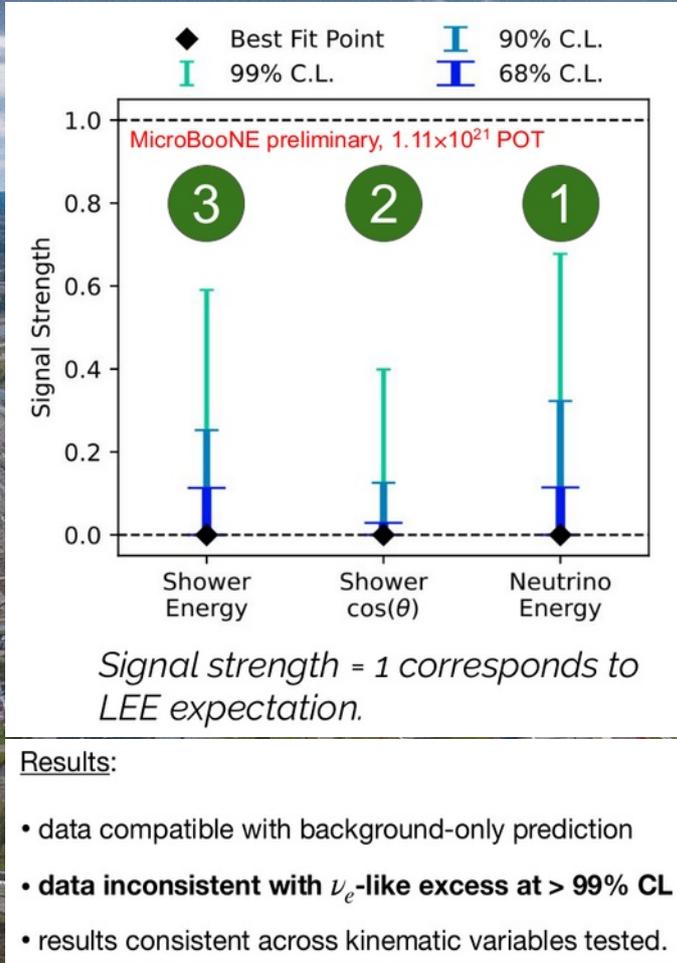


“Search for an Excess of Electron Neutrino Interactions in MicroBooNE Using Multiple Final-State Topologies”.  
 P. Abratenko et al. Phys. Rev. Lett. 128, 241801 (2022)

Игорь Алексеев, НИЦ КИ

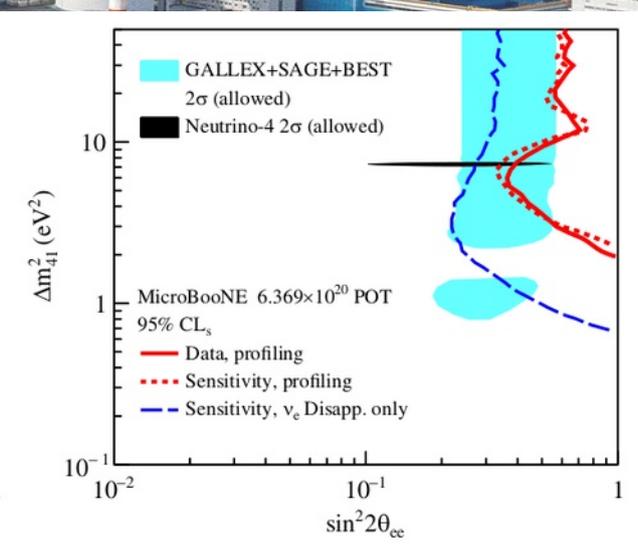
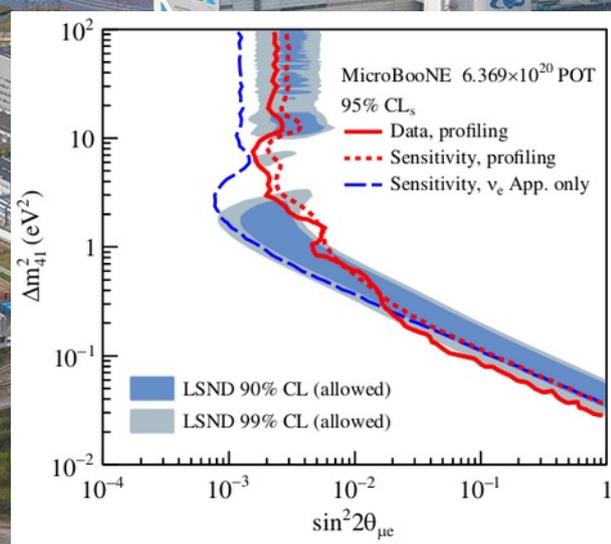


# MicroBooNE



“First Constraints on Light Sterile Neutrino Oscillations from Combined Appearance and Disappearance Searches with the MicroBooNE Detector”. P. Abratenko et al. Phys. Rev. Lett. 130, 011801 (2023)

Чувствительность ограничена вырождением между исчезновением и появлением  $\nu_e$  и может быть улучшена при использовании пучка NuMI.



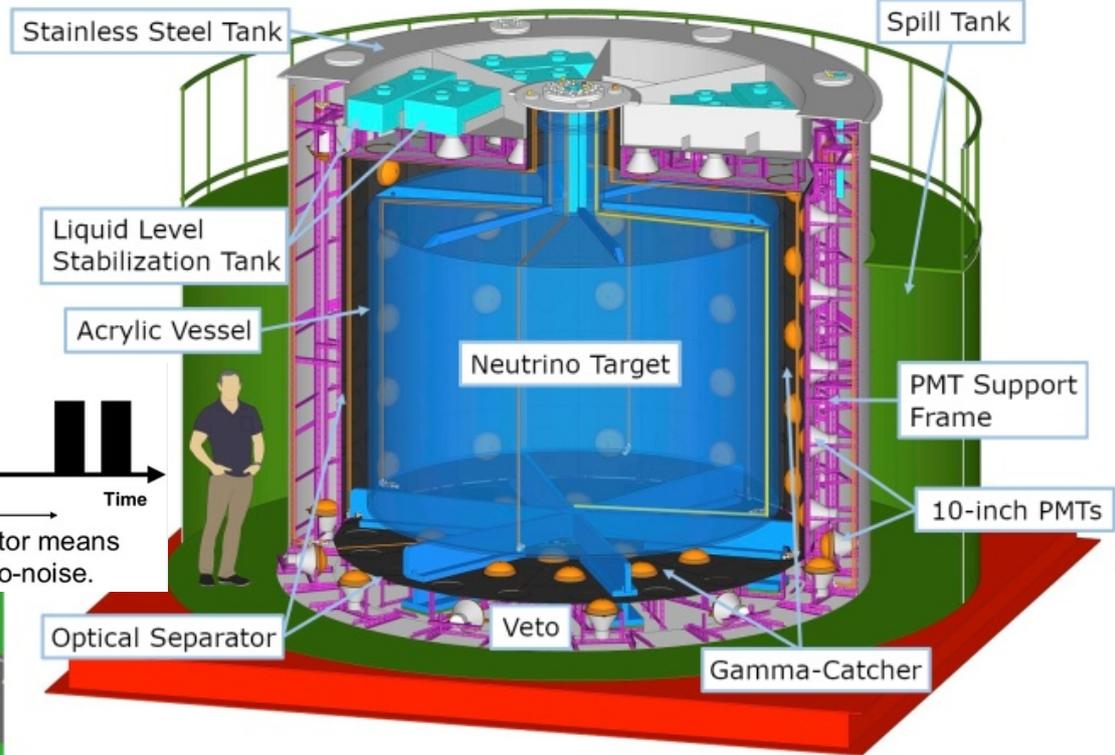
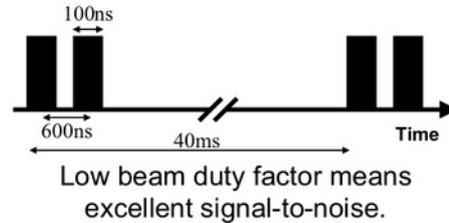
arXiv:2412.14407v2



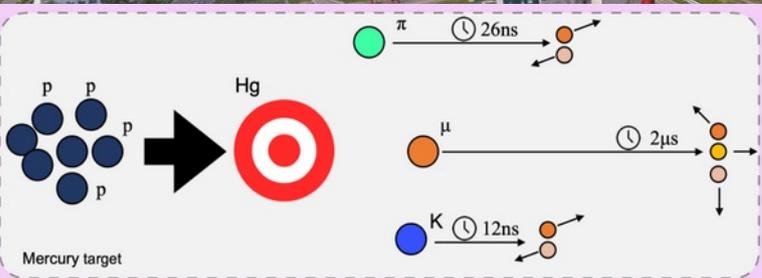
# JSNS<sup>2</sup>



- Протоны, 3 ГэВ, 1 МВт
- Отбор распадов мюонов в покое
- Внутренний объем: 17 тонн жидкого сцинтиллятора с гадолинием
- Наружный объем: 31 тонна жидкого сцинтиллятора
- 24 метра от ртутной мишени
- Проверка результатов LSND



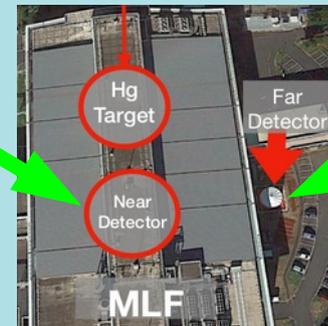
Записано около половины намеченной статистики, идёт анализ данных



18 февраля 2025



17 тонн, 24 м



32 тонны, 48 м

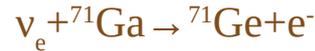


# Галлиевая аномалия: GALEX и SAGE



Эксперименты GALEX – 30т галлия в виде раствора GaCl<sub>3</sub>-HCl (Gran Sasso) и SAGE – 50т (13.1т в эксперименте с источником) металлического галлия (Баксан).

Регистрация солнечных нейтрино:



Химическое выделение германия.

Проверка эффективности с помощью источника нейтрино с энергией ~0.8 МэВ (захват электрона):



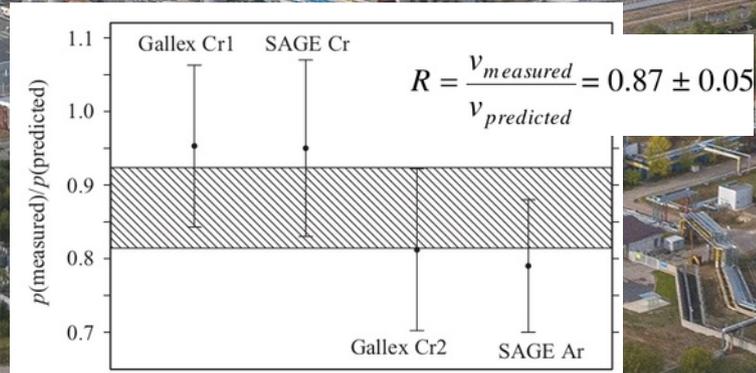
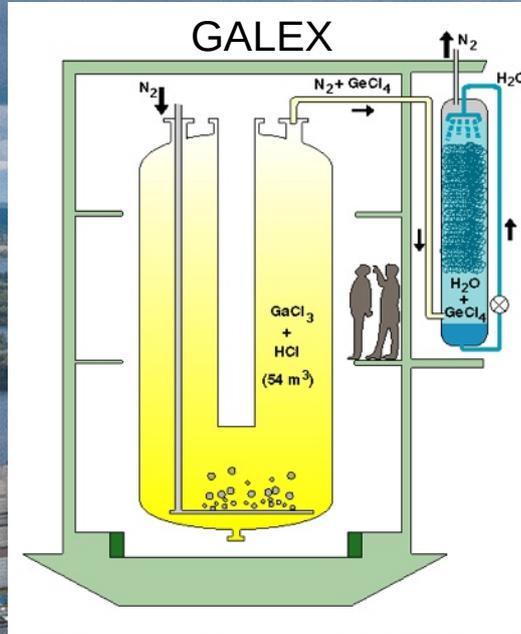
$E_\nu = 0.75$  МэВ (90%)  
и  $0.43$  МэВ (10%)

$E_\nu = 0.81$  МэВ (100%)

L/E ~ 1 м/МэВ: Эффективность ниже расчётной на 2.6σ

“Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III: Results for the 2002 - 2007 data-taking period”. J. N. Abdurashitov et al., Phys. Rev. C 80 (2009) 015807

“Final results of the <sup>51</sup>Cr neutrino source experiments in GALEX”. W. Hampel et al. Physics Letters B 420 (1998) 114

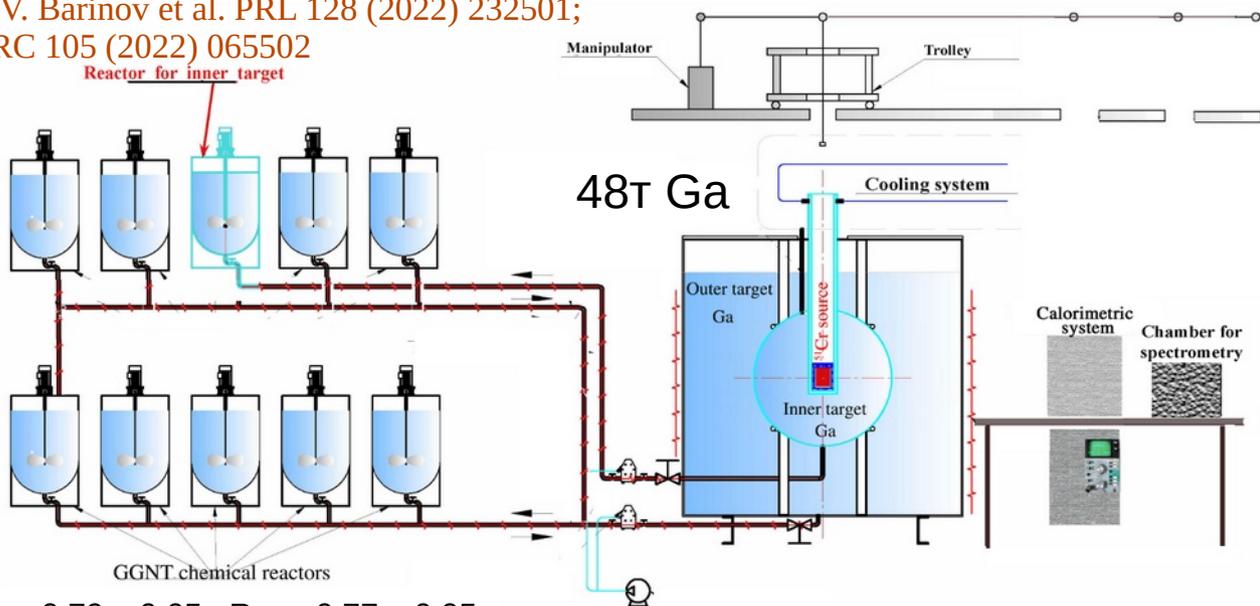




# Галлиевая аномалия: BEST

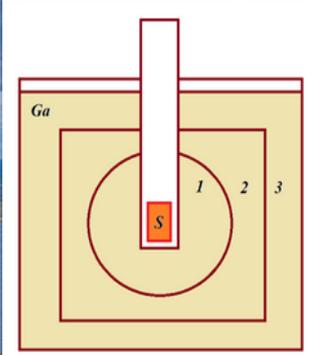


V.V. Barinov et al. PRL 128 (2022) 232501;  
PRC 105 (2022) 065502  
Reactor for inner target

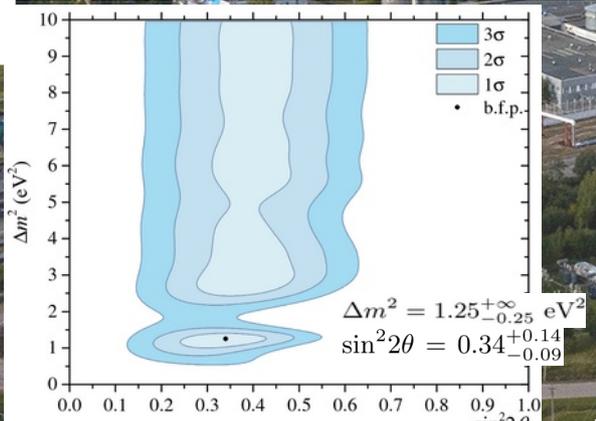
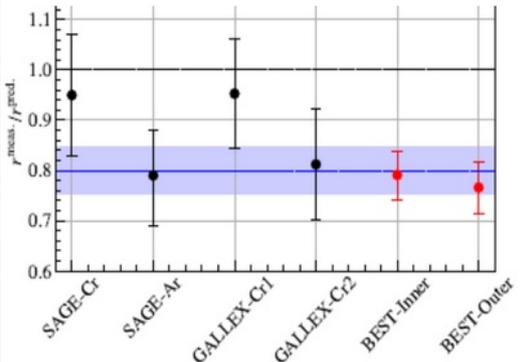


## BEST-2

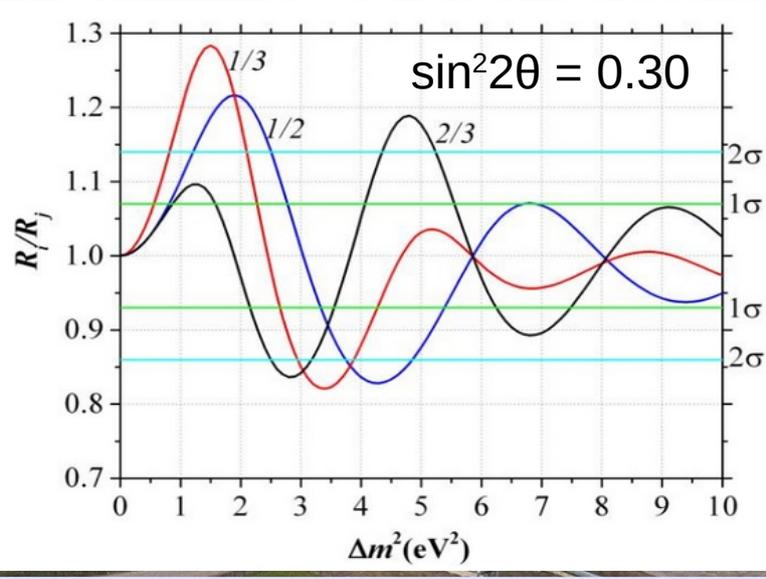
- ✓ 3 зоны
- ✓ Источник  $^{58}\text{Co}$   $E_\nu=1.5$  МэВ — сечение в 4.4 раза больше
- ✓ Активность  $A = 400$  кCi (у BEST 3.4 Мси)
- ✓ Ожидаемая статистика как у BEST



$R_{in} = 0.79 \pm 0.05$   $R_{out} = 0.77 \pm 0.05$   
 $R_{GA} = 0.80 \pm 0.05$  (4  $\sigma$ )



$\Delta m^2 = 1.25^{+0.05}_{-0.25}$  eV<sup>2</sup>  
 $\sin^2 2\theta = 0.34^{+0.14}_{-0.09}$

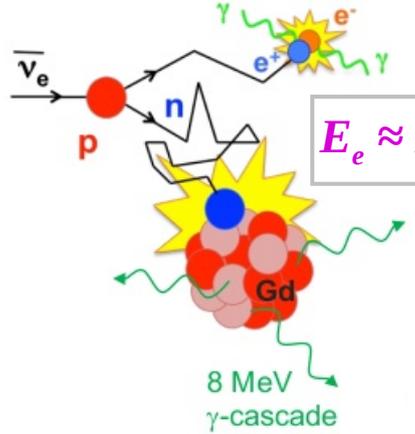


► Валерий Горбачев, пятница 21.02 14:00

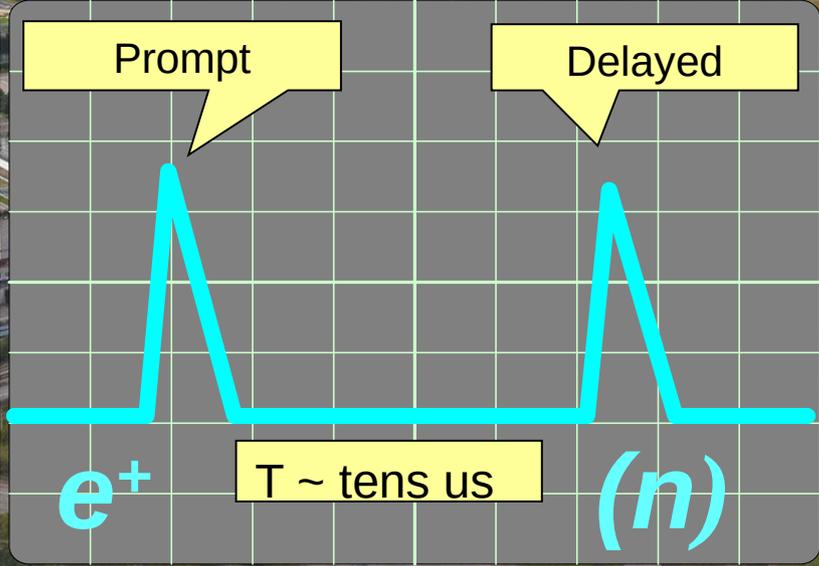
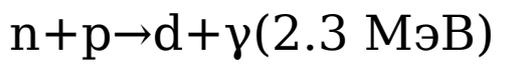
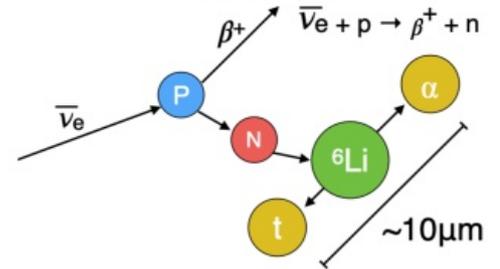


# Реакторные эксперименты

Обратный бета-распад



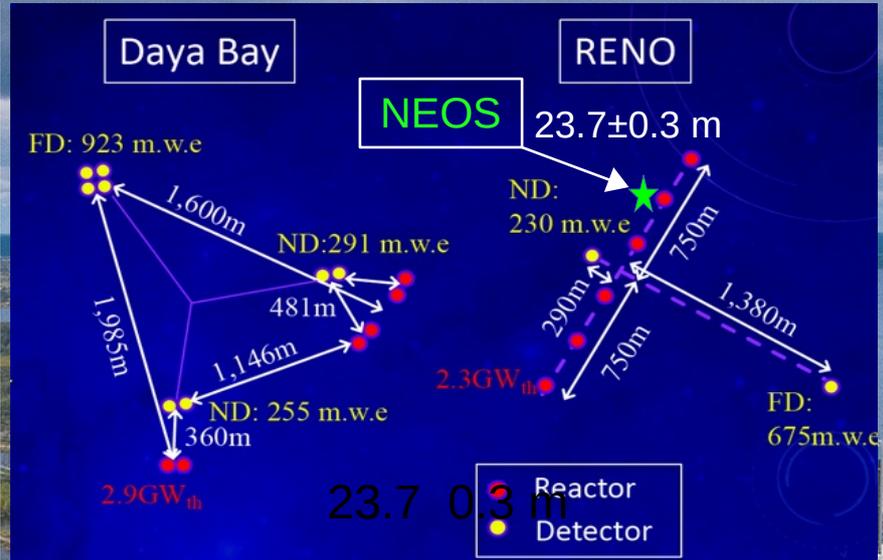
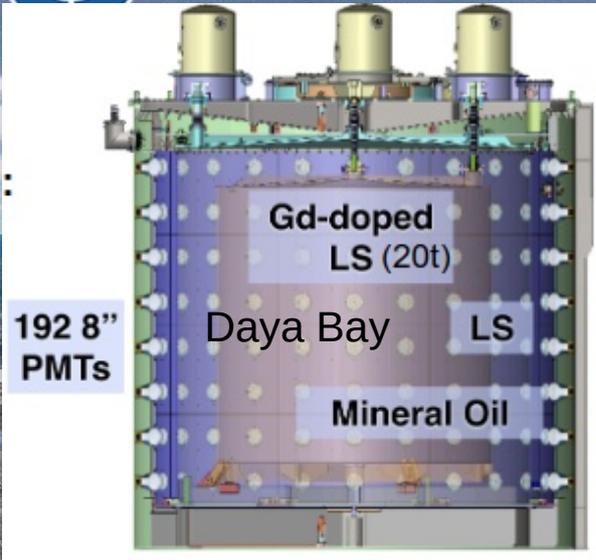
$$E_e \approx E_\nu - 1806 \text{ MeV}$$



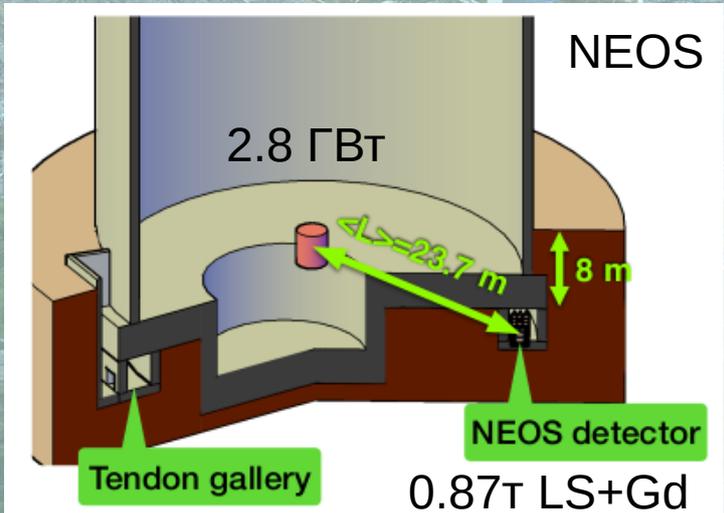
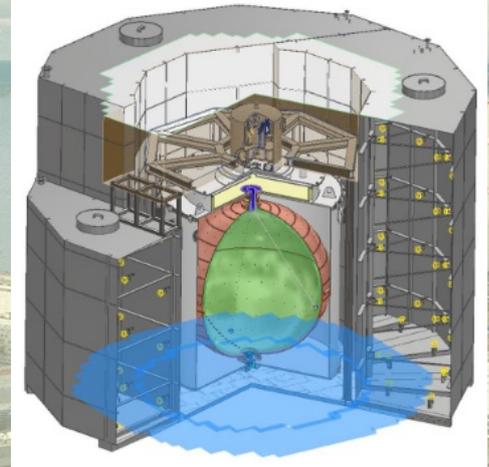
★ Исследовательский реактор  
★ Энергетический реактор



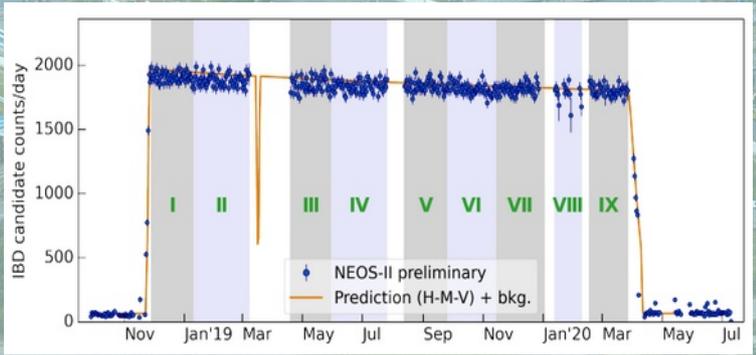
# Daya Bay, RENO, NEOS, JUNO-TAU, CLOUD



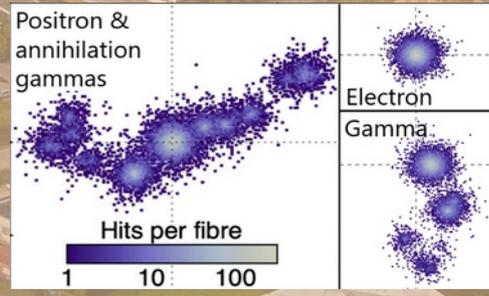
**JUNO-TAU:**  
 44 м от 2x4.6 ГВт  
 1 т LS+Gd,  
 50% SiPM: 2% @ 1 МэВ



388 дней реактор включен  
 43+74 дня реактор выключен



**CLOUD:** 33м от 2x4.25 ГВт  
 5-10 т матовый LS  
 10,000 WLS-волокон  
 SiPM с обеих сторон  
 > 200 ф.э./МэВ



18 февраля 2025

Игорь Алексеев, НИЦ КИ

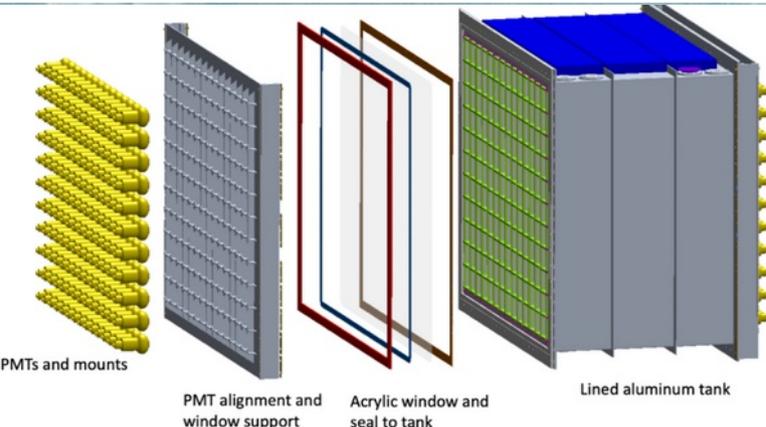
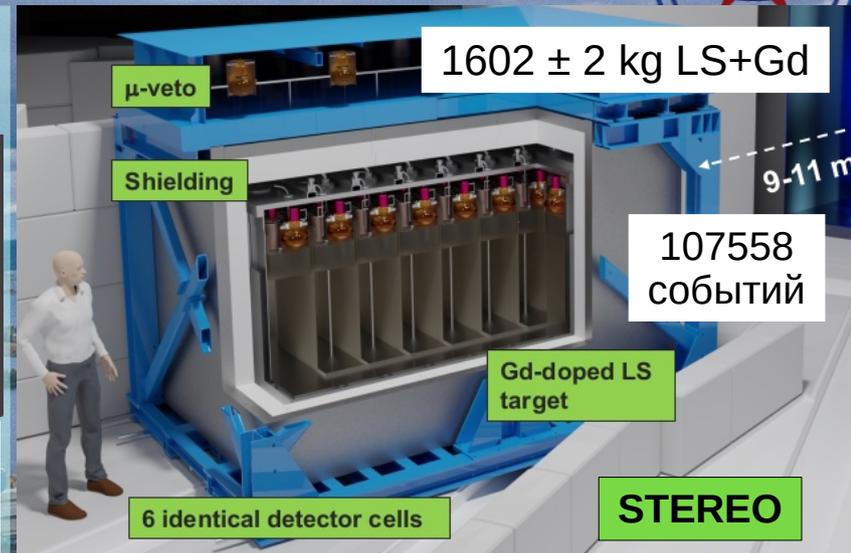
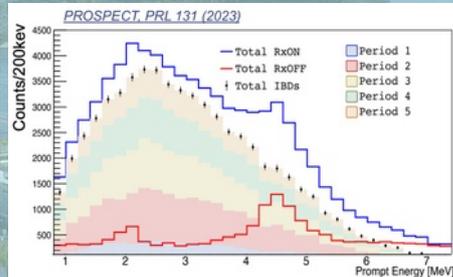
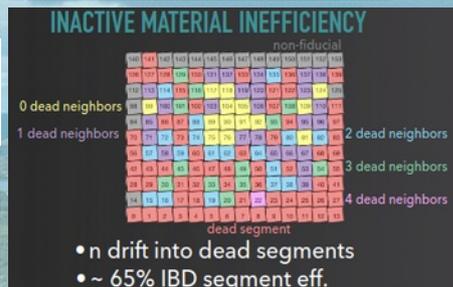


# PROSPECT (II), STEREO, SOLID

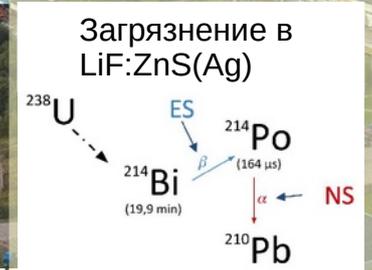
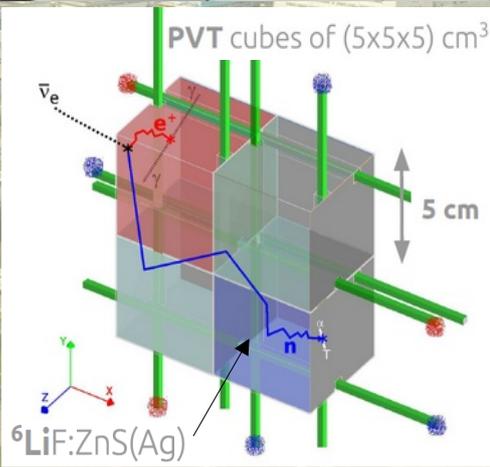


PROSPECT (II):  
154 сегмента, LS+Li,  
6.7-9.2 м от реактора

PROSPECT II — основное отличие —  
ФЭУ изолированы от сцинтиллятора



Parameter	P1	P2 at HFIR	P2 at LEU
Effective Statistics	36204	$2.08 \times 10^5$	$1.79 \times 10^6$



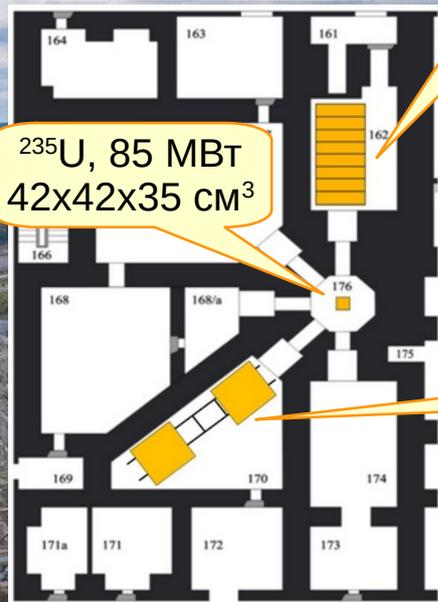
5x10 плоскостей 16x16





# Нейтрино-4 и Нейтрино-4+

Реактор СМ-3  
Димитровград



5.7 м<sup>3</sup> LS+Gd,  
4x5x5 секций,  
ФЭУ по сторонам,  
есть PSD

Нейтрино-4



Подвижный детектор L=6-12 м, 1.8 м<sup>3</sup> LS+Gd, 5x10 секций, ФЭУ сверху, нет PSD, 3.5 м в.э., S/B~0.5

Выполнена модернизация: заменён сцинтиллятор и секции детектора, установлена новая активная защита, подключена более быстрая система сбора данных. **Есть PSD!** С марта 2024 года идёт набор статистики. Набранные данные обрабатываются.

Нейтрино-4+



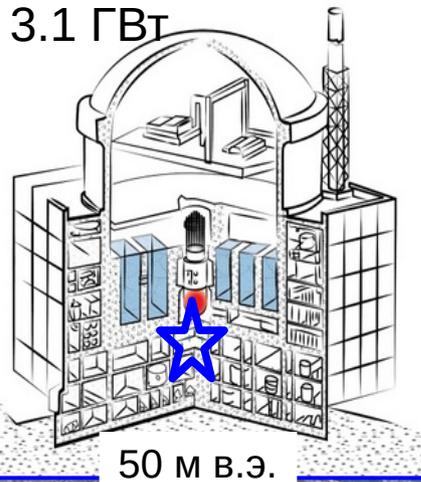
Идёт монтаж оборудования: установлены платформы, детектирующие модули заполнены сцинтиллятором, смонтированы фотоумножители и часть электроники. Монтажные работы продолжаются. Осенью должен начаться набор данных.



# ДАНСС



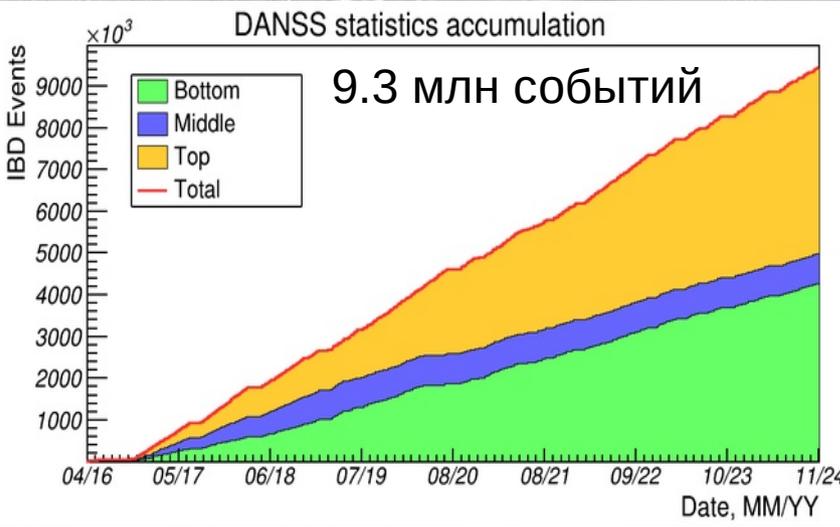
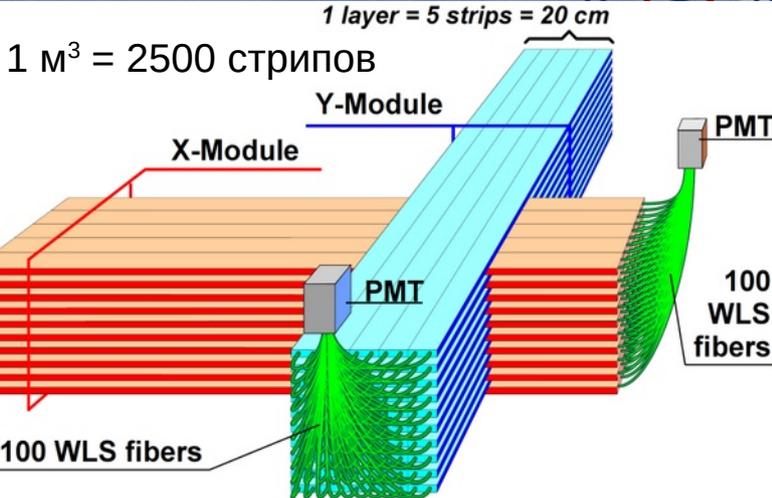
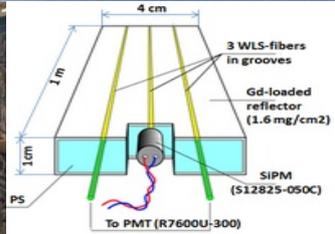
3.1 ГВт



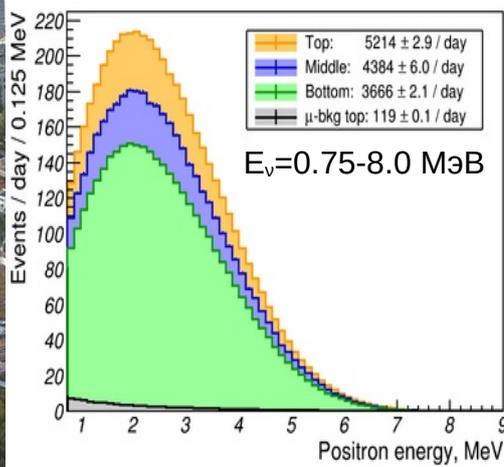
50 м в.э.



10.7-12.7 м от центра горения



9.3 млн событий



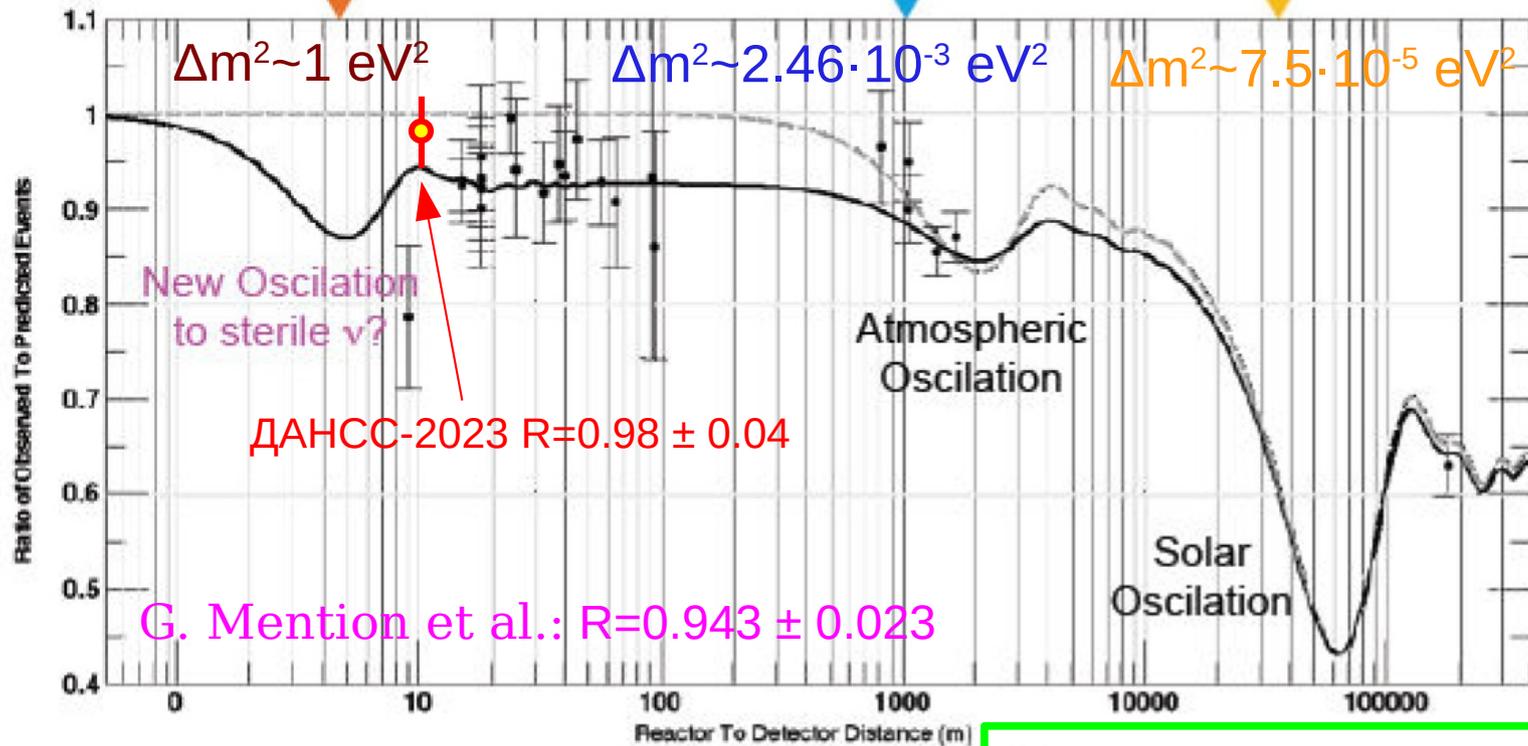
- Модернизация:**
- ✓ Новые стрипы 1200x50x20 мм<sup>3</sup>
  - ✓ 8 быстрых WLS-волокон YS2
  - ✓ SiPM с обеих сторон волокна
  - ✓ > 140 ф.э./МэВ
  - ✓ Чувствительный объем 1.7 м<sup>3</sup>
  - ✓ Разрешение 12% @ 1МэВ

- ▶ Дмитрий Свирида, среда 19.02 13:45
- ▶ Наталия Скрябова, пятница 21.02 13:45
- ▶ Марк Ширченко, пятница 21.02 16:15



# Реакторная аномалия

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \underbrace{\sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{41}^2 \frac{L}{E}\right)}_{\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2} - \underbrace{c_{14}^4 \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{31}^2 \frac{L}{E}\right)}_{\Delta m^2 \sim 2.46 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2} - \underbrace{c_{14}^4 c_{13}^2 \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{21}^2 \frac{L}{E}\right)}_{\Delta m^2 \sim 7.5 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2}$$

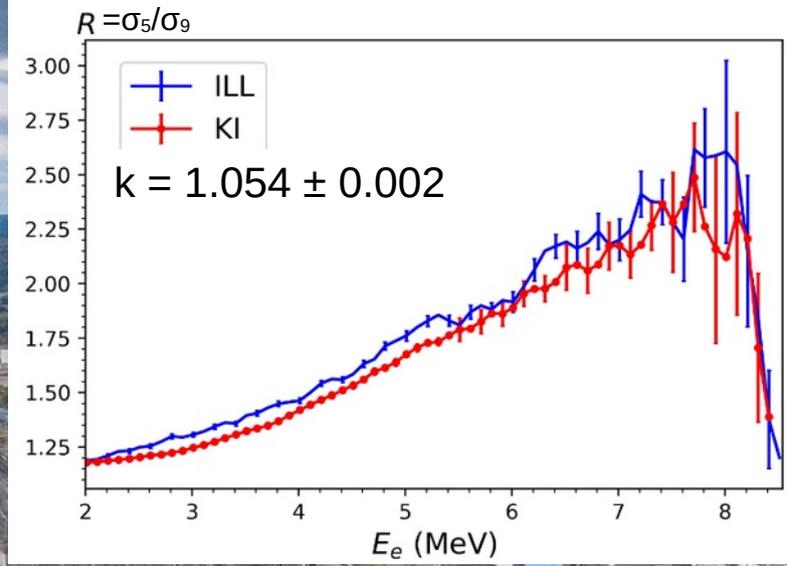


RAA: G. Mention et al., Phys. Rev. D 83 (2011) 073006  
 $^{238}\text{U}$ : Th. A. Mueller et al., Phys. Rev. C 83 (2011) 054615  
 $^{235}\text{U}$ ,  $^{239,241}\text{Pu}$ : Patrick Huber, Phys. Rev. C 84 (2011) 024617

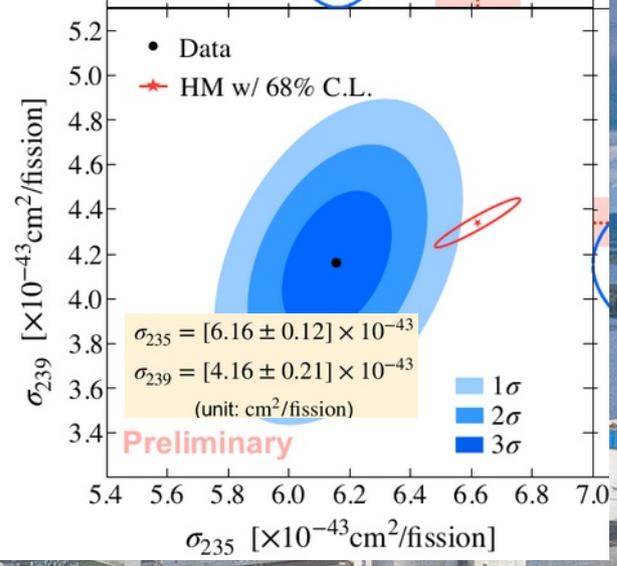
**ILL:**  
 W. Mampe et al., NIM 154 (1978) 127  
 F. von Feilitzsch et al., PLB 118 (1982) 162  
 K. Schreckenbach et al., PLB 160 (1985) 325  
 A. A. Hahn et al., PLB 218 (1989) 365



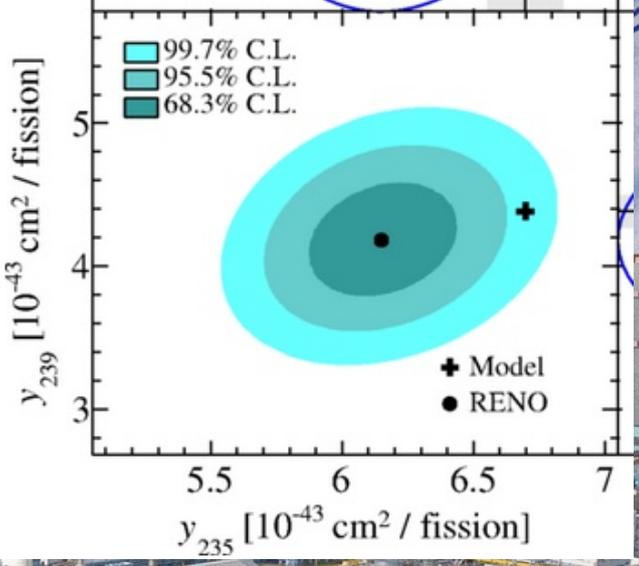
# Измерения реакторных потоков



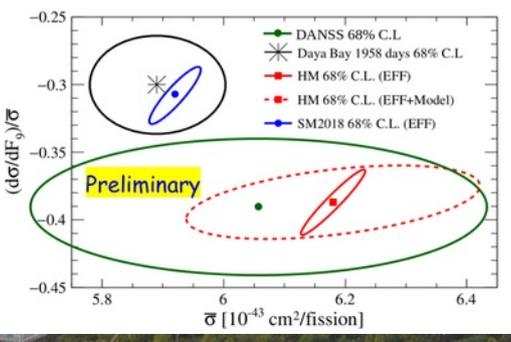
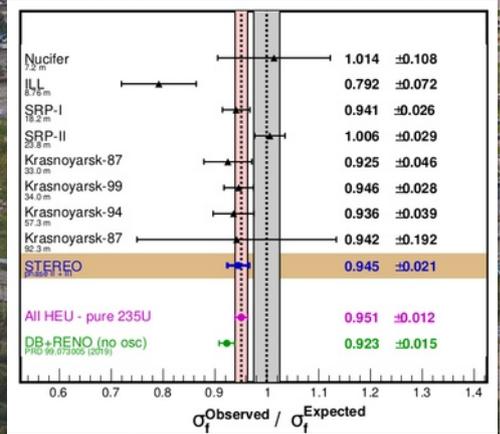
V. Kopeikin et al., PRD 104 (2021) L071301



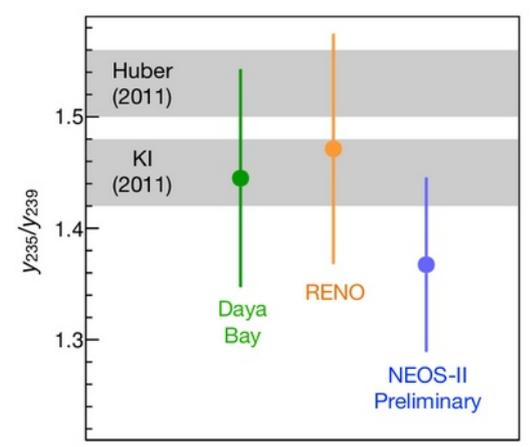
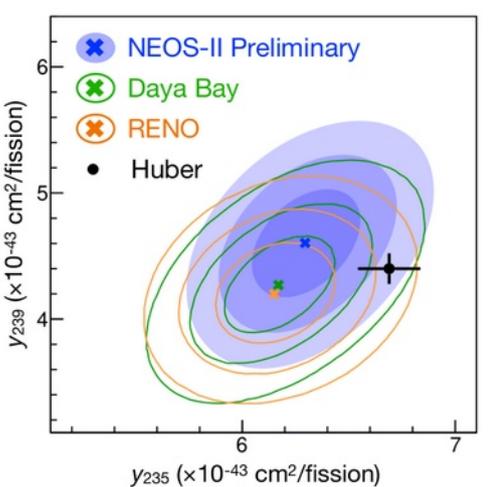
Daya Bay: 3158 дней,  $4.7 \cdot 10^6$  событий



G. Bak et al., PRL 122 (2019) 232501



F.P. An et al., PRL 130(2023)211801  
DANSS: private communications

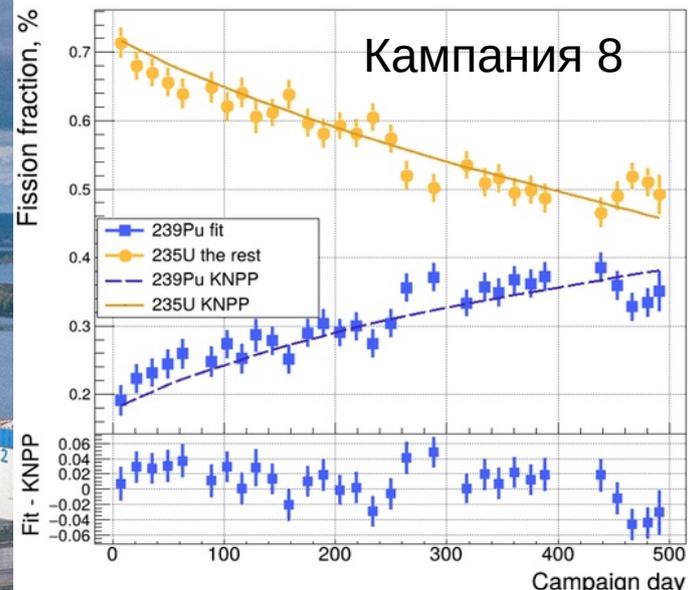
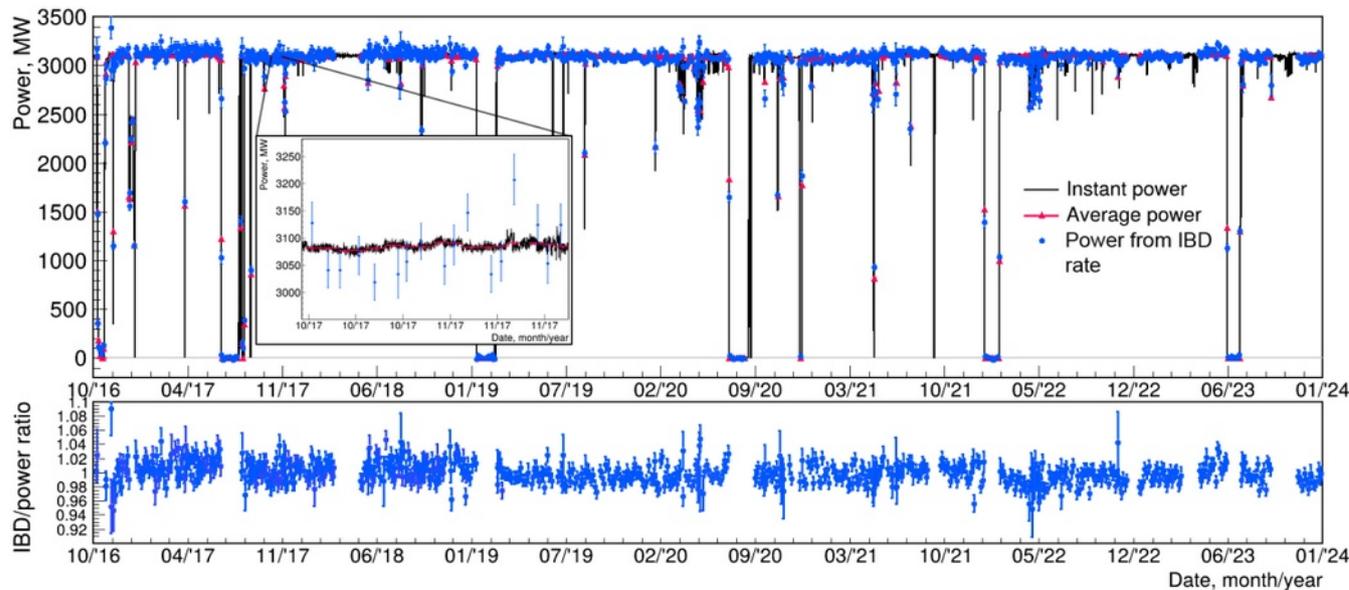


H. Almazán et al., Nature v 613 (2023) 257

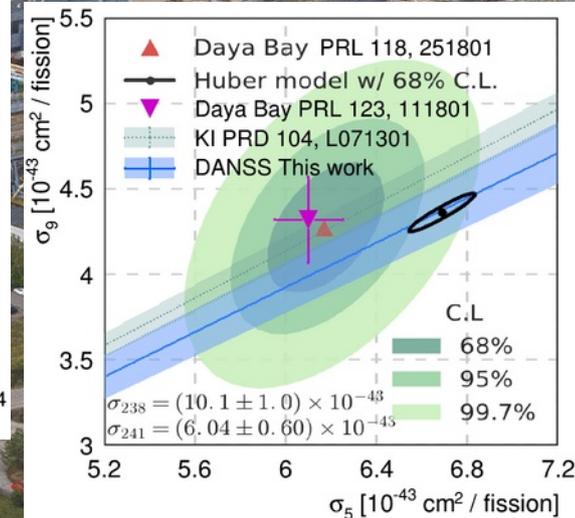
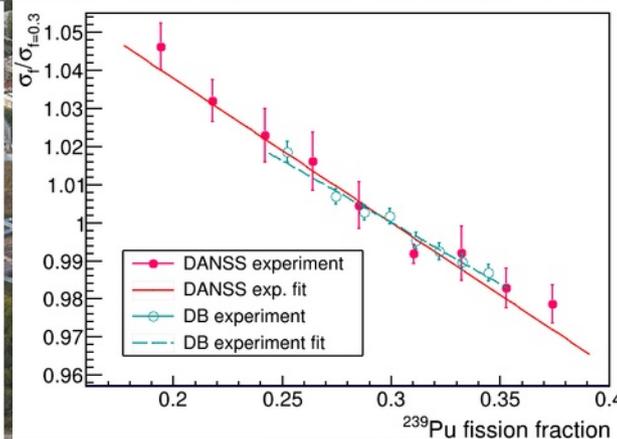
Игорь Алек



# Измерения ДАНСС



- ✓ Измерение мощности реактора по счёту  $\bar{\nu}$  в течение 7+ лет с систематическим отклонением  $< 0.8\%$
- ✓ Наблюдение 4 полных реакторных кампаний
- ✓ Определение долей деления по спектру  $\bar{\nu}$  с точностью не хуже 3%
- ✓ Определение отношения выходов ОБР от  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  на основе измерения наклона счёта ОБР:  $\sigma_5/\sigma_9 = 1.528 \pm 0.058$





# Модели реакторных потоков



## Конверсионная модель

## Модель суммирования

C. Giunti et al., PLB 829 (2022) 137054

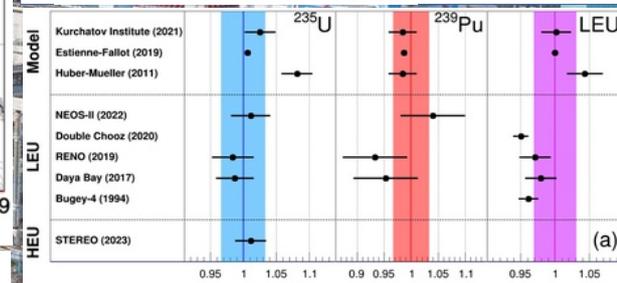
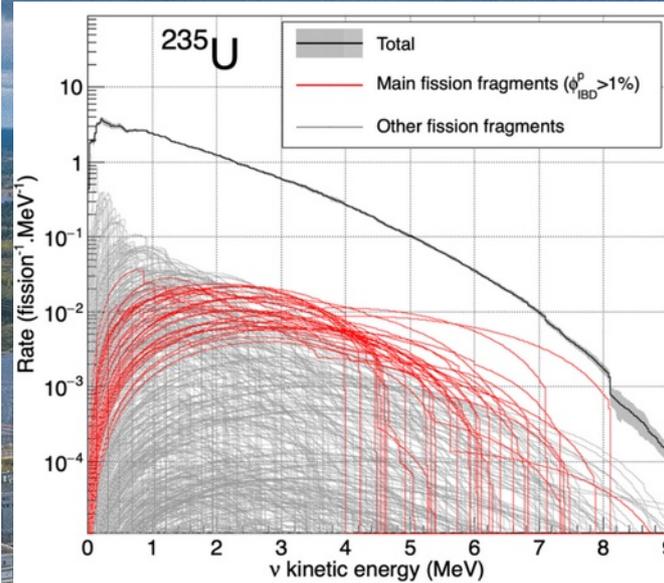
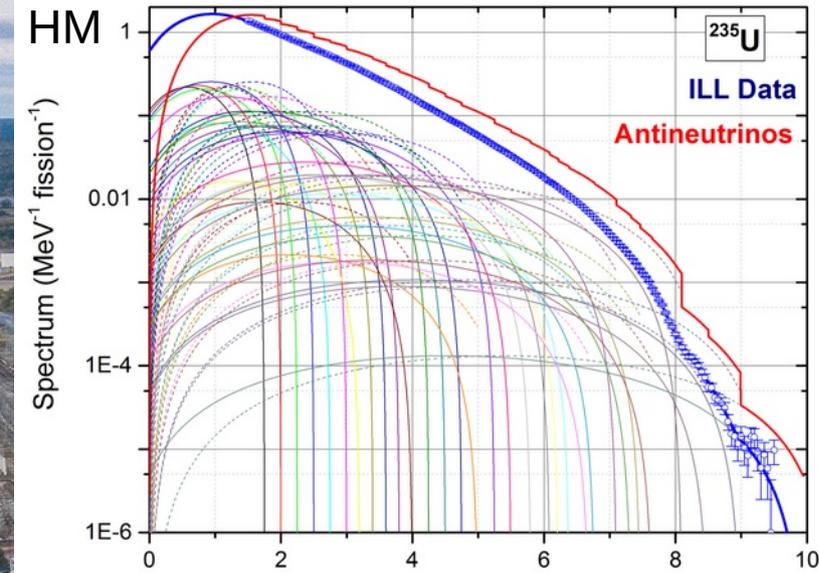
$$\bar{R}_{EF} = 0.960^{+0.033}_{-0.031}$$

$$\bar{R}_{HKSS} = 0.925^{+0.025}_{-0.023}$$

$$\bar{R}_{KI} = 0.975^{+0.022}_{-0.021}$$

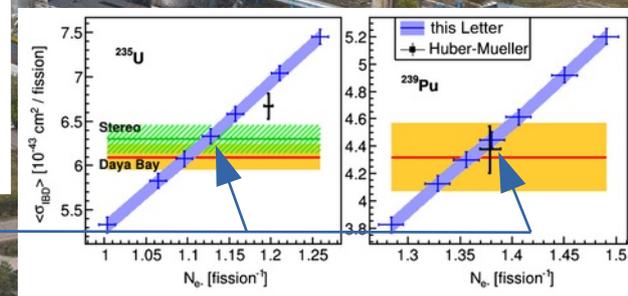
$$\bar{R}_{HKSS-KI} = 0.964^{+0.023}_{-0.022}$$

$$\bar{R}_{HM} = 0.936^{+0.024}_{-0.023}$$



Отношение к **BESTIOLE**

- L. Hayen et al., PRC 100 (2019) 054323 — конверсионная модель **HKSS**
- M. Estienne et al., PRL 123 (2019) 022502 — модель суммирования **EF**
- V. Kopeikin et al., PRD 104 (2021) L071301 — конверсионная модель **KI**
- L. Perissé et al., PRC 108 (2023) 055501 — модель суммирования **BESTIOLE**
- A. Letourneau et al., PRL 130 (2023) 021801 — модель суммирования с эмпирической моделью бета-распадов, отсутствующих в базе данных



▶ Валерий Синев, среда 19.02 13:30

Центральное значение параметра модели



# Модели реакторных потоков



Конверсионная модель

Модель суммирования

C. Giunti et al., PLB 829 (2022) 137054

$$\bar{\beta} = 0.960^{+0.033}_{-0.031}$$

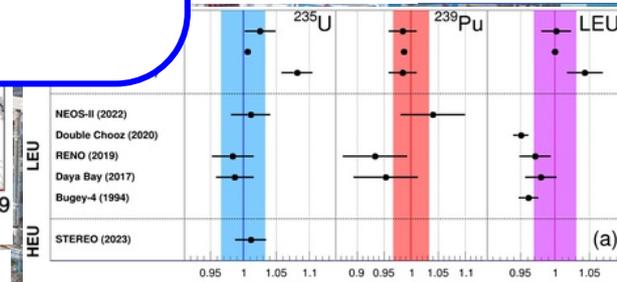
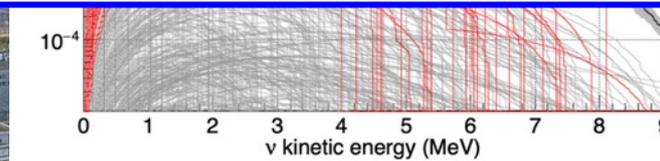
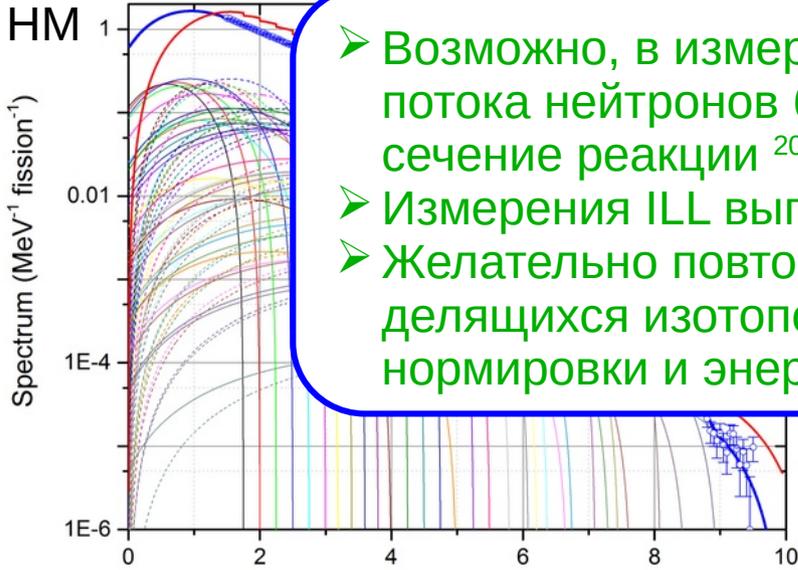
$$= 0.925^{+0.025}_{-0.023}$$

$$0.975^{+0.022}_{-0.021}$$

$$k_1 = 0.964^{+0.023}_{-0.022}$$

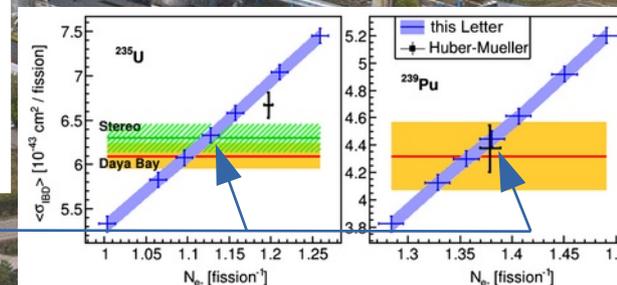
$$0.936^{+0.024}_{-0.023}$$

- Возможно, в измерениях ILL  $^{235}\text{U}$  для нормировки потока нейтронов было использовано завышенное сечение реакции  $^{207}\text{Pb}(n,\gamma)$
- Измерения ILL выполнены 40 лет назад
- Желательно повторить измерения спектров основных делящихся изотопов на новом уровне точности нормировки и энергетического разрешения



- L. Hayen et al., PRC 100 (2019) 054323 — конверсионная модель **HKSS**
- M. Estienne et al., PRL 123 (2019) 022502 — модель суммирования **EF**
- V. Kopeikin et al., PRD 104 (2021) L071301 — конверсионная модель **KI**
- L. Perissé et al., PRC 108 (2023) 055501 — модель суммирования **BESTIOLE**
- A. Letourneau et al., PRL 130 (2023) 021801 — модель суммирования с эмпирической моделью бета-распадов, отсутствующих в базе данных

Отношение к **BESTIOLE**



➤ Валерий Синев, среда 19.02 13:30

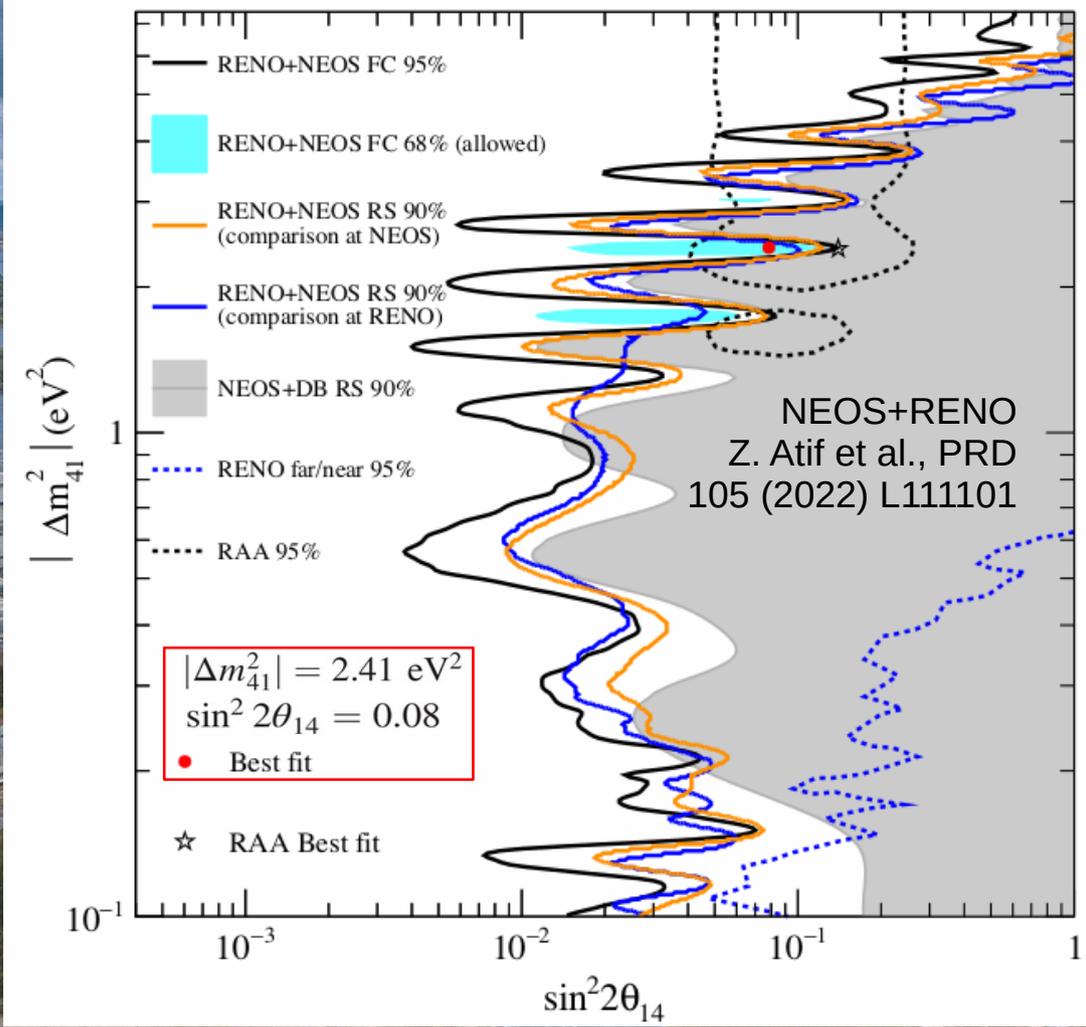
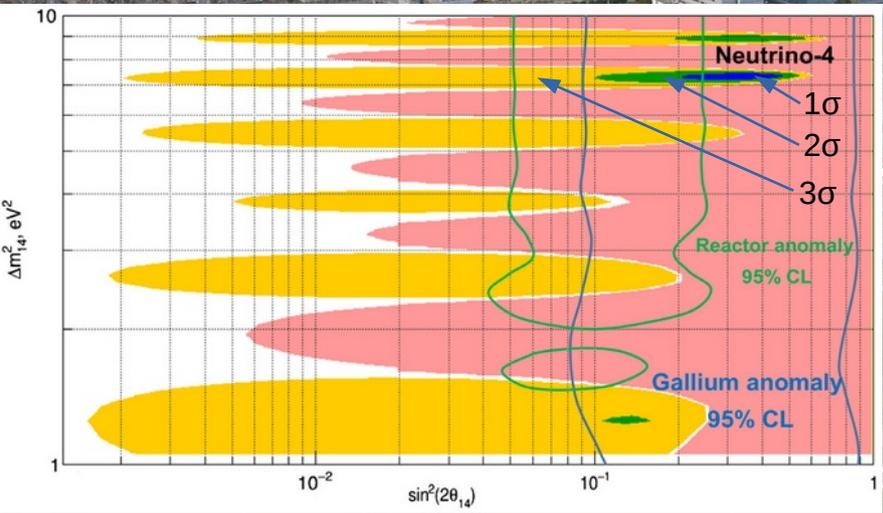
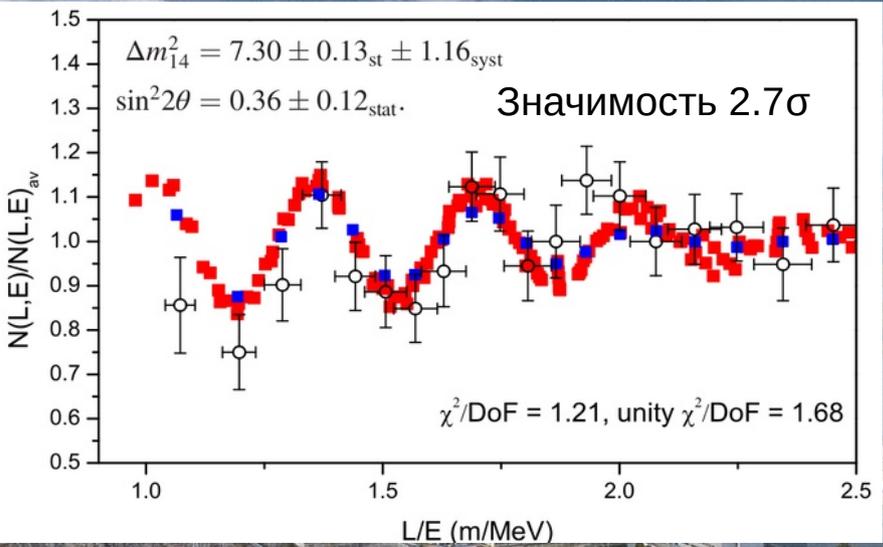
Центральное значение параметра модели



# Нейтрино-4, NEOS

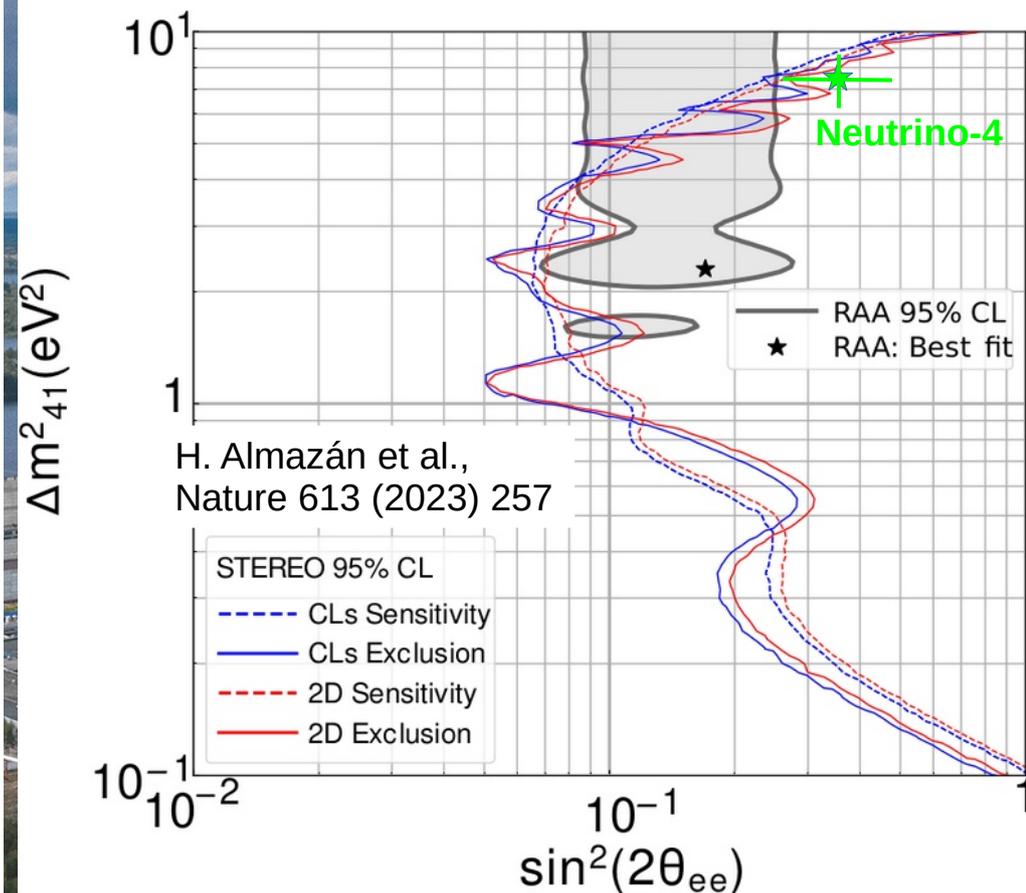
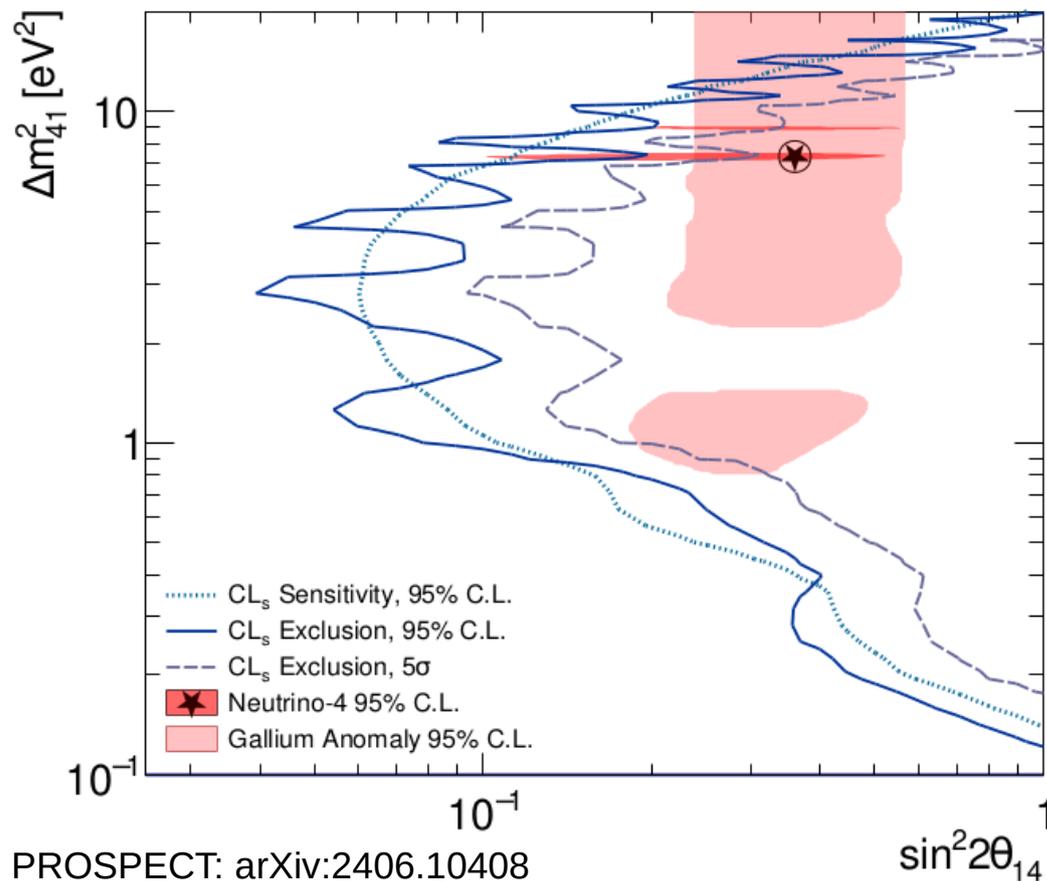


Нейтрино-4: A.P. Serebrov et al., Phys.Rev.D 104 (2021) 032003





# PROSPECT, STEREO



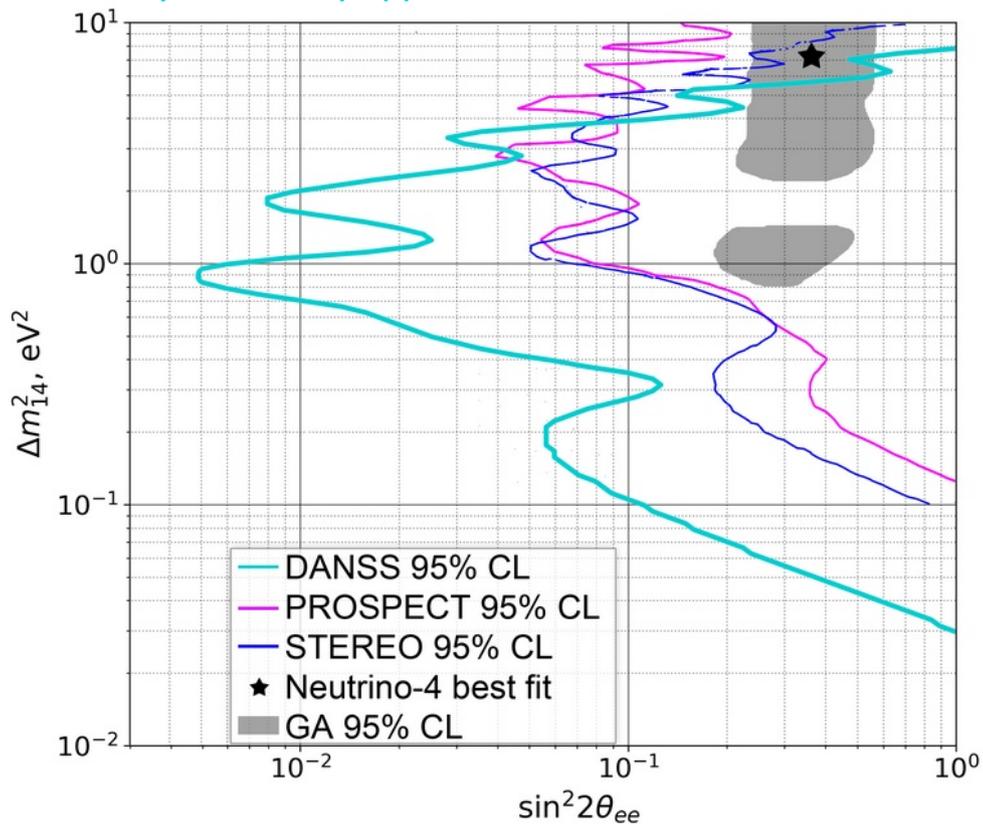
✗ Лучшая точка Нейтрино-4 лежит внутри 5 $\sigma$  области исключения PROSPECT  
✓ 95% C.L. область Нейтрино-4 выходит за 95% область исключения PROSPECT



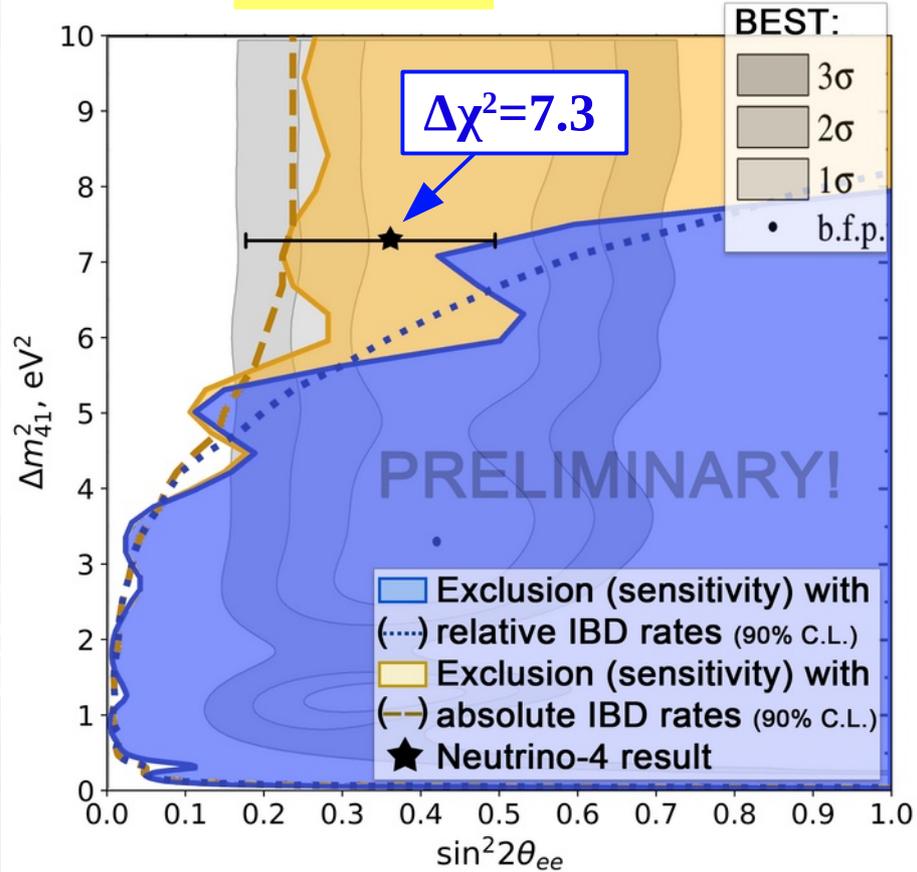
# DANSS



DANSS: 8 лет набора данных  
Эксперимент продолжается



HM-model



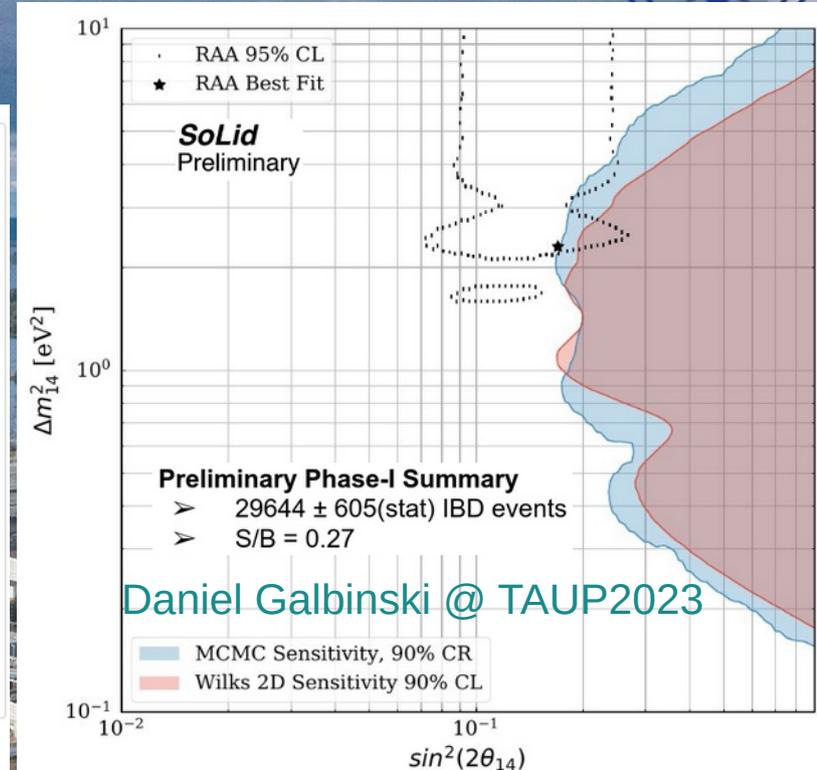
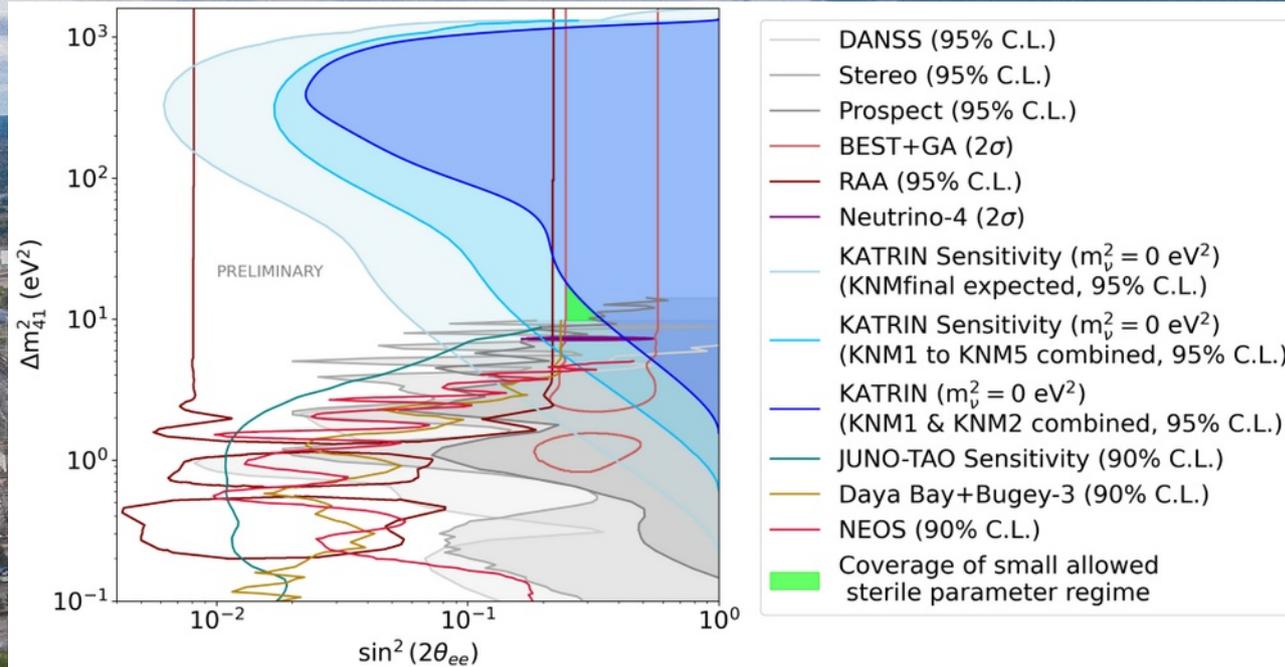
Модельно-зависимый анализ DANSS исключает лучшую точку Нейтрино-4 на уровне 2.2σ



# KATRIN SOLID



KATRIN: Shailaja Mohanty @ Neutrino 2024



Реакторные эксперименты практически исключают область  $\Delta m^2 = 0.1 - 10 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta > 0.1$



# Выводы



## Ускорительные эксперименты:

Новые измерения в рамках нейтринной программы Лаборатории Ферми (MicroBooNE) не подтверждают избытка событий с появлением электронных нейтрино, но и не дают объяснения наблюдавшемуся избытку. MicroBooNE планирует расширить область исключения за счёт использования второго нейтринного пучка с другим соотношением мюонного и электронного нейтрино.

Планируется новый эксперимент JSNS<sup>2</sup>, повторяющий кинематику LSND.

## Галлиевые эксперименты:

Эксперимент BEST подтвердил результаты SAGE и GALEX.

Планируется новый эксперимент BEST-2 с энергией нейтрино 1.5 МэВ и делением мишени на три зоны.

## Реакторные эксперименты:

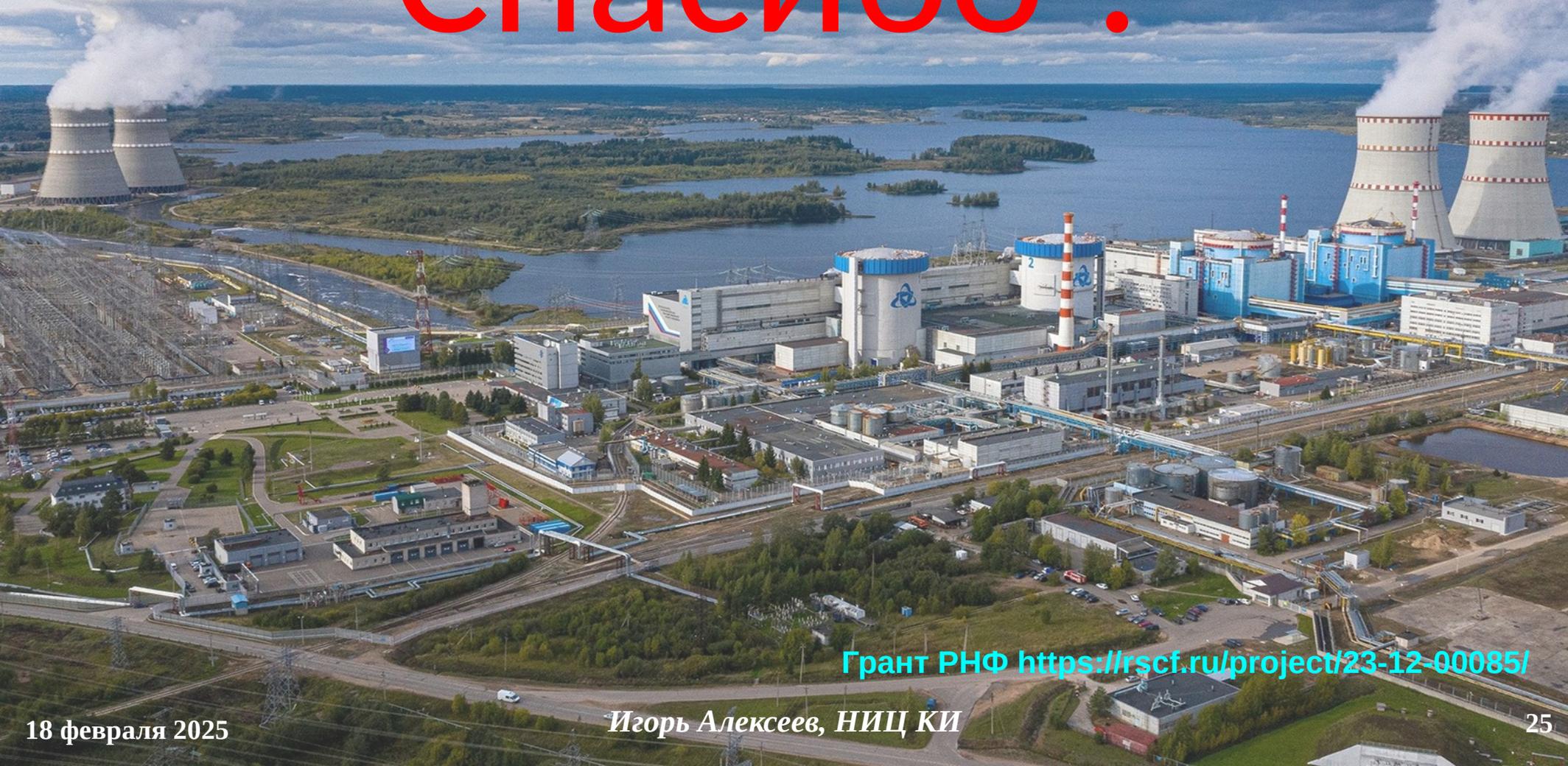
Реакторная аномалия возможно объясняется завышенным выходом нейтрино от <sup>235</sup>U в измерениях ILL, что может быть связано с завышенным сечением <sup>207</sup>Pb(n,γ), использованным при нормировке потока нейтронов. Измерения спектров электронов от основных делящихся изотопов необходимо повторить на новом уровне точности.

Измерение реакторных спектров на коротких расстояниях противоречит параметрам стерильных нейтрино из галлиевой и реакторной аномалий. Лучшая точка Нейтрино-4 исключается на уровне 5σ измерениями PROSPECT и STEREO, но вся область допускаемая Нейтрино-4 пока не перекрыта.

Модернизированные Нейтрино-4 (уже начал набор статистики), DANSS и PROSPECT, а также новый Нейтрино-4+ проверят сигнал от Нейтрино-4 и исследуют расширенную область параметров.



# Спасибо !



Грант РФФИ <https://rscf.ru/project/23-12-00085/>

18 февраля 2025

Игорь Алексеев, НИЦ КИ

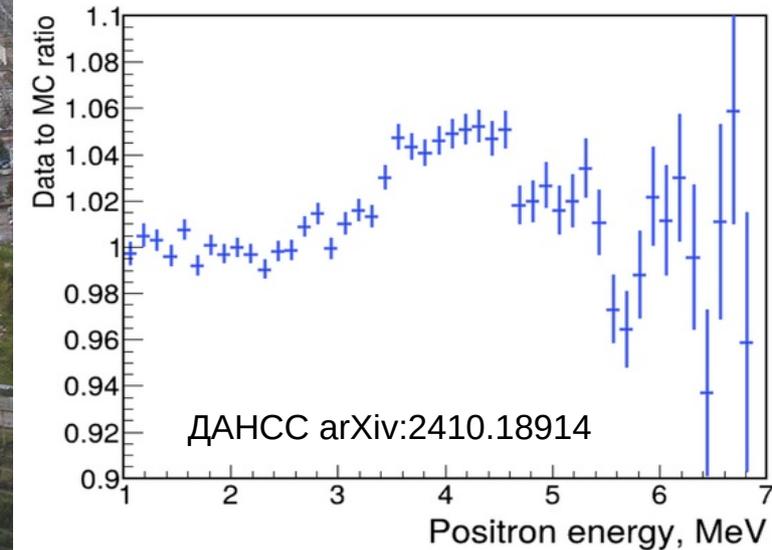
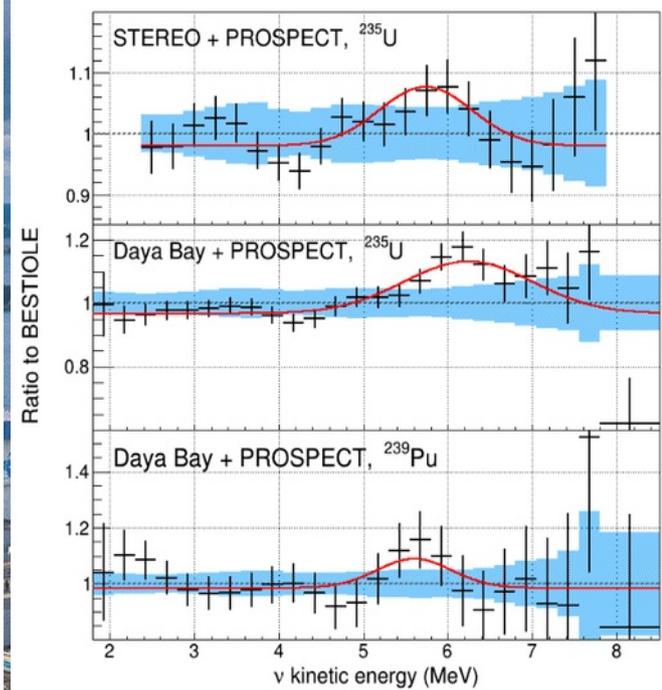
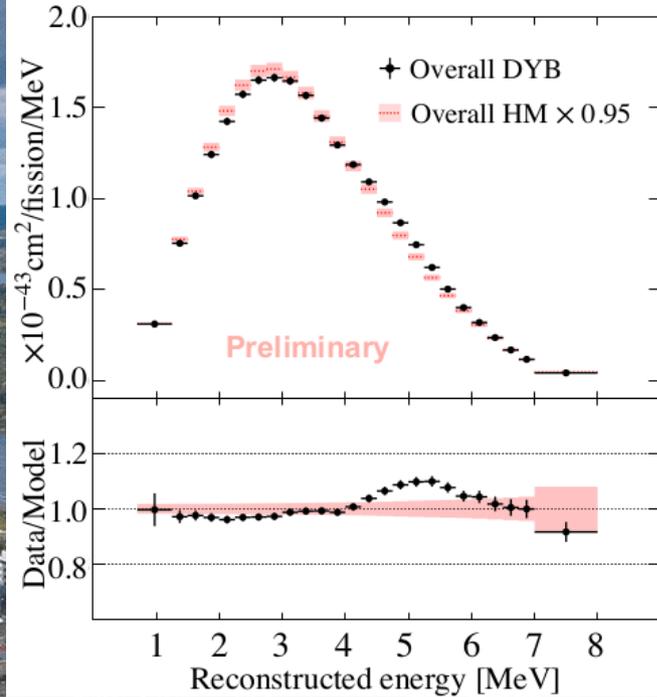
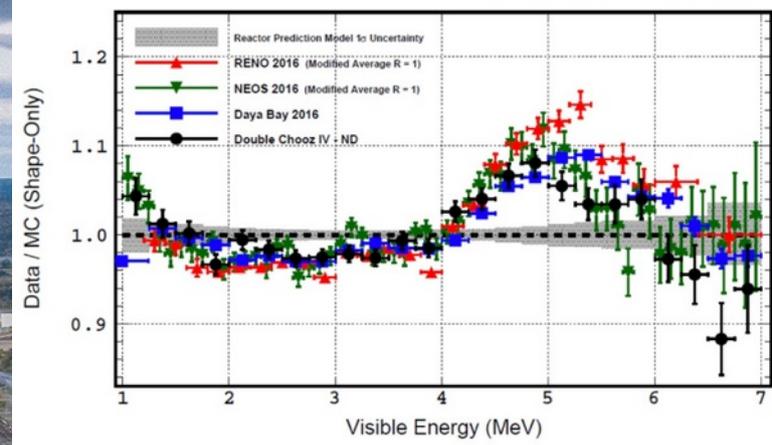
25



# Аномалия формы спектра - «Бамп»



Nature Physics 558–564 (2020)



ДАНСС arXiv:2410.18914

Yang HAN & Jinhao HUANG  
@ Neutrino 2024

L. Perissé et al., PRC 108 (2023)  
055501

Бамп хорошо виден в эксперименте, но не воспроизводится в моделях спектров антинейтрино