

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»

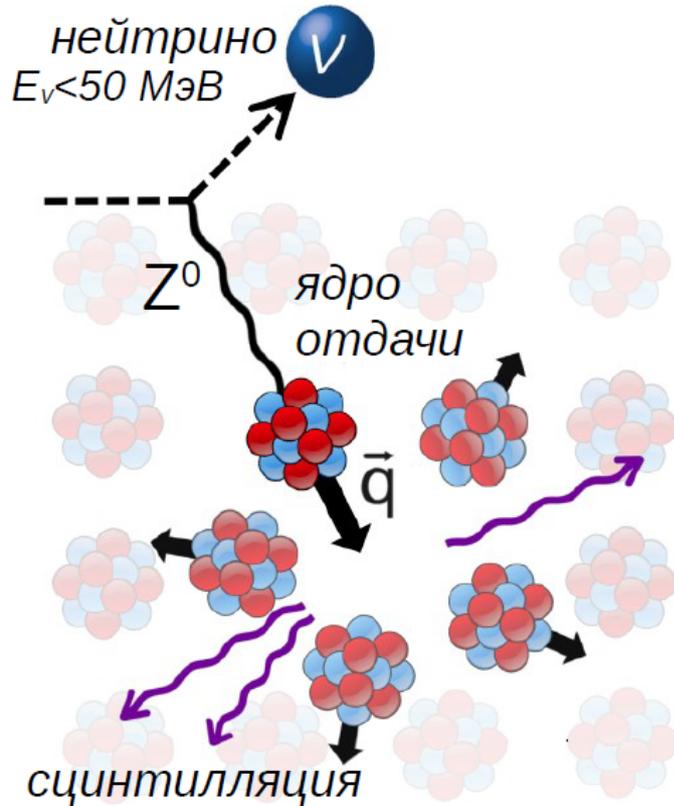
# Обзор измерений упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах атомов

работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках программы “Наука”, грант № 075-15-2024-541

*Алексей Коновалов (ФИАН, МИФИ)*

«Coherent effect of a weak neutral current»,  
D. Freedman, PRD v.9, iss.5 (1974)

«Изотопическая и киральная структура нейтрального тока»,  
В. Копелиович, Л. Франкфурт, Письма в ЖЭТФ, 19 (1974)



$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2 M}{4\pi} \left( [1 - 4 \sin^2 \theta_W] Z - N \right)^2 \left[ 1 - \frac{T}{T_{max}} \right] F_{nucl}^2(q^2)$$

Максимальная энергия ядра отдачи

$$T_{max} = 2E_\nu^2 / (M + 2E_\nu)$$

Ядро	$T_{max}$ , кэВ ( $E_\nu = 5$ МэВ)	$T_{max}$ , кэВ ( $E_\nu = 30$ МэВ)
$^{12}C$	4.44	159.0
$^{23}Na$	2.32	83.2
$^{40}Ar$	1.33	47.9
$^{74}Ge$	0.72	25.9
$^{131}Xe$	0.41	14.8
$^{133}Cs$	0.40	14.6

# Мотивация исследования CEvNS

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2 M}{4\pi} \left( [1 - 4 \sin^2 \theta_W] Z - N \right)^2 \left[ 1 - \frac{T}{T_{max}} \right] \underline{F_{nucl}^2(q^2)}$$

«Новая физика»: нестандартные взаимодействия нейтрино с кварками через нейтральный ток

$$Q_\alpha^2 = [Z (g_p^V + 2\varepsilon_{\alpha\alpha}^u + \varepsilon_{\alpha\alpha}^d) + N (g_n^V + \varepsilon_{\alpha\alpha}^u + 2\varepsilon_{\alpha\alpha}^d)]^2$$

Угол э/с смешивания на малых  $q^2$

Ядерный форм-фактор (распределение  $n$  в ядре)

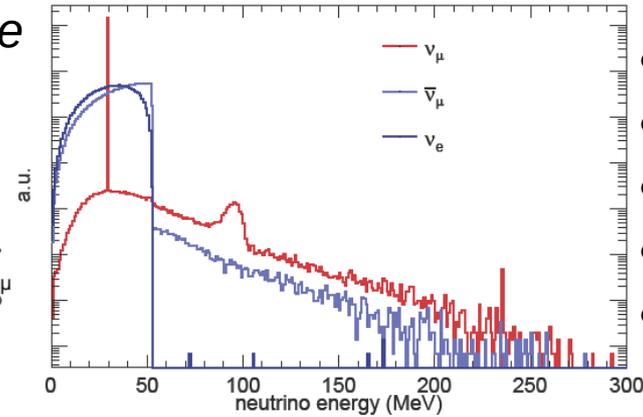
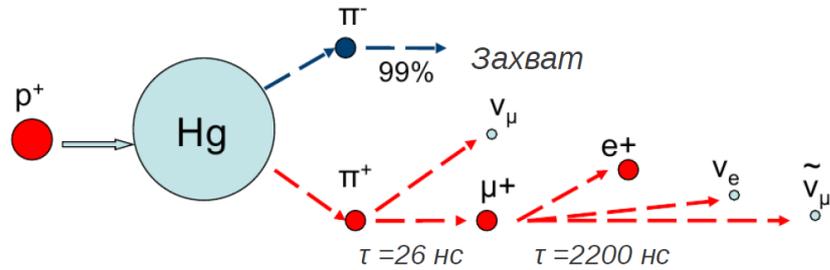
Пересечение с ОБР-экспериментами:  
 - поиск стерильных нейтрино  
 - мониторингирование состояния реактора

Как фон: «нейтринный туман» в подземных экспериментах по поиску темной материи

В природе: роль в динамике коллапса звёзд (доминирует в сечении рассеяния нейтрино)

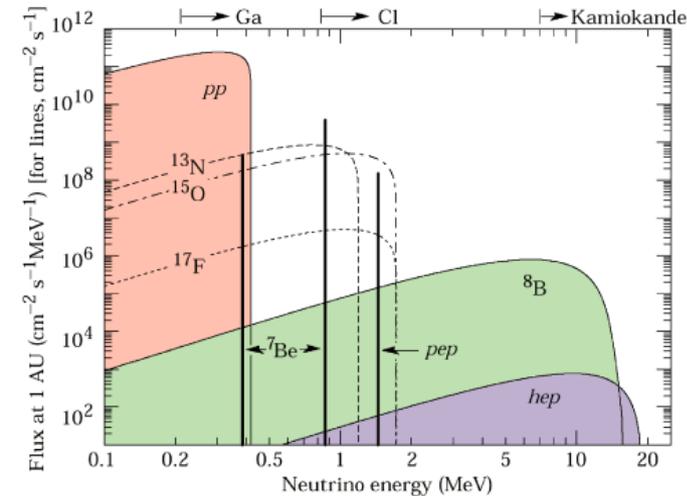
# Источники нейтрино для CEvNS

Ускорители: распад пионов в покое



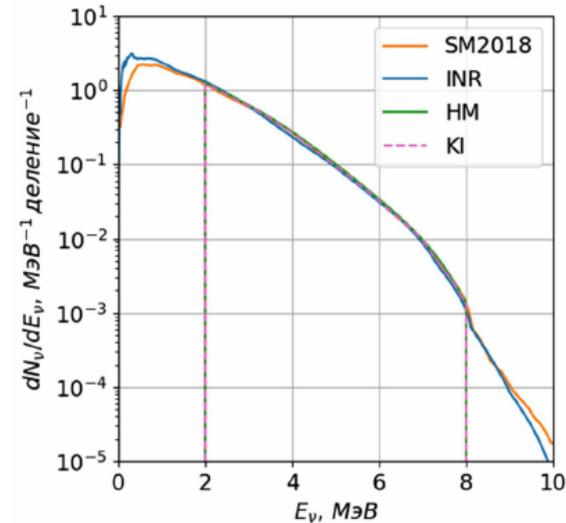
- низкий поток  $\nu$ , два типа
- подавление фона («duty factor»)
- большая энергия ядра отдачи (ЯО)
- большой переданный импульс ( $q^2$ )
- неопр-сть форм-фактора (1-3%)

Солнце



- все типы нейтрино
- нет исключения  $\nu$
- подземные лаб-рии
- малая энергия ЯО
- форм-фактор 1.0
- малый  $q^2$

Реакторы



- большой поток,  $\nu_e$
- сложные фоновые усл.
- малая энергия ЯО
- форм-фактор 1.0
- малый  $q^2$

# Мотивация исследования CEvNS

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2 M}{4\pi} \left( [1 - 4 \sin^2 \theta_W] Z - N \right)^2 \left[ 1 - \frac{T}{T_{max}} \right] F_{nucl}^2(q^2)$$

«Новая физика»: нестандартные взаимодействия нейтрино с кварками через нейтральный ток

$$Q_\alpha^2 = [Z (g_p^V + 2\varepsilon_{\alpha\alpha}^u + \varepsilon_{\alpha\alpha}^d) + N (g_n^V + \varepsilon_{\alpha\alpha}^u + 2\varepsilon_{\alpha\alpha}^d)]^2$$

Угол э/с смешивания на малых  $q^2$

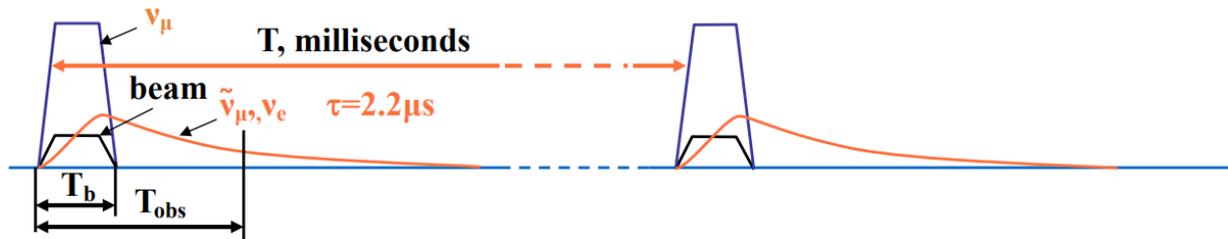
Ядерный форм-фактор (распределение  $n$  в ядре)

Пересечение с ОБР-экспериментами:  
 - поиск стерильных нейтрино  
 - мониторингирование состояния реактора

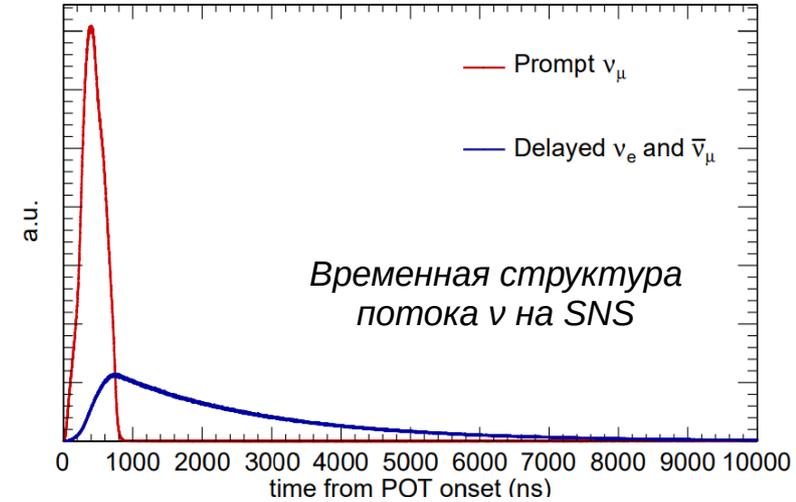
Как фон: «нейтринный туман» в подземных экспериментах по поиску темной материи

В природе: роль в динамике коллапса звёзд  
 (доминирует в сечении рассеяния нейтрино)

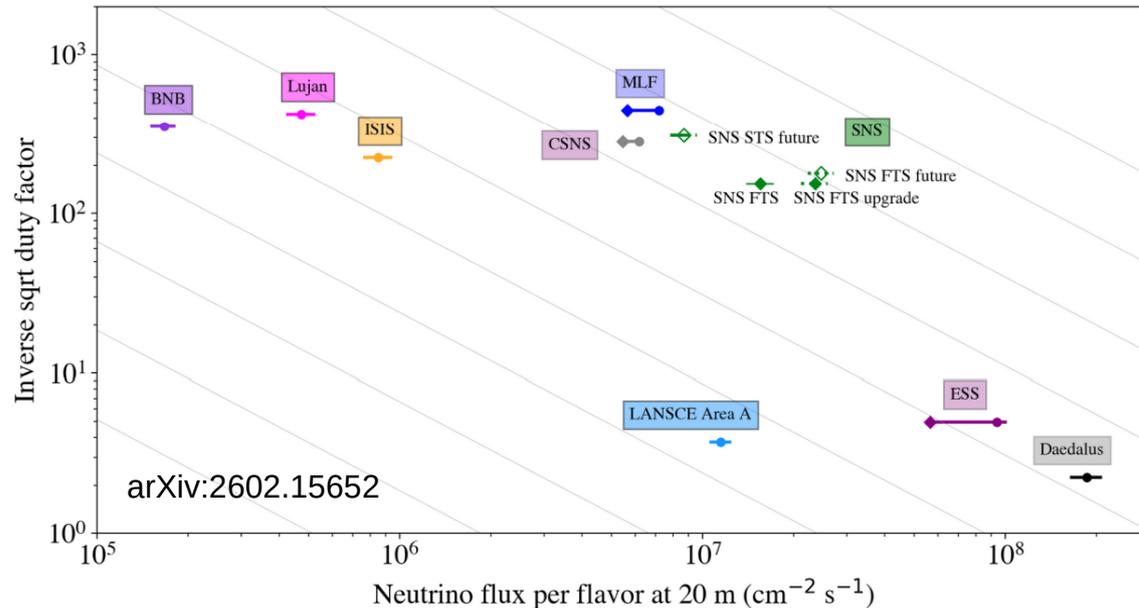
# Ускорители



Подавление пост. фона  $\sim T_{\text{obs}}/T$ :  $\sim 10 \text{ мкс} / 16.7 \text{ мс} = 6 \cdot 10^{-4}$  на SNS



## Сравнение характеристик $\pi\text{DAR}$

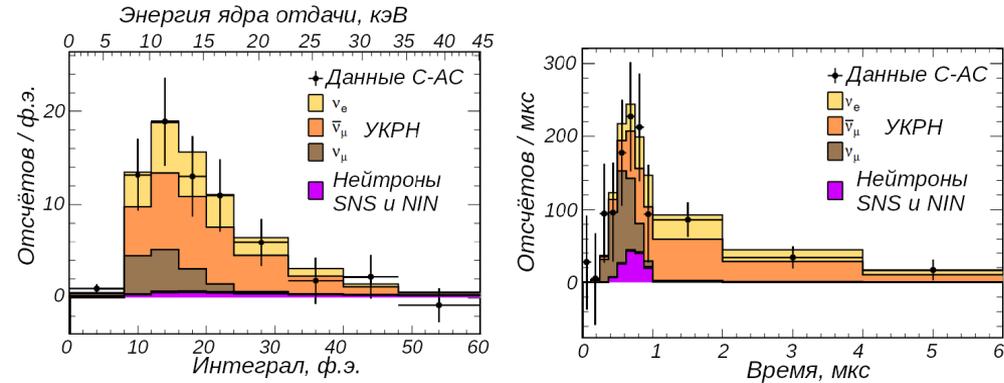


## Эксперименты и предложения

SNS	COHERENT	2602.15652
LANSCE	CCM (10 тонн LAr)	2105.14020
CSNS	CloverS (12 кг CsI)	2402.05026
ESS	ESSCEvNS	1911.00762
MLF	группа ESSCEvNS	2512.19788
TiMoFey	INR	2508.01968

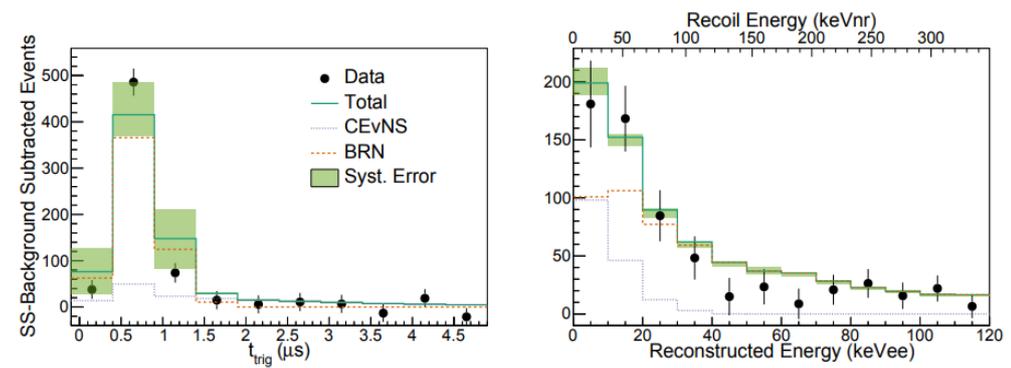
# Результаты COHERENT

## CsI/NaI, 14.6 кг



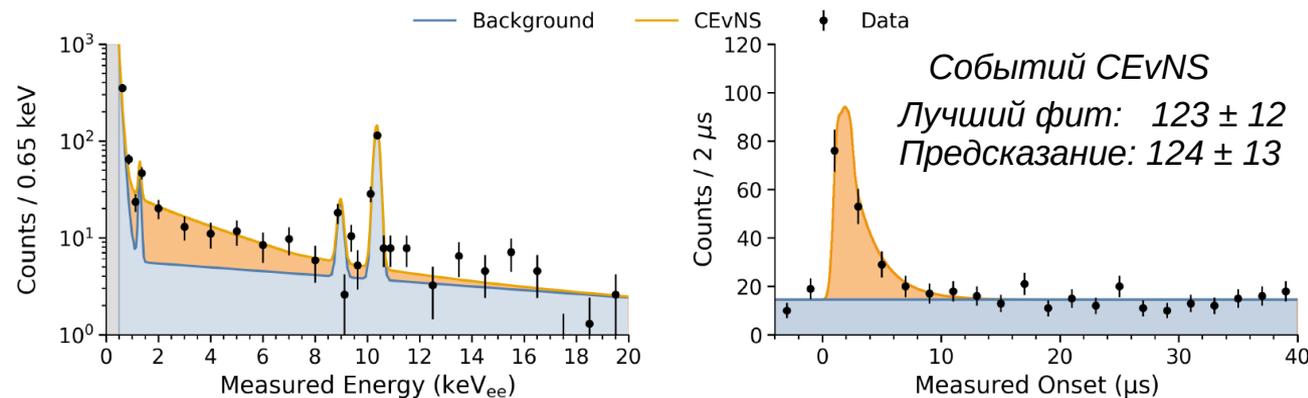
От  $7\sigma$  (2017 г.) к  $12\sigma$  (2022 г.)

## Жидкий Ar, 24 кг

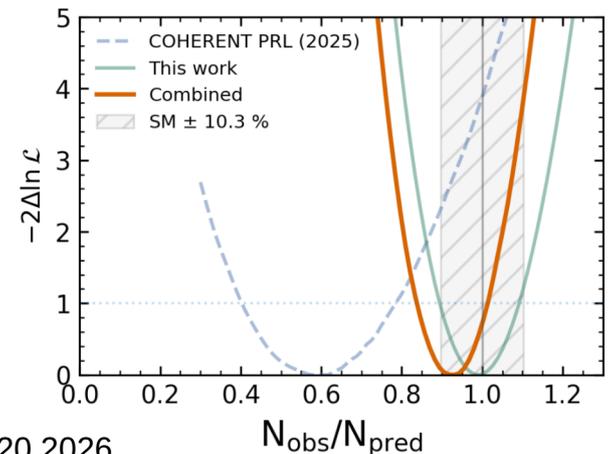


$3.1\sigma$  (2020 г.) -> результат на полной статистике (2026 г?)

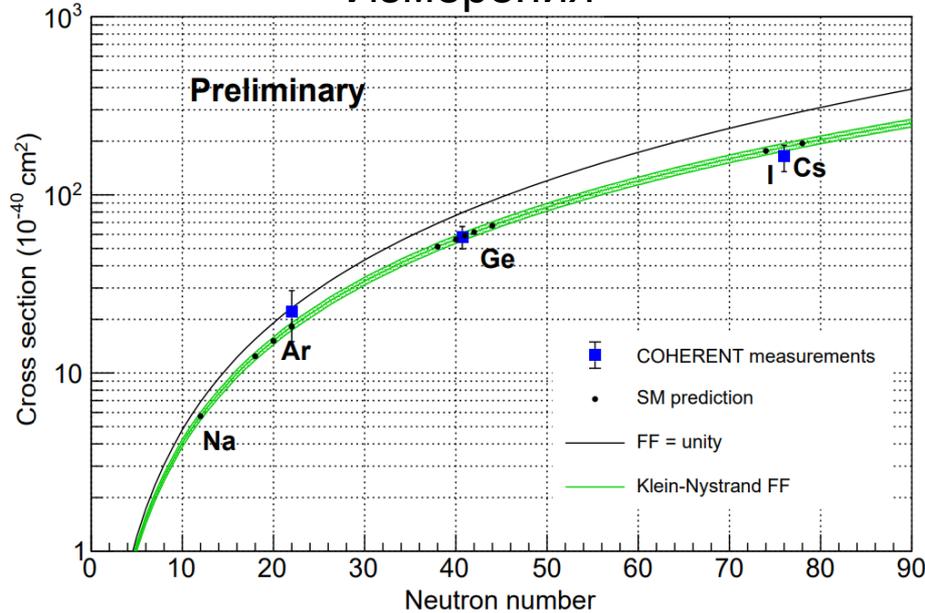
## Ge-Mini: HPGe (ICPC) — 4 детектора, всего 8.5 кг



## Сравнение с результатом 2025 года



## Измерения



Для CEvNS:

- набор данных: Ge
- установка детекторов: NaI, LAr
- планы: CsI, неон

Заряженный ток (захват нейтрино): O, Ar, I, Pb

Измерение потока нейтрино: D2O

TABLE I. Overview on subsystems for CEvNS detection.

Nuclear target	Detector Technology	Target Mass (kg)	Distance from source	Energy threshold (keV <sup>†</sup> )	Deployment dates
CsI[Na]	Scintillating crystal	14	20 m	5	2015-2019
Ar	Single-phase LAr*	24	27.5 m	20	2016-2021
Ge	HPGe PPC <sup>‡</sup>	18	19.2 m	2.5	2022 - present
NaI[Tl]	Scintillating Crystal	3500	22 m	13	2022 - present
Ar	Single-phase LAr*	476	27.5 m	20	from 2026
CsI	CsI+SiPM arrays at 77 K	~6.4	20 m	~0.5	from 2026
CsI	CsI+SiPM arrays at 40 K	~10	20 m	~0.5	from 2027
Neon	Single-phase neon	~20	~15 m	<25	from 2026

Completed Under deployment Current Planned

\*liquid argon, fiducial volume stated, <sup>‡</sup>p-type point-contact, <sup>†</sup>nuclear recoil energy, approximate threshold

TABLE II. Additional detectors that broaden the physics reach of COHERENT.

Name	Detector Technology	Main purpose	Deployment dates
NaIvE	185 kg NaI[Tl] crystals	Measure $\nu_e + I$ CC cross section & beam-related backgrounds	2016 - 2024
NIN cubes	Liquid scintillator cells in lead and iron shields	Measure neutrino-induced neutrons (NIN) in lead & iron	2015 - 2022
MARS	Scintillation panels interleaved with Gd-painted foils	Measure beam-related neutrons in Neutrino Alley	2017 - present
NuThor	Th enclosed by NaI crystals and Gd-doped water brick	Measure neutrino-induced fission on thorium	2022 - present
D <sub>2</sub> O M1	heavy water Cherenkov detector	Measure neutrino flux precisely & $\nu_e + O$ inelastic cross section	2023 - present
D <sub>2</sub> O M2 (H <sub>2</sub> O)	Light ( $\rightarrow$ heavy) water Cherenkov detector	Measure $\nu_e + O$ inelastic cross section	from 2026
NEP-ton (Pb glass)	Cherenkov radiation in Pb glass blocks	Determination of $\nu_e + Pb$ and $\nu_e + O$ inelastic cross section	2025-present
Pb sandwich	Pb sheets between scintillator panels	Directional $\nu_e$ CC on Pb detection, forbidden transitions	from 2026
H <sub>2</sub> O	Light water Cherenkov detector	Dedicated $\nu_e + O$ inelastic cross sections	from 2026
LArTPC	Liquid argon time-projection chamber	Measure $\nu_e + Ar$ inelastic cross section	from 2026

Completed Under deployment Current Planned

# Солнечные нейтрино

Подземные эксперименты по поиску тёмной материи наблюдают CEvNS борных  $\nu$

Ключевая технология — двухфазные эмиссионные детекторы на Xe

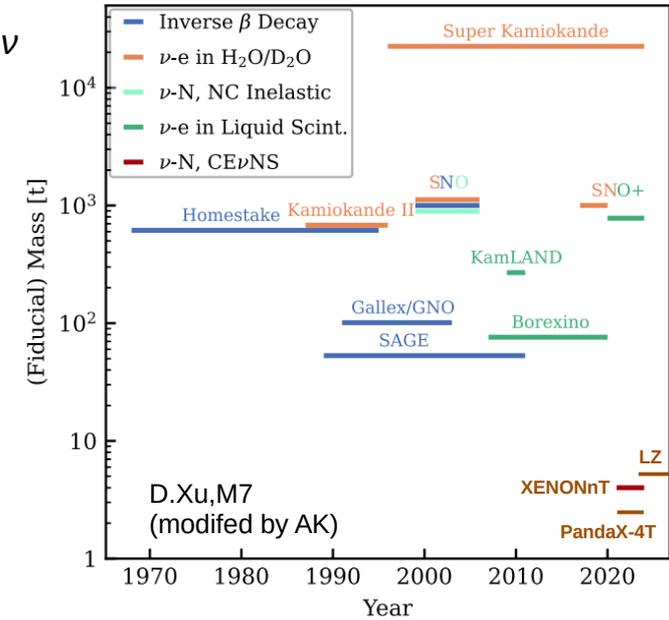
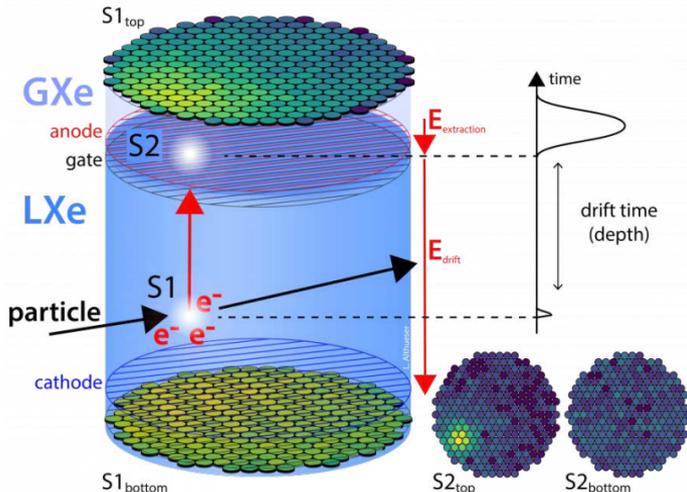
Эксперимент	Масса (FV), T	Предсказано	Измерено	Экспозиция	Знач-сть
PandaX-4T	2.6	n/a	$3.5 \pm 1.3 / 75 \pm 28$	1.2 T*лет	$2.64\sigma$
XENONnT	~4	$11.9 \pm 4.5$	10.7	3.5 T*лет	$2.73\sigma$
LZ	5.1	$20.6^{+8.9}_{-6.8}$	$12.3^{+7.0}_{-5.4}$	5.7 T*лет	$4.5\sigma$

PRL 133, 191002 (2024)

PRL 133, 191001 (2024)

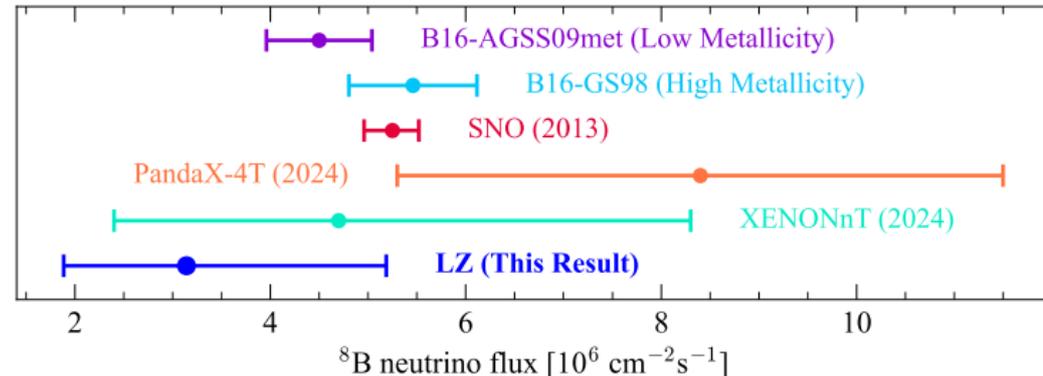
arXiv:2512.08065 (2025)

Принцип работы детектора (XENONnT)

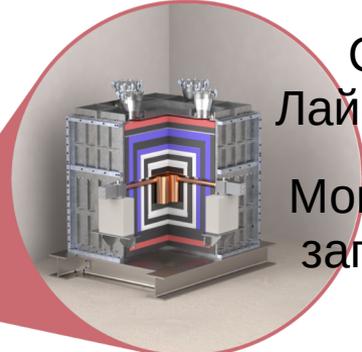
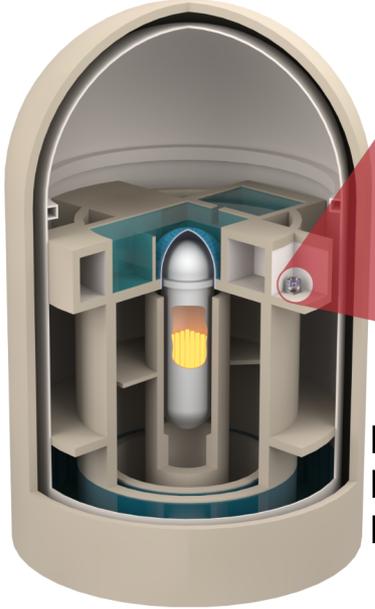


D.Xu, M7  
(modified by AK)

Поток борных нейтрино, измеренный через CEvNS



Прешествующий эксперимент: CONUS, АЭС Брокдорф,  
4 HPGe, 3.7 кг,  $E_{th} \approx 210$  эВ, 2024: предел в 1.6 раз выше СМ



CONUS+ на АЭС  
Лайбштадт, Швейцария  
Мощность р-ра 3.6 ГВт,  
заглубление 7.4 м в.э.

Поток  $\nu$ :  $1.5 \times 10^{13}$   $\nu/\text{cm}^2/\text{с}$  на 20.7 м

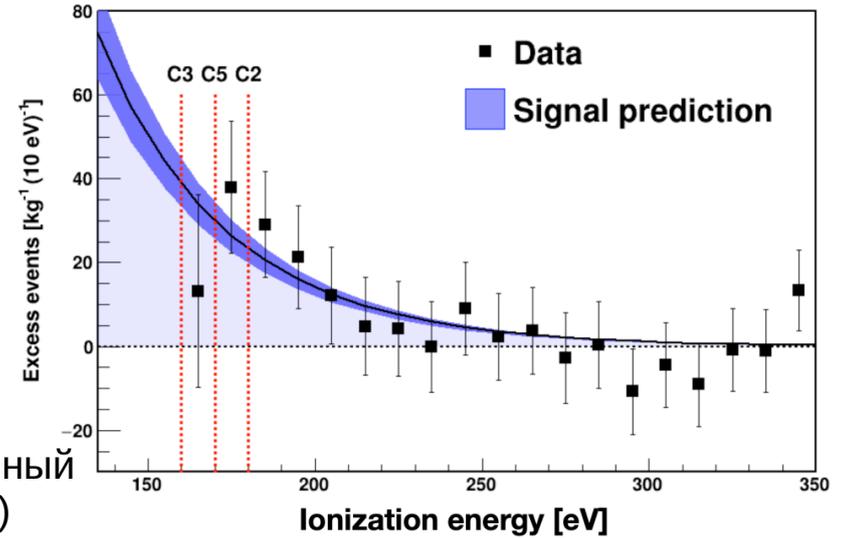
Пассивная защита +  $\mu$  вето:  
ПЭ (красный), свинец (чёрный) и борированный  
ПЭ (белый), два слоя мюонного вето (синий)

Отклонение нулевой гипотезы 3.7 $\sigma$

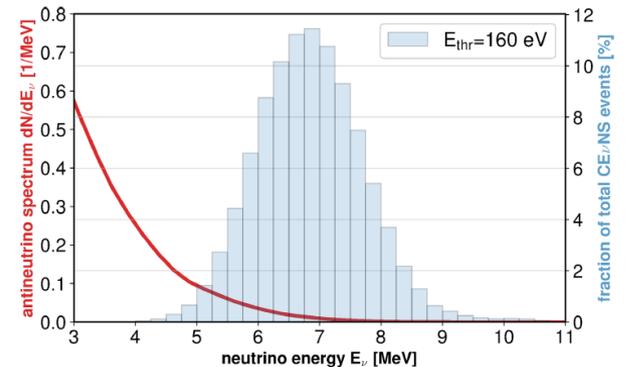
Detector	$E_{th}$ [eV $_{ee}$ ]	mass (kg)	live time	signal data	prediction	ratio
C2	180	$0.95 \pm 0.01$	117.1 days	$69 \pm 47$	$96 \pm 16$	$0.72 \pm 0.50$
C3	160	$0.94 \pm 0.01$	109.9 days	$186 \pm 66$	$135 \pm 23$	$1.38 \pm 0.54$
C5	170	$0.94 \pm 0.01$	119.5 days	$117 \pm 75$	$116 \pm 20$	$1.01 \pm 0.67$
combined		$2.83 \pm 0.02$		$395 \pm 106$	$347 \pm 59$	$1.14 \pm 0.36$

Новый этап: 2.4 кг HPGe, планы на O(100 кг) и  $E_{th} \sim 100$  эВ

Сравнение данных ON с моделью фона



Чувствительность к спектру  $\nu$



## Другие германиевые эксперименты

**TEXONO** PRL 134, 121802 (2025)

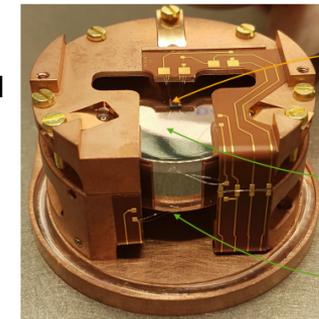
$m \approx 1.4$  кг, порог  $0.2$  кэВ<sub>ee</sub> Предел на CEvNS  $< 4.7 \times SM$

АЭС Куошен остановлена, переезд эксперимента

**Dresden-II** PRL 129, 211802 (2022)

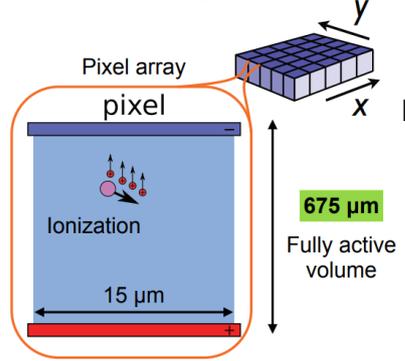
$m \approx 3$  кг, порог  $0.2$  кэВ<sub>ee</sub>  
Заявление о наблюдении CEvNS при разных условиях ON/OFF — фон, защита, особом значении QF  
Противоречие с CONUS+, «tension» с другими экспериментами

**RICOCHET** 2507.22751



Ge болометры, съём тепла и ионизации  
 $m \approx 18 \times 42$  г, порог  $< 100$  эВ<sub>ee</sub>  
Набирает данные на ILL

## CONNIE (ПЗС, АЭС Ангра)



$m \approx$ грамм, порог  $15$  эВ<sub>ee</sub>

Предел на CEvNS  $< 70 \times SM$

Лучшие пределы на MCP ( $q < 10^{-6} e_0$ )

PRL 134, 071801 (2025)

## РЭД-100 (LXe, КланАЭС)



PRD 111, 072012 (2025)

$m \approx 126$  кг,  $27$  фэ/е, порог  $\sim 0.25$  кэВ<sub>ee</sub>

Предел на CEvNS  $< 60 \times SM$

Фон от одиночных е

Переход на LAr

## NEON (NaI, АЭС Ханбит)



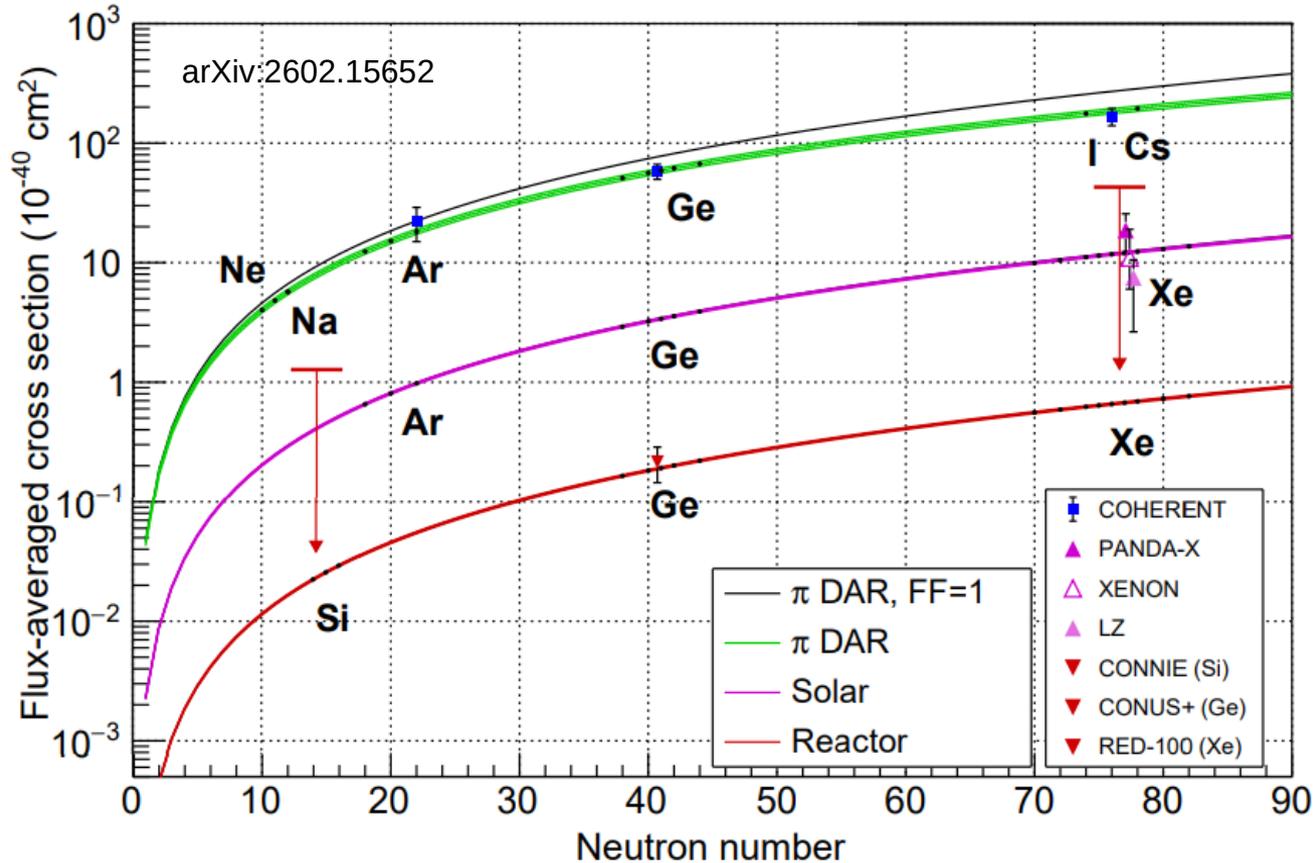
$m \approx 16.7$  кг,  $24$  фэ/кэВ, порог  $0.6$  кэВ для CEvNS нужен  $0.2$  кэВ<sub>ee</sub>  $10 \times \downarrow$  BG

Строгие пределы на ALPs

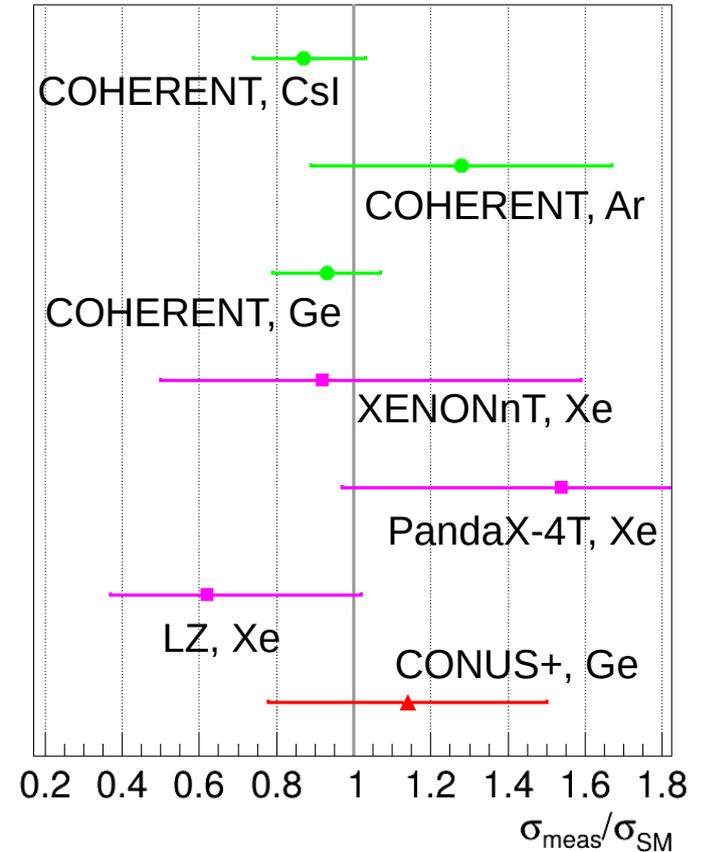
PRL 134, 201002 (2025)

## Обзор результатов

Лучшие результаты для источника / мишени



Отношение к СМ

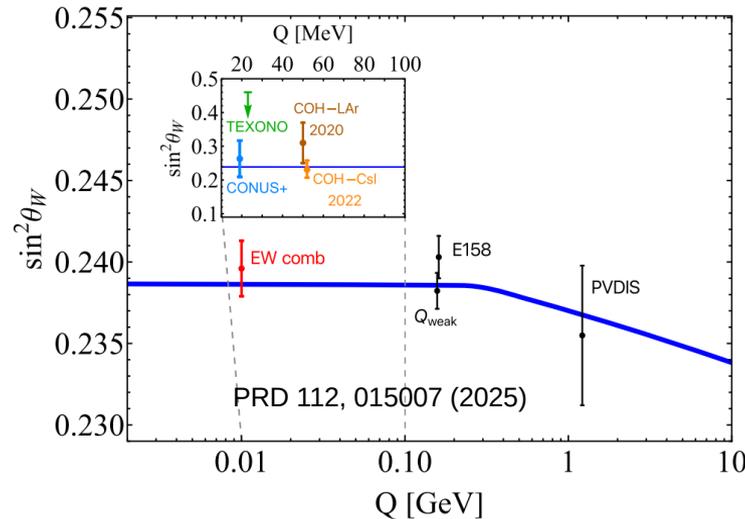
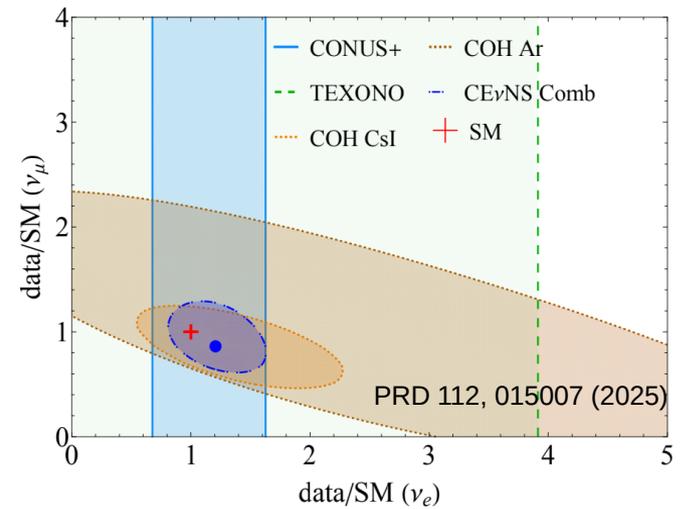
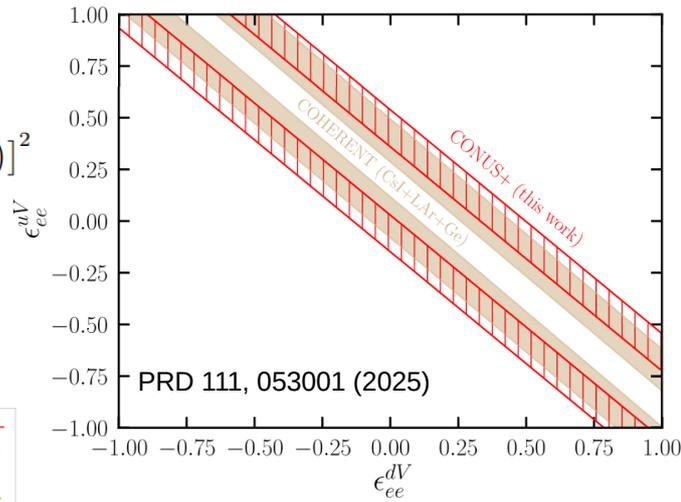
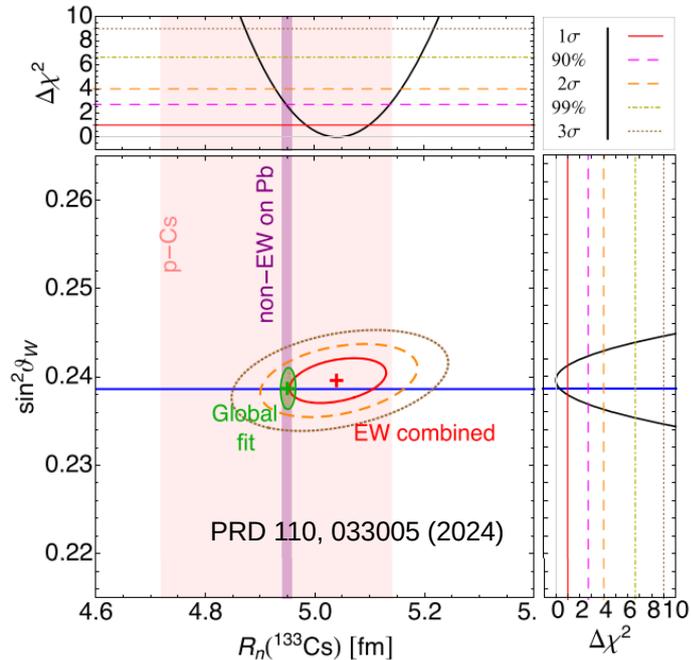


# Следствия наблюдений

## Ограничение $\nu$ - $q$ NSI

$$Q_\alpha^2 = [Z (g_p^V + 2\varepsilon_{\alpha\alpha}^u + \varepsilon_{\alpha\alpha}^d) + N (g_n^V + \varepsilon_{\alpha\alpha}^u + 2\varepsilon_{\alpha\alpha}^d)]^2$$

NSI за счёт нейтрального тока,  
связь различных типов  $\nu$   
с  $u, d$ -кварками



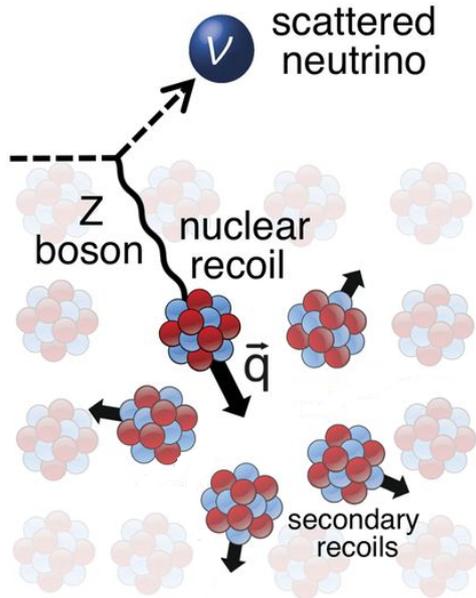
## Измерение форм-факторов и угла Вайнберга

	$\sin^2 \vartheta_W$	$R_n(^{133}\text{Cs})$ (fm)
APV(Cs) + COH + CSRe	$0.2396^{+0.0020}_{-0.0019}$	$5.04 \pm 0.19$
EW combined	$0.2396 \pm 0.0017$	$5.04 \pm 0.06$
Global fit	$0.2387 \pm 0.0016$	$4.952 \pm 0.009$

# Заключение

Эффект зарегистрирован с ускорительными, солнечными и реакторными нейтрино

Получены ограничения на  $\nu$ - $q$  NSI, дополнительные сведения о ядерных форм-факторах и  $\sin^2\theta_w$



Значительное разнообразие типов детекторов и развитие методологии

Связанные области:  
поиск миллизаряженных частиц электромагнитных свойств нейтрино, реакций заряженного тока на ядрах

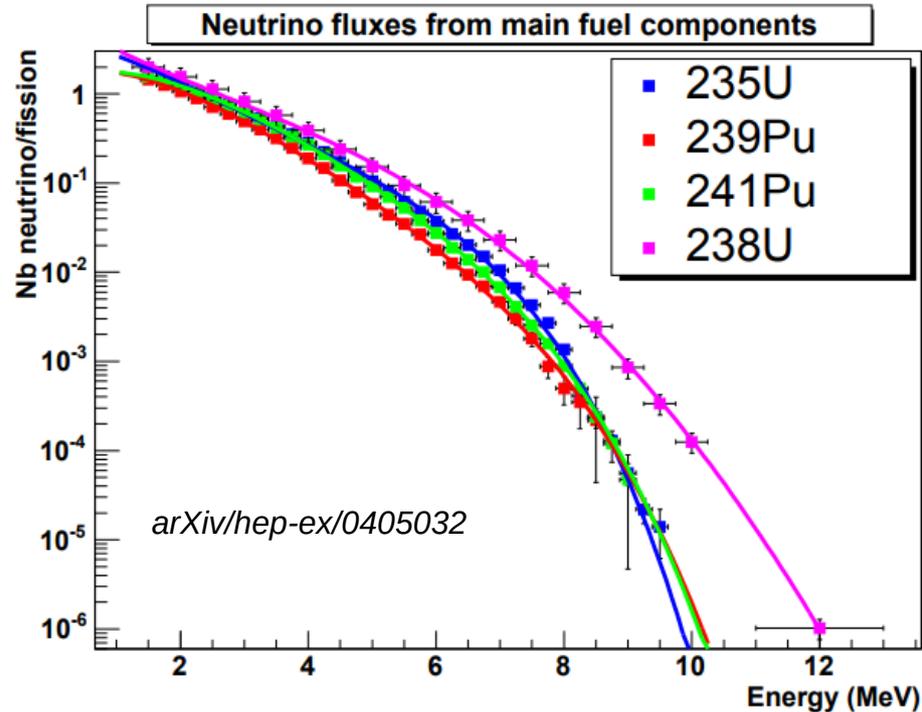
*Спасибо за внимание!*

для поддержания безопасности АЭС

потенциал для создания компактных  
детекторов для мониторинга реакторов

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

Состав топлива и спектр  $\bar{\nu}$   
меняется  $\rightarrow$  возможность  
мониторинга реактора  
см. также Bowen and Huber, PRD102 (2020)



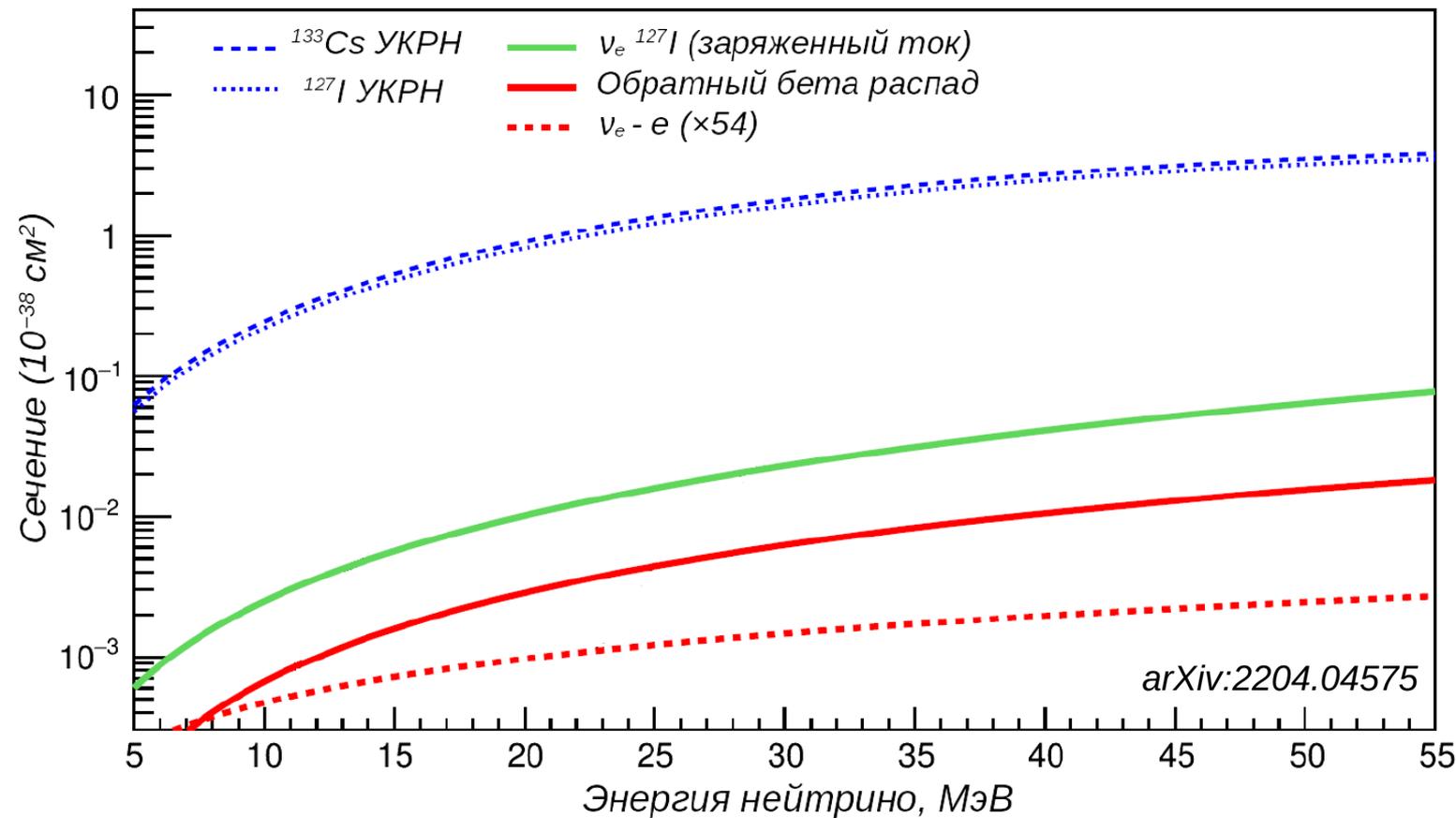
УКРН как инструмент научных исследований

- поиск стерильных нейтрино

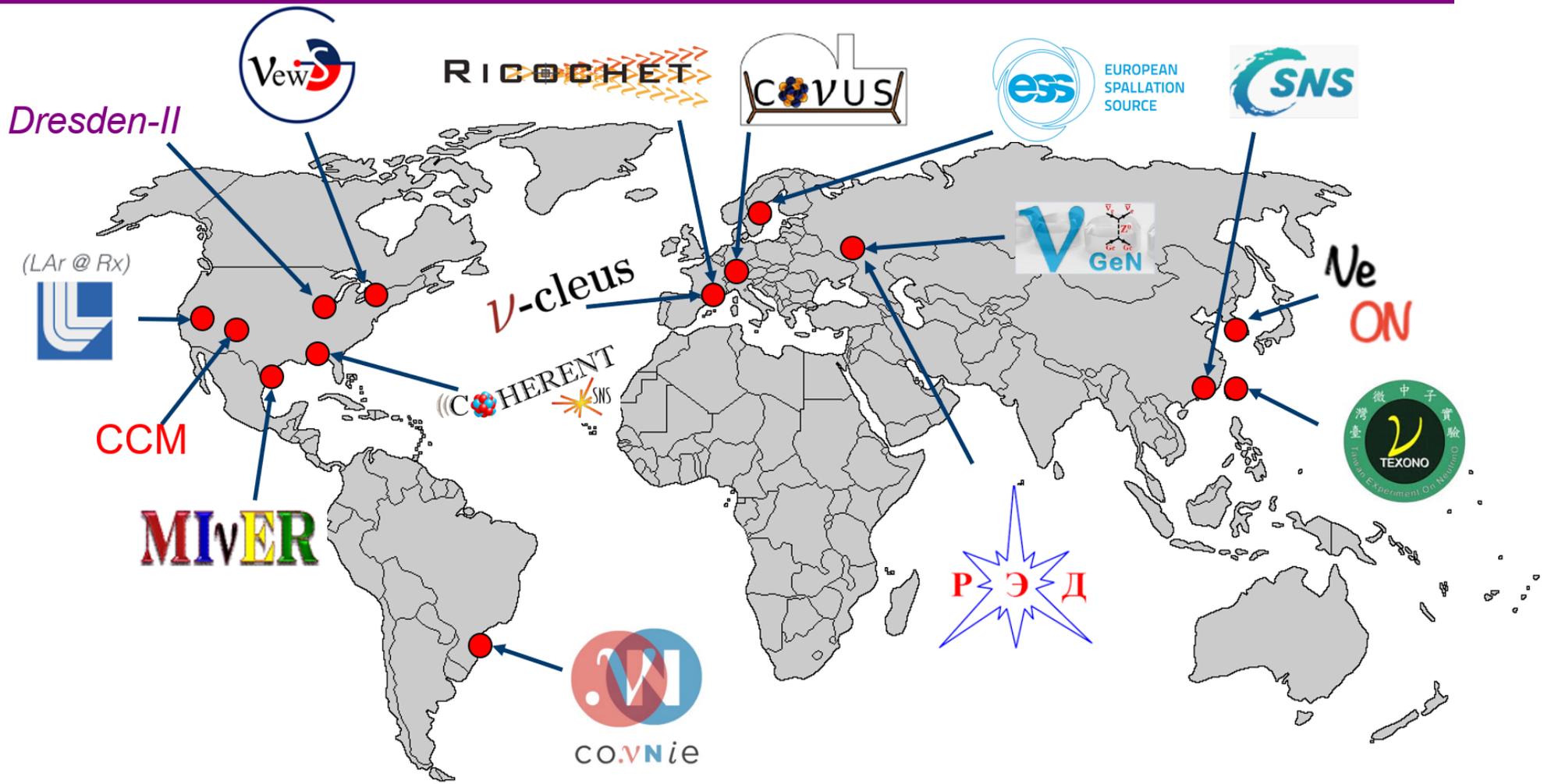
A.J. Anderson et al., PRD 86 013004 (2012)

- изм-ие ядерного форм-фактора

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



*УКРН — наиболее вероятный канал взаимодействия нейтрино с веществом для средних и тяжёлых ядер*



Значительное пересечение сообществ с прямым поиском ТМ в виде WIMP

# Germanium tension

## Dresden-II claim

PRL 129, 211802 (2022)

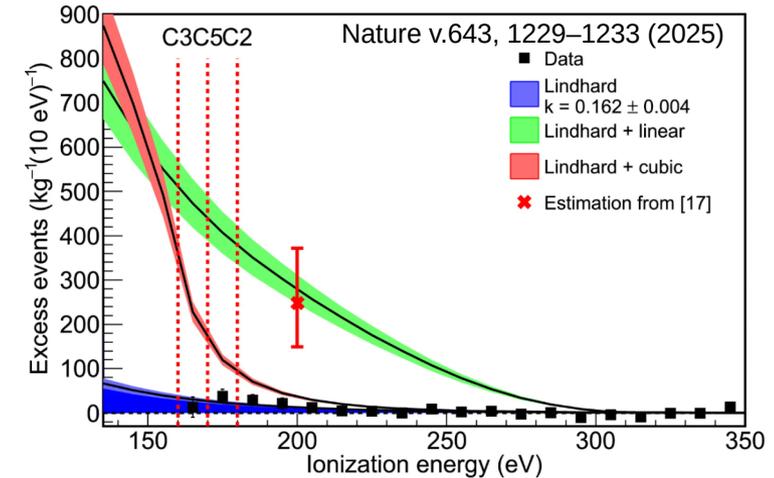
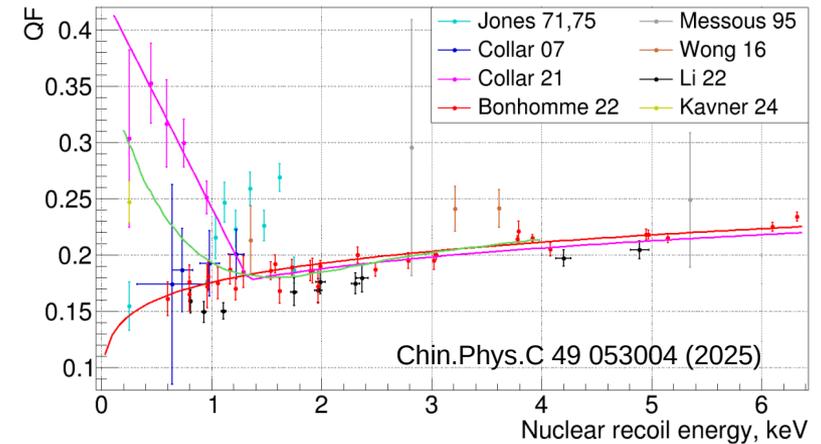
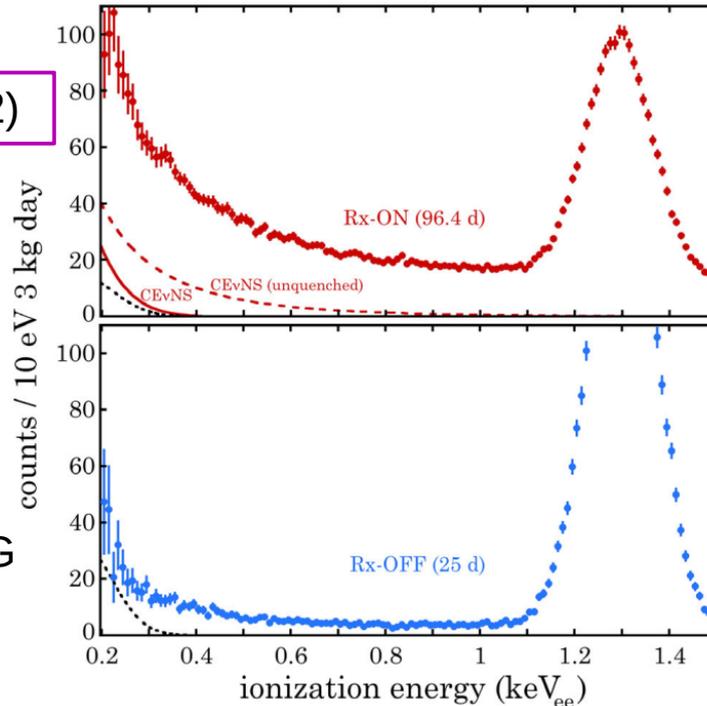
Close to reactor: 10.4 m

$$4.8 \times 10^{13} \text{ v/cm}^2/\text{s}$$

Almost no overburden

Shielding change  
between ON and OFF

Reactor-correlated n BG



CONUS+ vs. Dresden-II:

1. Discrepancy in measured QF
2. Discrepancy in observed rate at a reactor

*"No choice of quenching factor can bring these three data sets into mutual agreement..." (arXiv:2502.12308)*