

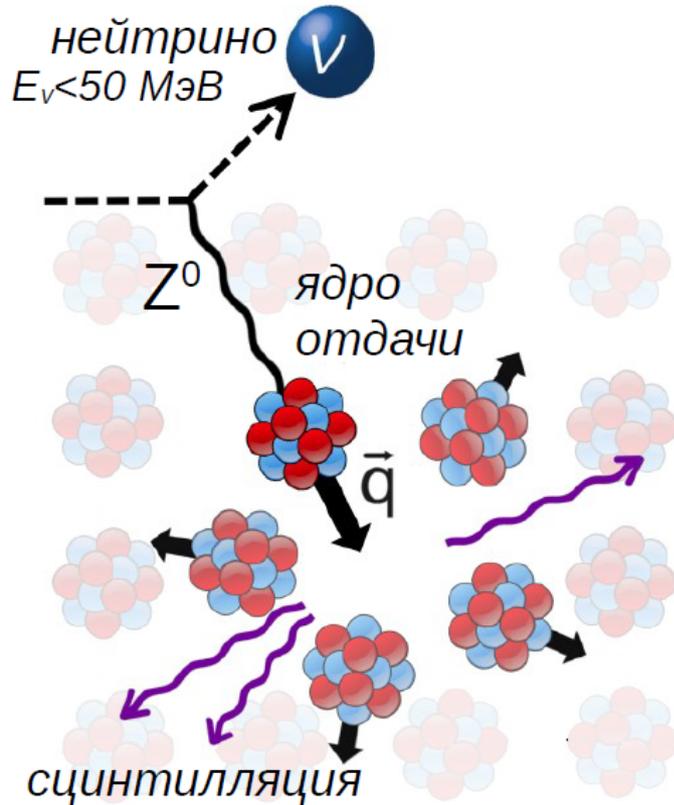
Научная сессия секции ядерной физики РАН

Статус экспериментов по исследованию когерентного
рассеяния нейтрино на ядрах

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)

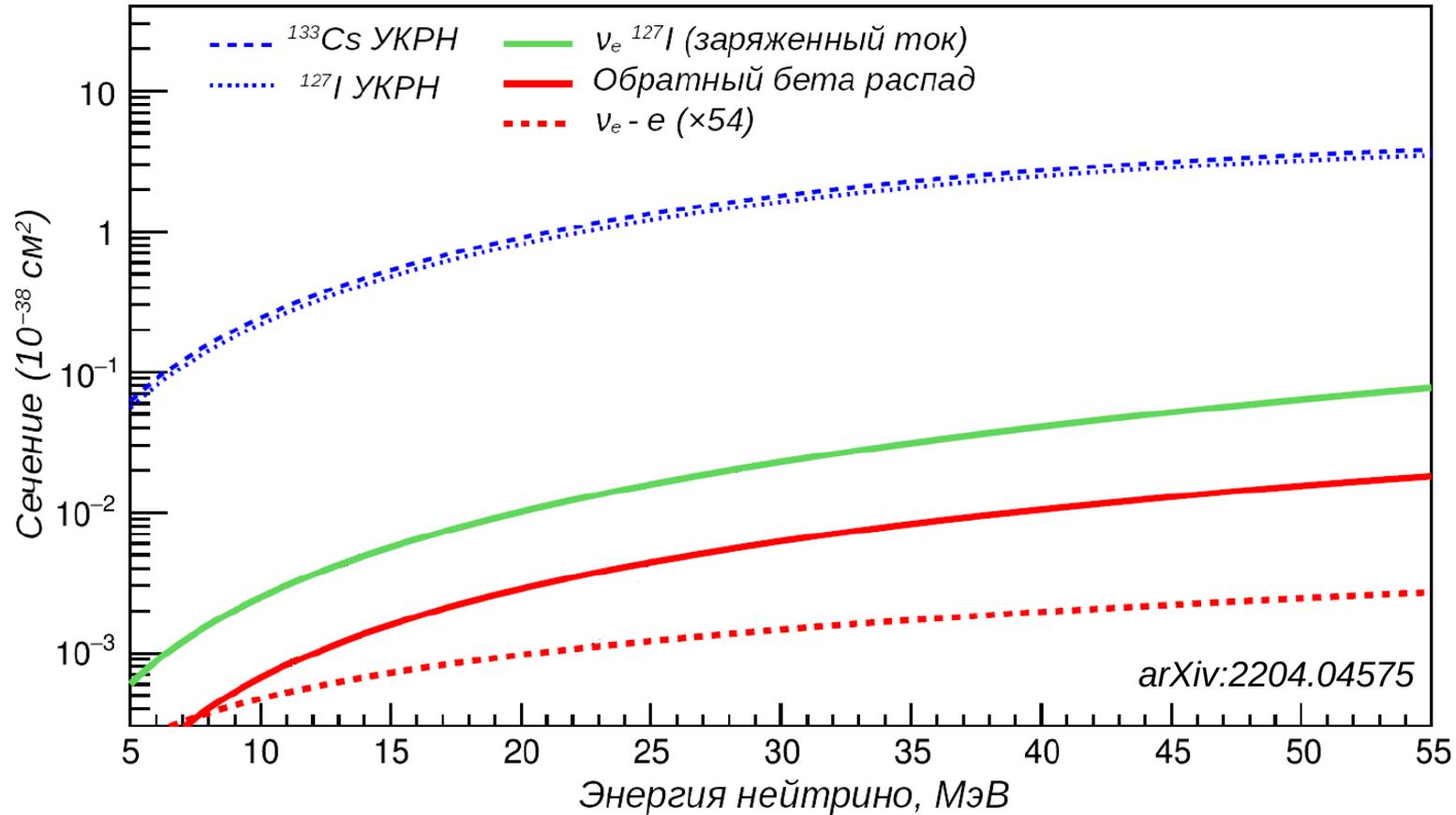


$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2 M}{4\pi} \left([1 - 4 \sin^2 \theta_W] Z - N \right)^2 \left[1 - \frac{T}{T_{max}} \right] F_{nucl}^2(q^2)$$

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



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

как тест Стандартной модели

поиск признаков «новой физики» в нейтринном секторе

K. Scholberg, PRD 73 033005 (2006)

P. Coloma, T. Schwetz, PRD 94 055005 (2016)

«в природе»

перенос энергии при звёздном коллапсе

J.R. Wilson, PRL 34 113 (1974)

D.N. Schramm, W.D. Arnett, PRL 34, 113 (1975)

как инструмент научных исследований

- *изм-ие ядерного форм-фактора*

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

- *изм-ие угла э/с смешивания ($q \sim 10$ -ки МэВ)*

L. M. Krauss, Phys. Lett. B 269 407 (1991)

- *поиск стерильных нейтрино*

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

для поддержания безопасности АЭС

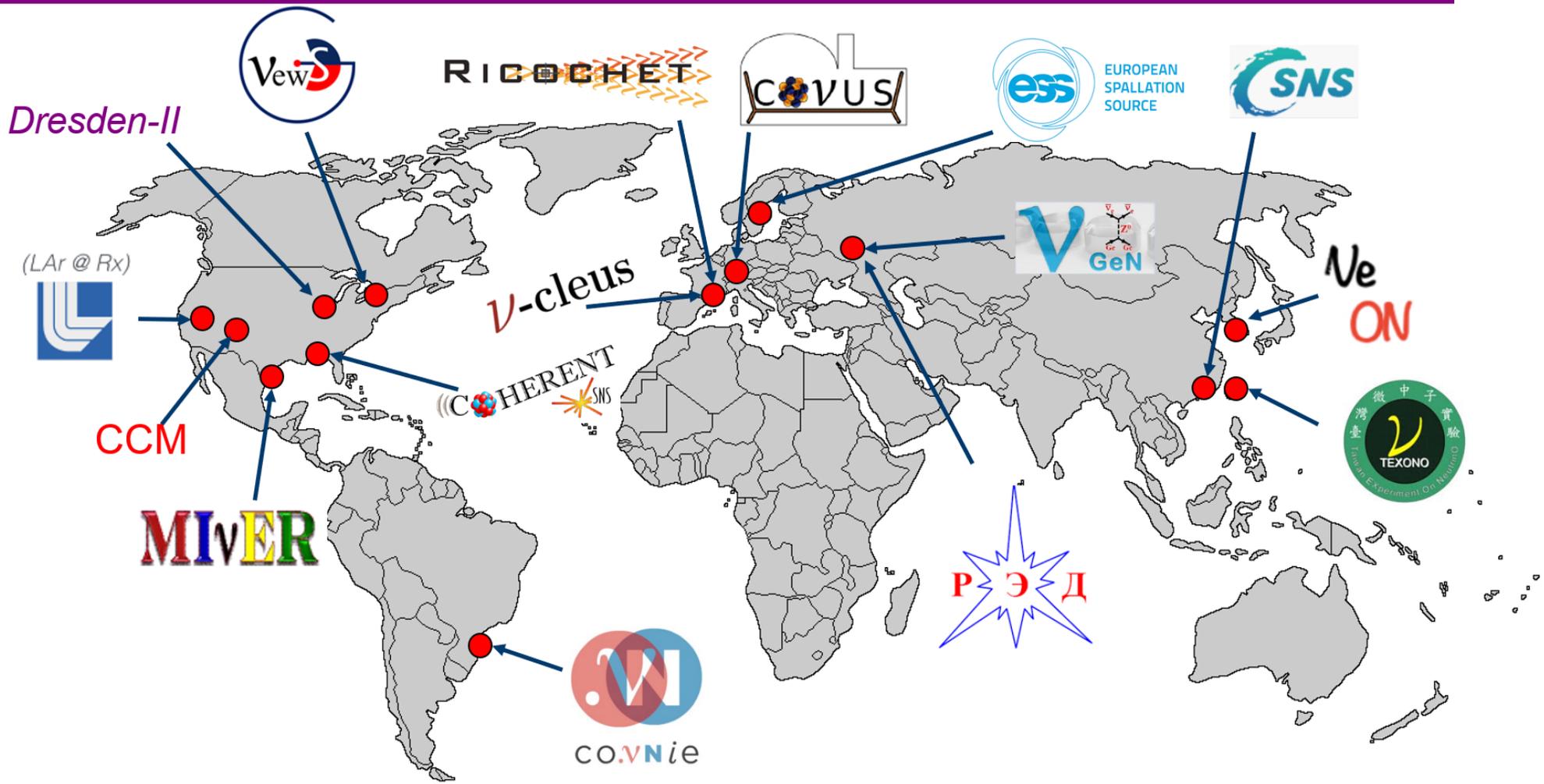
потенциал для создания компактных детекторов для мониторинга реакторов

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

как фон

в экспериментах по поиску темной материи

J. Billard et al., PRD 89 (2014)

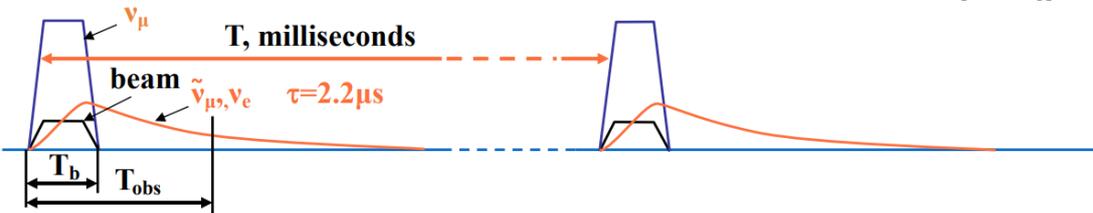
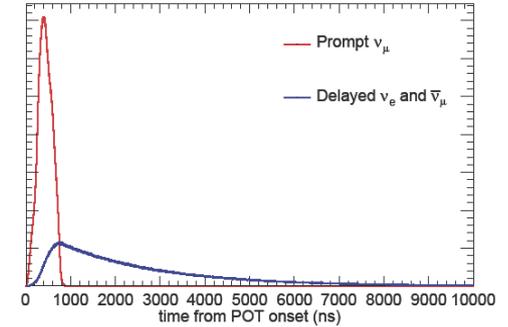
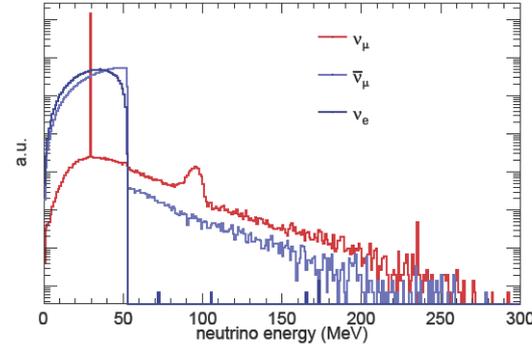
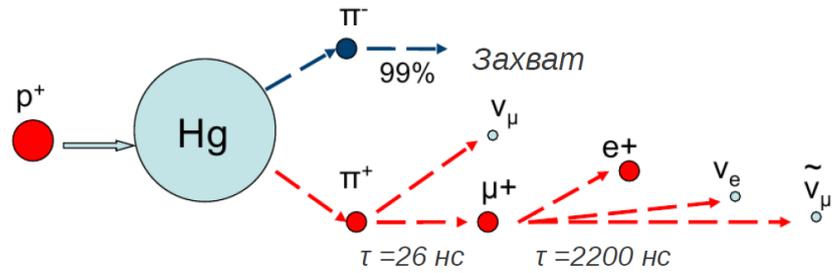


Значительное пересечение сообществ с прямым поиском ТМ в виде WIMP

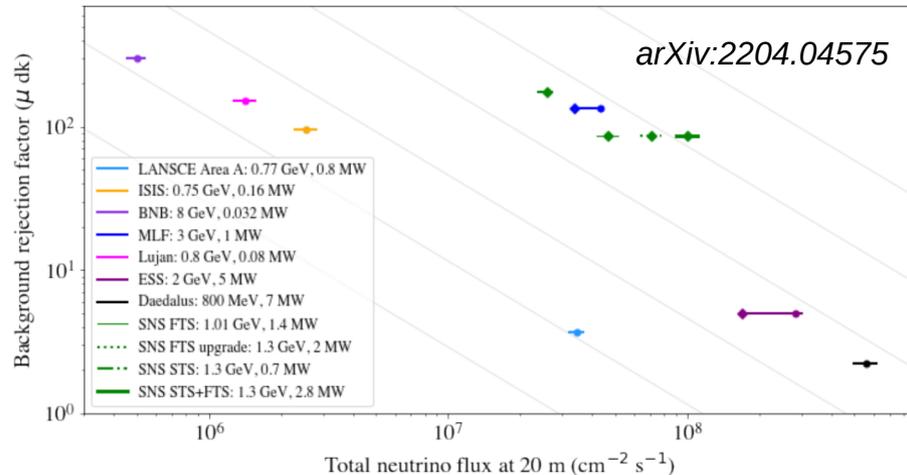
Доклад Е. Якушева

Подходящие ускорители

Схема рождения нейтрино и характеристики потока на примере Spallation Neutron Source



Подавление постоянного фона $\sim T_{obs}/T$
 SNS: $\sim 10 \text{ мкс} / 16.7 \text{ мс} = 6 \cdot 10^{-4}$
 ESS: $\sim 2.8 \text{ мс} / 71 \text{ мс} = 4 \cdot 10^{-2}$

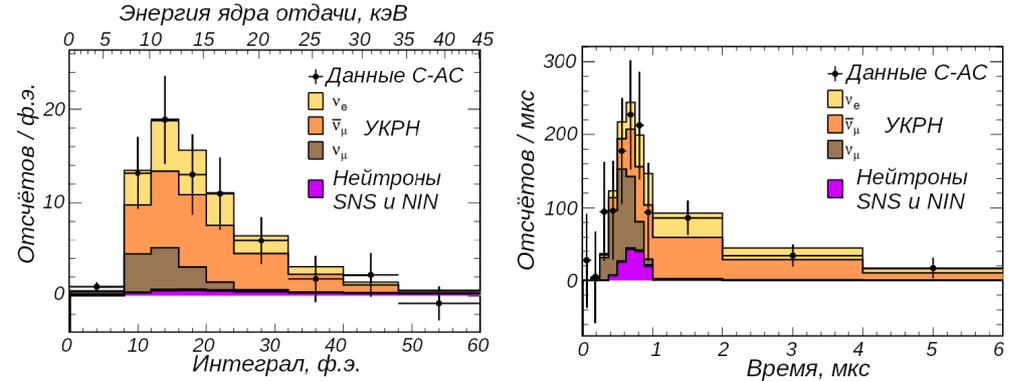


Активные эксперименты

SNS	COHERENT	2204.04575
LANSCE	CCM (10 тонн LAr)	2105.14020
CSNS	CloverS (12 кг CsI)	
ESS	ESSCEvNS	1911.00762

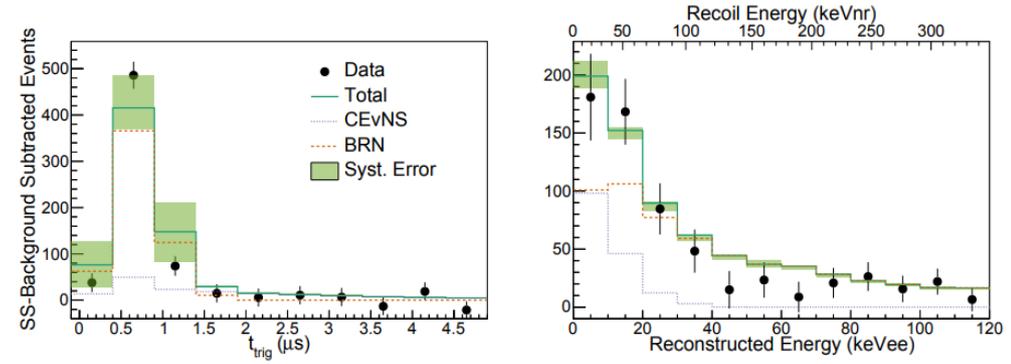
Результаты COHERENT

CsI[Na], 14.6 кг



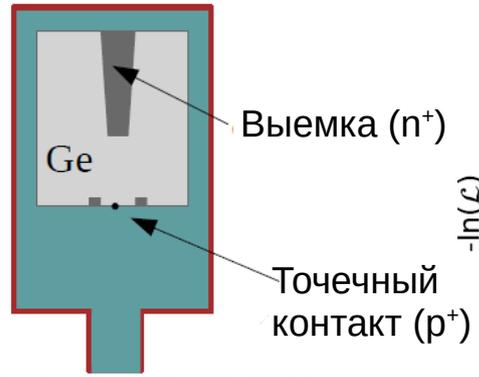
От 7σ (2017 г.) к 12σ (2022 г.)

Жидкий Ar, 24 кг

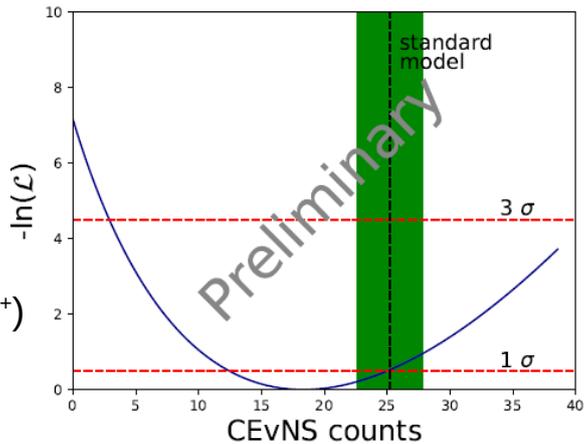


3.1σ (2020 г.) -> результат на полной статистике (2024 г.)

Новый результат (2023!): HPGe (ICPC) — 8 детекторов × 2.2 кг



100-150 эВ ПШПМ для генератора



Подход — аппроксимация 2d распределения в совпадении с пучком, порог — 1.5 кэВ_{ээ}

Время набора данных: июнь-август 2023 года

Fit result: Null hypothesis rejected by **3.9 sigma!**

CEvNS signal:	18.4	- 5.9	+ 6.7 (stat)
beam-related neutrons:	0.55	± 0.18	(input)
steady-state background:	143.8	- 8.6	+ 9.0 (stat)

(40 μs window)

Standard model prediction: 25.2 ± 2.6 (ratio to data: 0.73 ± 0.26)

See J. Hakenmüller, JEPT seminar, Fermilab, March 1 2024

Реакторы: HPGe

Эксп.	Место	Масса, кг	Поток, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Ссылка
νGeN	КАЭС, РФ	1.4	$4.4 \cdot 10^{13}$	Доклад Д. Пономарёва
CO ν US	Брокдорф, ФРГ	3.7	$2.3 \cdot 10^{13}$	2401.07684
Dresden-II	Моррис, США	2.9	$4.8 \cdot 10^{13}$	PRL 129 (2022) 21

Сравнение результатов и чувствительности:

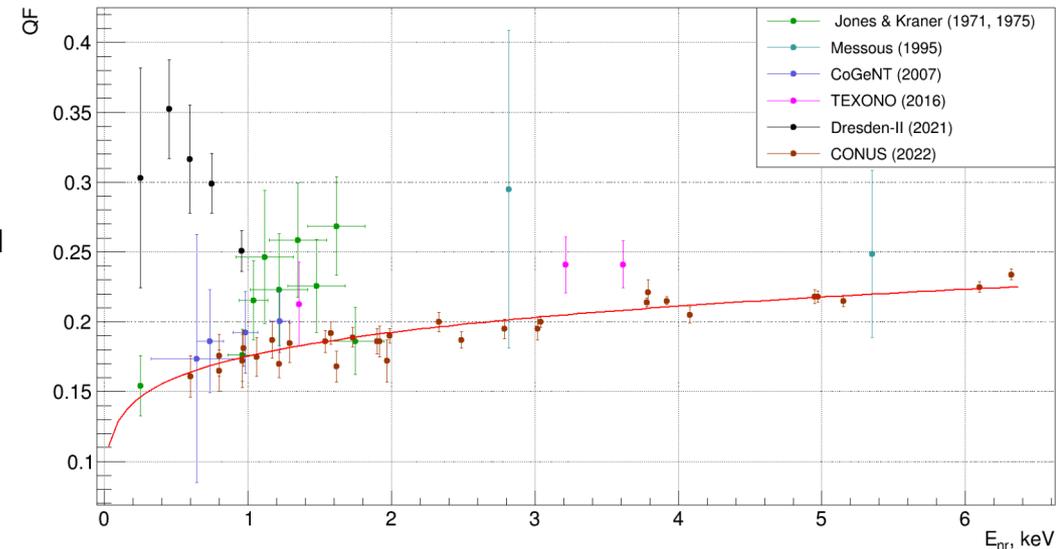
CO ν US: $A_{\text{CEvNS}} < 1.6 \times \text{SM}$, 90% CL ($k_L=0.16$)

νGeN : $A_{\text{CEvNS}} < 4.0 \times \text{SM}$, exp. 90% CL ($k_L=0.16$)

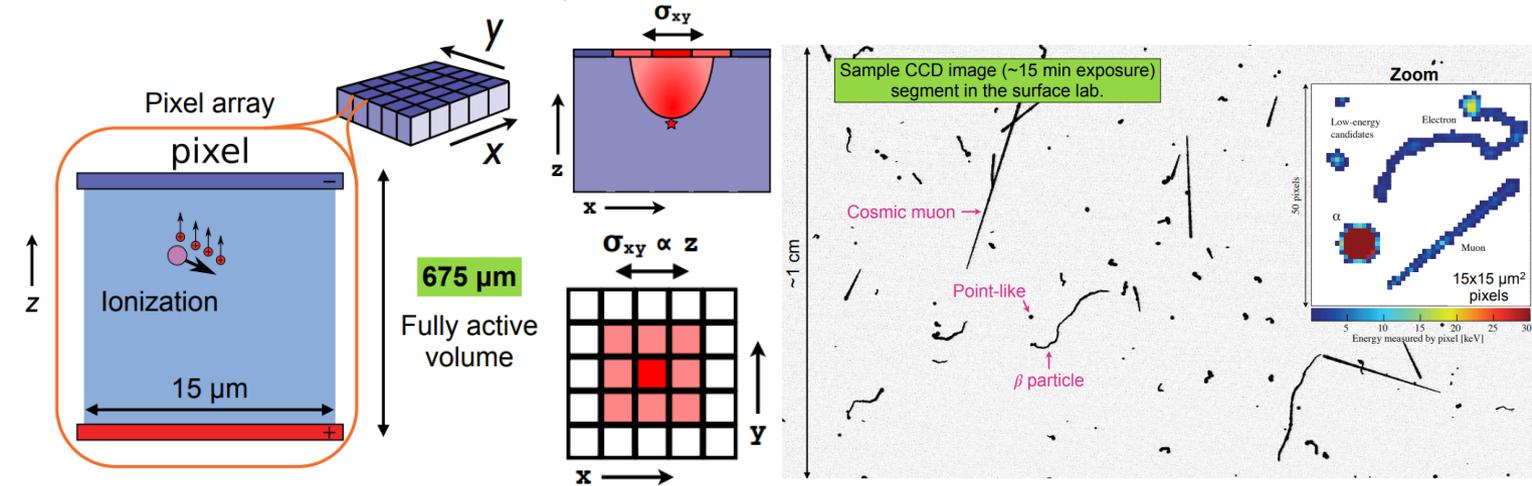
Dresden-II: заявление о наблюдении CEvNS SM при квенчинге, отклоняющемся от модели Линдхарда
 BG OFF Dresden-II = $10 \times \text{BG } \nu\text{GeN}$,
 ON BG = $4 \times \text{OFF BG}$

Противоречие с CO ν US, объяснение растущего к малым E QF эффектом Мигдала не проходит

Проблема QF



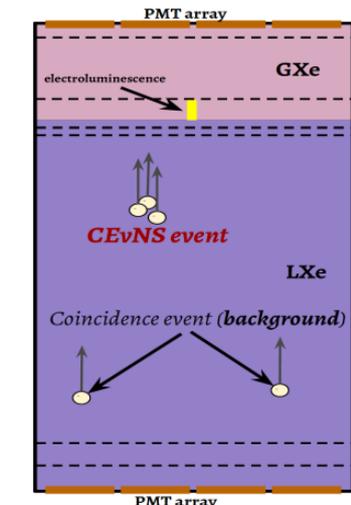
Реакторы: ПЗС матрицы



2016-2019, Angra II, Brazil:
 ~30-50 g, ON/OFF = ~2/2 kg*d
 $A_{CEvNS} < 40 \cdot SM$ (90% CL)

~2023 (ATUCHA II, Argentina):
 Skipper CCD tests - 2.5 g,
 E_{th} from 50 to 20 eV, 50 g needed
 for CEvNS in ~1y

Реакторы: эмиссионные детекторы



~130 кг LXe в чувств. объёме
 Восстановление XY по распр-ию света
 Выход S2:
 28 ф.э./электрон



Начало 2022 г. - набор данных на КАЭС, фон от спонтанной эмиссии электронов (простр-ные корреляции)

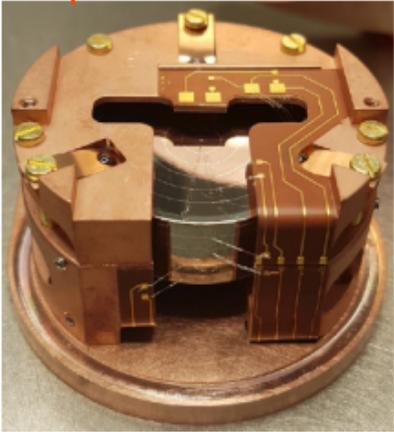
2023-2024 г. - переход на LAr, модернизация и тесты

Доклады А. Лукьяшина и А. Пинчука

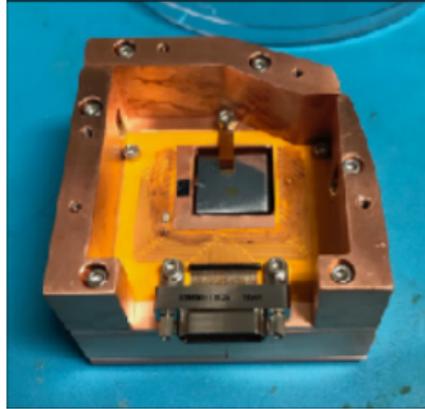
Реакторы: болометры

RICOCHE

Exposition started!

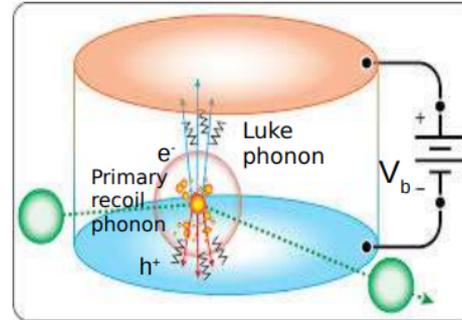


← Ge
Zn →

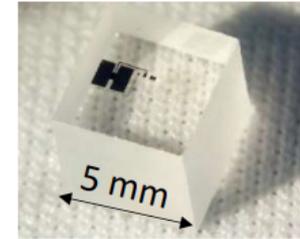


18-27 × 42g Ge + 9 × 32g Zn,
9m from 60 MW ILL, 15 mwe, PID at ~50 eV

MIvER



72/102 m from 2 × 4.25 GW
Double Chooz NPP, 3 mwe

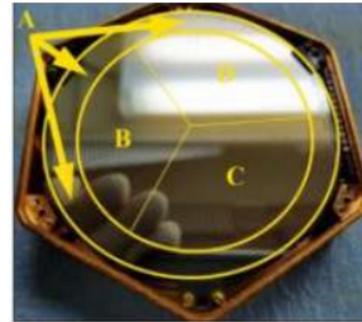


Al₂O₃
CaWO₄

~1g crystals → E_{th} ~ 20 eV
~10g tot. mass

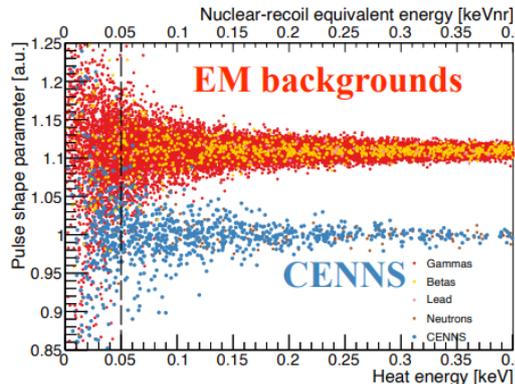
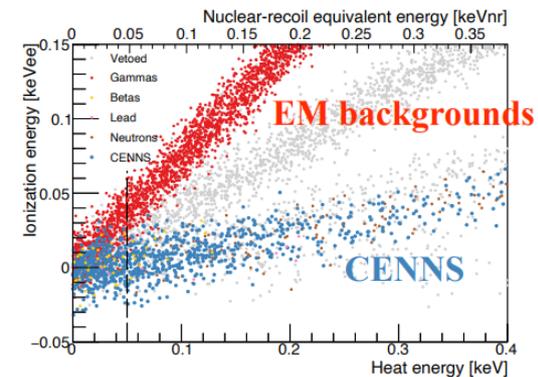
Commissioning at the lab
BG characterization

Move to Double Chooz
in 2024



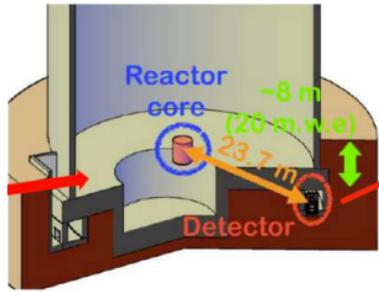
18-27 × 42g Ge + 9 × 32g Zn,
4.5 m from 1 MW TRIGA,
NTL amplification for E_{th} ~ 10 eV

Engineering runs on site

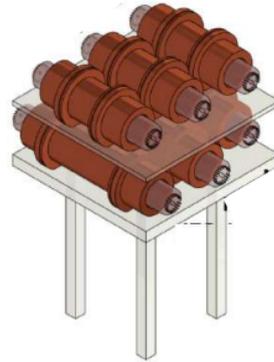
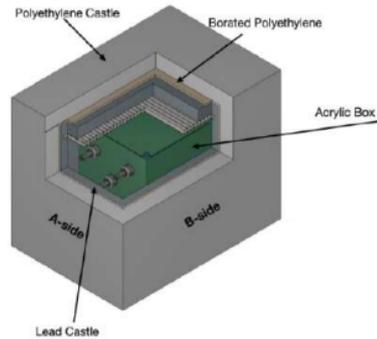


Реакторы: NaI

Hanbit nuclear reactor, South Korea.



In tendon gallery (20 m.w.e.),
23.7 m from reactor



Detector mass 16.7 kg total
Very high light collection eff. – 24 phe/keV



Low threshold – 0.2 keV_{ee}

140 day OFF data collected
Now, collecting 1-y ON data



Реакторы: другие проекты

CHILLAX — two-phase Ar detector with Xe doping (~50 kg), NUXE — two-phase Xe detector (~30 kg),

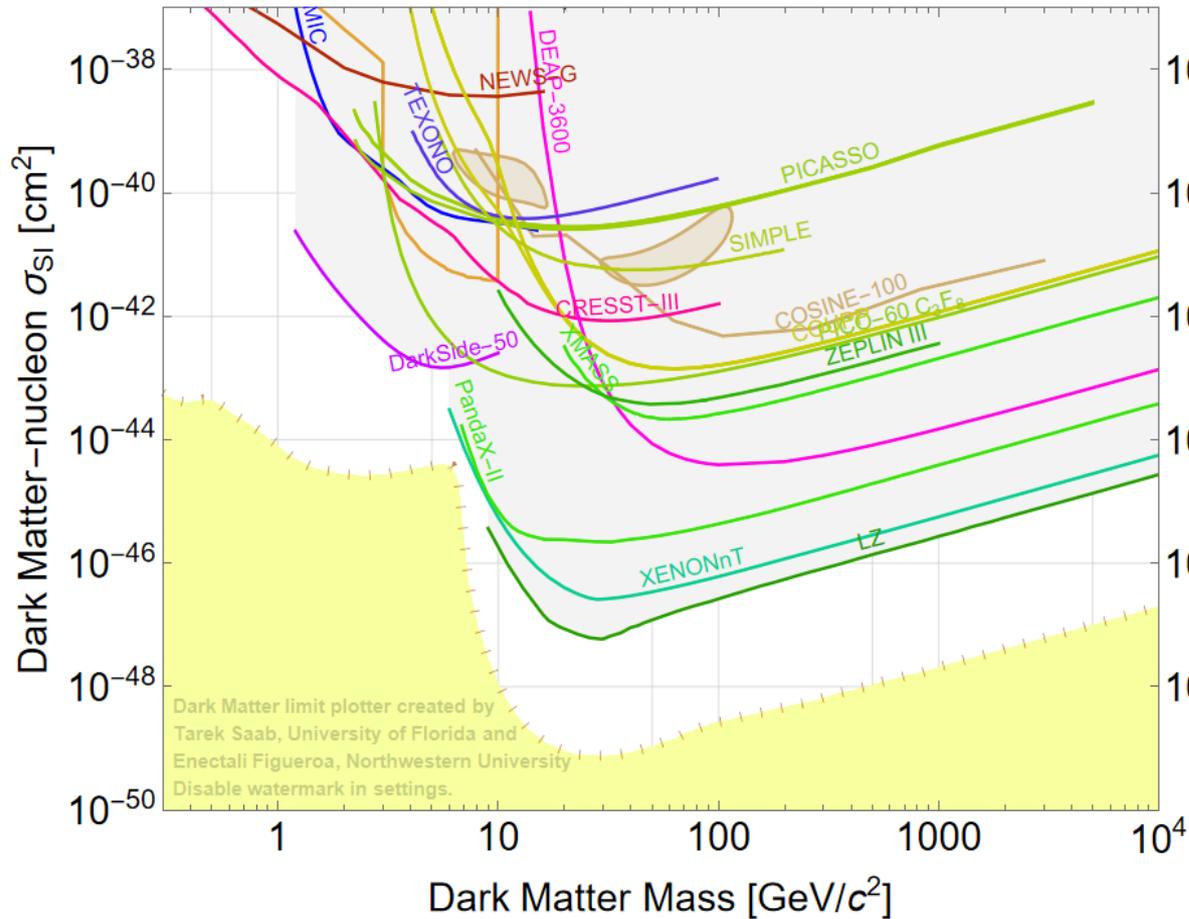
SBC — LAr scintillating bubble chamber, Xe doping, + acoustic (~10 kg, E_{th}~100 eV),

NEWS-G — spherical proportional counters (He, Ne, Ar, Xe) with a mass ~ 1 kg

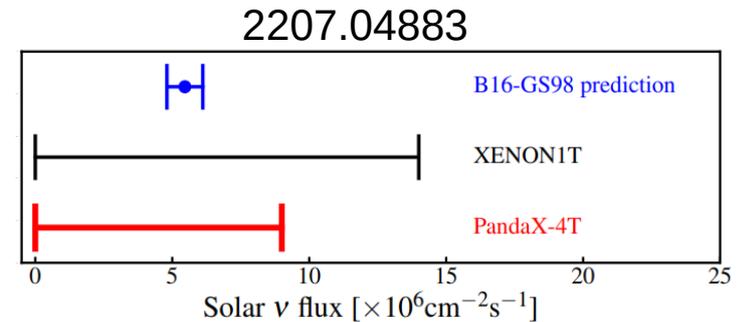
More info: «Coherent elastic neutrino-nucleus scattering: Terrestrial and astrophysical applications», 2203.07361

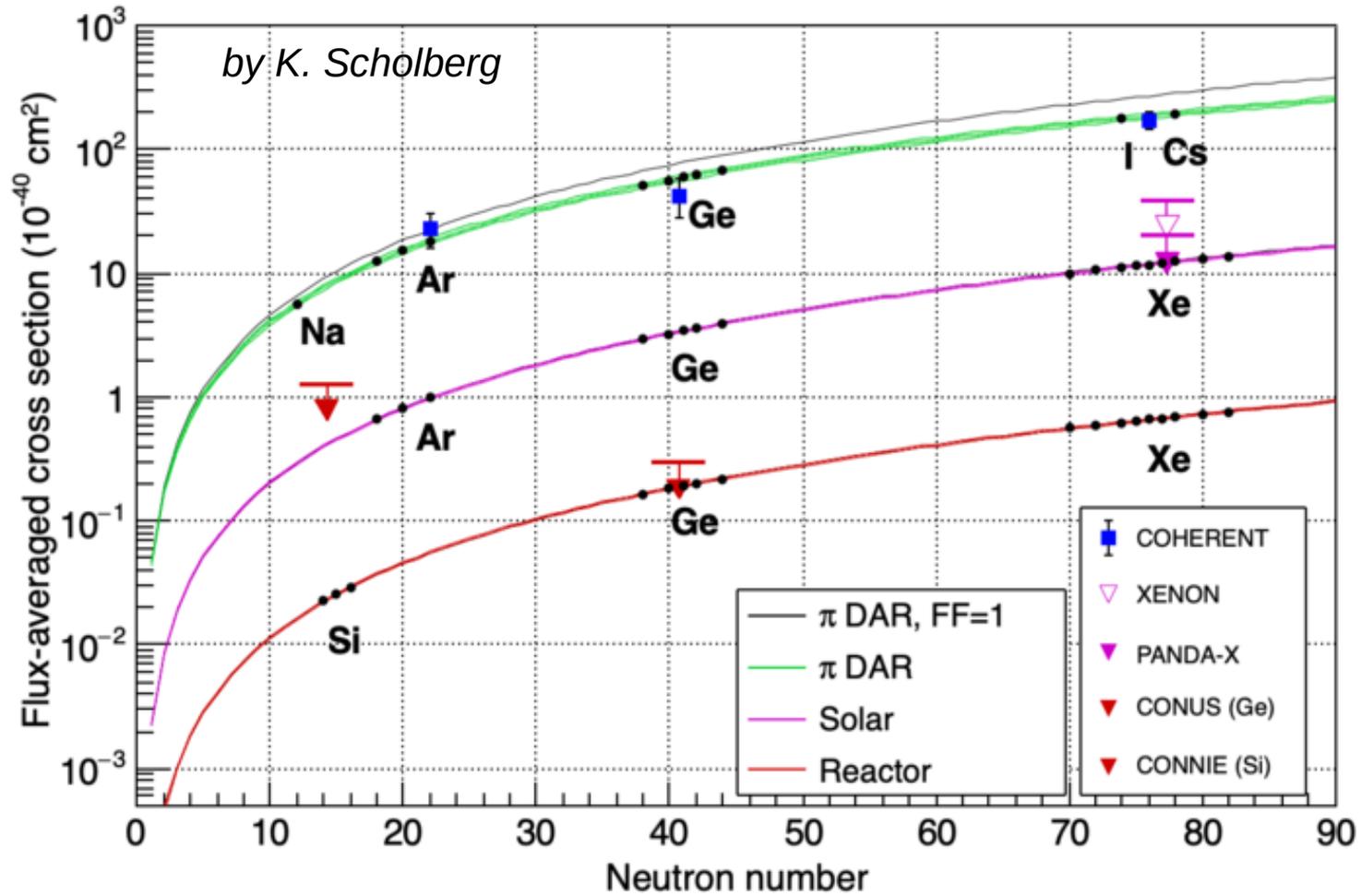
Annual «Magnificent CEvNS» Workshops

Солнечные нейтрино



LZ, XENONnT, PandaX-4T заявляют о возможности наблюдать CEvNS борных в при планируемой экспозиции

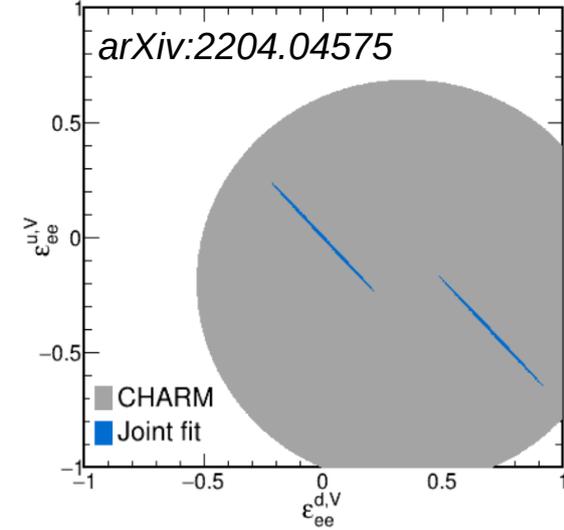
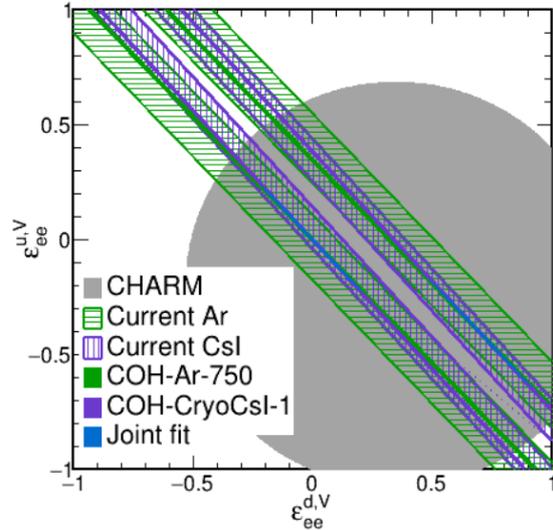




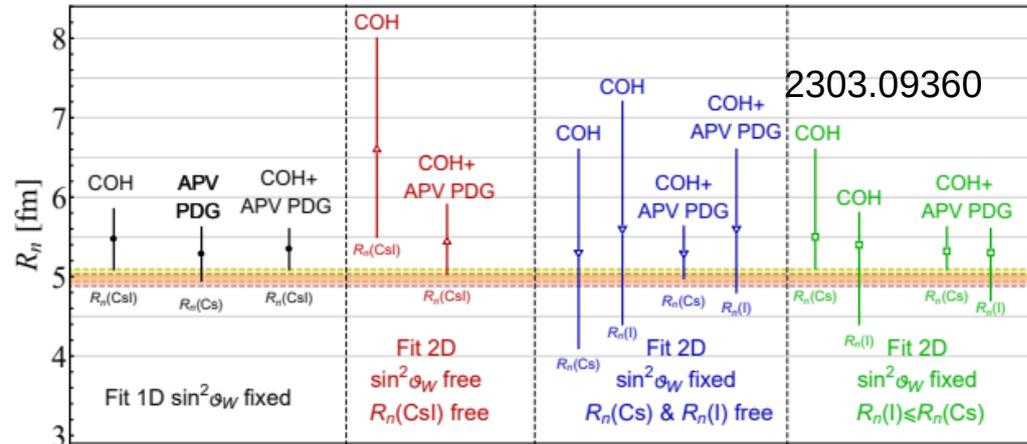
Следствия наблюдений

Векторо-подобные NSI (*JHEP 12 (2005) 021*):

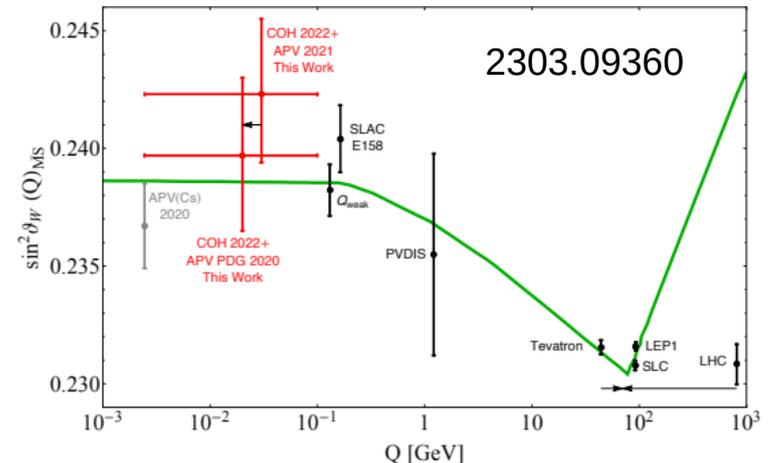
$$Q_\alpha^2 = [Z (g_p^V + 2\varepsilon_{\alpha\alpha}^u + \varepsilon_{\alpha\alpha}^d) + N (g_n^V + \varepsilon_{\alpha\alpha}^u + 2\varepsilon_{\alpha\alpha}^d)]^2$$



Ядерная физика: «neutron skin»



Слабое взаимодействие: $\sin^2\theta_W$



Заключение

Ускорители: COHERENT – завершение программы «first light», подготовка к точным измерениям

Реакторы:

- нет подтвержденного наблюдения, обсуждение заявления Dresden-II
- эффект на пороге, требуется лучшее понимание $E_\nu > 8$ МэВ
- HPGe: лучшие пределы, проблема квенчинга
- болометры: начало экспозиции, большие надежды
- продолжение R&D и доработка детекторов (ПЗС, эмиссионные детекторы и др.)

Daya Bay, PRL 129,
041801 (2022)

Double Chooz,
Яд.Физ,т. 87,1,(2024)

DANSS
Доклад И. Алексеева

Подземные эксперименты: LZ, XENONnT, PandaX приближаются к нейтринному порогу

Спасибо за внимание!

Ваккуп: CEvNS в природе

«В природе»

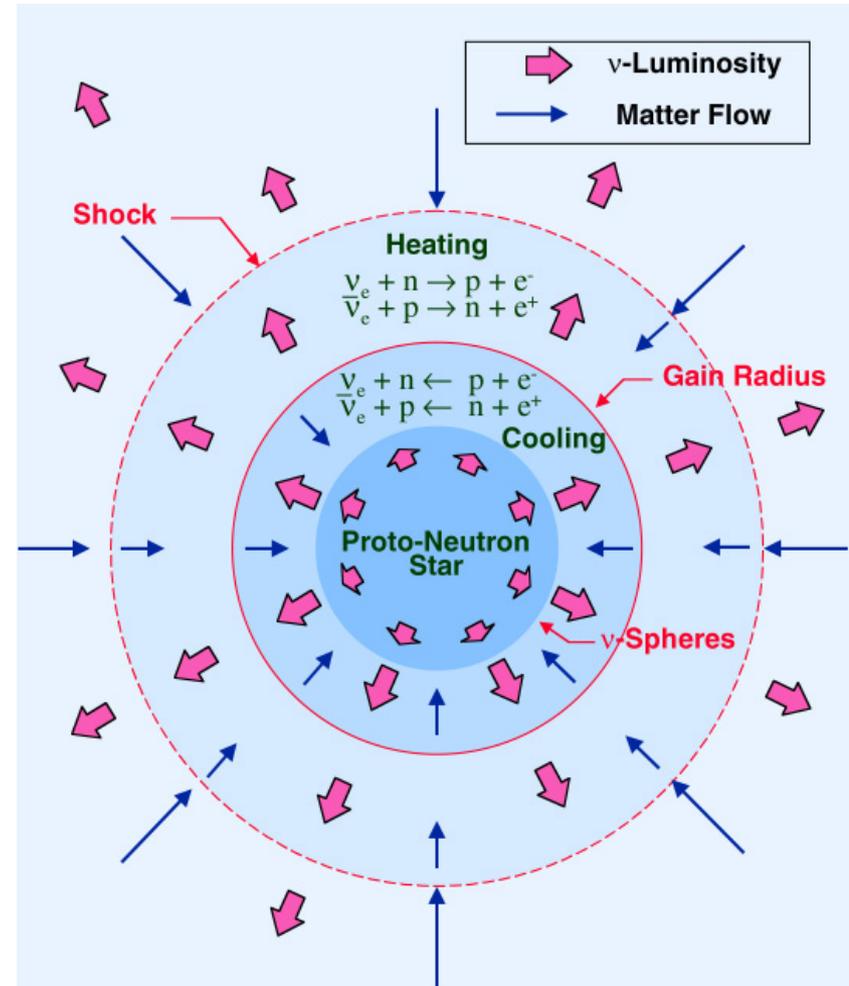
перенос энергии при звёздном
коллапсе

J.R. Wilson, PRL 34 113 (1974)

D.N. Schramm, W.D. Arnett, PRL 34, 113 (1975)

Нейтрино уносят энергию из области формирующейся нейтронной звезды

На масштабе плотности $\sim 10^{12}$ г/см³ УКРН переводит нейтрино в режим диффузии с $\lambda=0.5$ км



Васкис: нестандартные взаимодействия

как тест Стандартной модели

поиск признаков «новой физики» в
нейтринном секторе

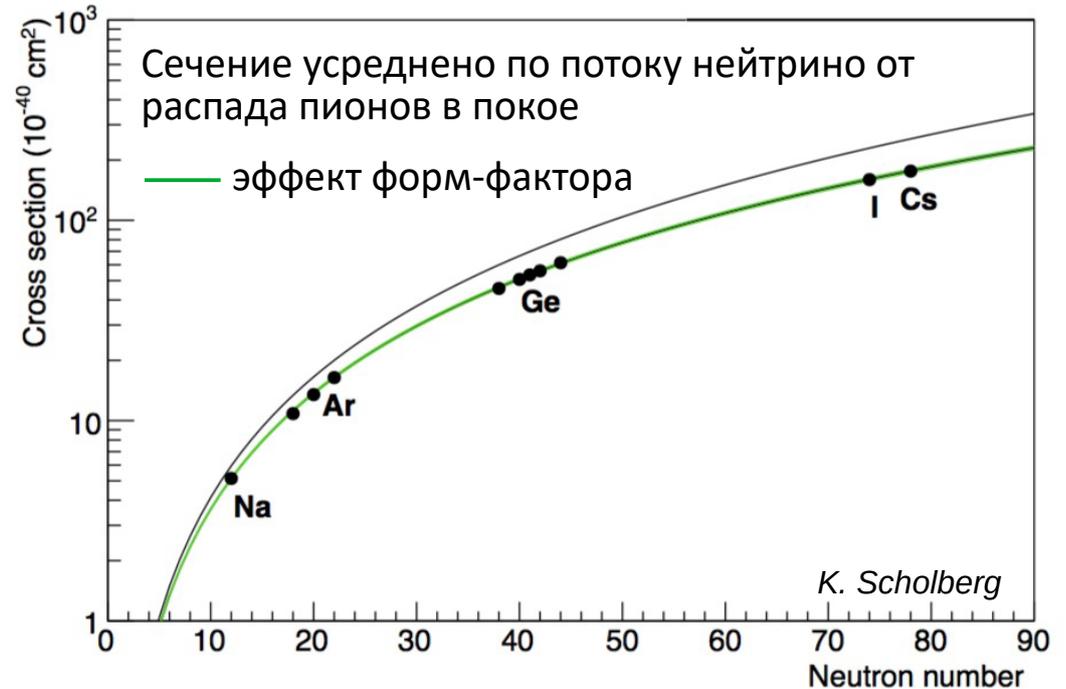
K. Scholberg, PRD 73 033005 (2006)

P. Coloma, T. Schwetz, PRD 94 055005 (2016)

УКРН — тест взаимодействия
нейтрино с кварками посредством
нейтрального тока

В фокусе — электронные
(анти)нейтрино

«Чистое» предсказание сечения, особенно
при малом переданном импульсе $F^2(Q)=1!$



Васкир: угол электрослабого смешивания

как тест Стандартной модели

поиск признаков «новой физики» в
нейтринном секторе

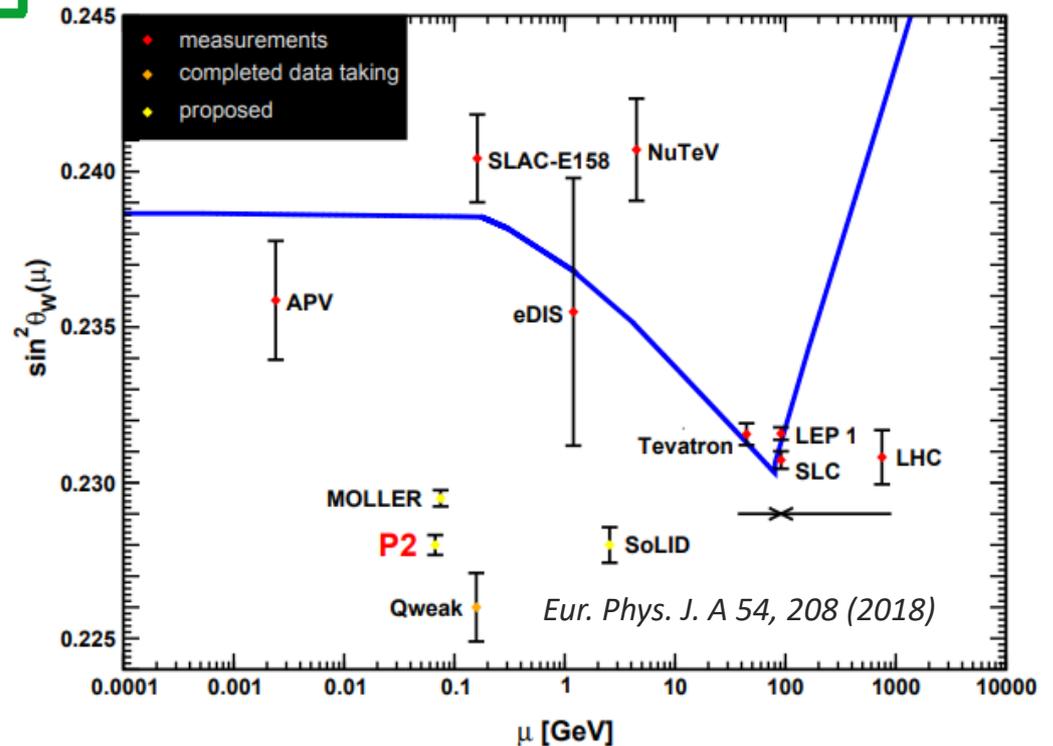
K. Scholberg, PRD 73 033005 (2006)

P. Coloma, T. Schwetz, PRD 94 055005 (2016)

Угол электрослабого смешивания —
«бегущая» константа

Интересно проверить его значение
на масштабе переданного
импульса 10-100 МэВ

«Чистое» предсказание сечения, особенно
при малом переданном импульсе $F^2(Q)=1!$



Васкир: фон в экспериментах по поиску ТМ

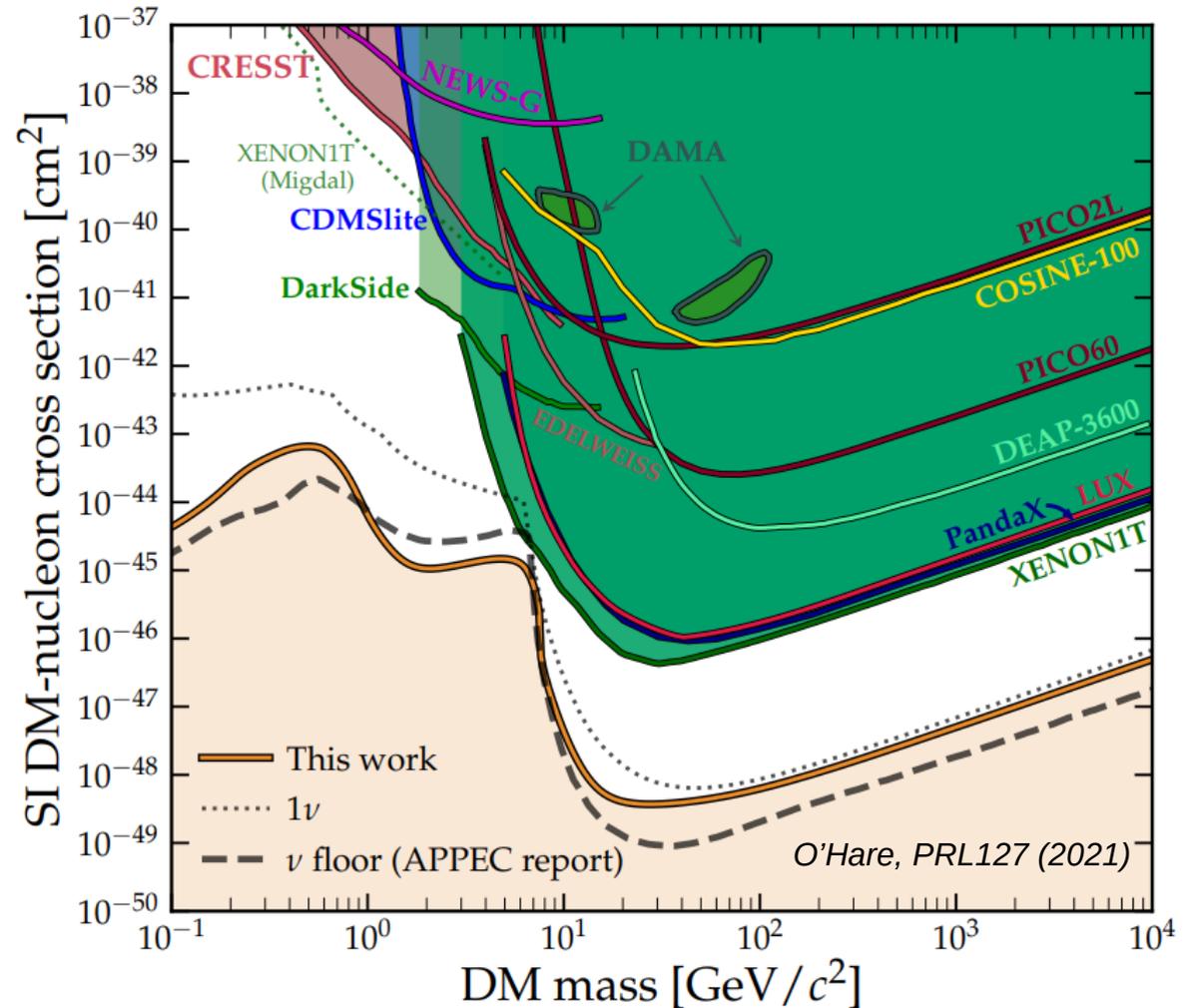
как фон

в экспериментах по поиску
темной материи

J. Billard et al., PRD 89 (2014)

УКРН солнечных и атмосферных
нейтрино — фон для «прямого»
поиска темной материи (ТМ)

... и для косвенного поиска
«лёгкой» ТМ на ускорителях
тоже

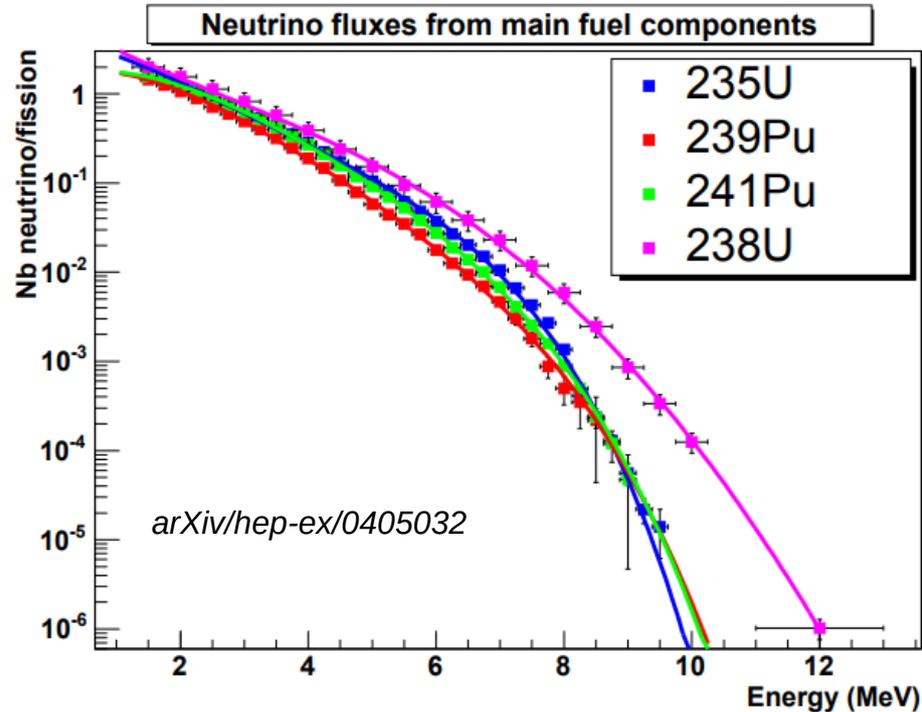


для поддержания безопасности АЭС

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)



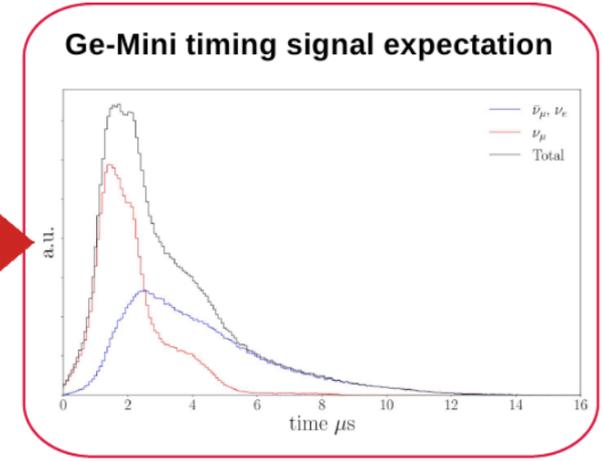
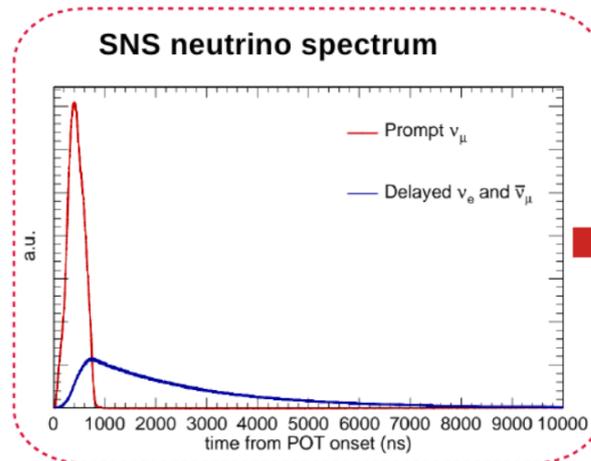
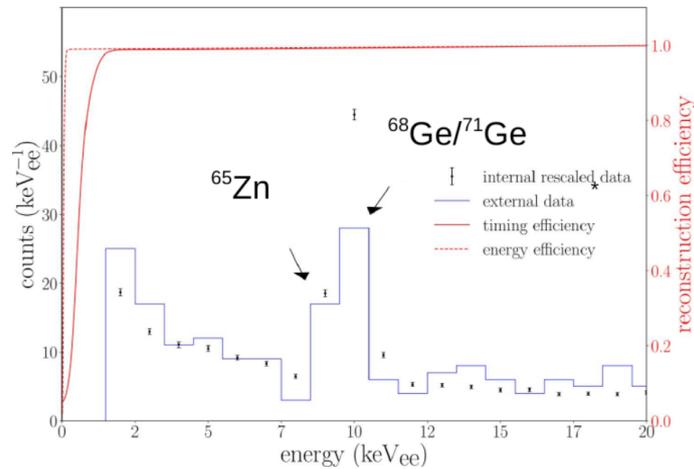
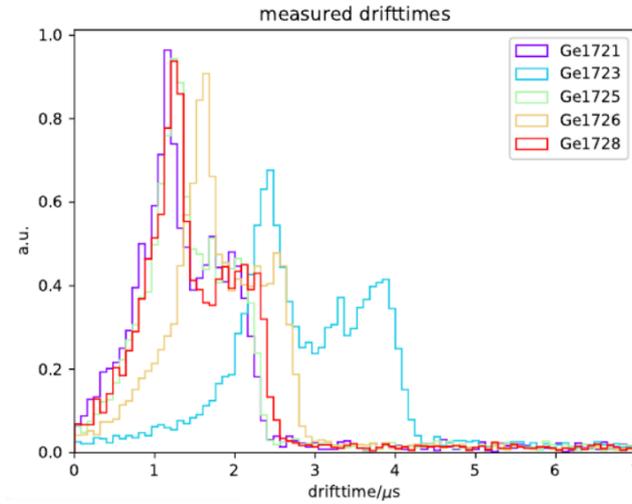
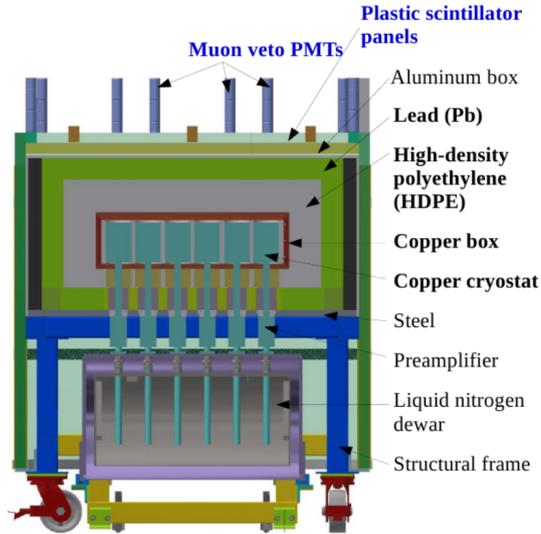
УКРН как инструмент научных исследований

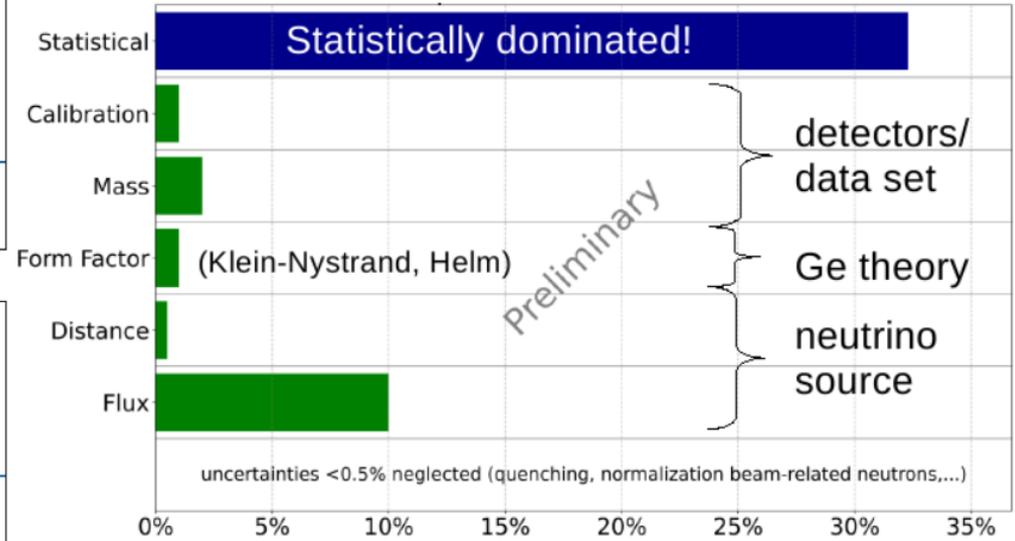
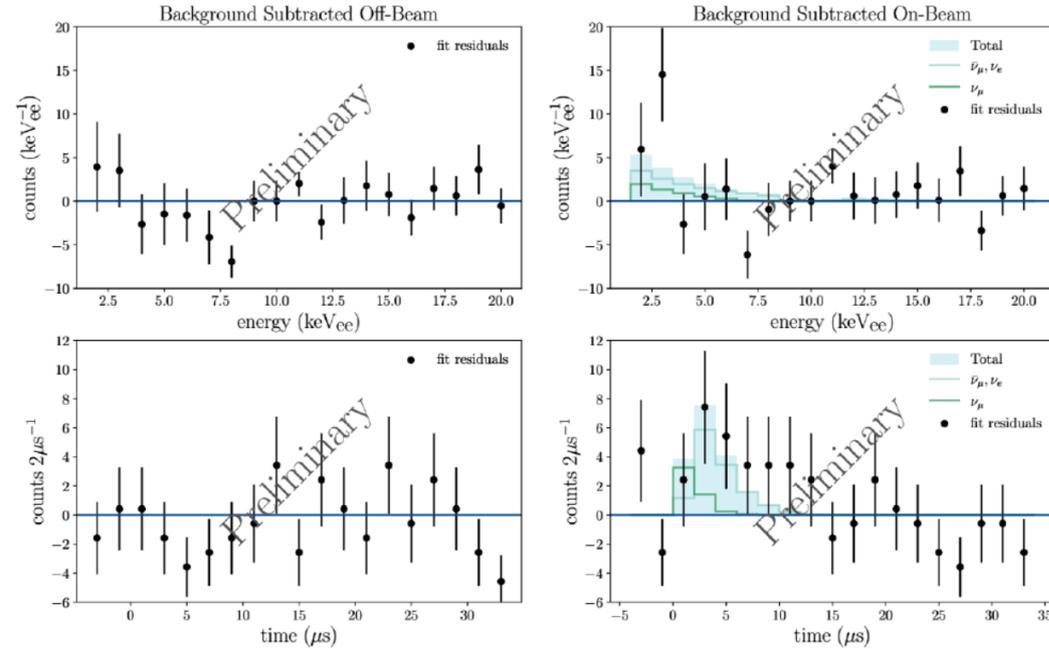
- поиск стерильных нейтрино

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

- изм-ие ядерного форм-фактора

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

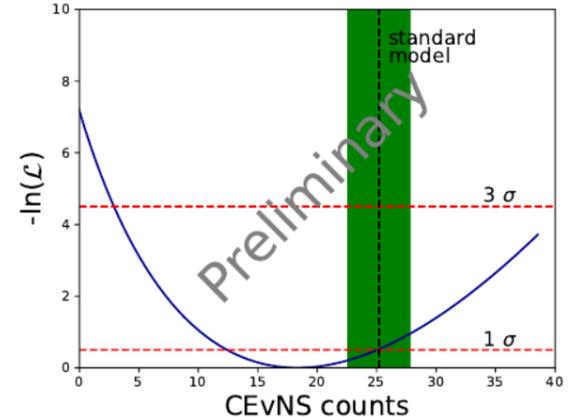




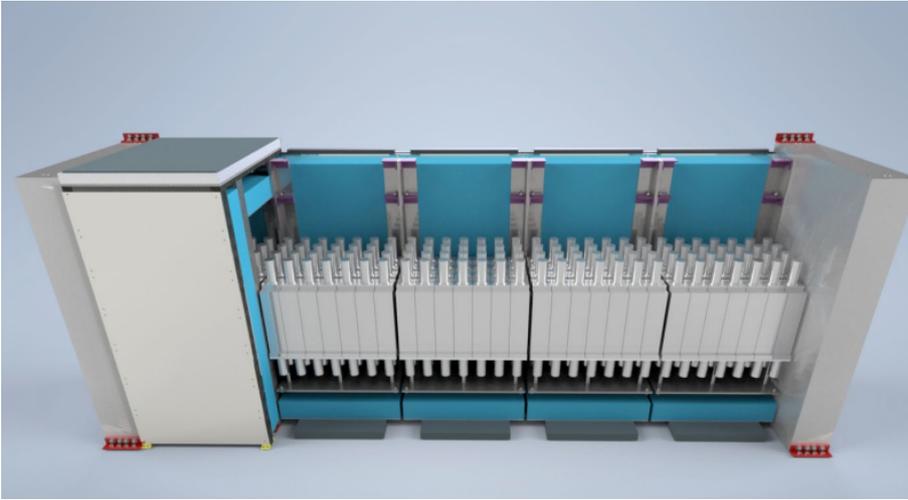
Fit result: Null hypothesis rejected by **3.9 sigma!**
 CEvNS signal: 18.4 - 5.9 + 6.7 (stat)
 beam-related neutrons: 0.55 ± 0.18 (input)
 steady-state background: 143.8 - 8.6 + 9.0 (stat)
 (40 μs window)

Counting analysis:
 S/B ~ 1
 18.0 ± 7.7

Standard model prediction: 25.2 ± 2.6 (ratio to data: 0.73 ± 0.26)
 agreement within 1 sigma!



Backup, future of COHERENT: NalvETe



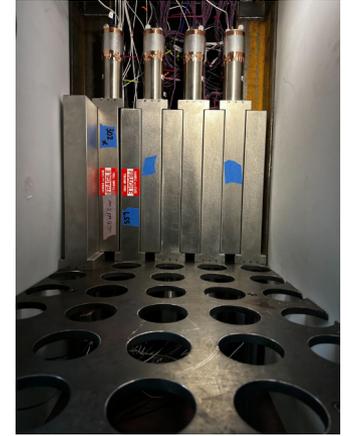
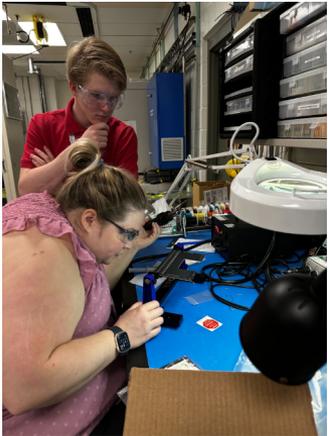
$\text{NaI}[\text{Tl}]$: 2.4T \rightarrow 3.4T

1 crystal = 7.7 kg,

1 module = 63 crystals,

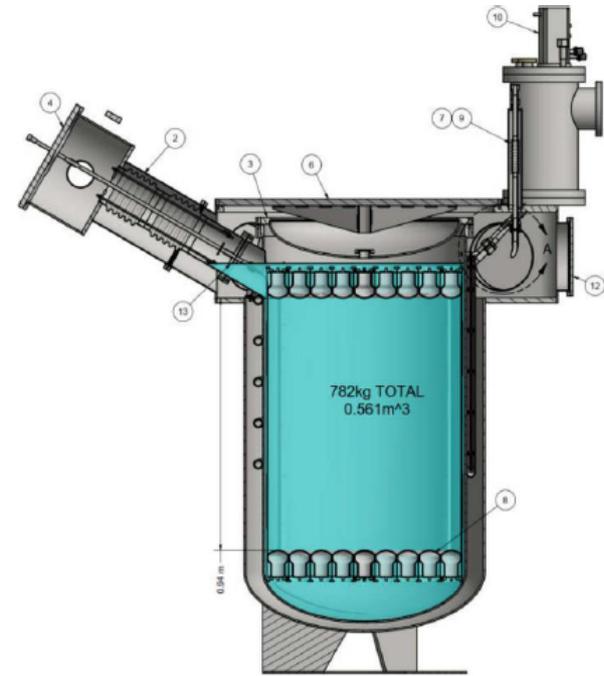
5 \rightarrow 7 modules planned [3 deployed ATM]

Sensitivity: 3σ per year (3.4 T), $E_{\text{thr}} = 13 \text{ keV}_{\text{nr}}$



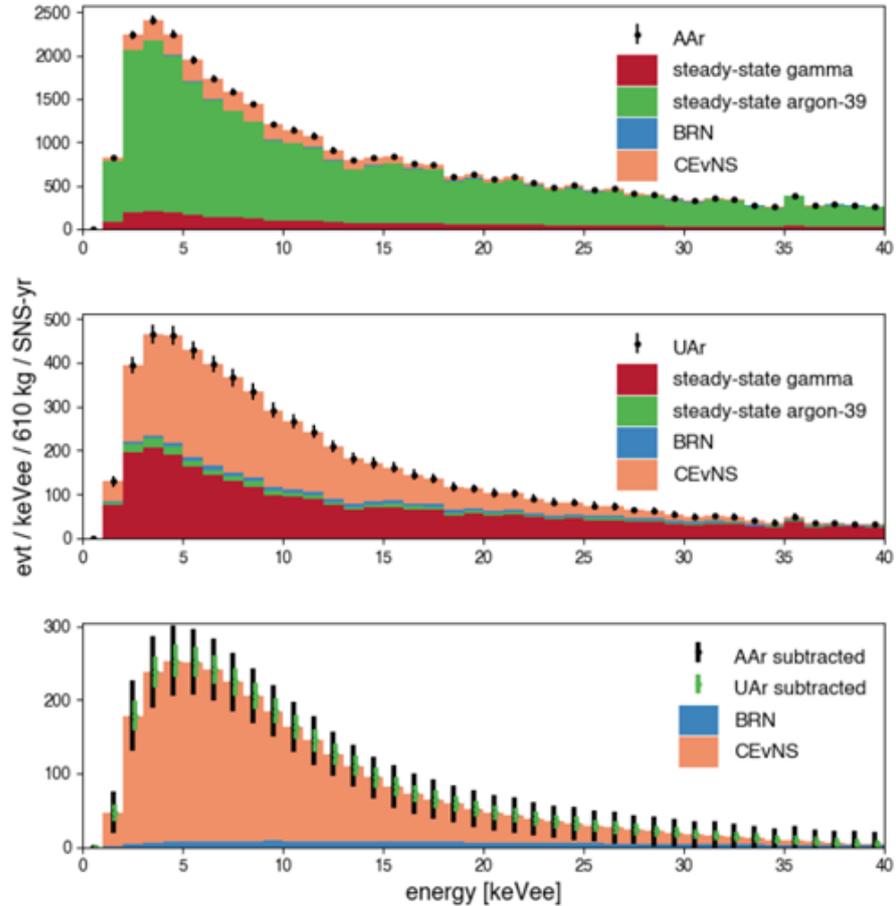
Backup, future of COHERENT: CENNS-750

750 kg total (610 kg fid.), 3000 CEvNS/year
128 PMTs, TPB for wavelength shifting

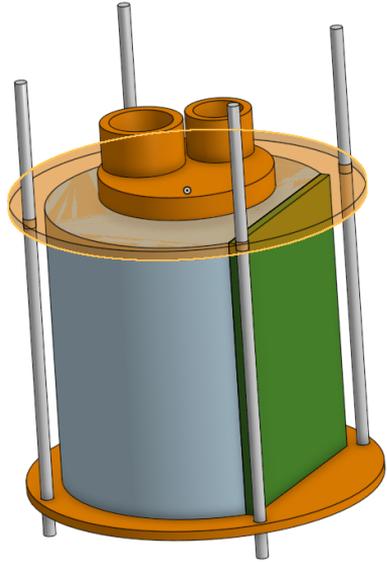


Cryostat nearly complete, PMTs acquired

Planned to be deployed and running by 2025

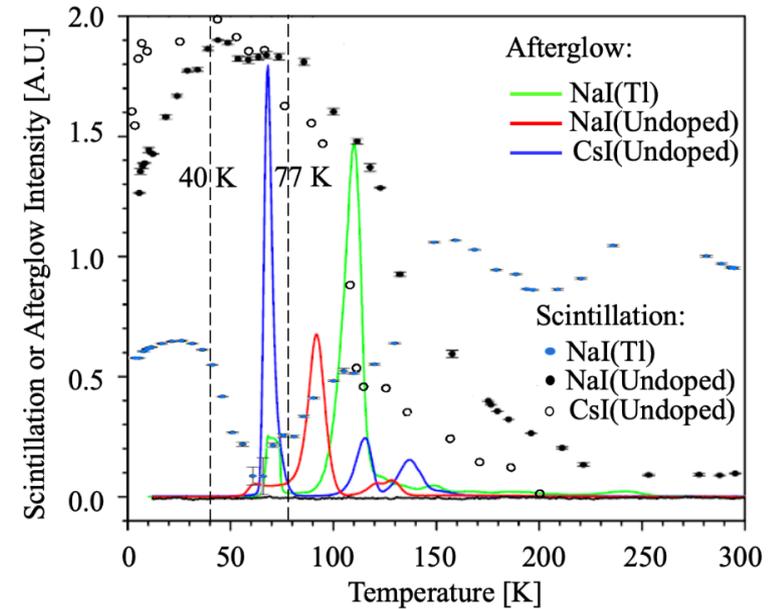


Backup, future of COHERENT: cryogenic undoped CsI



Like CsI[Na], but better:

1. *Higher light yield at or below 77 K*
2. *SiPMs:*
 - *high QE*
 - *no Cherenkov radiation*
 - *low dark count rate (low T)*

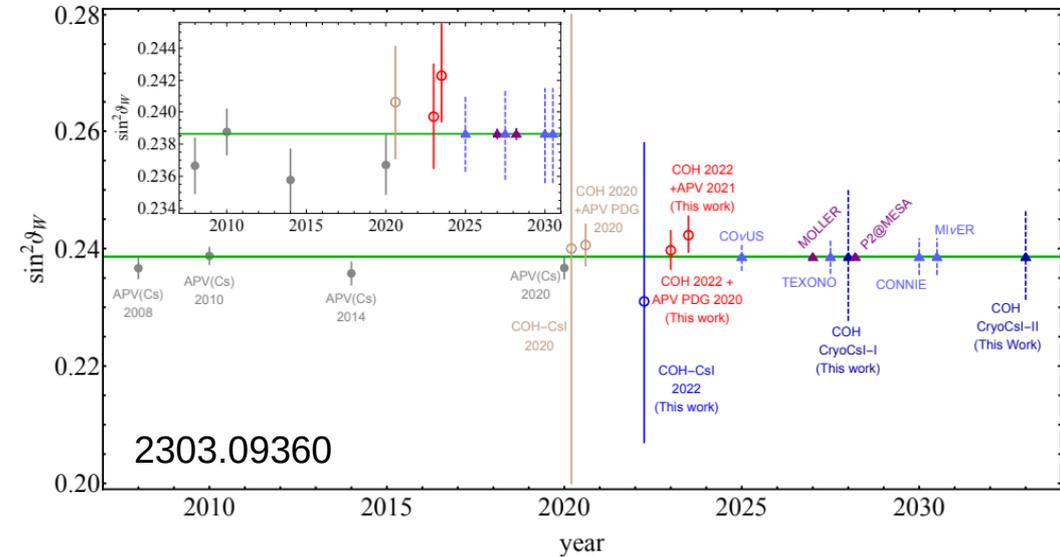
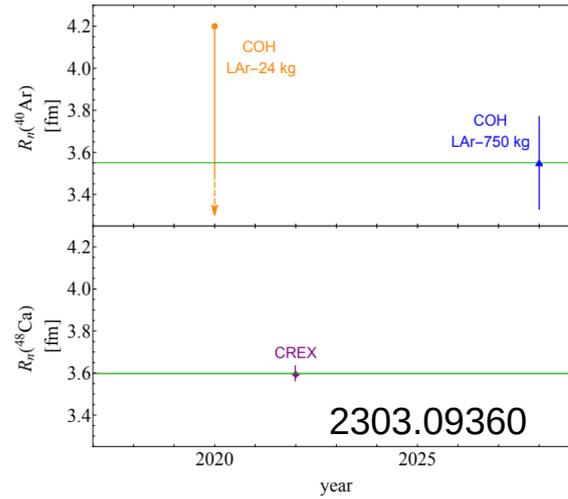
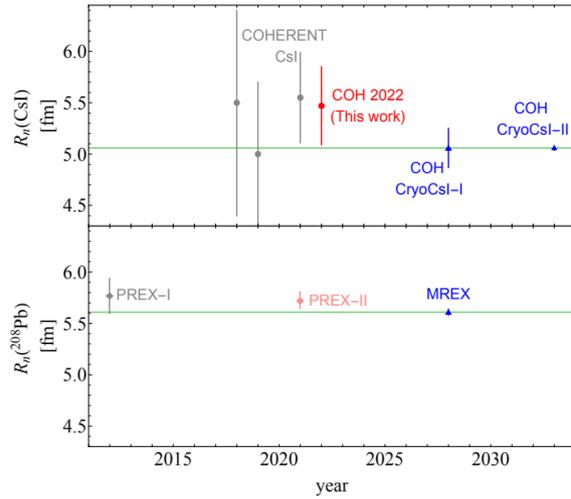


- R&D:*
- *detector shape and size: ~10 kg, 6" x 6" cylinder*
 - *cooling: LN or cryocooler*
 - *QF measurements at TUNL*
 - *about 1.4 keV_{nr} threshold planned*

Accelerator facility	Location	Proton energy, GeV	Target power, MW	Bunch time structure	Repetition rate, Hz
LAMPF (Los Alamos Meson Physics Facility)	USA (Los Alamos National Laboratory)	0.8	0.8	600 μ s	120
ISIS	Great Britain (Rutherford Appleton Laboratory)	0.8	0.16	2 \times 200 ns	50
SNS (Spallation Neutron Source)	USA (Oak Ridge National Laboratory)	1	1.4	700 ns	60
MLF (Material and Life science experimental Facility)	Japan (J-PARC)	3	1	2 \times (60–100) ns	25
CSNS (China Spallation Neutron Source)	China	1.6	0.1	< 500 ns	25
ESS (European Spallation Source)	Sweden	1.3	5	2.8ms	17
DAE δ ALUS (Decay-At-rest Experiment for δ_{CP} studies At the Laboratory for Underground Science)	Planned	0.7	\sim 7	100 ms	2

Реакторные эксперименты по поиску УКРН

Эксперимент	Детектор					Реактор	
	Технология	Мишень	M , кг	Порог, кэВ	L , м	Место	P , ГВт
CoGeNT	PPC HPGe	Ge	0.5	0.6	25	San Onofre, США	1.1
TEXONO	PPC HPGe	Ge	1.0	0.3	28	Kuo-Sheng, Тайвань	1.0
ν Gen	PPC HPGe	Ge	1.6	0.35	10-12	Калининская АЭС, РФ	3.0
CONUS	PPC HPGe	Ge	4.0	0.3	17	Brokdorf, Германия	3.9
Dresden-II	PPC HPGe	Ge	3.0	0.2	10.4	Моррис, США	3.0
CONNIE	ПЗС	Si	0.04	0.03	30	Angra dos Reis, Бразилия	4.0
NEON	Сцинтиллятор	NaI[Tl]	13.3	1.5	24	Hanbit NPP, Южная Корея	2.8
RICOCHET	Болометр	Ge/Zn	1/0.3	0.1	9	ILL-H7, Франция	0.06
MINER	Болометр	Ge	10	0.1	1-10	TRIGA, США	10^{-3}
ν -cleus	Болометр	Al ₂ O ₃ / CaWO ₄	0.01	0.02	72/102	Chooz NPP, Франция	2×4.3
РЭД-100	Двухфазный	Xe	100	0.3	19	Калининская АЭС, РФ	3.0

Backup: neutron skin and $\sin^2\theta_W$ 

J. Colaresi, J. I. Collar,* T. W. Hossbach , C. M. Lewis , and K. M. Yocum, «Measurement of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering from Reactor Antineutrinos», PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 211802 (2022)

- Claimed about strong preference ($p < 1.2 \cdot 10^{-3}$) for the presence of CEvNS.
- Similar to nuGen antineutrino flux from reactor ($4.8 \cdot 10^{13}$ v/cm²/sec)
- Sideway location gives almost no overburden (cosmogenic background).
- Almost no shielding against fast neutrons.
- Different shielding during reactor ON and OFF
- Big difference in background levels during reactor ON and OFF
- Moderate energy resolution > 160 eV (FWHM) (in nuGen – 101.6(5) eV)

