



Статус и результаты эксперимента ν GeN

Житников Игорь
от коллаборации ν GeN

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А.Рубакова

2025-02-19

Цели и задачи

- Поиск упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН)
- Поиск магнитного момента нейтрино (ММН):
См. выступление Г.Игнатова
«Исследование электромагнитных свойств нейтрино в эксперименте νGeN »
- Поиск Новой физики через исследование нестандартных взаимодействий нейтрино.
- Определение угла Вайнберга при низких энергиях, ядерная физика, стерильные нейтрино.
- Возможное прикладное применение: мониторинг работы ядерных реакторов с помощью компактных германиевых детекторов на основе УКРН

Упругое Когерентное рассеяние нейтрино

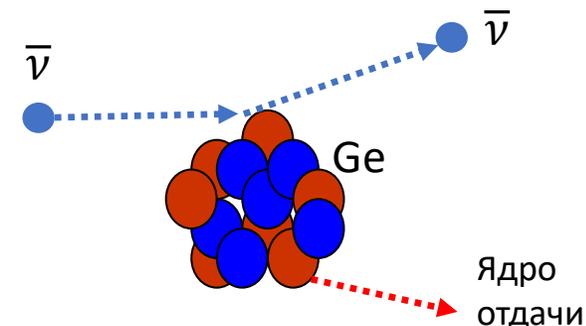
- Упругое когерентное рассеяние нейтрино – процесс, предсказанный в рамках Стандартной модели (СМ).
- Детектирование данного процесса является важным тестом СМ.
- С помощью УРКН можно провести поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, стерильных нейтрино и др.

- $E_\nu < 50$ МэВ
- Сечение УКРН превышает на несколько порядков «обычное» рассеяние
- Пропорционально квадрату числа нейтронов N^2
- Энергия отдачи ядра мала – меньше нескольких кэВ.
- Детектируется лишь часть оставленной энергии (для HPGe детекторов $\approx 20\%$)

В настоящее время в нескольких экспериментах (COHERENT, DRESDEN-II, CONUS+, PandaX-4T, XENONnT, ...) было заявлено об обнаружении УКРН.

«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)

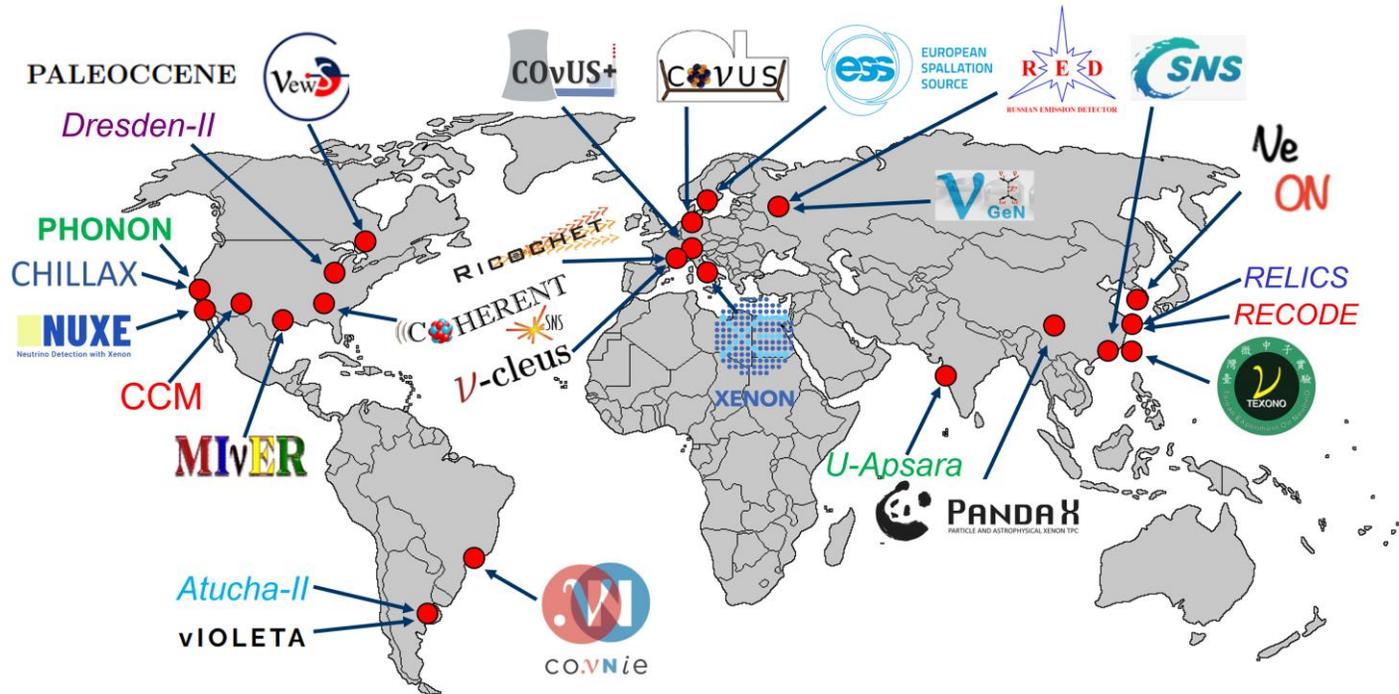


$$\left(\frac{d\sigma}{dT}\right) = \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 M \left[1 - \frac{MT}{2E_\nu^2}\right] F^2(Q^2)$$

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

Nucleus	T_{max} , keV ($E_\nu = 5$ MeV)	T_{max} , keV ($E_\nu = 30$ MeV)
^{12}C	4.44	159.0
^{23}Na	2.32	83.2
^{40}Ar	1.33	47.9
^{74}Ge	0.72	25.9
^{133}Cs	0.40	14.4

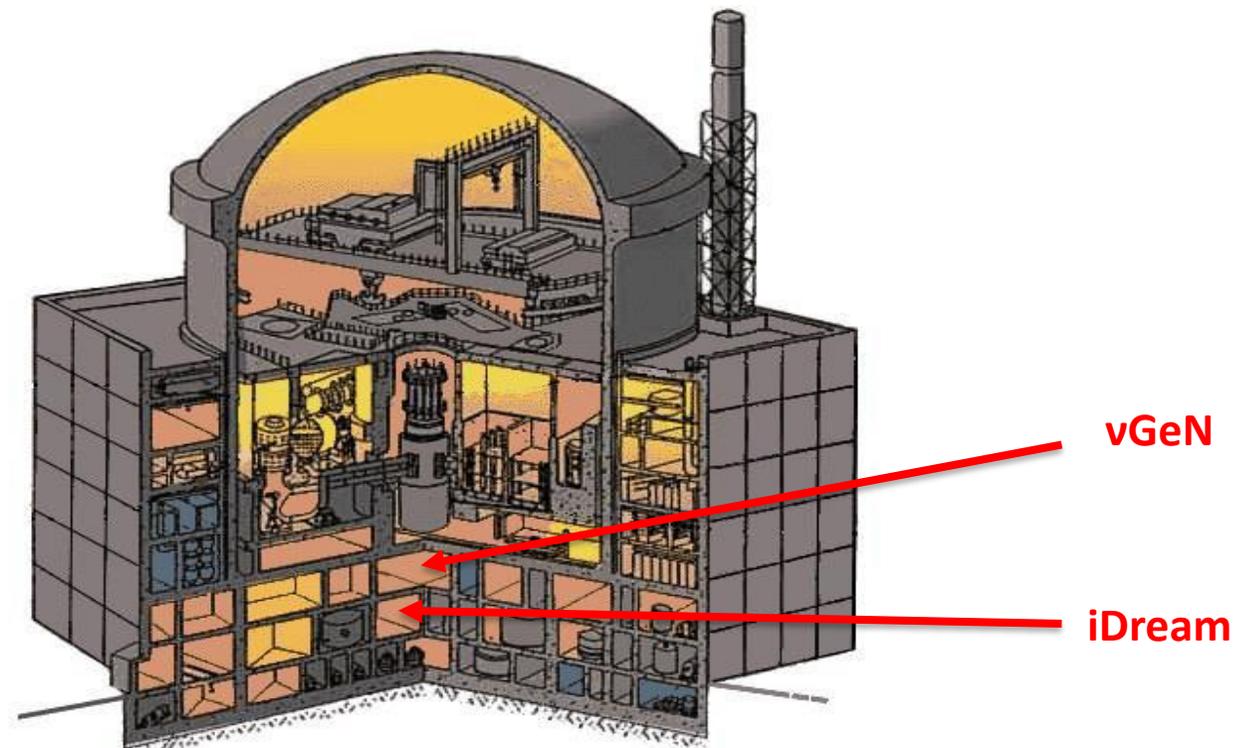
Эксперименты по поиску УКРН



Сравнение условий экспериментов по поиску УКРН от реакторных антинейтрино

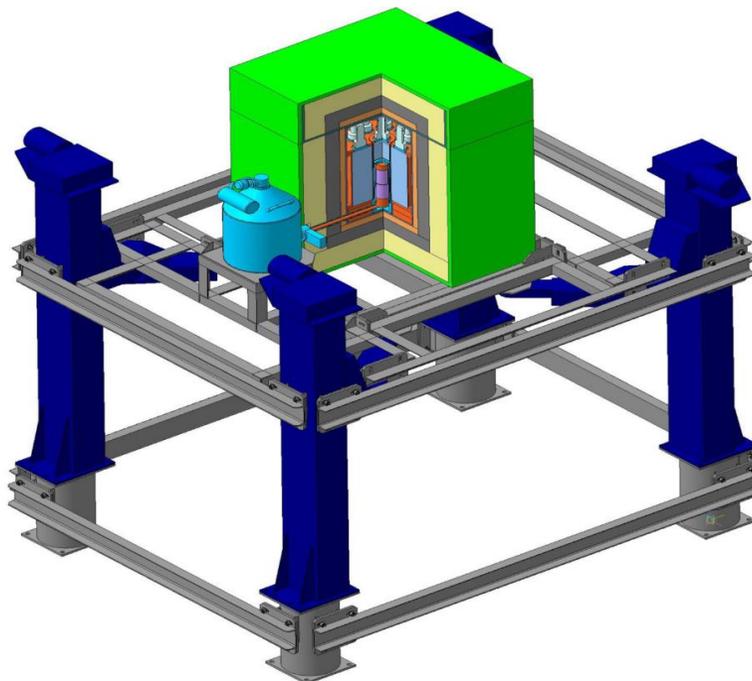
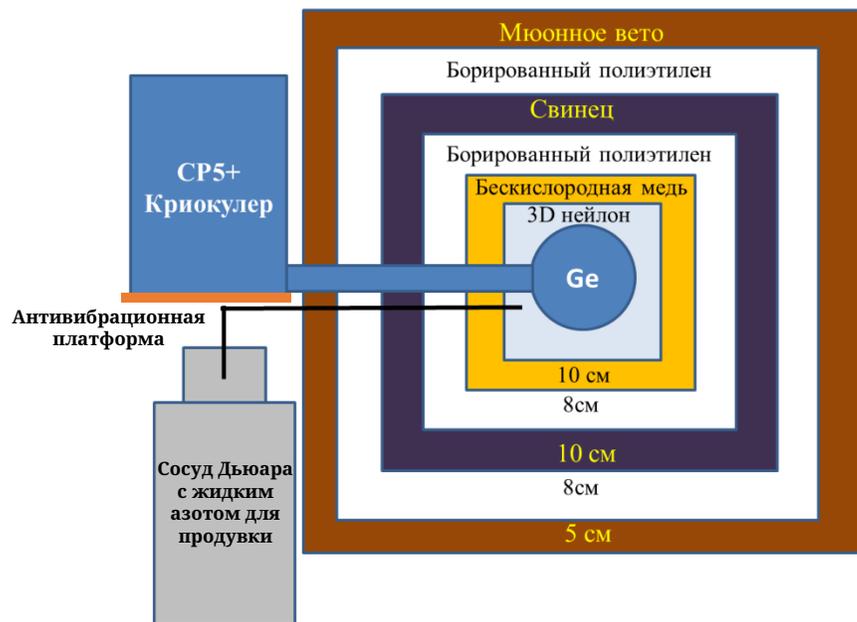
Experiment	Location	Neutrino flux $\nu/(\text{cm}^2 \text{ s})$	Overburden [m w. e.]
vGeN	KNPP, Russia	$\sim(3.6-4.4)\times 10^{13}$	~ 50
CONUS	Brokdorf, Germany	2.3×10^{13}	10-45
CONUS+	Leibstadt, Switzerland	1.45×10^{13}	7-8
TEXONO	Kuo-Sheng NPP, Taiwan	6.4×10^{12}	~ 30
RED-100	KNPP, Russia	1.7×10^{13}	> 50
CONNIE	Angra 2, Brazil	7.8×10^{12}	0
RICOCHET	ILL, France	2×10^{12}	~ 15
MINER	Texas A&M, USA	2×10^{12}	~ 5
NUCLEUS	Chooz, France	2×10^{12}	~ 3
NCC-1701	Dresden-II, USA	4.8×10^{13}	-
NEON	Hanbit 6, Korea	7.1×10^{12}	~ 8
SBS	Laguna Verde, Mexico	$3 \times 10^{12}?$?

Место измерений



- Спектрометр **vGeN** расположен под энергоблоком №3 КлнАЭС (ВВЭР-1000, тепловая мощность – 3,1 ГВт)
- Поток антинейтрино, проходящий через детектор на расстоянии 11 метров $> 4 \cdot 10^{13} \nu / (c \cdot \text{см}^2)$
- Реактор, бетонные конструкции здания и технологическое оборудование обеспечивают защиту от космического излучения ~ 50 м.в.э.

Измерительная установка



Расстояние от детектора до центра активной зоны реактора:

11.1 м - верхнее положение

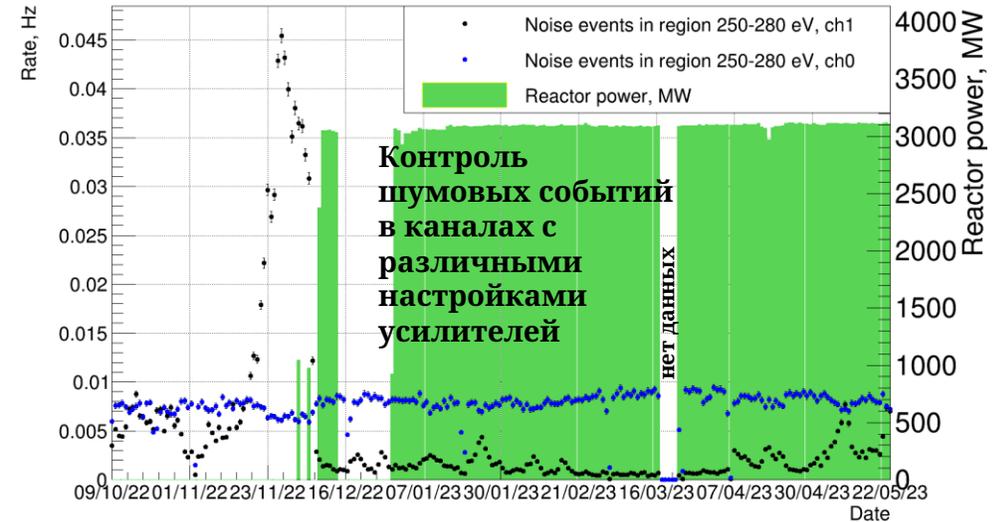
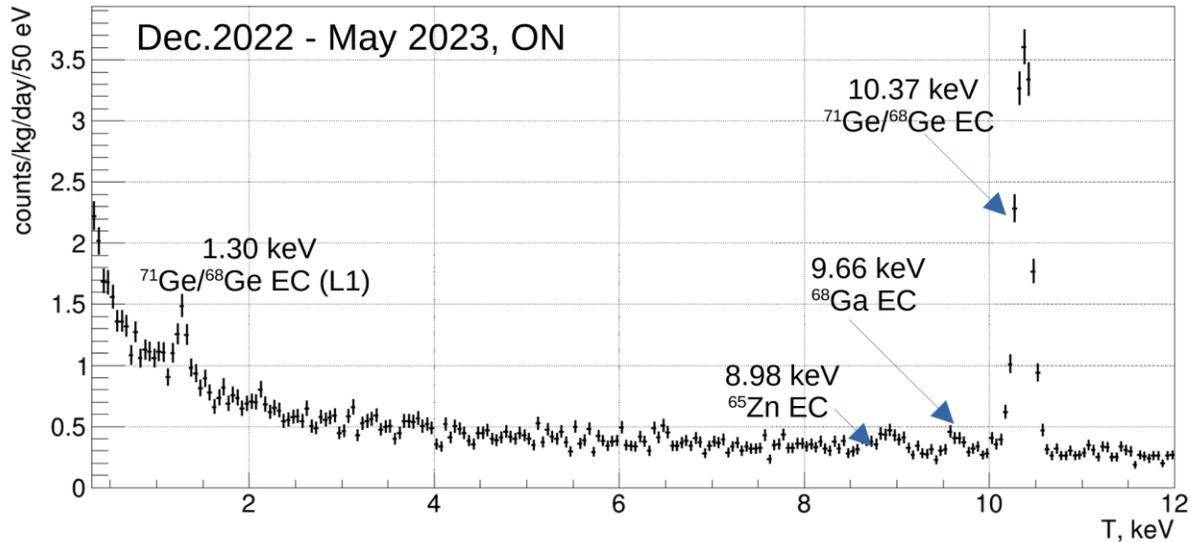
12.5 м - нижнее положение



Низкопороговый HPGe детектор с точечным контактом производства CANBERRA (Mirion, Lingosheim). Охлаждение осуществляется с помощью криокулера CP5+. Масса детектора 1,4 кг. Разрешение (FWHM) в области интереса – 102 эВ (получено с помощью генератора сигналов).



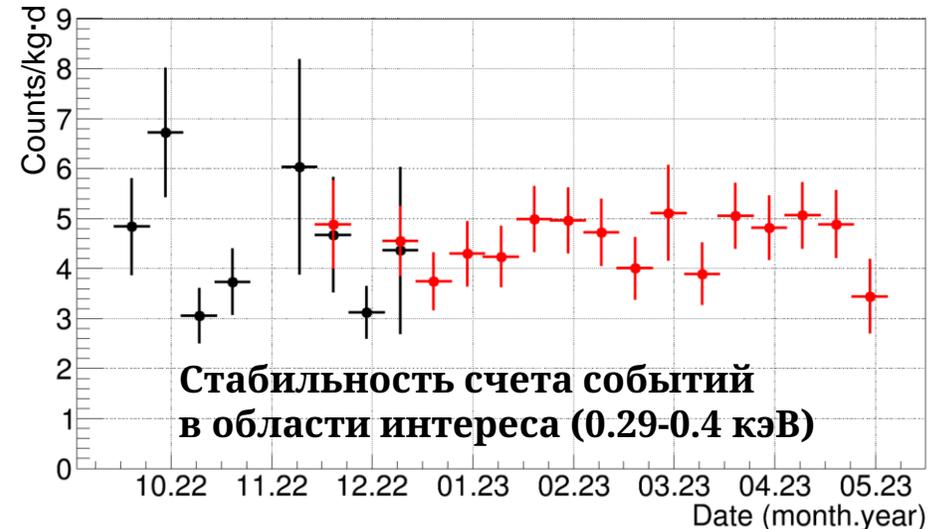
Набор данных



Всего с ноября 2019 года набрано около **1472 дней** работающего реактора и **160 дней** выключенного.

В представленном анализе использовались данные с Октября 2022 по Май 2023 в 11.1 м от активной зоны реактора:

Включенный реактор (ON) - 137 дней (195.5 кг·д)
Выключенный реактор (OFF) – 38 дней (54.6 кг·д)



Отбор событий

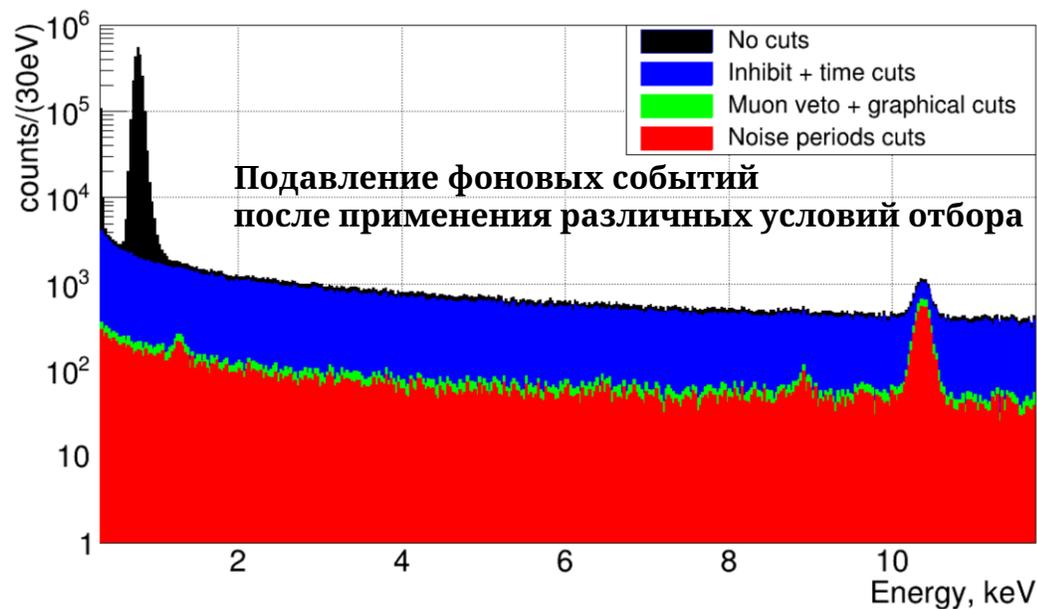
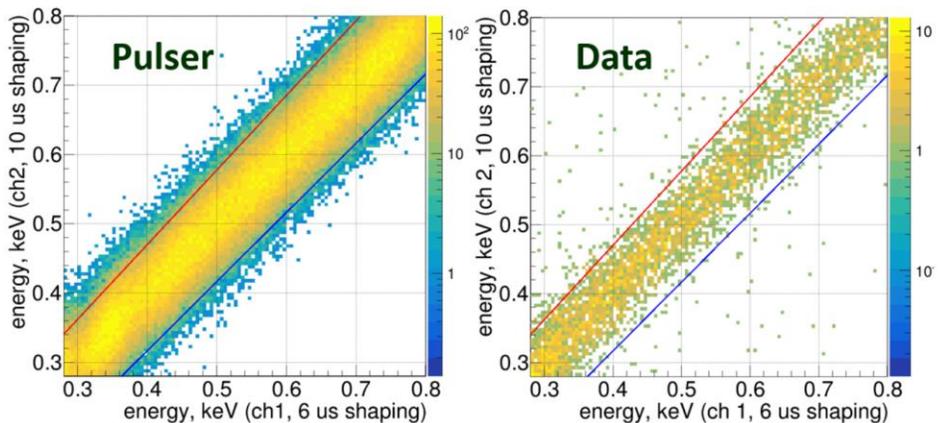
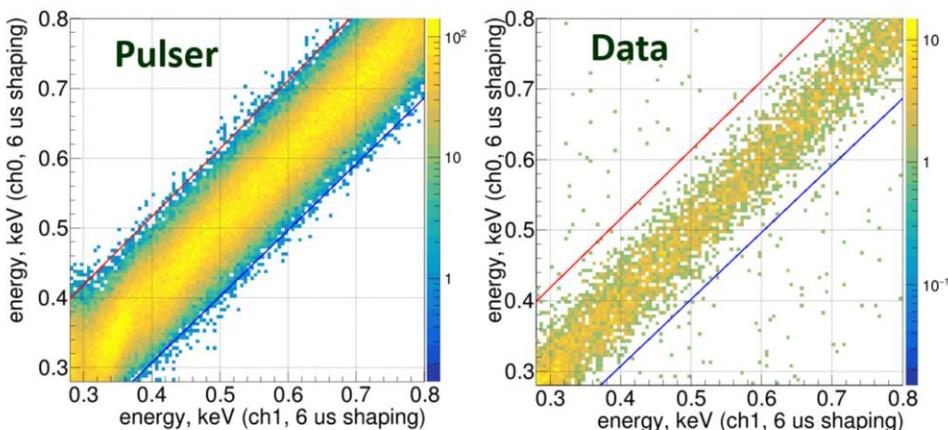
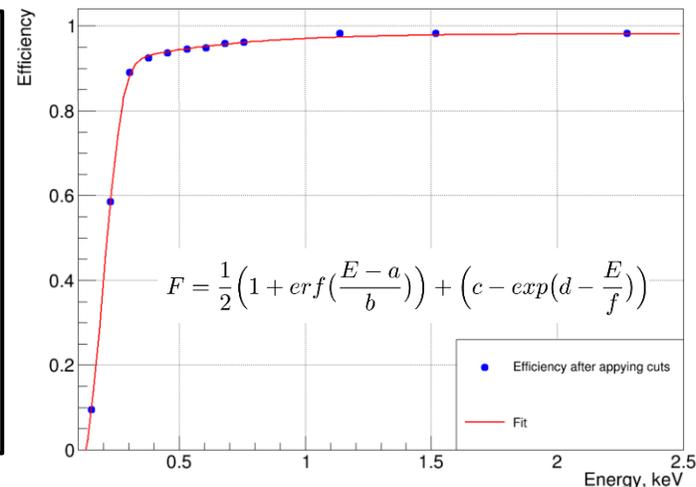
Для отсеивания шумовых событий используются спектрометрические усилители с разной формировкой сигнала

Эффективность триггера с учетом отсеивания шумовых событий:

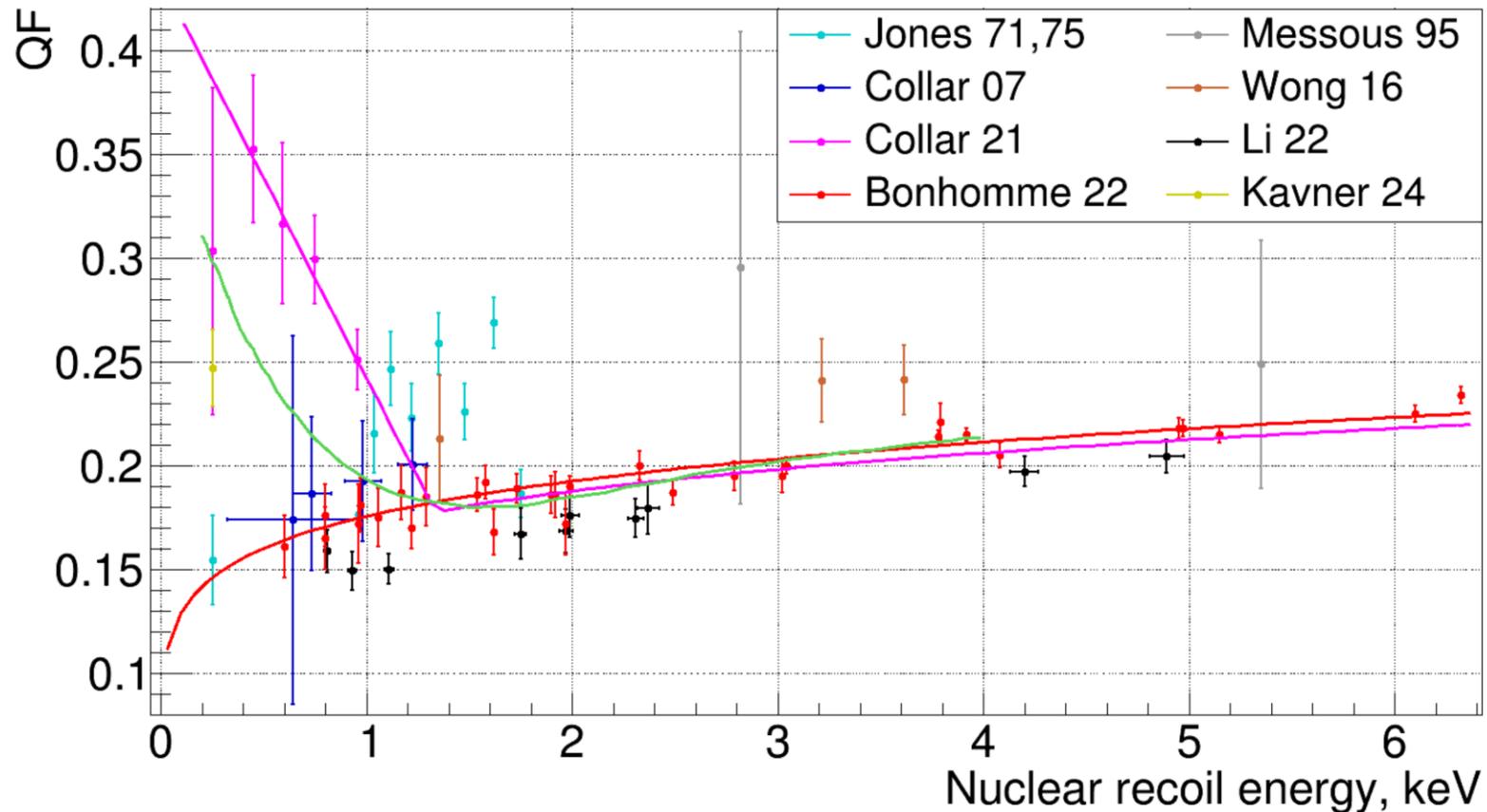
~40% для 0.2 кэВ

~80% для 0.3 кэВ

Отбор событий от сброса предусилителя и при срабатывании мюонного вето приводит к суммарному мертвому времени ~10%



Проблема QF (квенчинг фактор)



$$QF = \frac{E_{detected}}{E_{Nuclear\ recoil}}$$

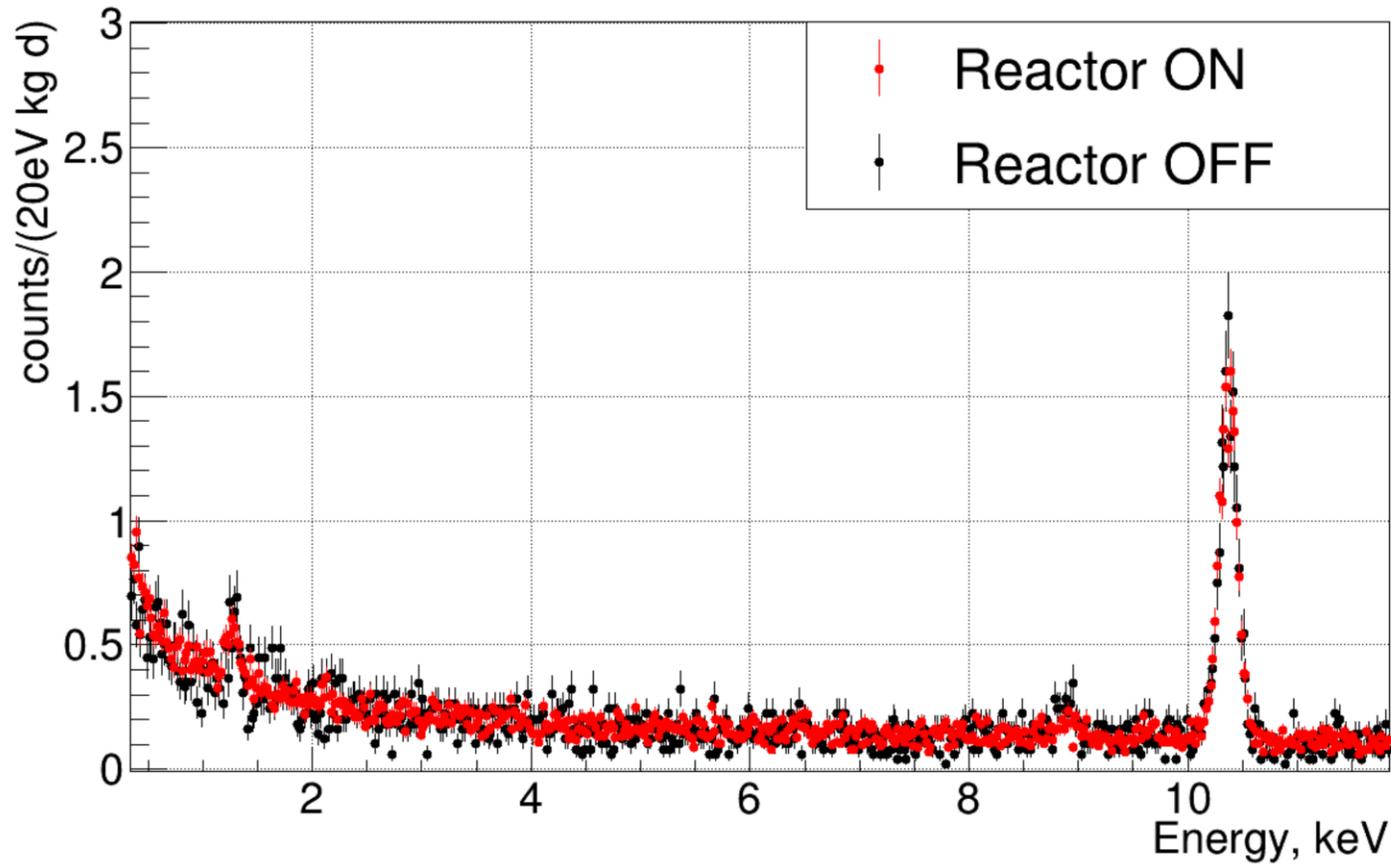
**Модель квенчинга Линдхарда
(используется в эксперименте
CONUS/CONUS+) – далее С**

Модель Dresden-II – далее D1

Модель Dresden-II – далее D2

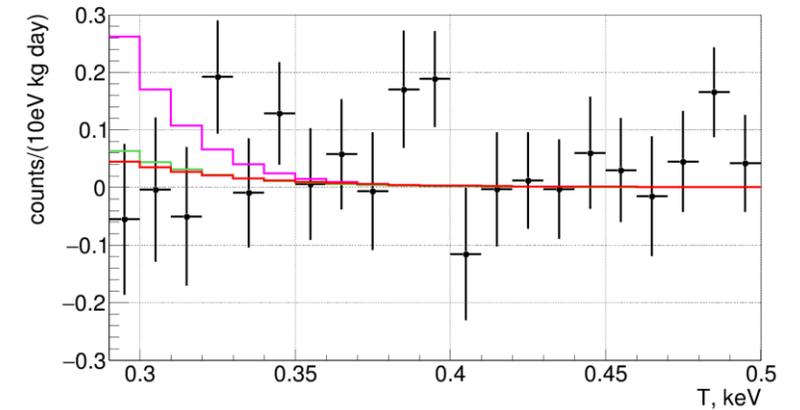
[arXiv:2401.07684]

Результаты

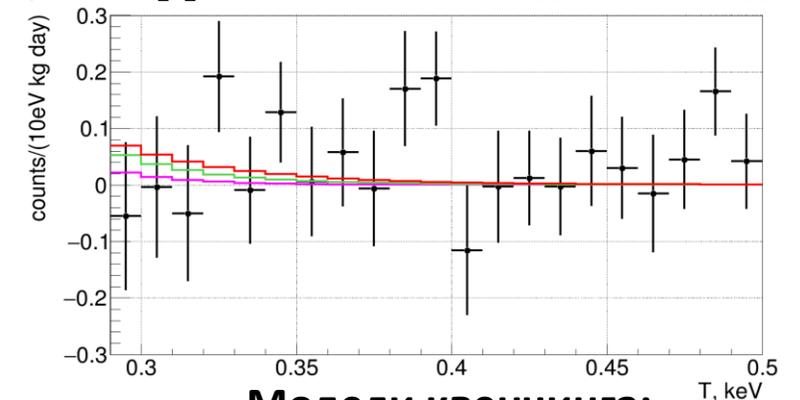


Сравнение нормированных полученных спектров при **включенном (195.5 кг·д)** и при выключенном (54.6 кг·д) реакторе

Разница в спектрах ON-OFF:
Ожидаемый эффект



Оценка эффекта на основе подгонки (fit) данных



Модели квенчинга:

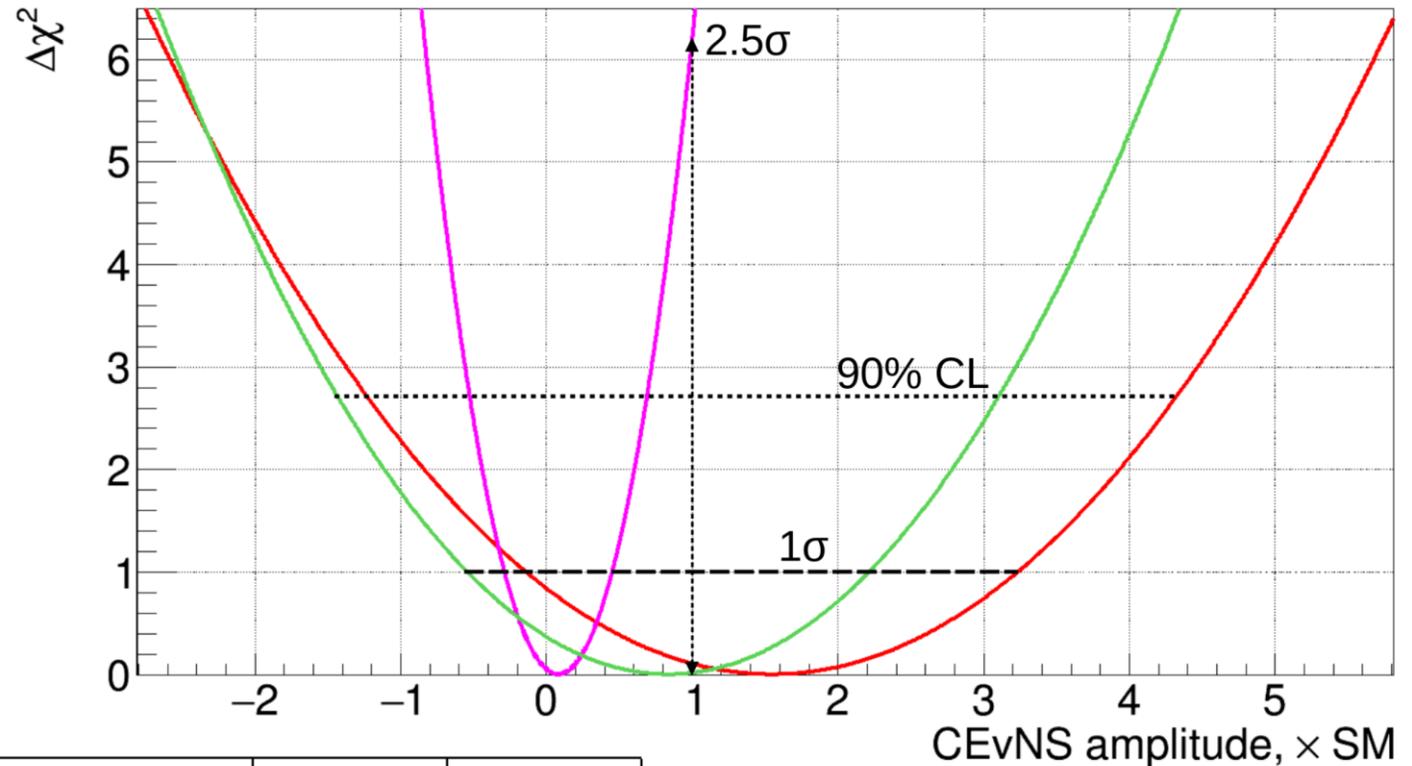
C, D1, D2

Результаты

Модель квенчинга Линдхарда
(CONUS/CONUS+) – C

Модель Dresden-II – D1

Модель Dresden-II – D2



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

Планы на 2025

- Установка системы комптоновского вето (на основе NaI) для подавления событий многократного рассеяния в детекторной установке
- Модификация системы охлаждения детектора для уменьшения вибраций и связанных с ними акустических шумов в области интереса
- Обновление электроники и системы накопления данных для записи и последующего анализа форм сигналов.
- **Цель всех изменений – уменьшение порога 290 эВ -> 150-200 эВ**



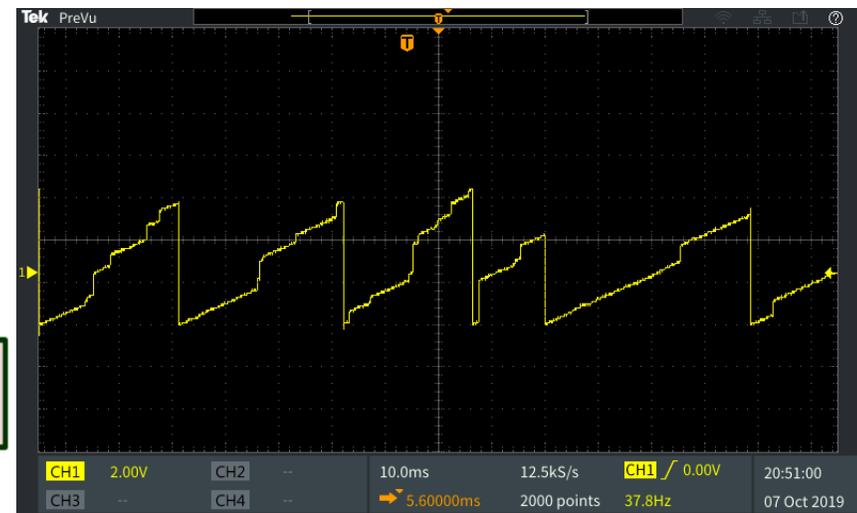
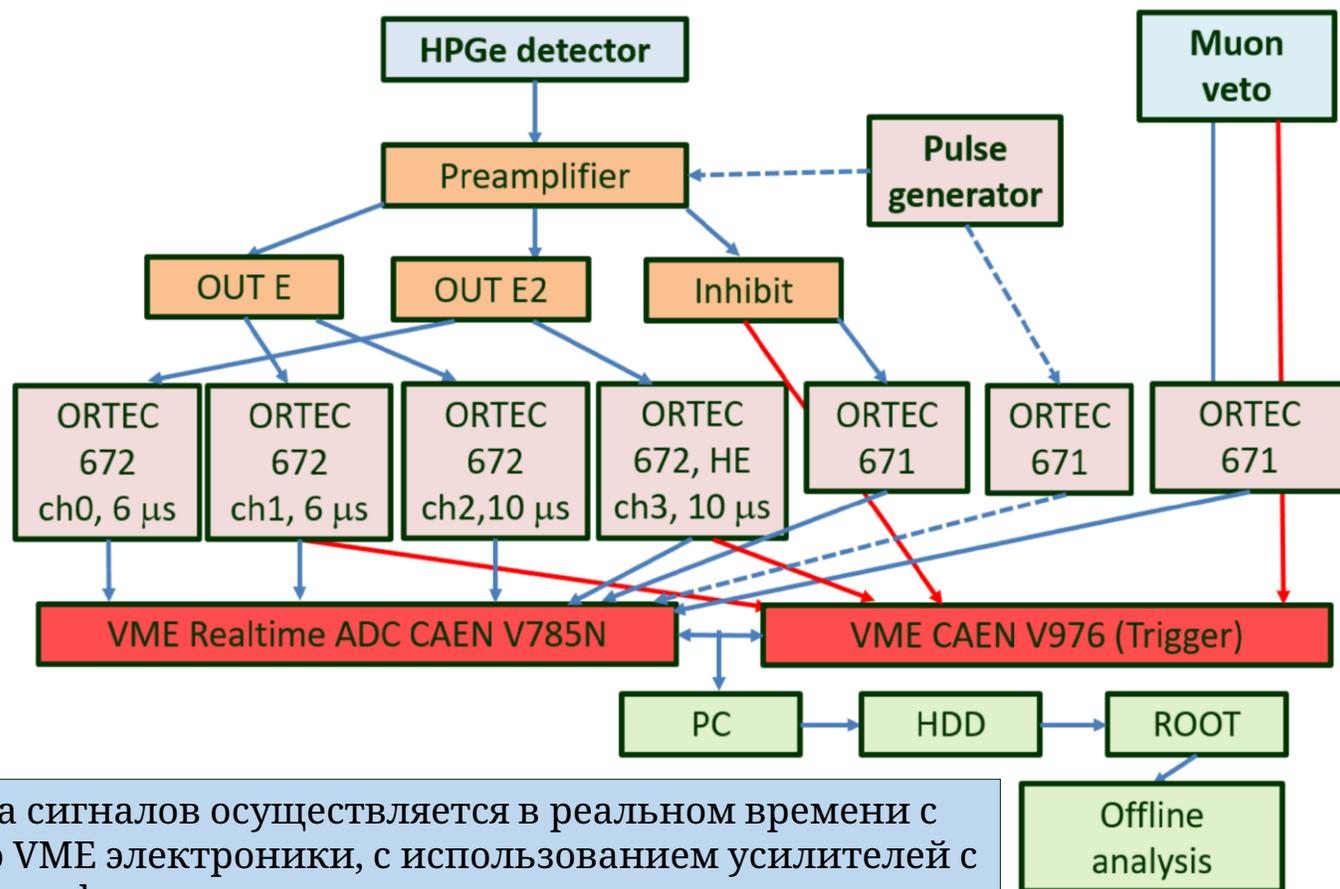
Тестовые измерения с HPGe детектором массой 1 кг



Заключение

- Достигнутый в измерительной установке на КЛНАЭС уровень фона не меняется при включенном/выключенном реакторе, что позволяет напрямую сравнивать данные без использования моделей фона.
- Поставлено верхнее ограничение на величину сечения УКРН. Результаты эксперимента не подтверждают самую оптимистичную модель квенчинга (QF), используемую в эксперименте Dresden-II
- Идет подготовка к апгрейду измерительной установки в середине 2025 года. Цель - достичь меньший энергетический порог в 150-200 эВ
- В следующий анализ будет включен большой набор накопленных данных
- Продолжаются работы по составлению полной модели фона для достижения большей чувствительности при поиске УКРН
- Идет анализ по оценке влияния используемых моделей спектров антинейтрино при поиске УКРН (См. доклад Д.Саутнера Расчет ожидаемого сигнала от упругого когерентного рассеяния нейтрино в эксперименте νGeN)
- Представленные результаты отправлены на публикацию в Chinese Physics C
- Продолжается набор данных на КЛНАЭС

Система накопления данных



В предусилителе используется схема со сбросом сигнала. Типичная частота сброса в фоновых измерениях $\approx 5-30$ Hz. Предусмотрен сигнал запрета (Inhibit) для идентификации нефизических сигналов вызванных сбросом.

Обработка сигналов осуществляется в реальном времени с помощью VME электроники, с использованием усилителей с различными формировками.

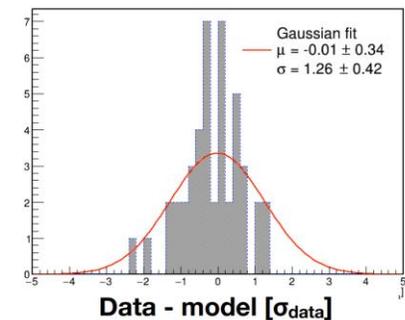
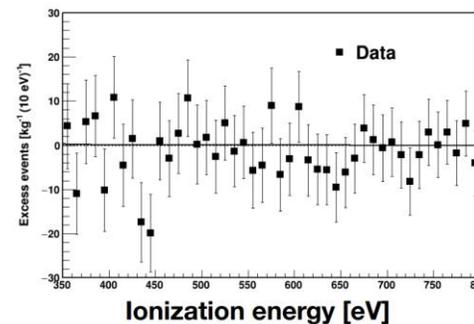
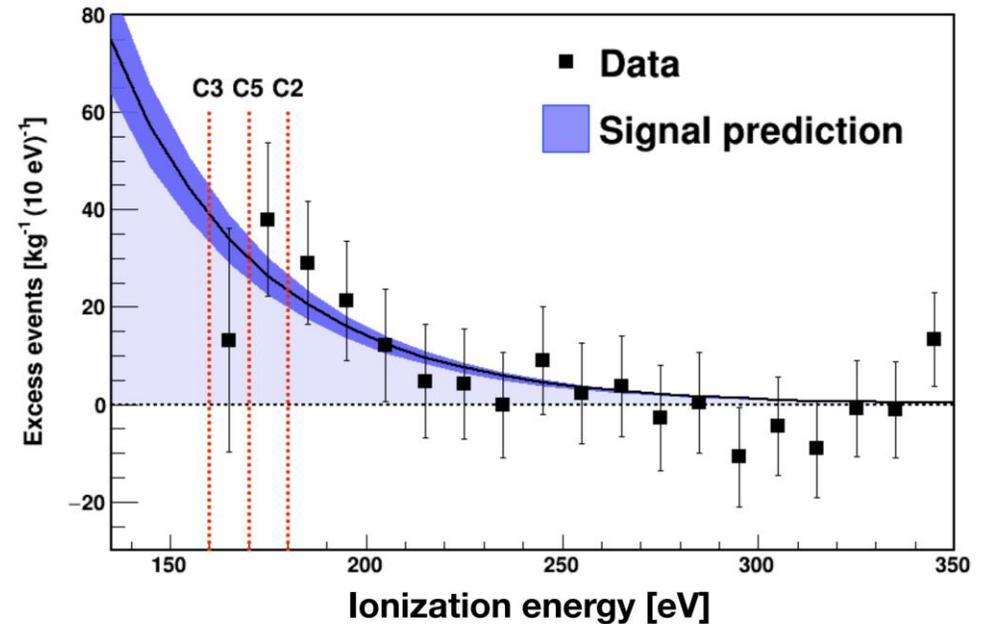
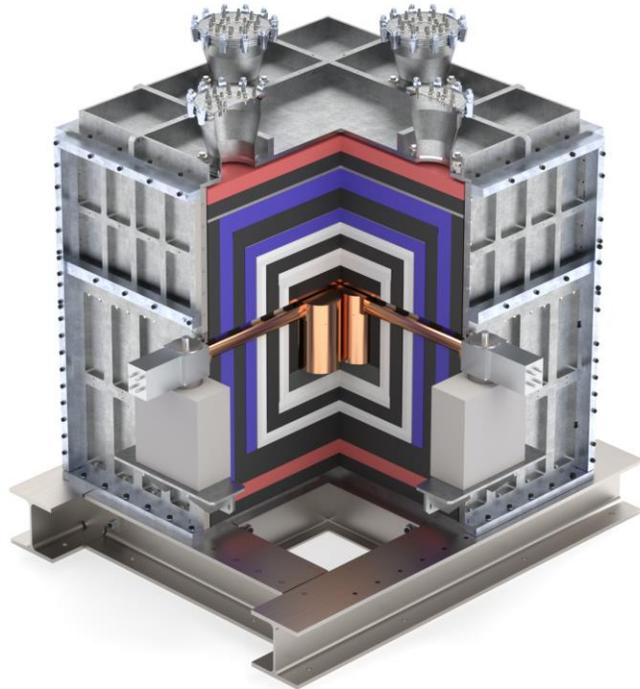
Два динамических диапазона:

низкие энергии: 0.2 – 17 кэВ

высокие энергии (HE): 17 – 1700 кэВ

Результаты эксперимента CONUS+

arXiv:2501.05206

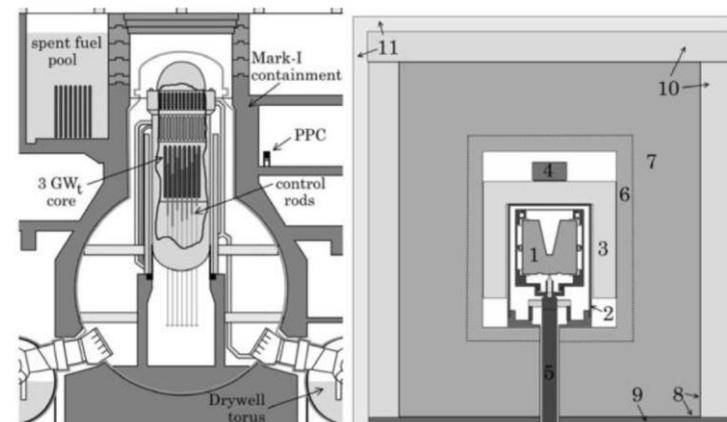
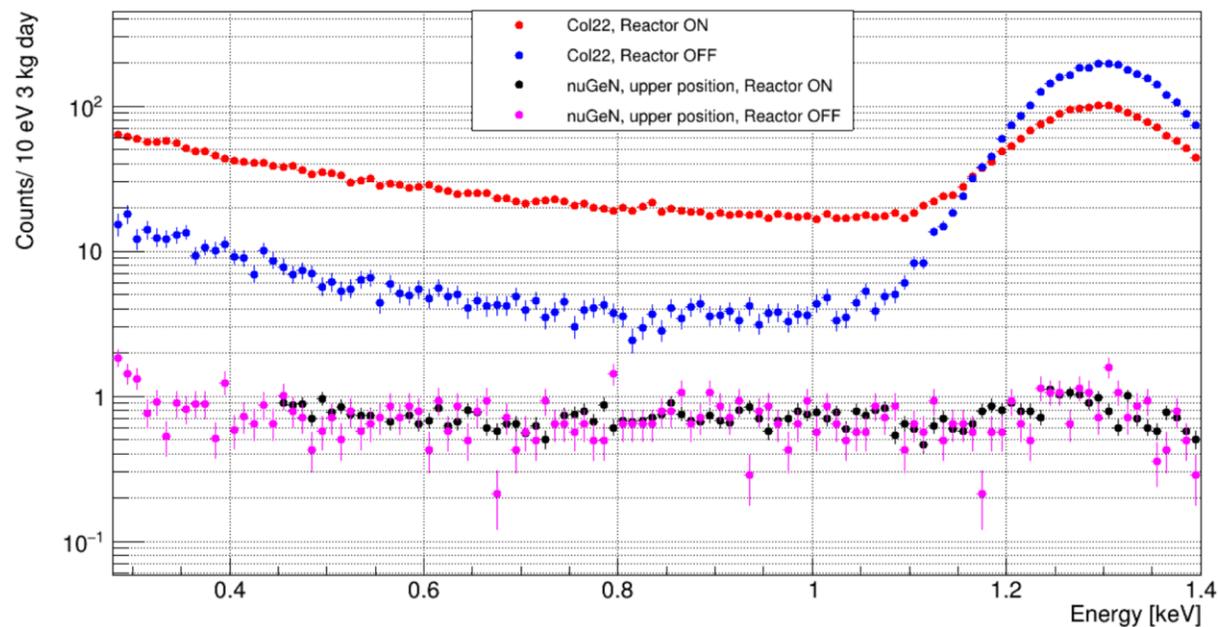


- 4 HPGe детектора, ~1 кг каждый (C2-C5)
- Расположен в 20.8м от 3.6 ГВт(тепловая мощность) реактора Лайбштадт, Швейцария (KKL)
- 347+59 событий предсказано в рамках СМ
- 395+106 событий зарегистрировано
- 327 кг·д данных с включенным реактором
- Результат согласуется с моделью квенчинга Линдхарда и соответствующим значением $k = 0.162$

Сравнение с экспериментом DRESDEN-II

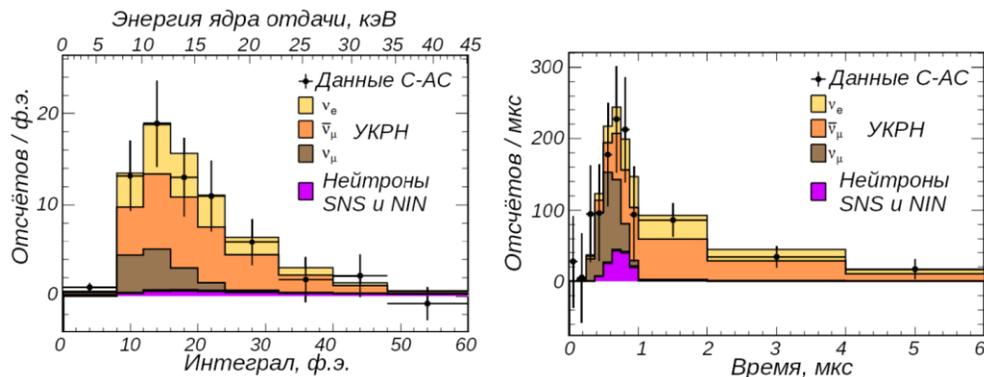
PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 211802 (2022)

- 1 HPGe детектор, ~3 кг
- Заявлено сильное согласие в данных, подтверждающее УКРН ($p < 1.2 \cdot 10^{-3}$)
- Данные: 96.4 дней при включенном реакторе, 25 дней при выключенном
- Умеренное энергетическое разрешение > 160 эВ (FWHM)
- Большая разница в фоне при включенном и выключенном реакторах
- Разная защита при включенном и выключенном реакторах
- Почти нет защиты от быстрых нейтронов



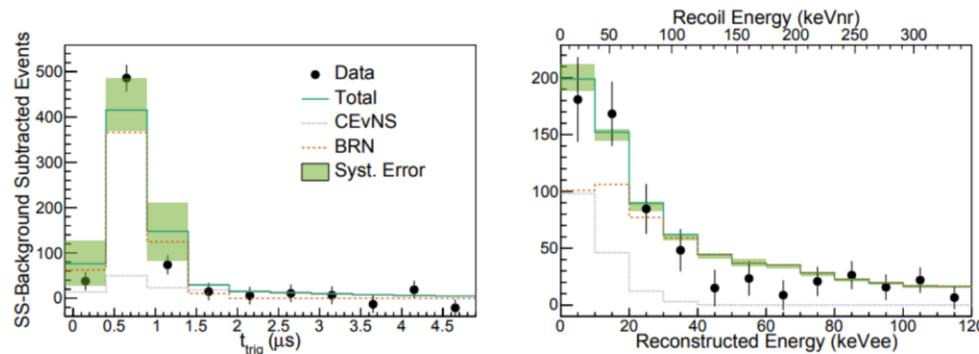
Результаты эксперимента COHERENT

CsI[Na], 14.6 кг



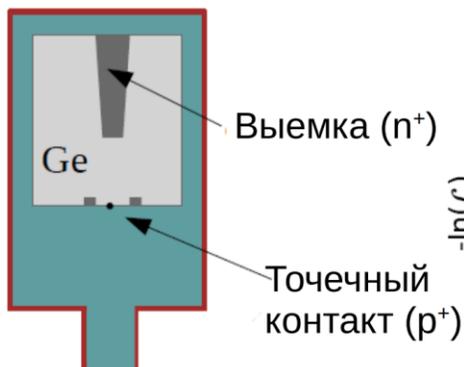
От 7σ (2017 г.) к 12σ (2022 г.)

Жидкий Ar, 24 кг

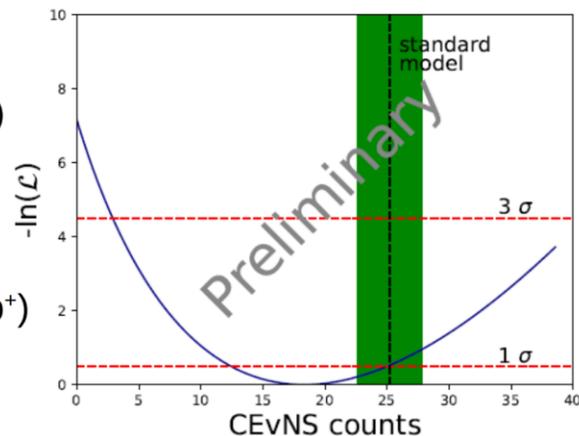


3.1σ (2020 г.) -> результат на полной статистике (2024 г.)

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