



# Статус и результаты эксперимента $\nu$ GeN

Житников Игорь  
от коллаборации  $\nu$ 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  $\nu\text{GeN}$ »
- 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

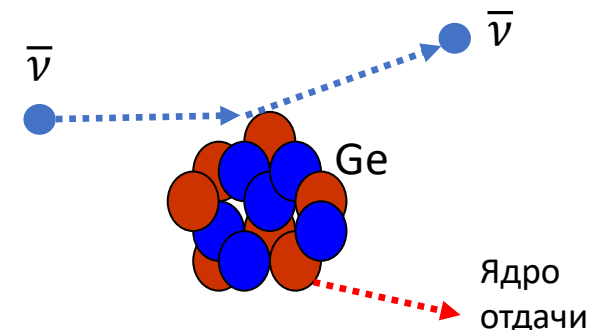
- Упругое когерентное рассеяние нейтрино – процесс, предсказанный в рамках Стандартной модели (СМ).
- Детектирование данного процесса является важным тестом СМ.
- С помощью УРКН можно провести поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, стерильных нейтрино и др.

- $E_\nu < 50$  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)

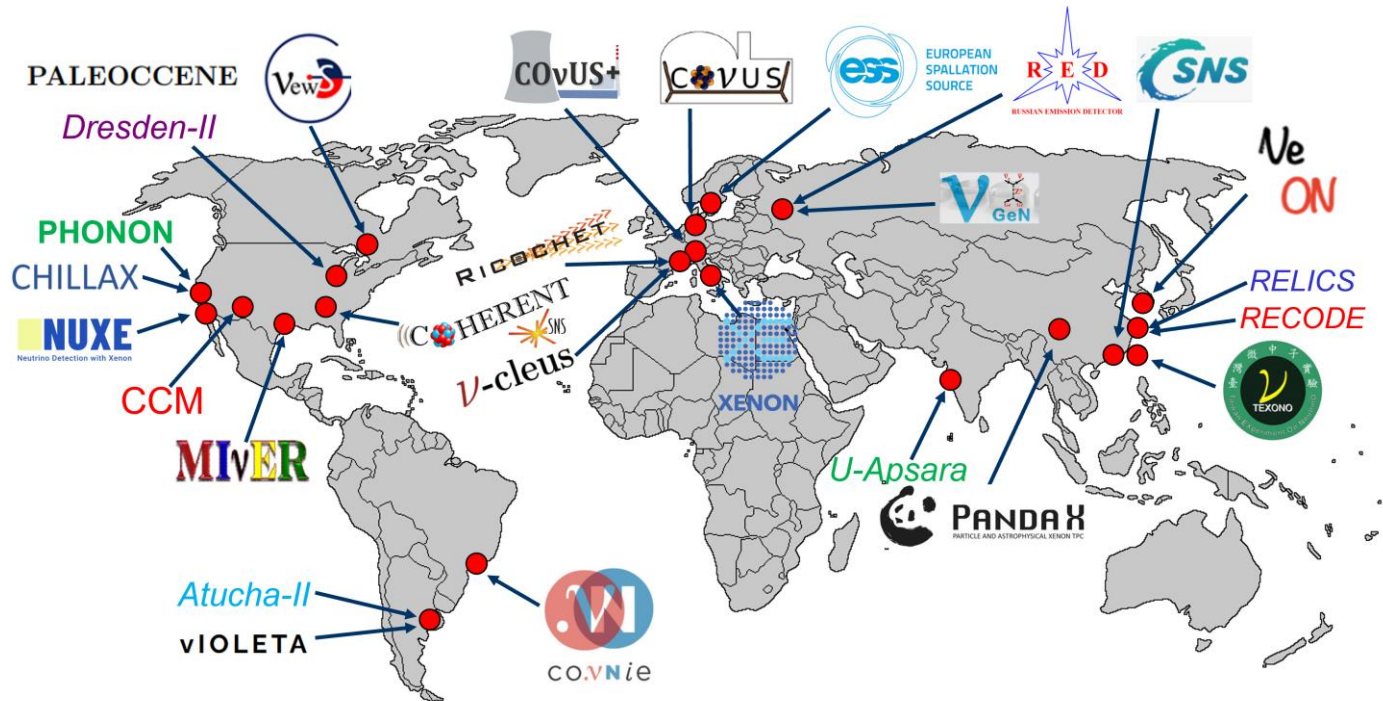


$$\left(\frac{d\sigma}{dT}\right) = \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 M \left[1 - \frac{MT}{2E_\nu^2}\right] F^2(Q^2)$$

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

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

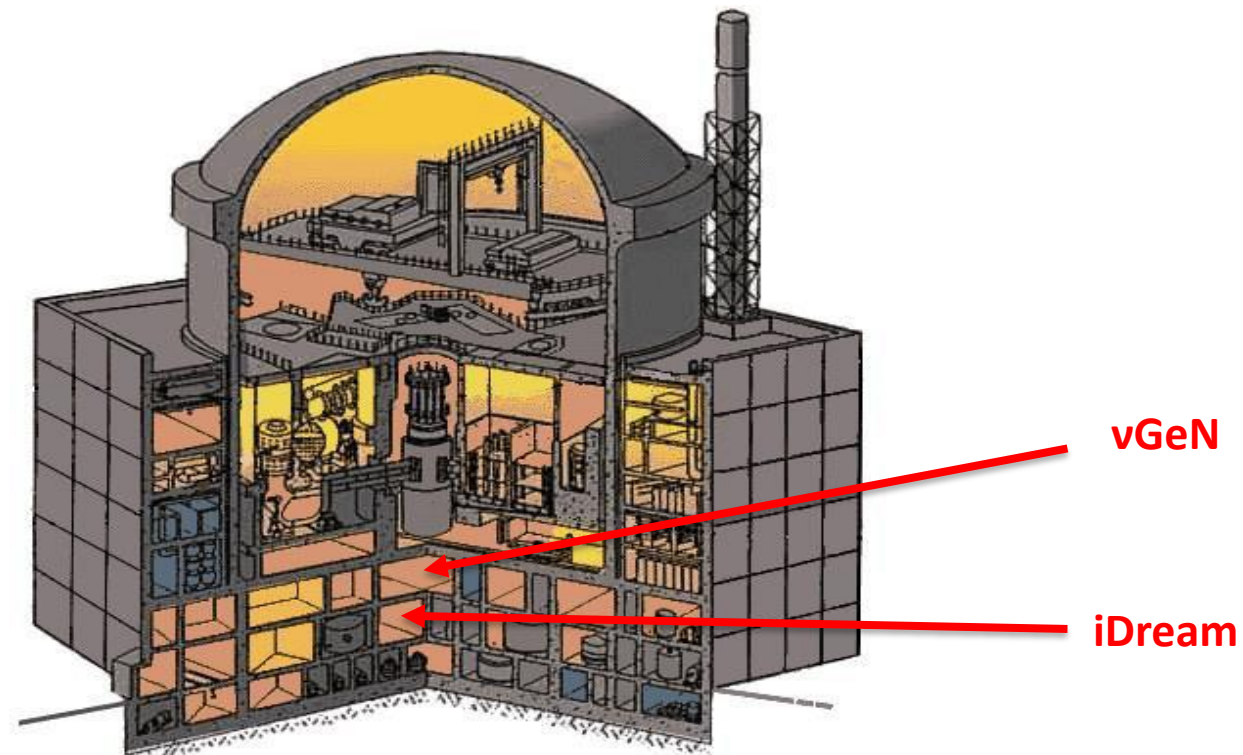
# Эксперименты по поиску УКРН



Сравнение условий экспериментов по поиску УКРН от реакторных антинейтрино

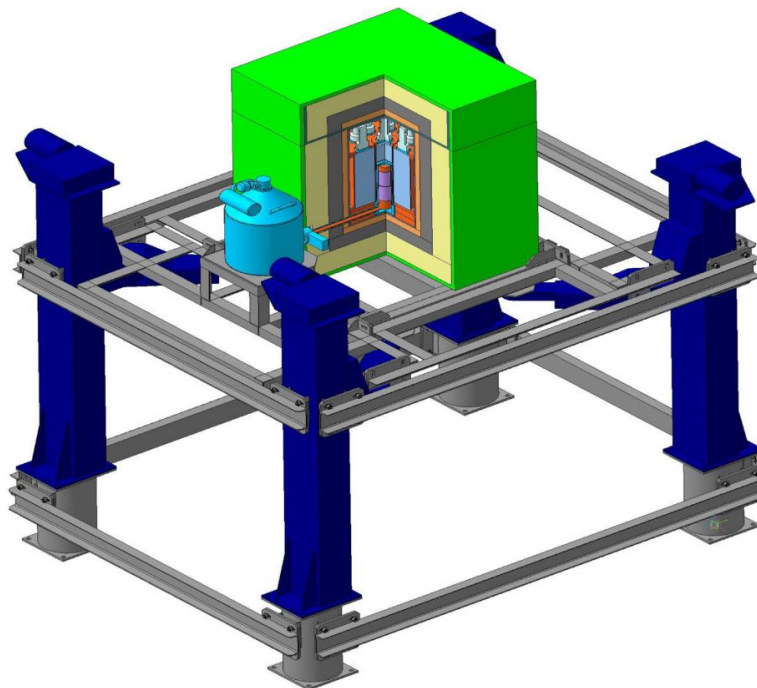
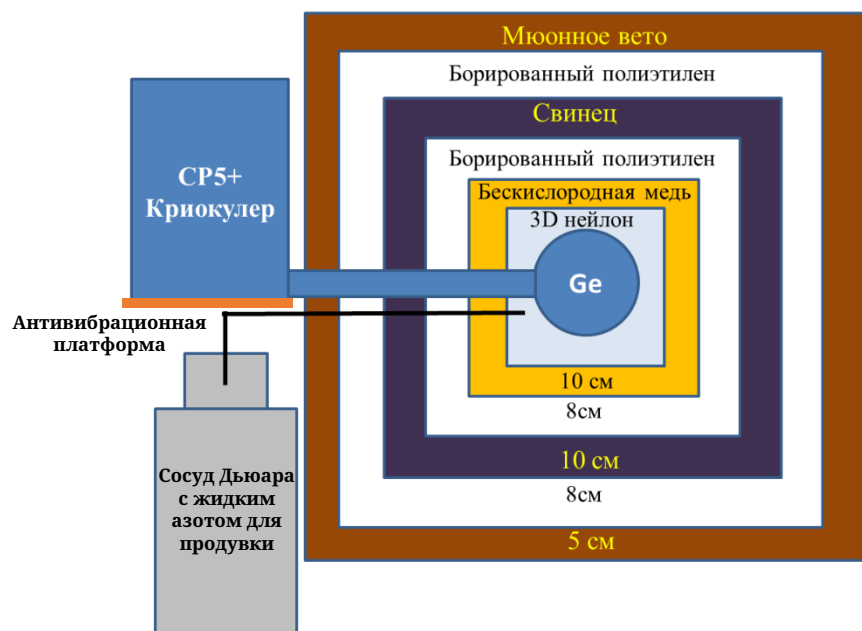
Experiment	Location	Neutrino flux $\nu/(\text{cm}^2 \text{ s})$	Overburden [m w. e.]
vGeN	KNPP, Russia	$\sim(3.6-4.4)\times 10^{13}$	$\sim 50$
CONUS	Brokdorf, Germany	$2.3 \times 10^{13}$	10-45
CONUS+	Leibstadt, Switzerland	$1.45 \times 10^{13}$	7-8
TEXONO	Kuo-Sheng NPP, Taiwan	$6.4 \times 10^{12}$	$\sim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

# Измерительная установка



Расстояние от детектора до центра активной зоны реактора:

11.1 м - верхнее положение

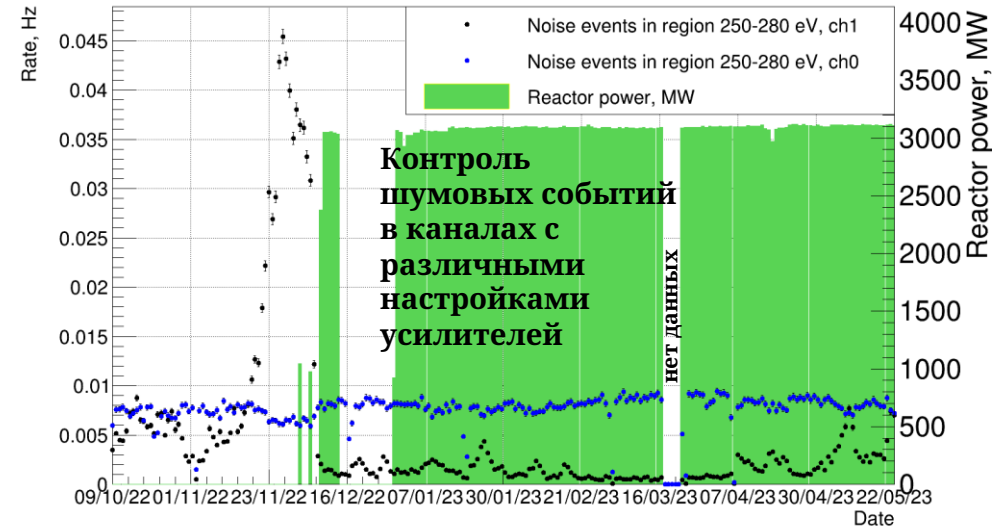
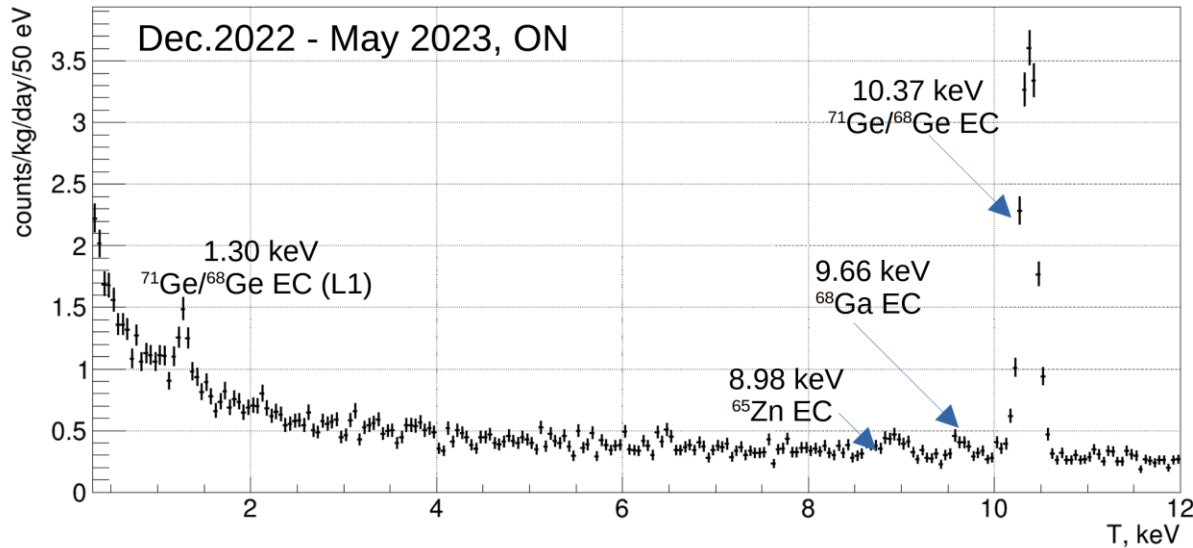
12.5 м - нижнее положение



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

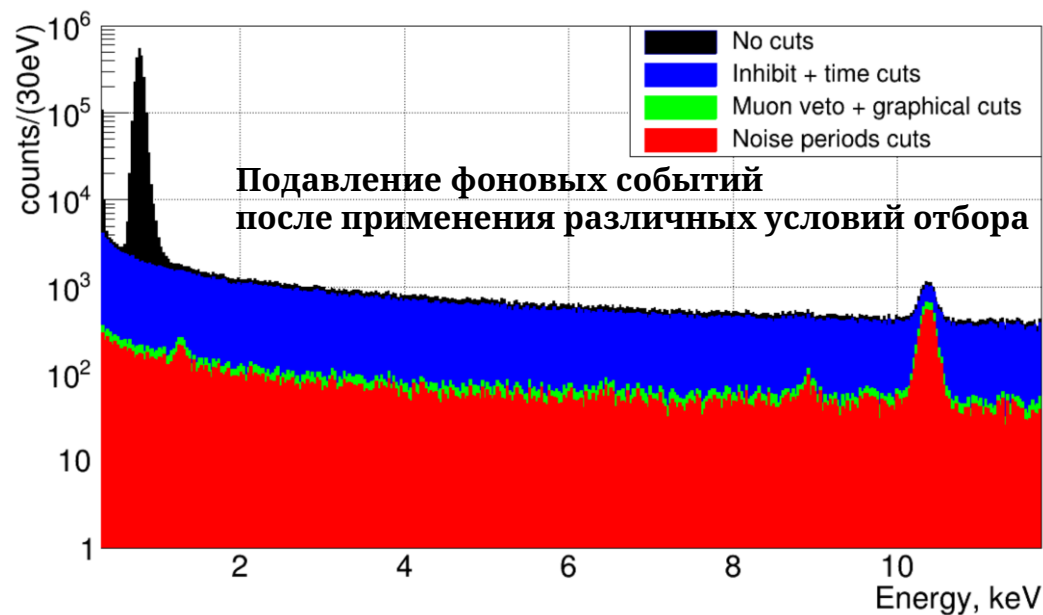
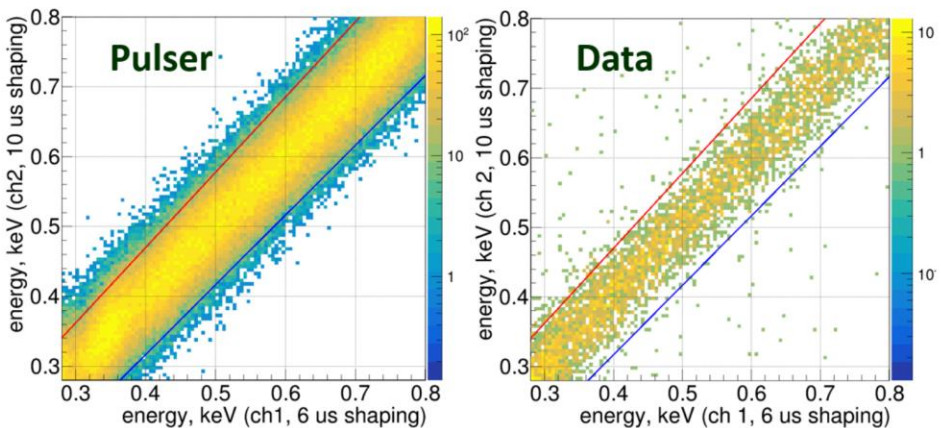
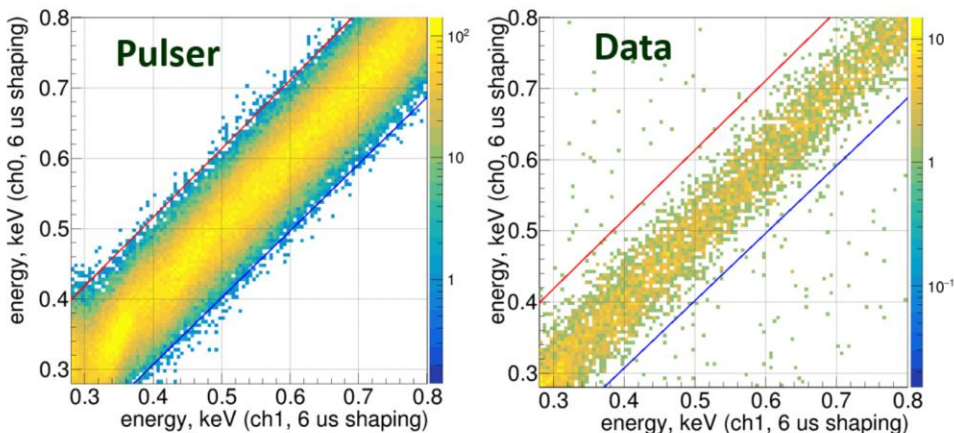
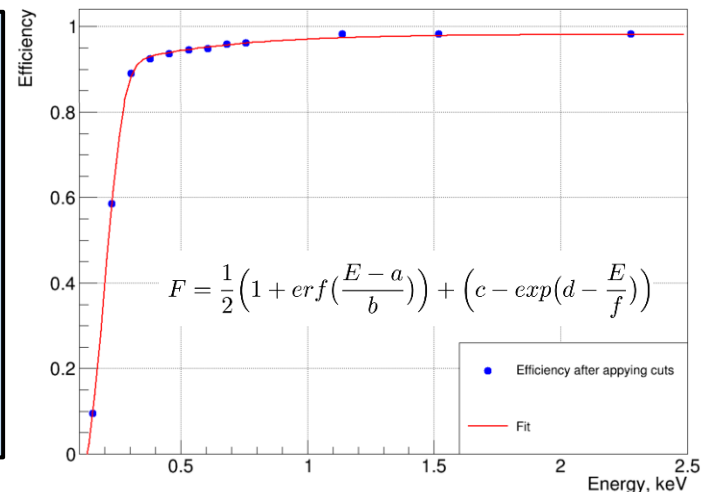
Для отсеивания шумовых событий используются спектрометрические усилители с разной формировкой сигнала

Эффективность триггера с учетом отсеивания шумовых событий:

~40% для 0.2 кэВ

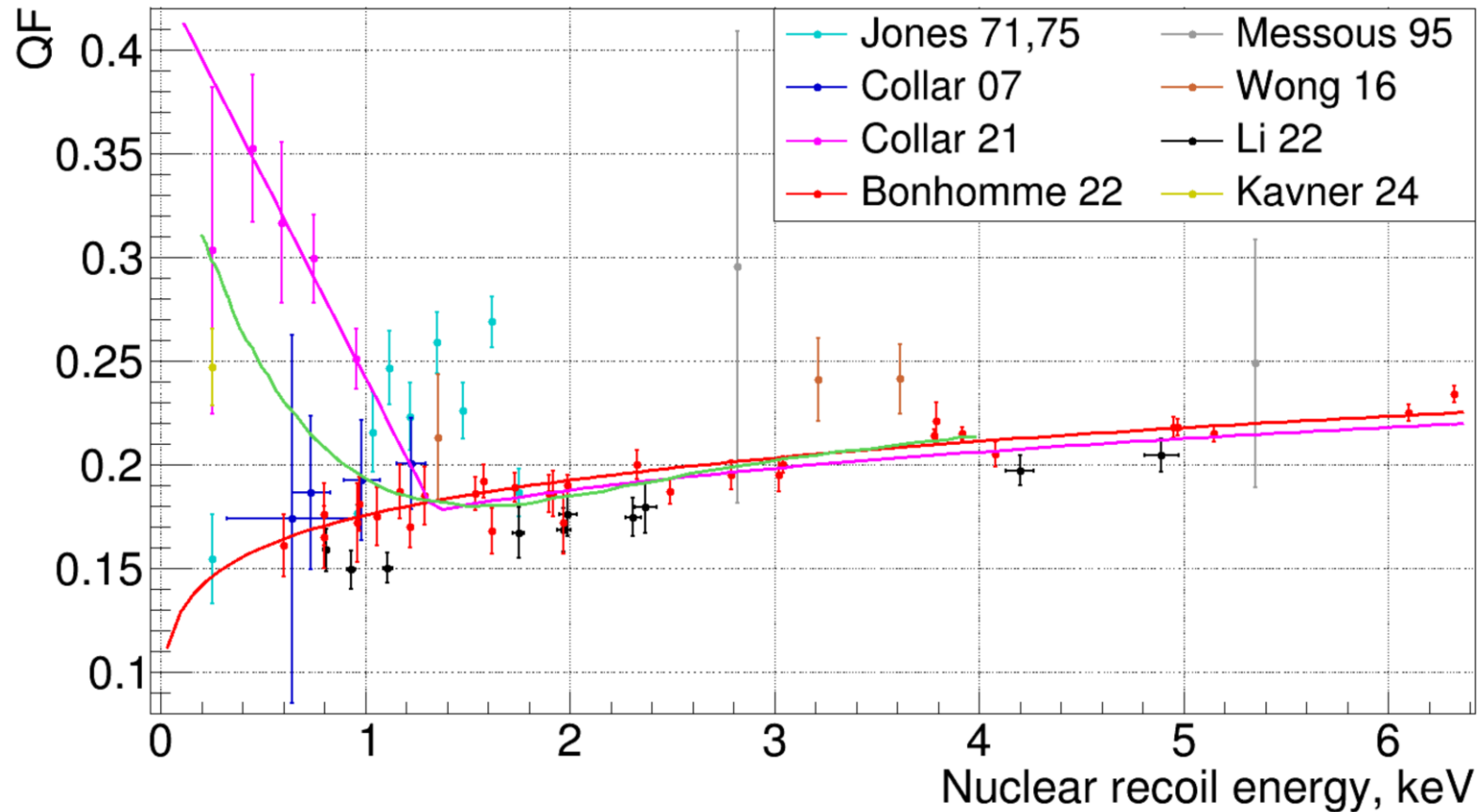
~80% для 0.3 кэВ

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





# Проблема QF (квенчинг фактор)



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

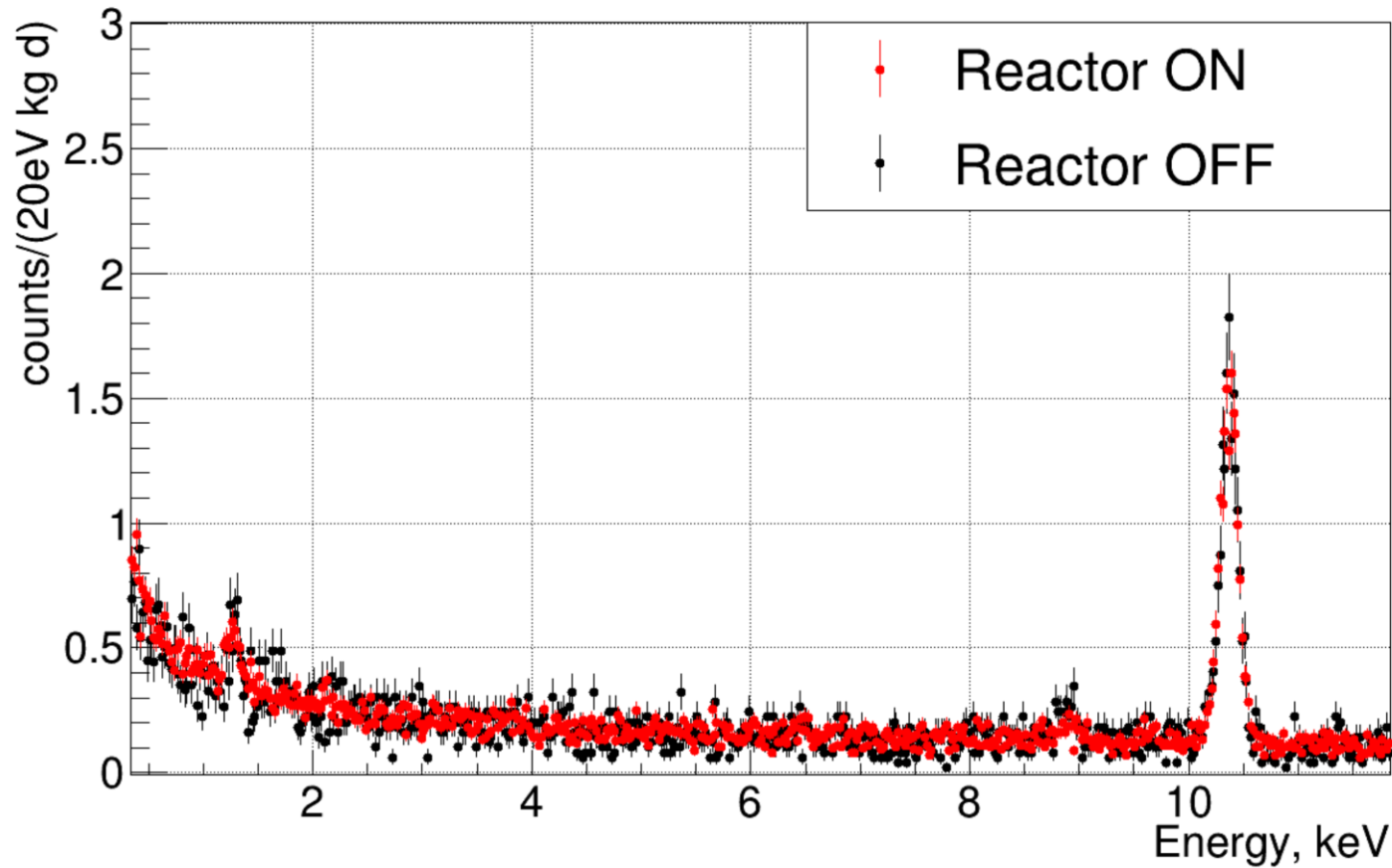
**Модель квенчинга Линдхарда  
(используется в эксперименте  
CONUS/CONUS+) – далее С**

**Модель Dresden-II – далее D1**

**Модель Dresden-II – далее D2**

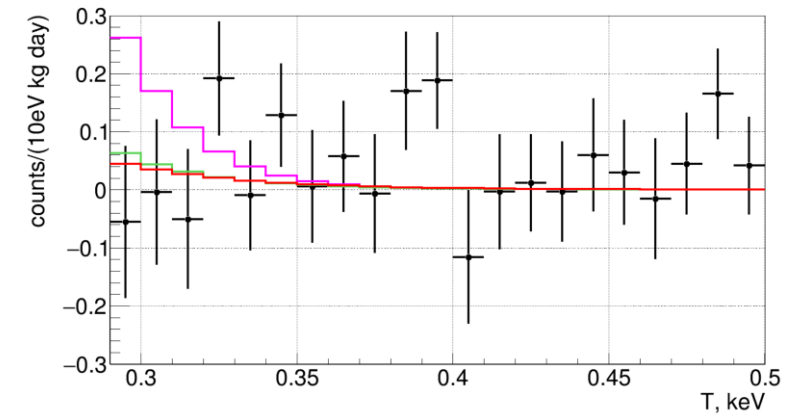
**[arXiv:2401.07684]**

# Результаты

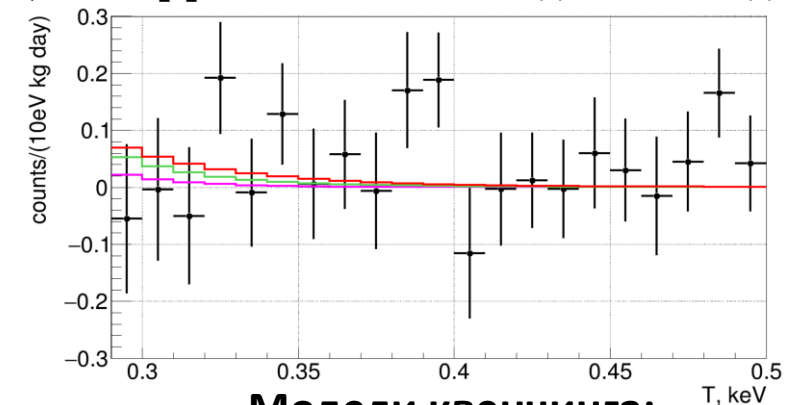


Сравнение нормированных полученных спектров при **включенном (195.5 кг·д)** и при выключенном (54.6 кг·д) реакторе

Разница в спектрах ON-OFF:  
Ожидаемый эффект



Оценка эффекта на основе подгонки(fit) данных



Модели квенчинга:

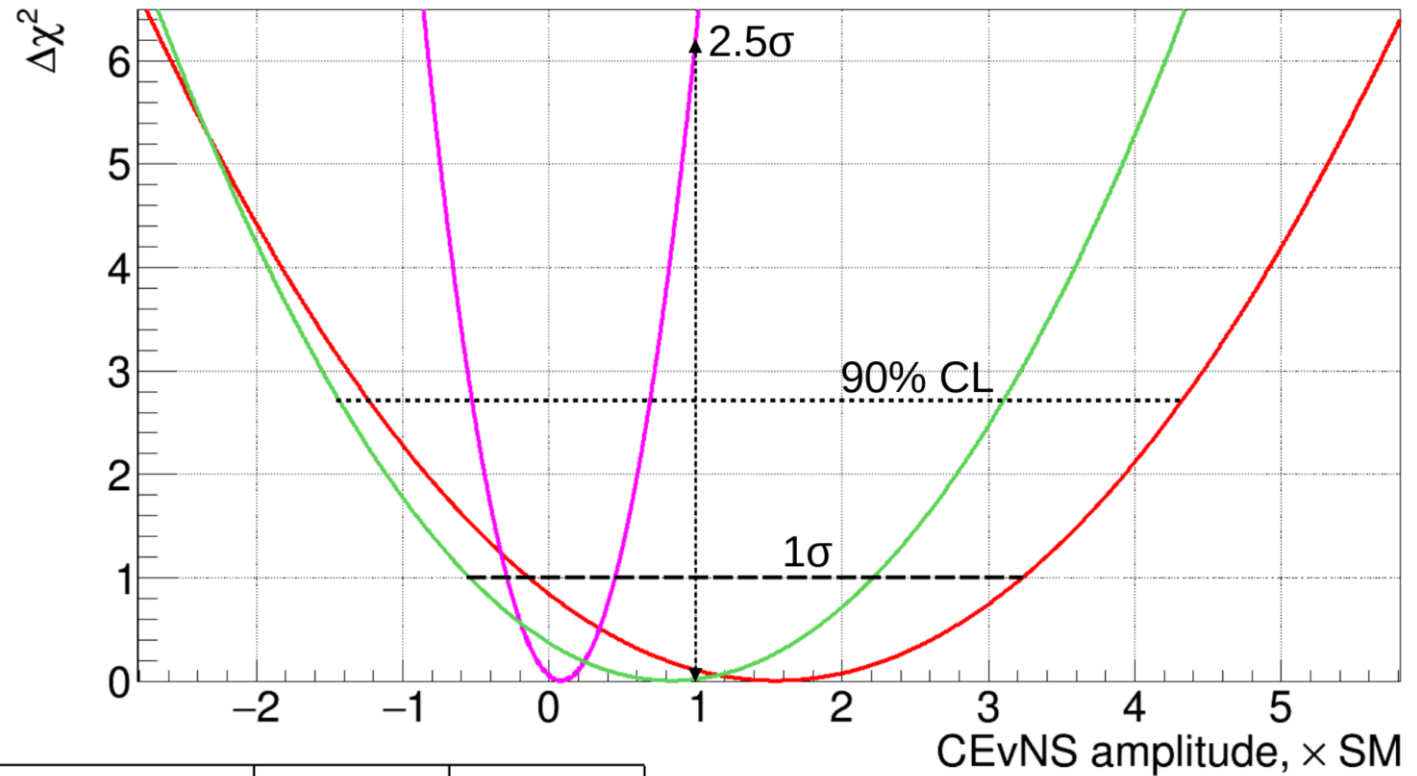
C, D1, D2

# Результаты

Модель квенчинга Линдхарда  
(CONUS/CONUS+) – C

Модель Dresden-II – D1

Модель Dresden-II – D2



QF	$A_{best} \pm \sigma_A, \times \text{SM}$	$\chi_{best}^2$ (ndf=10)	S, $\times \text{SM}$	L, $\times \text{SM}$
<b>C</b>	$1.5 \pm 1.7$	13.6	3.8	4.3
<b>D1</b>	$0.1 \pm 0.4$	14.4	1.6	0.7
<b>D2</b>	$0.8 \pm 1.4$	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**



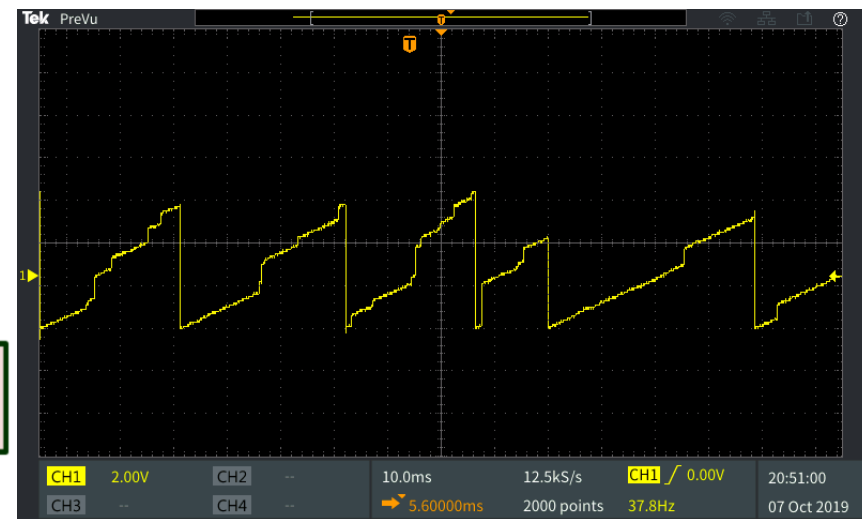
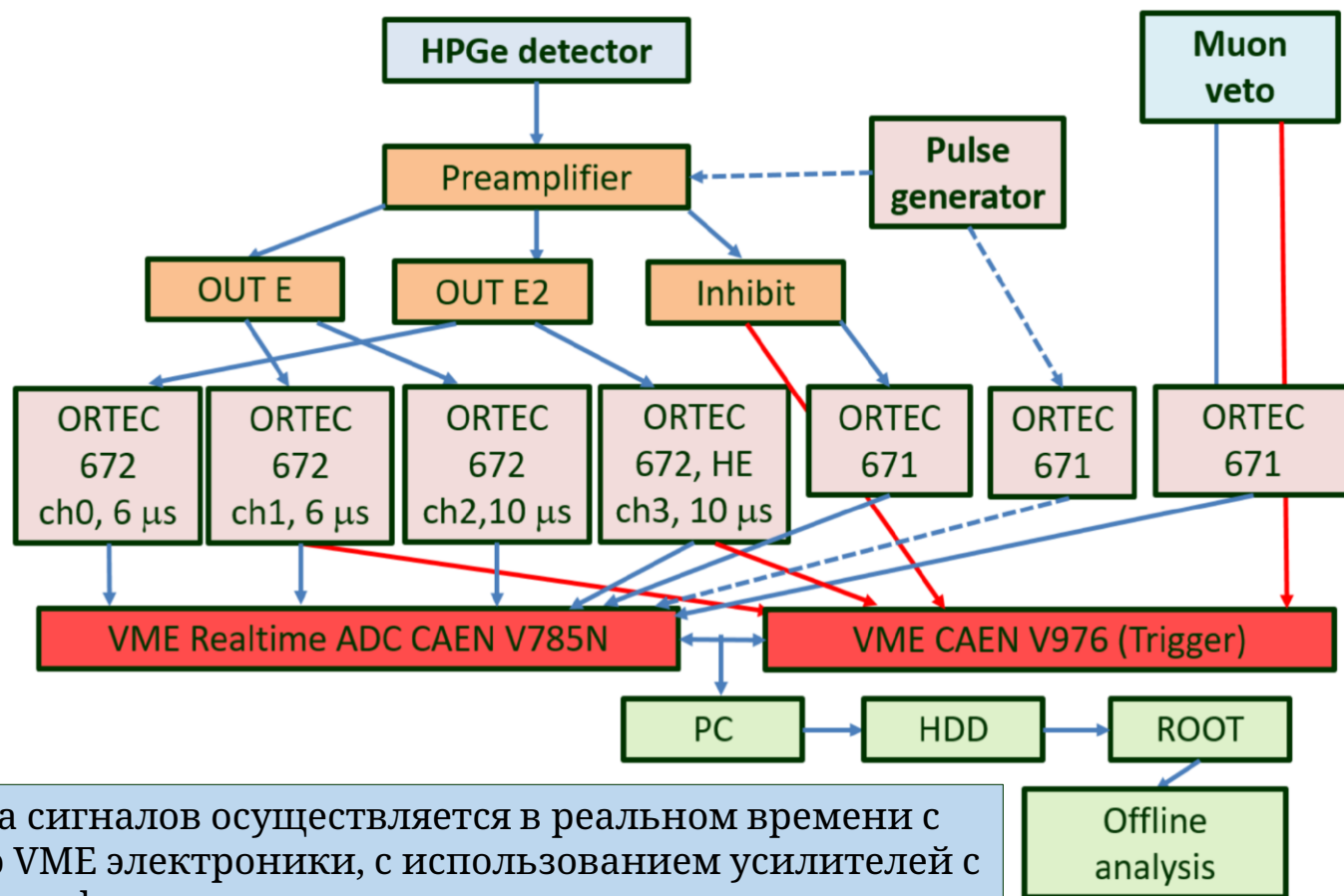
Тестовые измерения с HPGe детектором массой 1 кг



# 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 Расчёт ожидаемого сигнала от упругого когерентного рассеяния нейтрино в эксперименте  $\nu\text{GeN}$ )
- 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.

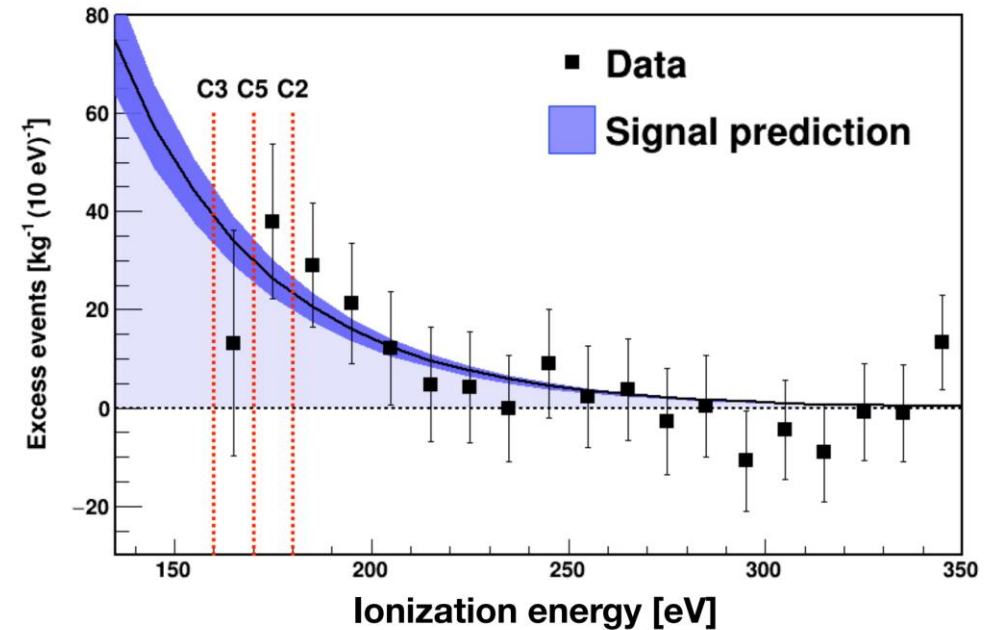
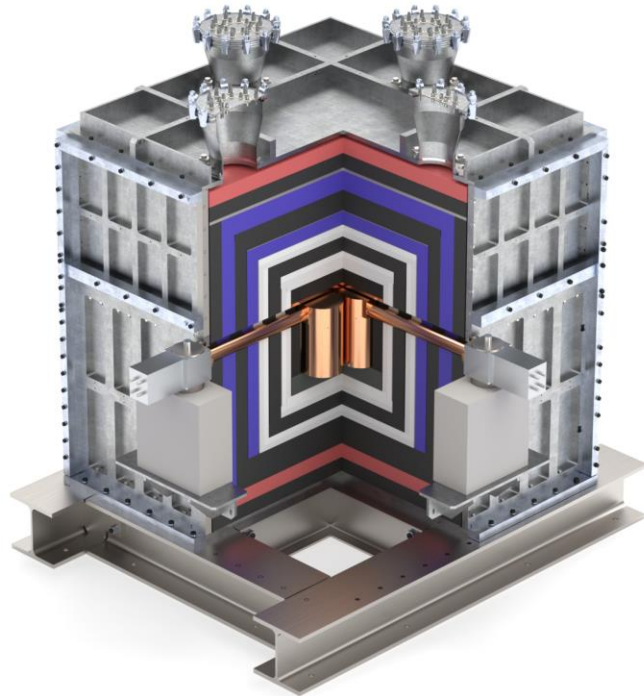
Два динамических диапазона:

низкие энергии: 0.2 – 17 кэВ

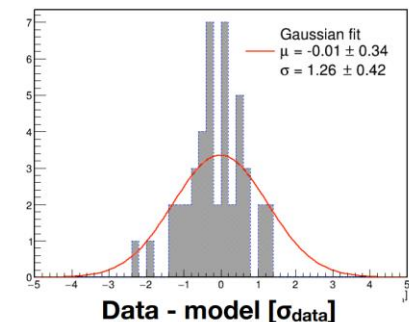
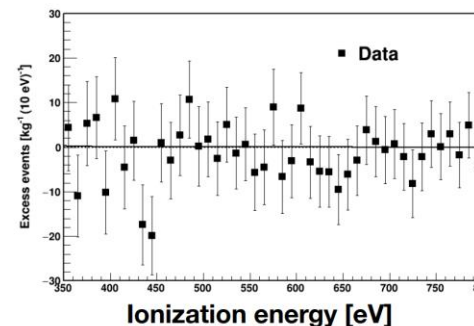
высокие энергии (HE): 17 – 1700 кэВ

# Результаты эксперимента CONUS+

arXiv:2501.05206



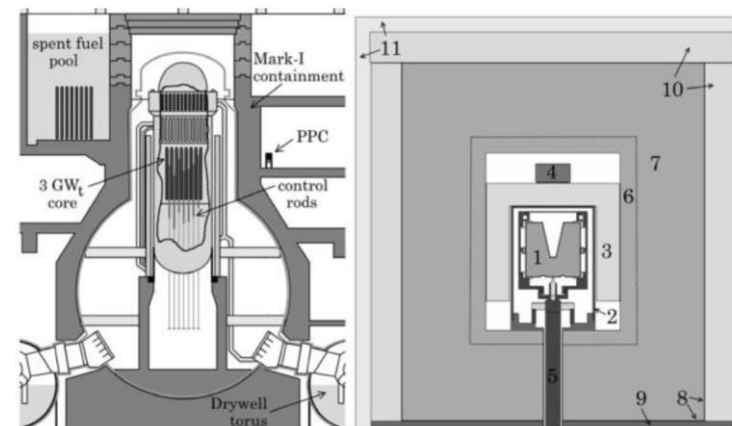
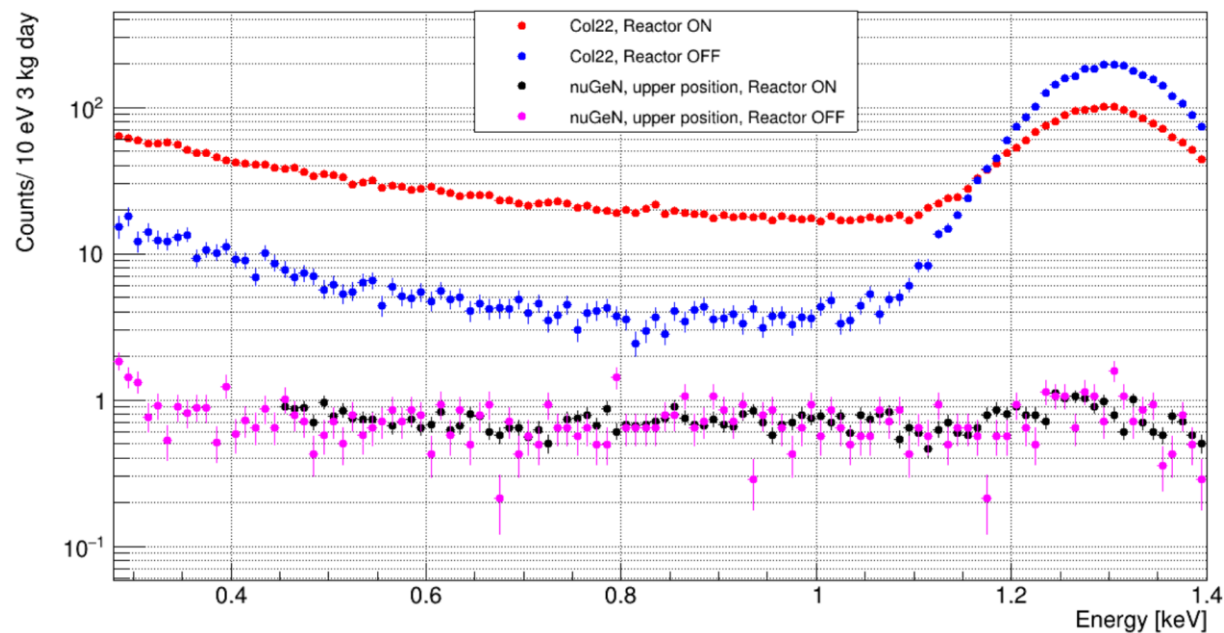
- 4 HPGe детектора,  $\sim 1$  кг каждый (C2-C5)
- Расположен в 20.8м от 3.6 ГВт(тепловая мощность) реактора Лайбштадт, Швейцария (KKL)
- $347 \pm 59$  событий предсказано в рамках СМ
- $395 \pm 106$  событий зарегистрировано
- $327 \text{ кг}\cdot\text{д}$  данных с включенным реактором
- Результат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



# Сравнение с экспериментом DRESDEN-II

PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 211802 (2022)

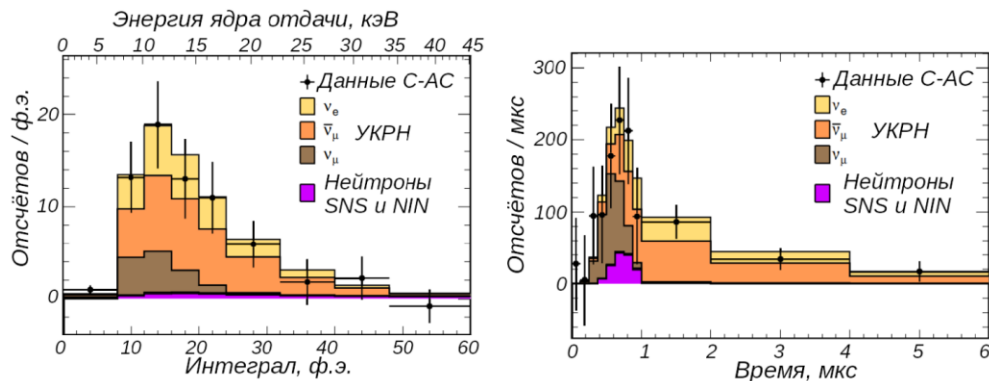
- 1 HPGe детектор, ~3 кг
- Заявлено сильное согласие в данных, подтверждающее УКРН ( $p < 1.2 \cdot 10^{-3}$ )
- Данные: 96.4 дней при включенном реакторе, 25 дней при выключенном
- Умеренное энергетическое разрешение  $> 160$  эВ (FWHM)
- Большая разница в фоне при включенном и выключенном реакторах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





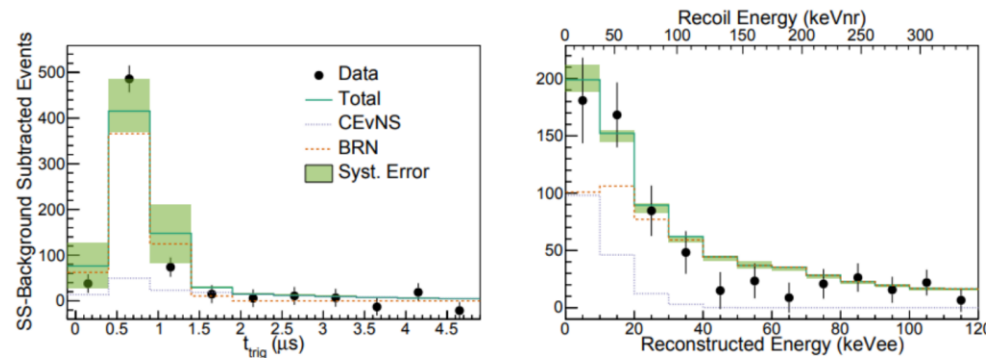
# Результаты эксперимента COHERENT

CsI[Na], 14.6 кг



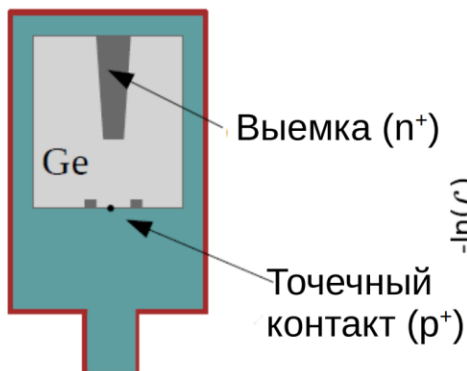
От  $7\sigma$  (2017 г.) к  $12\sigma$  (2022 г.)

Жидкий Ar, 24 кг

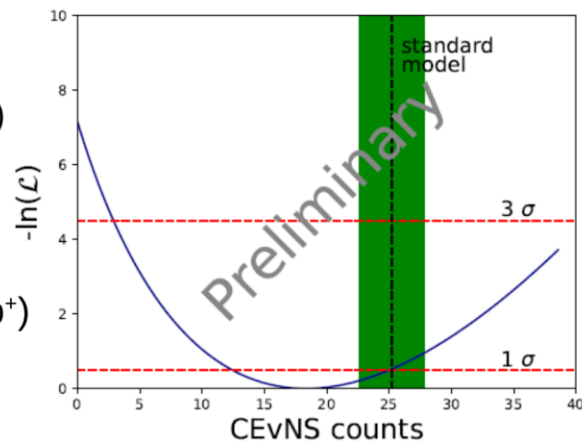


$3.1\sigma$  (2020 г.) -> результат на полной статистике (2024 г.)

## 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<sub>ээ</sub>

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