



Алексей Коновалов (ФИАН, МИФИ)

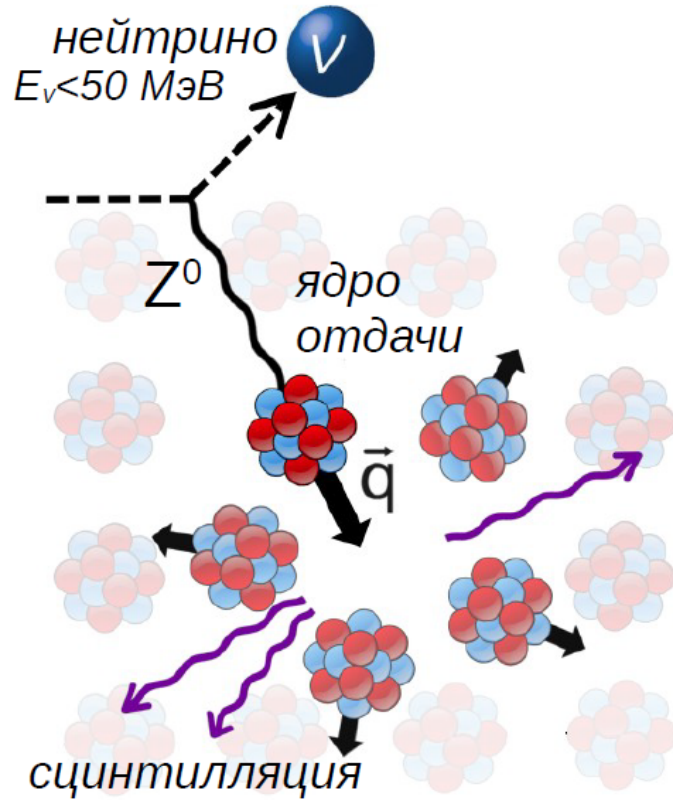
Обнаружение процесса упругого когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре и определение его сечения на ядрах Cs и I

Специальность:

1.3.15 — Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий

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

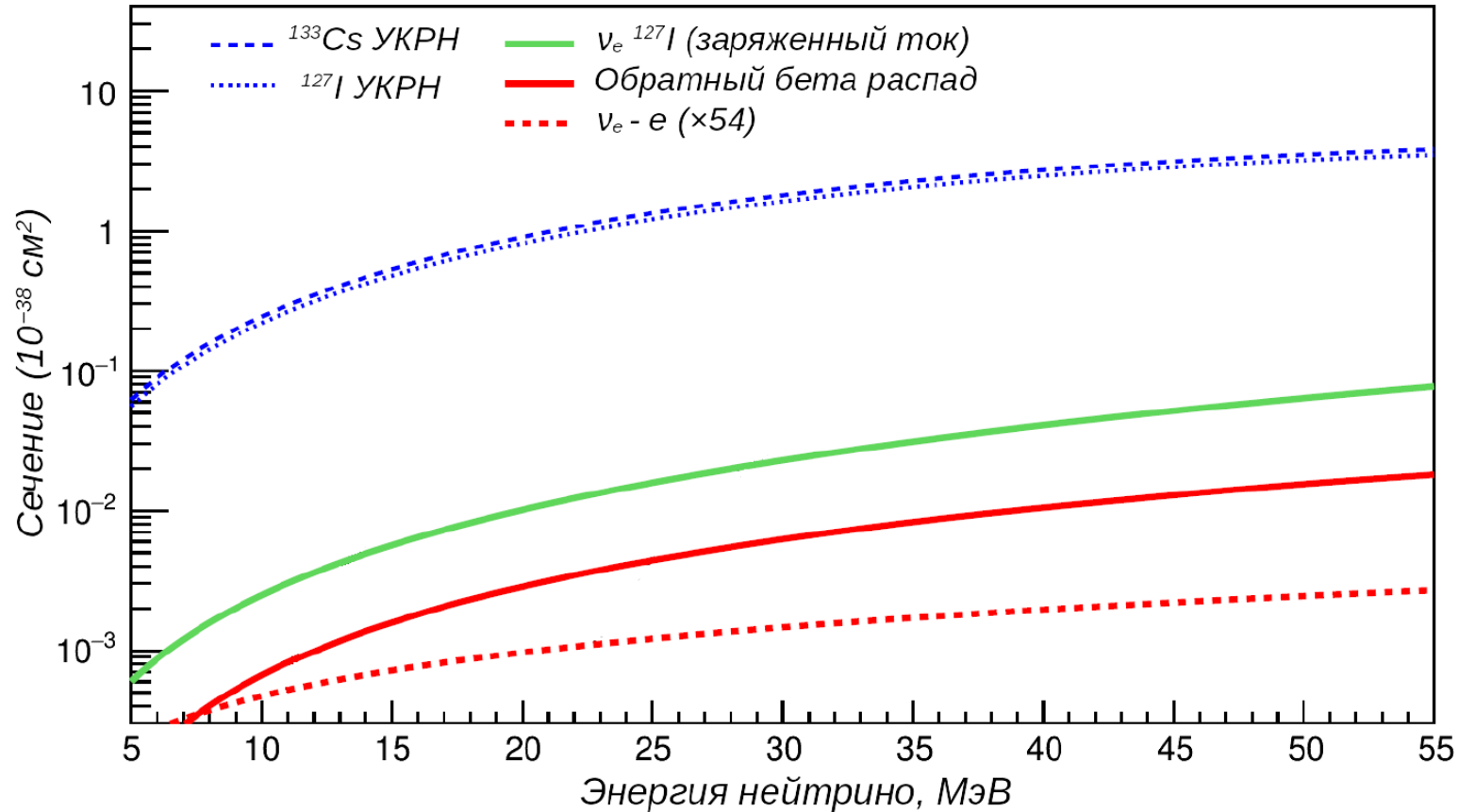
«Изотопическая и киральная структура нейтрального тока»,
В. Копелиович, Л. Франкфурт, Письма в ЖЭТФ, 19 (1974)



Our suggestion may be an act of hubris, because the inevitable constraints of interaction rate, resolution, and background pose grave experimental difficulties for elastic neutrino-nucleus scattering.

Максимальная энергия ядра отдачи

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

Сечение УКРН в рамках Стандартной модели

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

Константа Ферми (параметр СМ)

Кинематика

Слабый заряд

Угол Вайнберга, $\sin^2 \theta_W = 0.239$ (параметр СМ)

Форм-фактор, мера степени интерференции

УКРН «в природе»

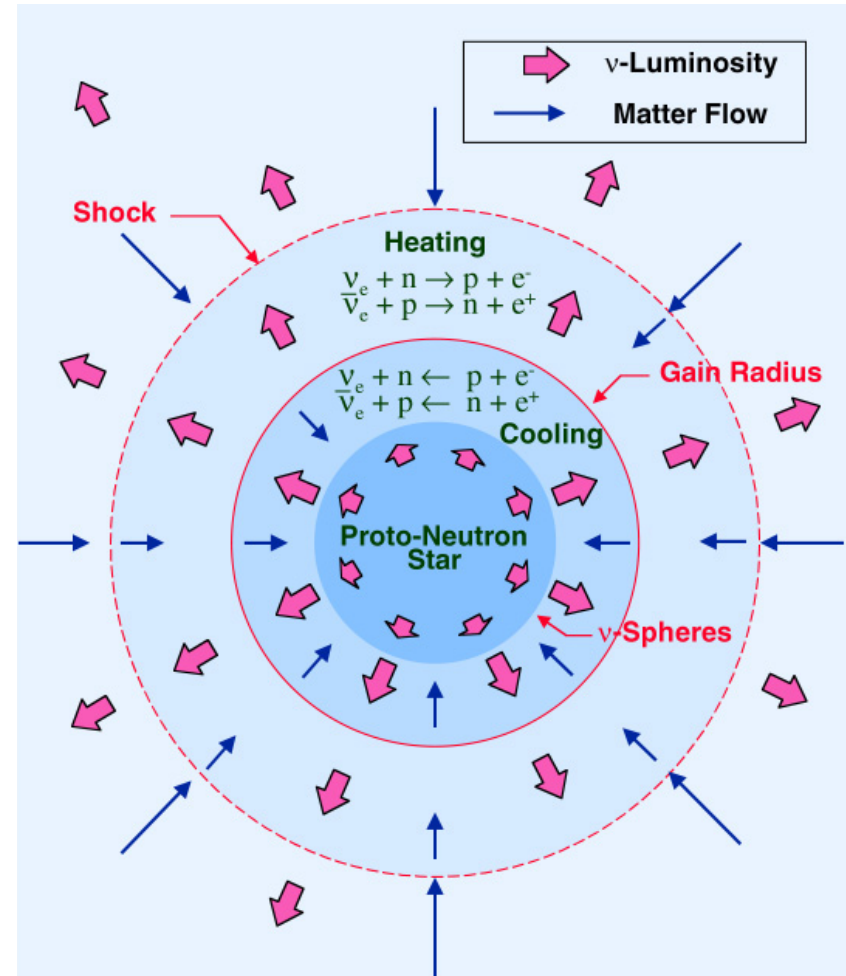
перенос энергии при звёздном
коллапсе

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



УКРН как тест Стандартной модели

поиск признаков «новой физики» в
нейтринном секторе

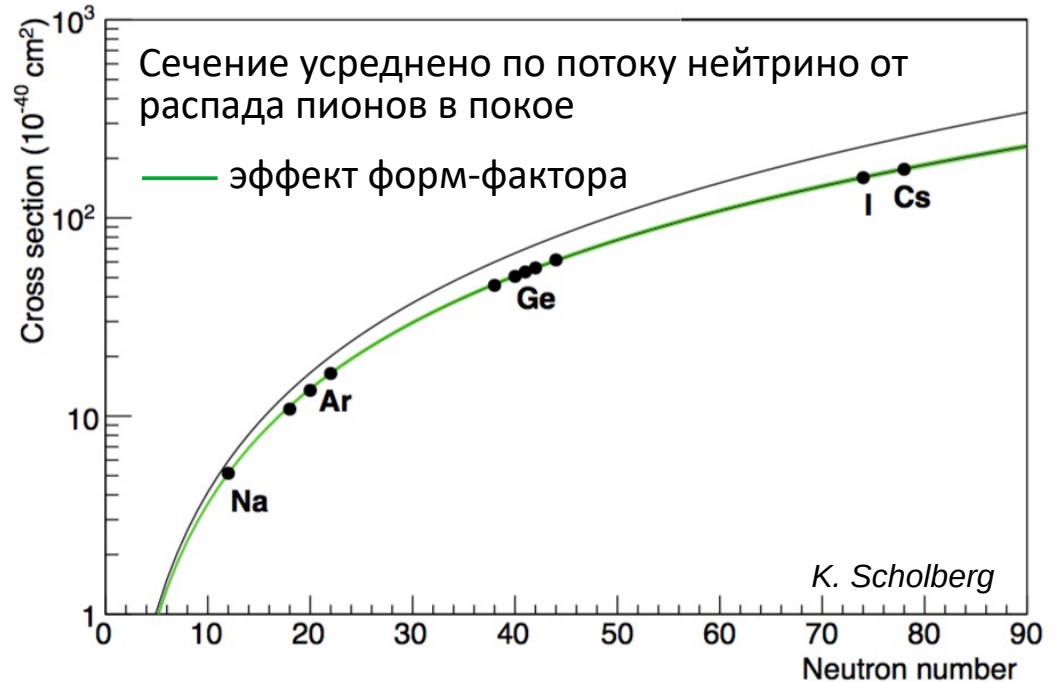
K. Scholberg, PRD 73 033005 (2006)

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 $F^2(Q)=1!$



УКРН как тест Стандартной модели

поиск признаков «новой физики» в нейтринном секторе

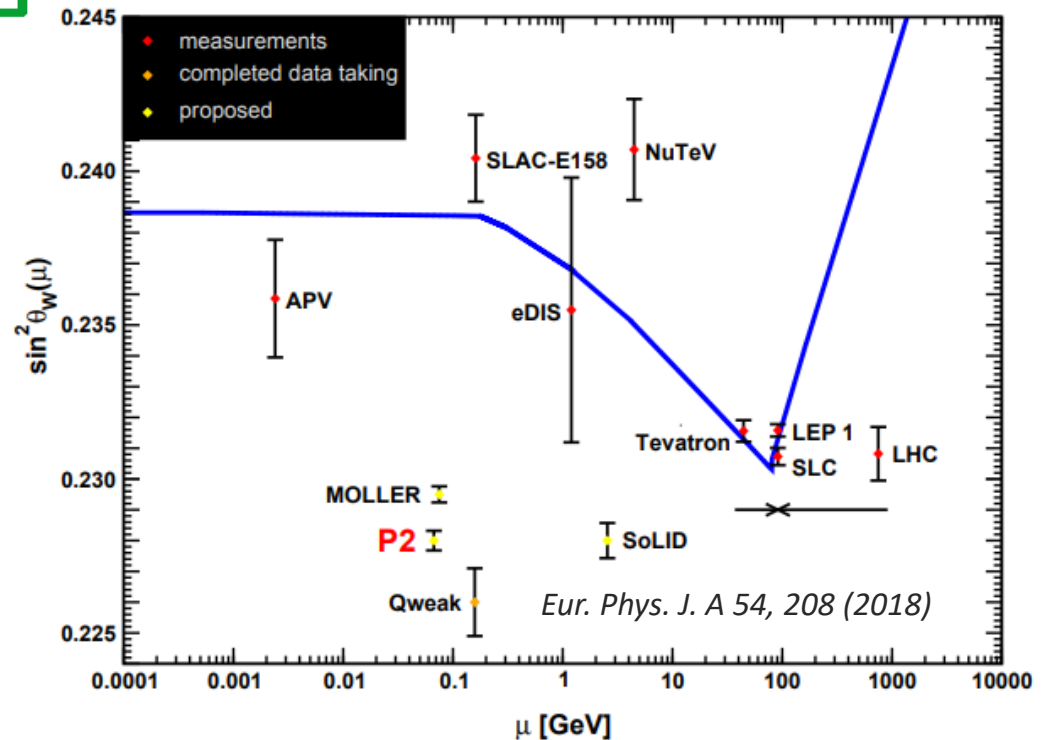
K. Scholberg, PRD 73 033005 (2006)

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 $F^2(Q)=1!$



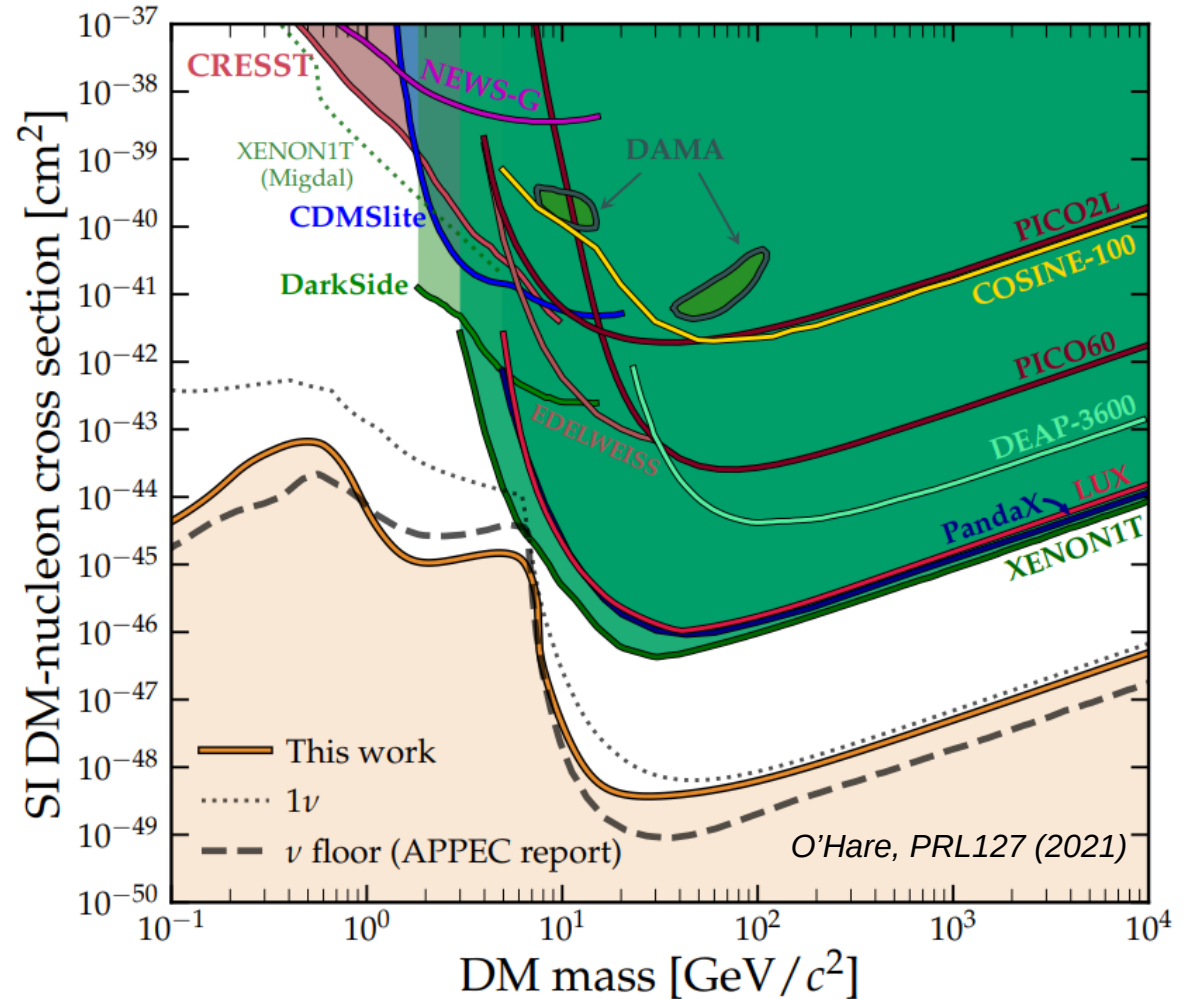
УКРН как фон

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

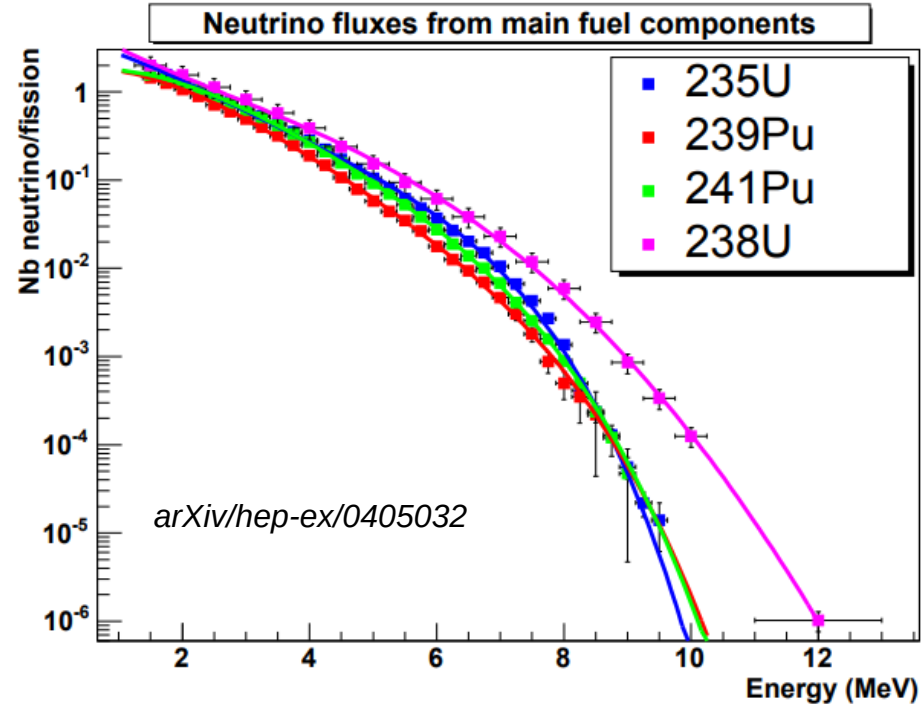


УКРН для поддержания безопасности АЭС

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)



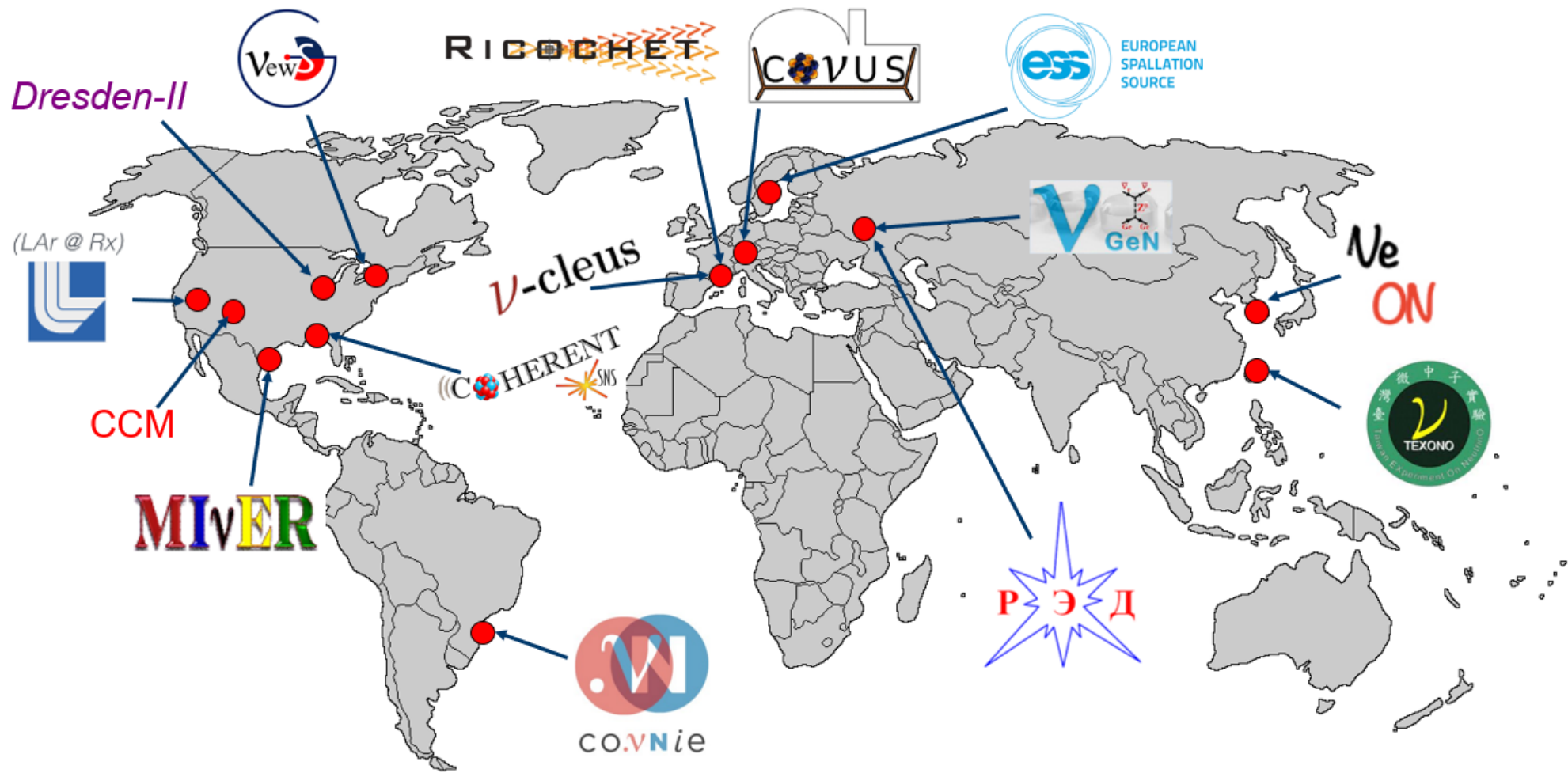
УКРН как инструмент научных исследований

- 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)

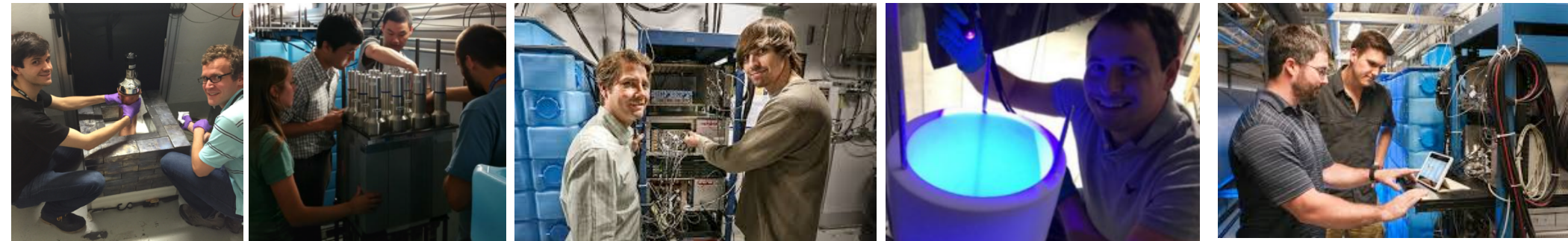


Коллаборация COHERENT



Около 90 человек из 5 стран

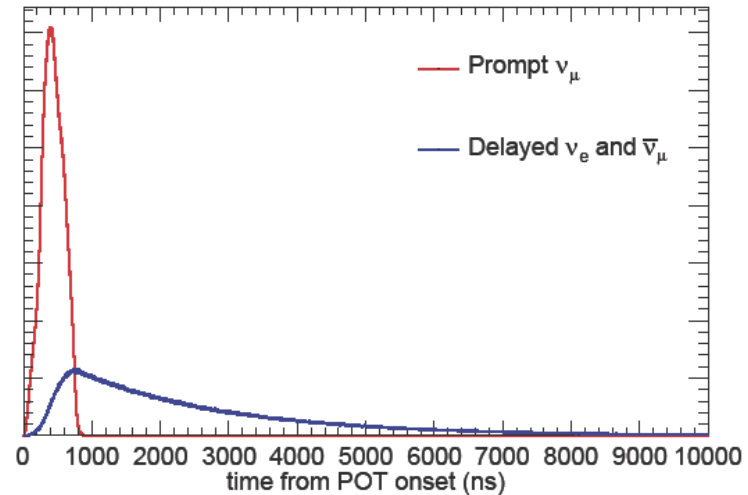
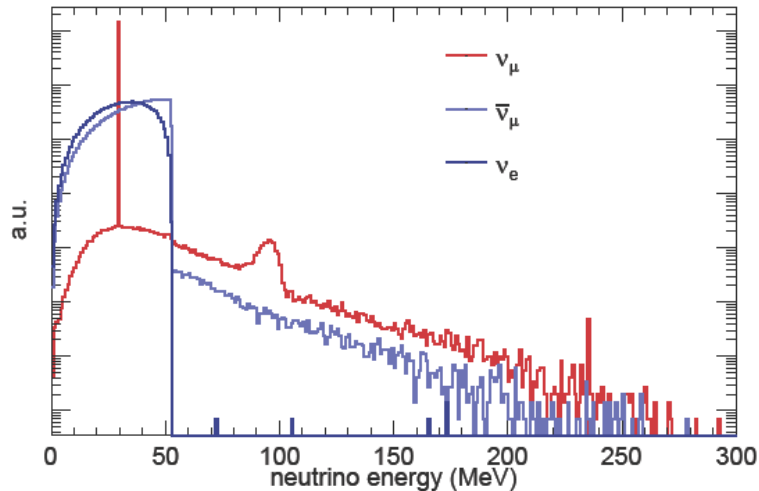
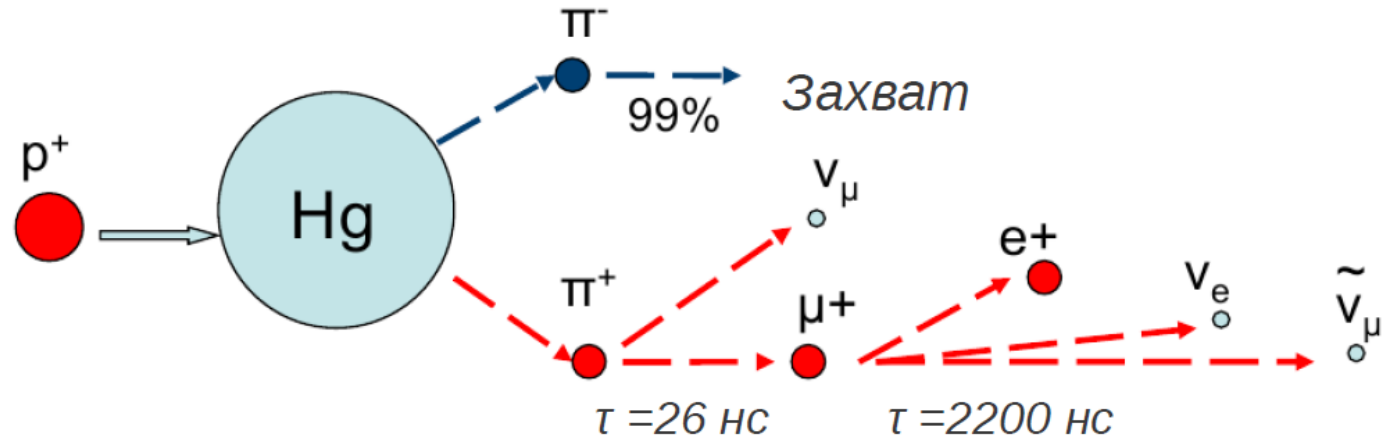
Основная цель - поиск Новой физики при помощи УКРН



Банчи протонов 1ГэВ
на Hg мишени с
частотой 60 Hz

Временной профиль
банча 350 нс
(полуширина)

Полный поток
нейтрино на 20 м –
 $4.3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$



«Нейтринная аллея»

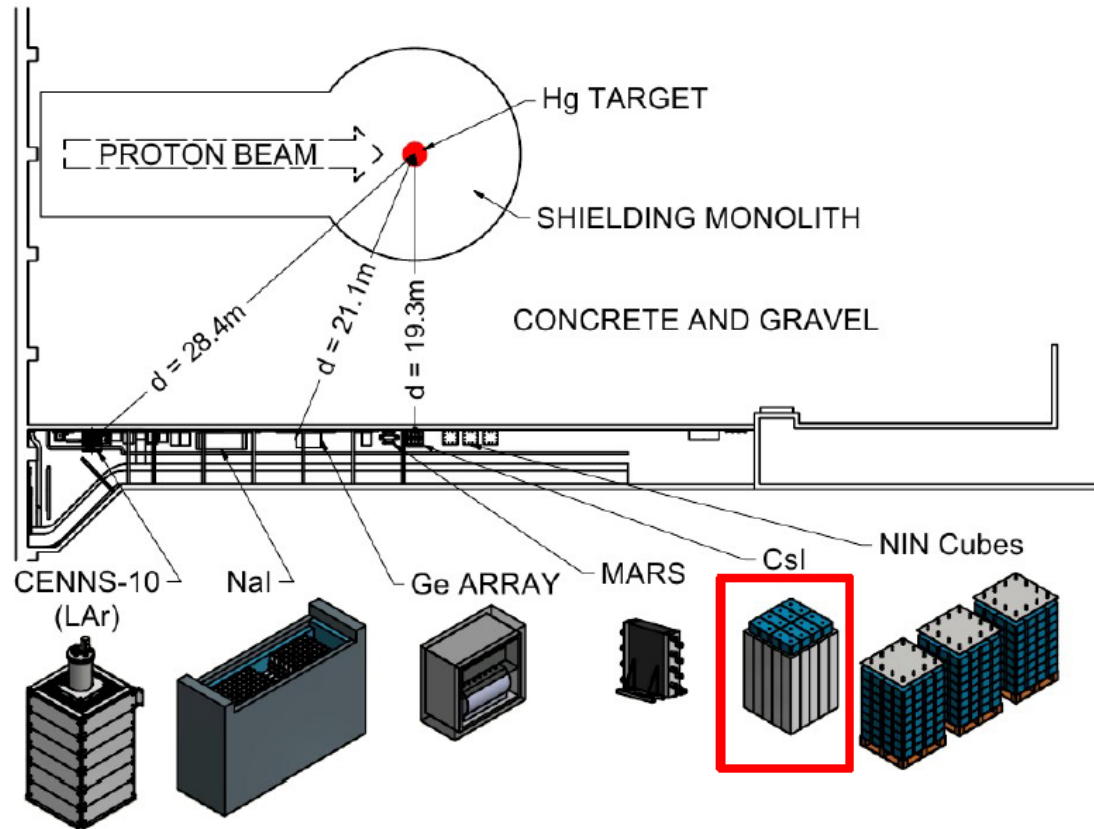


TABLE I. Parameters of subsystems for CEvNS detection.

Nuclear target	Detector Technology	Target Mass (kg)	Distance from source	Energy thresh- old (keV [†])	Deployment dates
CsI[Na]	Scintillating crystal	14	20 m	5	2015-2019
Ar	Single-phase LAr*	24	29 m	20	2016-2021
Ge	HPGe PPC [‡]	18	22 m	<5	2022
NaI[Tl]	Scintillating Crystal	3500	22 m	13	2022
Ar	Single-phase LAr*	750	29 m	20	2025
Ge	HPGe PPC [‡]	50	22 m	<5	2025
CsI	CsI+SiPM arrays at 40 K	10~15	20 m	1.4	2025

Finished **Planned**, *liquid argon, [‡]p-type point-contact, [†]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 - present
MARS	scintillation panels interleaved with Gd-painted foils	Measure beam-related neutrons in Neutrino Alley	2017 - present
NIN	liquid scintillator cells cubes in lead and iron shields	Measure neutrino-induced neutrons (NIN) in lead & iron	2015 - present
D ₂ O	heavy water Cherenkov detector	Measure neutrino flux precisely & $\nu_e + O$ inelastic cross section	2022
LAr TPC	liquid argon time-projection chamber	Measure $\nu_e + Ar$ inelastic cross section	2025

Current **Planned**

See «The COHERENT Experimental Program»,
arXiv:2204.04575

«Нейтринная аллея»: 20 м стали, бетона и щебня в направлении мишени,
8 м.в.э. конструкционных материалов над помещением

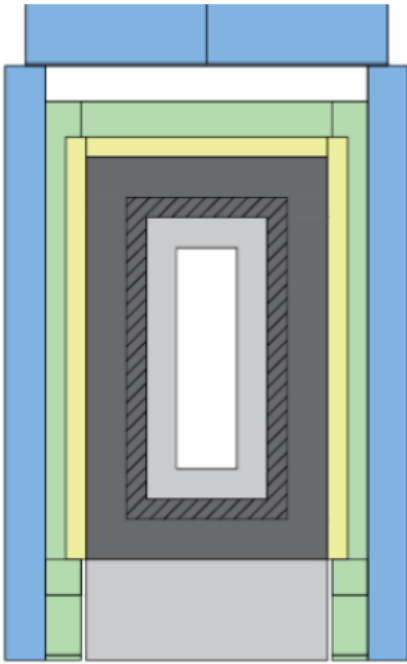
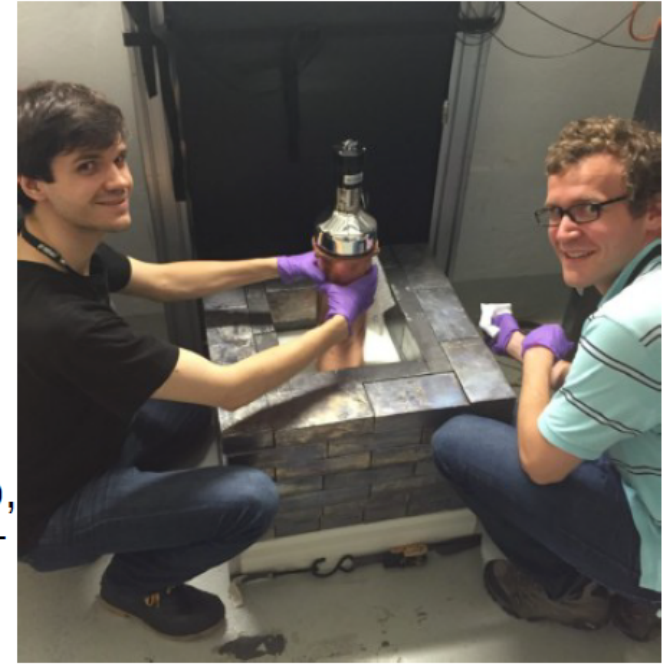
Детектор CsI[Na]

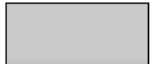
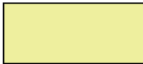
Кристалл от Amcrys, Харьков

Длина — 34 см, Масса — 14.6 кг
Диаметр — 11 см,

Светосбор: 1 ФЭУ Hamamatsu R877-100

Установка создана в Университете Чикаго,
была размещена на расстоянии 19.3 м от
мишени SNS в ORNL (США)



Слой защиты	ПЭВП	Низкофон. свинец	Свинец	μ вето	Вода
Толщина, см	7.6	5.1	10.2	5.1	10.2
Цвет на схеме					

Система сбора данных записывала 70 мкс сигнал CsI[Na] по триггеру от сброса пучка SNS

Цели исследования и решаемые задачи

Цель:

Регистрация процесса УРКН и измерение его сечения на ядрах атомов CsI

Задачи:

1. Зарегистрировать УРКН при помощи детектора CsI[Na] на SNS на основе данных 2015-2017 годов
2. Уточнить отклик сцинтиллятора CsI[Na] на ядра отдачи с энергией 5-30 кэВ для сокращения неопределённости ожидаемой скорости счёта событий УРКН
3. Измерить сечение УРКН на ядрах атомов CsI на полном наборе данных CsI[Na] 2015-2019 годов

Изучение УКРН на CsI на SNS

Изучение отклика CsI[Na]
на ядра отдачи

поиск сигналов CsI[Na] и восстановление их характеристик

калибровка энергетической шкалы детектора

оптимизация отборов для выделения сигнала от УКРН

получение спектра энерговыделений и распределения времён появления сигналов от УКРН

вычисление скорости счёта событий УКРН, сравнение с предсказанием СМ

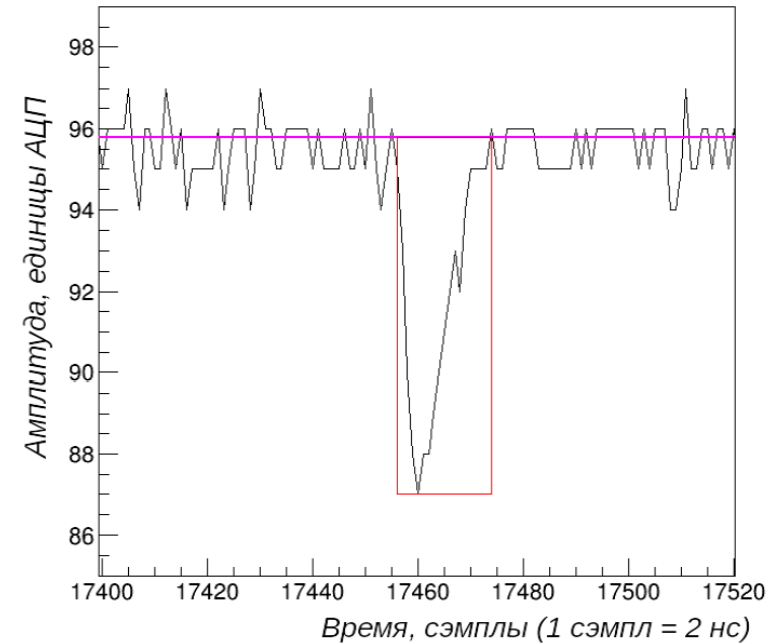
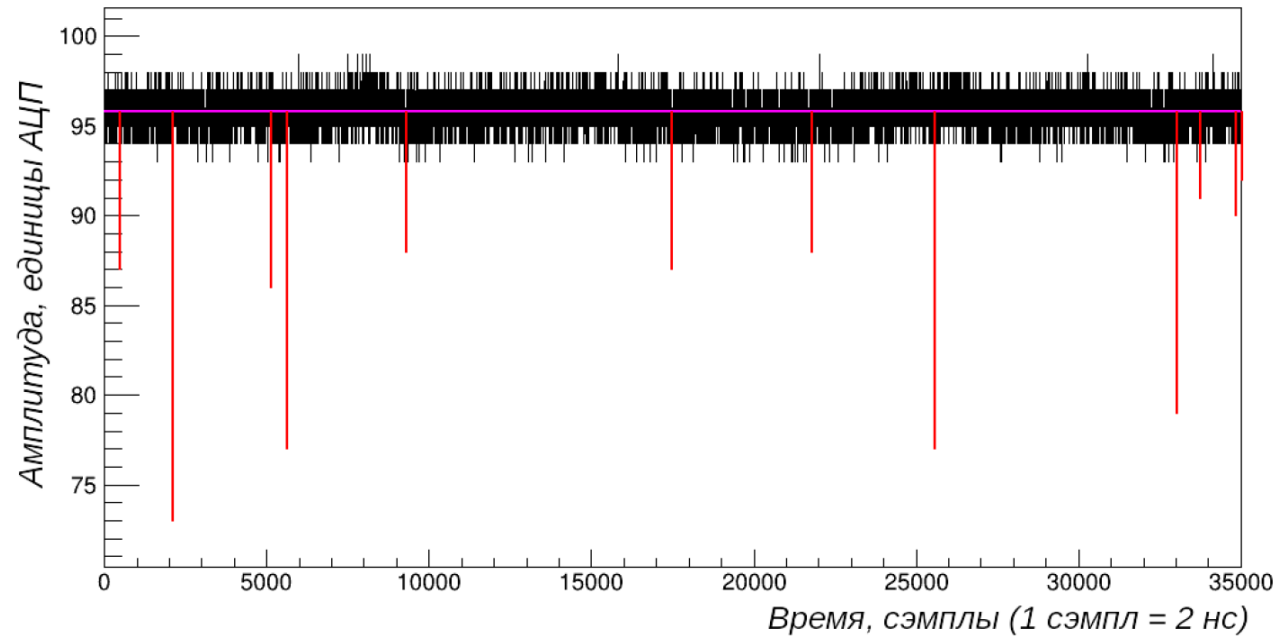
определение отборов, позволяющих выделить сигнал от нейтронов источника

получение спектров энерговыделений от ядер отдачи

определение отклика CsI[Na] на ядра отдачи и его зависимости от выделенной энергии

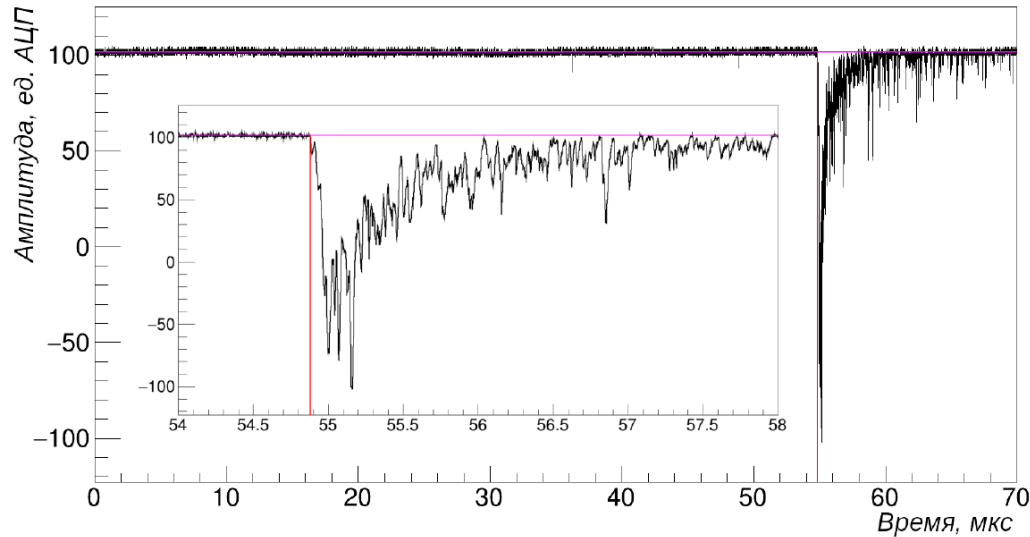
Обработка данных

Записанные формы сигнала обрабатывались программой REDOffline (В. Белов, ККТЭФ и А. Кумпан, МИФИ) с адаптированными алгоритмами поиска и параметризации событий



Последовательности импульсов могут быть объединены в «кластеры», соответствующие взаимодействию ионизирующего излучения с веществом

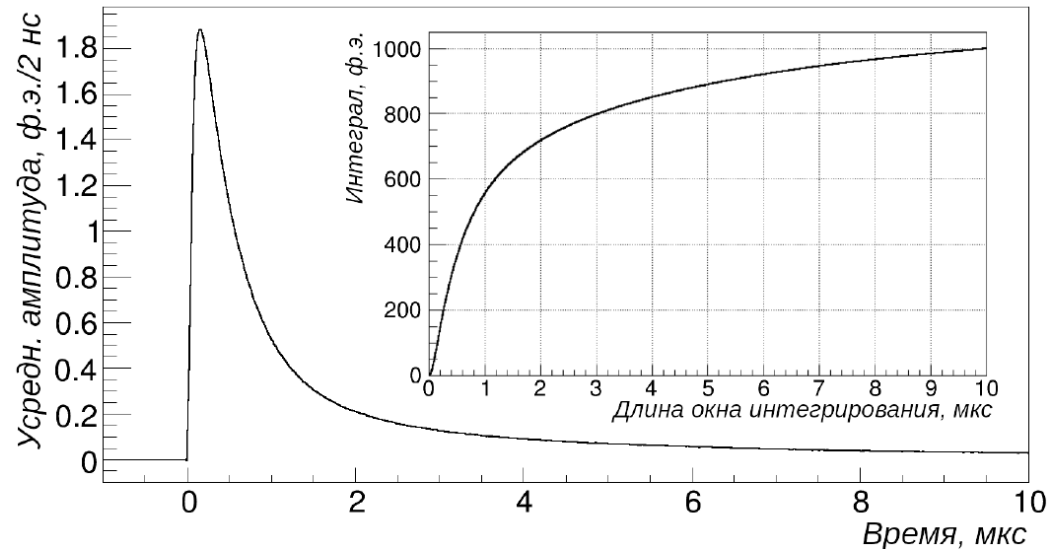
Калибровка детектора CsI[Na]



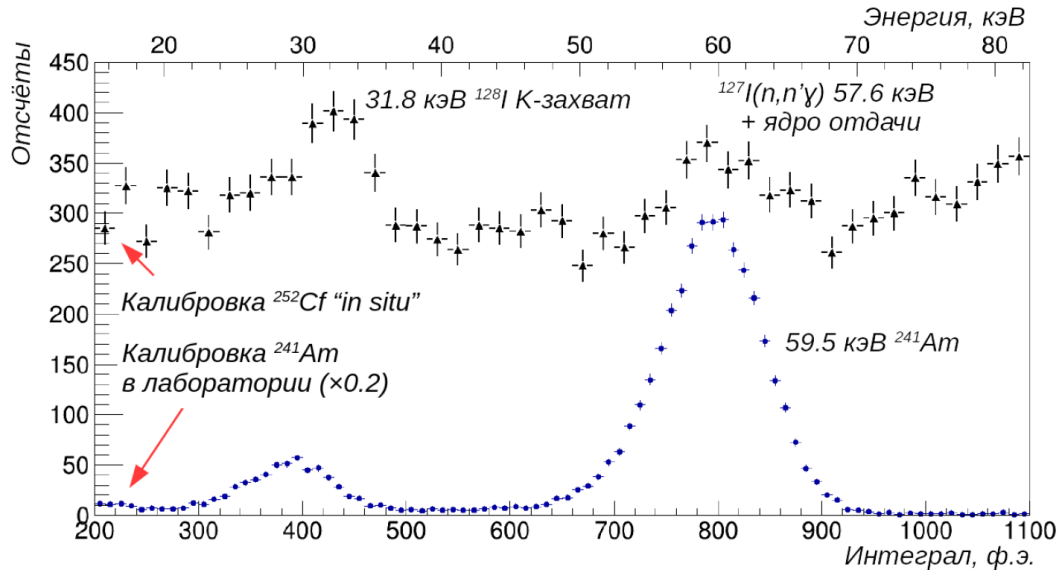
Усреднённая форма сигнала от 59.5 кэВ и зависимость световыхода от длительности окна интегрирования сигнала

Было выбрано время интегрирования 3 мкс, баланс световыхода (~80%) и вероятности совпадения импульсов фосфоресценции

Пример формы сигнала от гамма-кванта 59.5 кэВ ^{241}Am в лабораторной калибровке



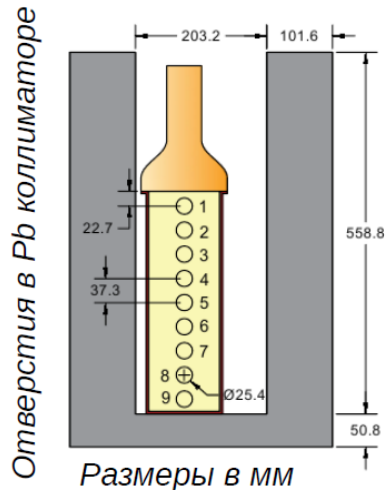
Калибровка детектора CsI[Na]



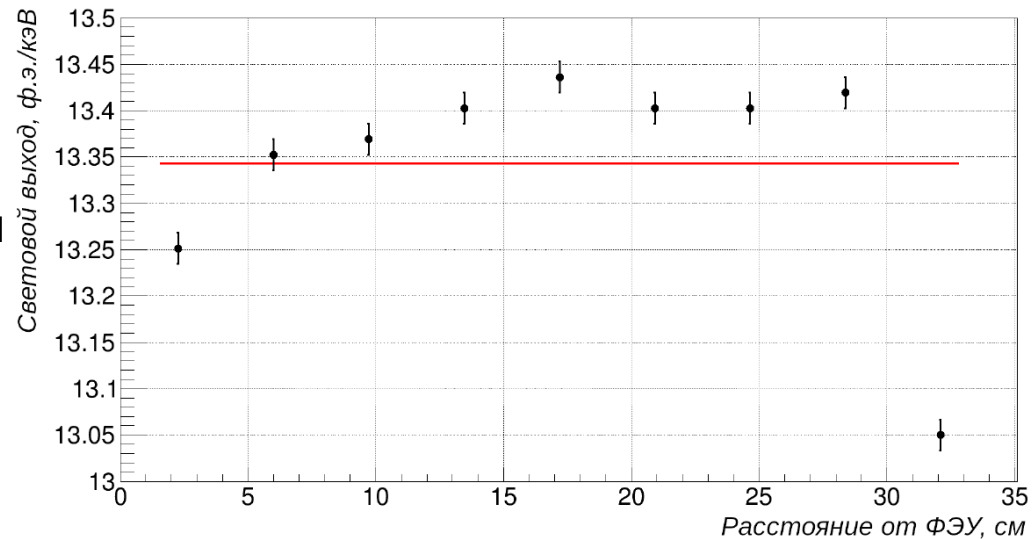
Лабораторная калибровка гамма-квантами
59.5 кэВ ^{241}Am показала световыход

$$13.3 \pm 0.3 \text{ ф.э./кэВ}$$

Световой выхода был подтверждён *in situ*
при помощи гамма-линии 57.6 кэВ от (n, γ)
реакции при калибровке ^{252}Cf

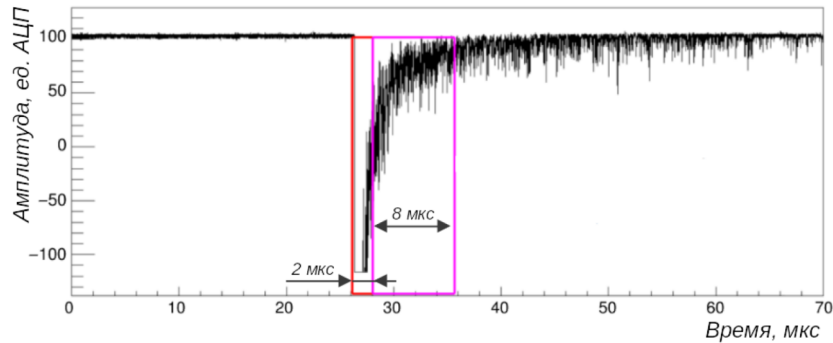


Световой выход однороден
по длине кристалла

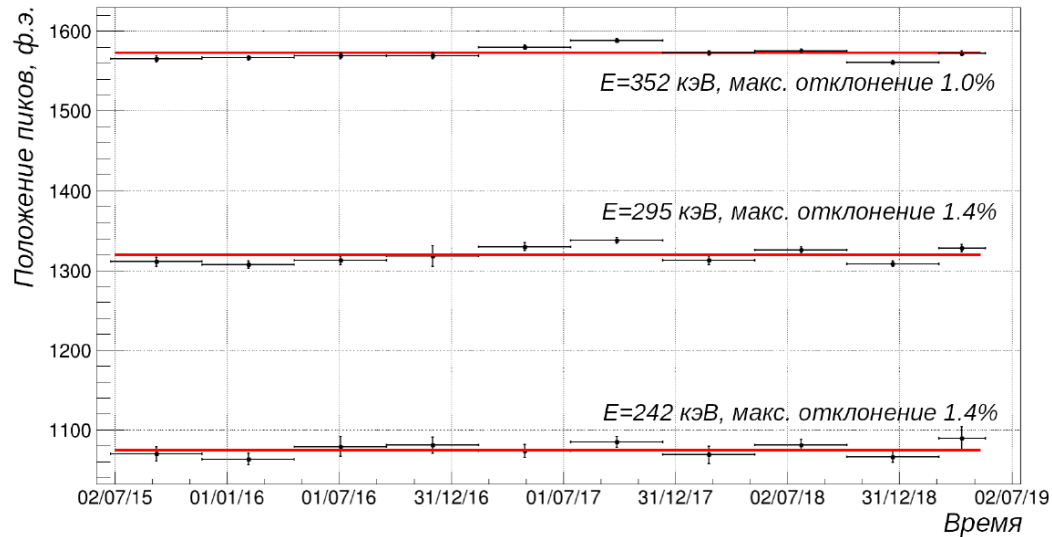


Стабильность светового выхода во времени

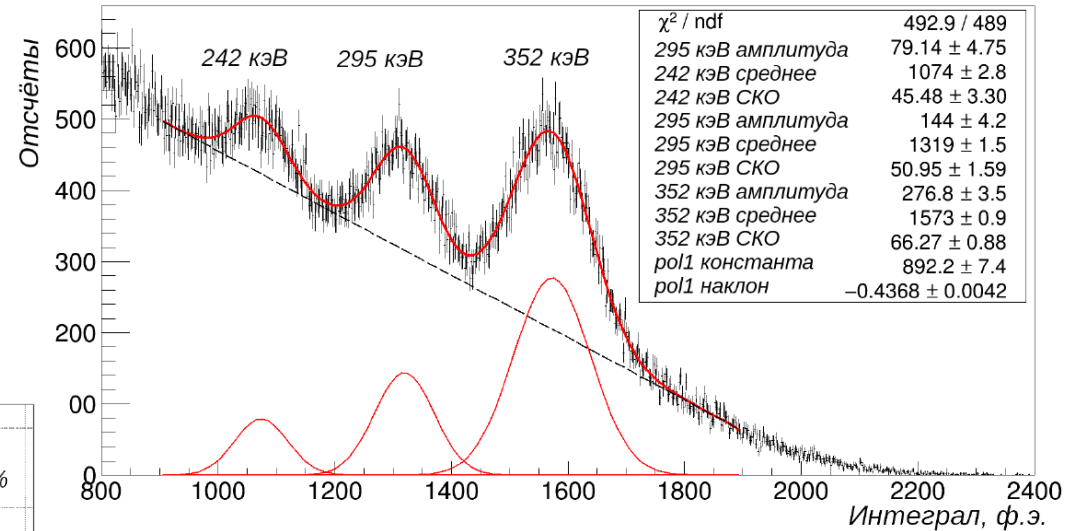
Детектор находился на экспозиции в течение 4 лет



В силу ограниченного диапазона АЦП
использовался «хвост» сигнала



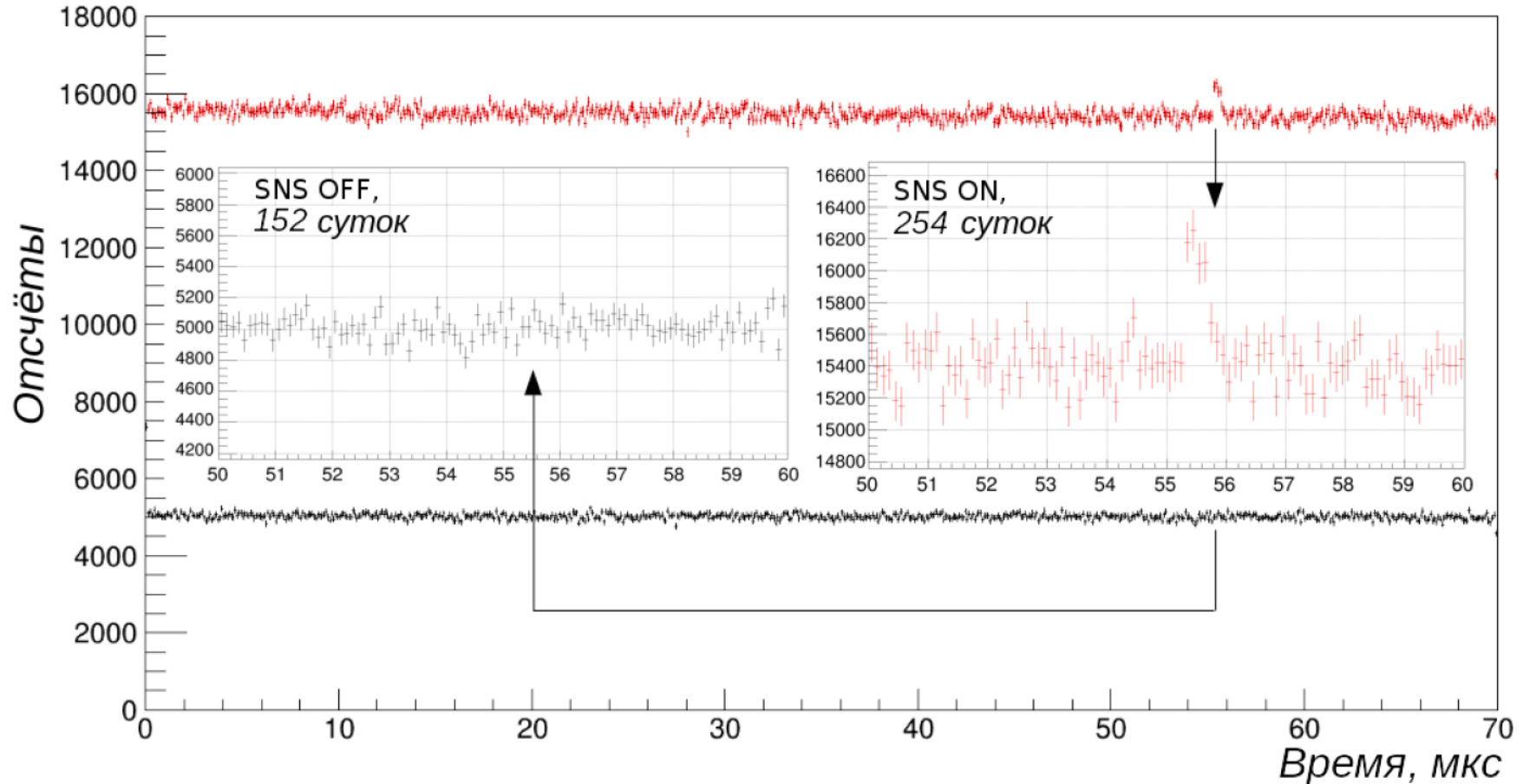
Стабильность световыхода была
проверена по линиям от ^{214}Pb



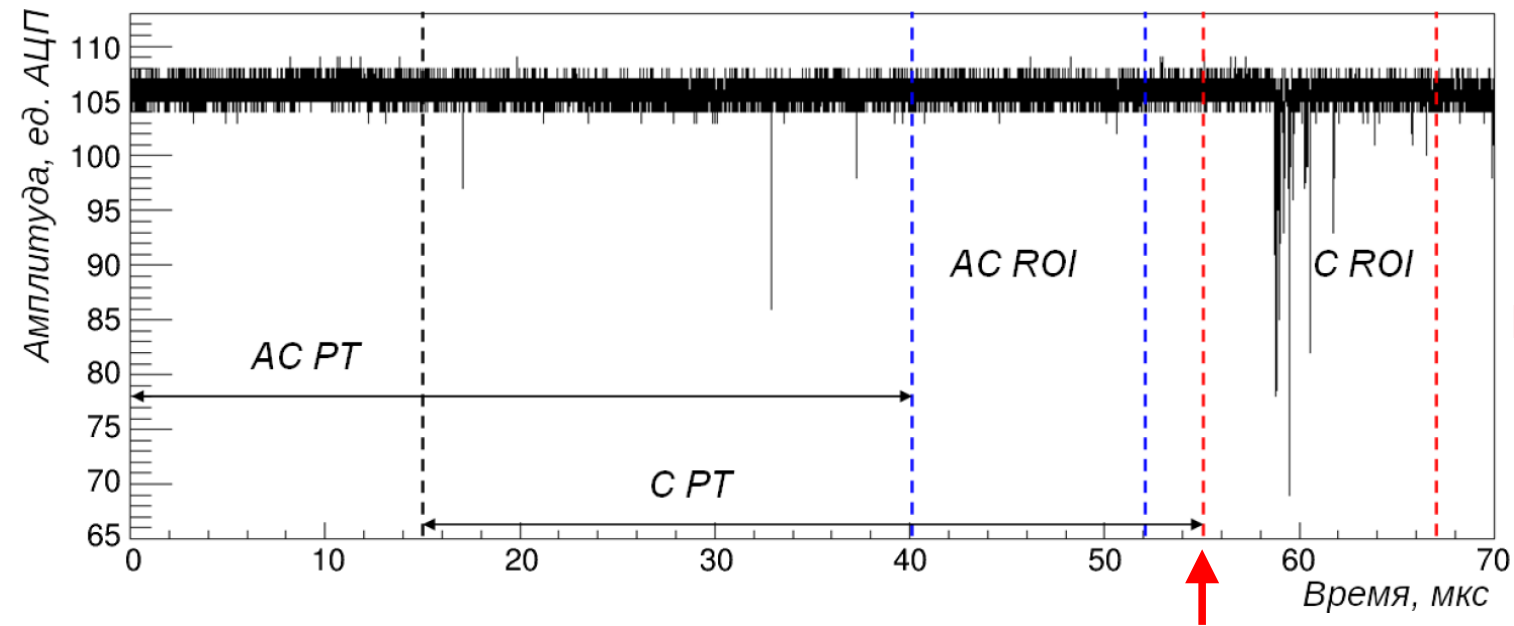
Проверка показала стабильность
световыхода на уровне $\sim 1.5\%$

Подтверждение временной привязки

Проверка привязки триггера к синхроимпульсу SNS была проведена при помощи veto



Подход к анализу данных с SNS



С — «совпадение»
 АС — «анти-совпадение»

ROI — область интереса
 PT — «претрэйс»

К маю 2017 года записано
 более 2.6 миллиардов
 триггеров!

Триггер от сброса пучка на мишень

$$\boxed{\text{С ROI (после триггера)} - \text{АС ROI (до триггера)}} =$$

УКРН

+

Фоны, коррелированные с пучком

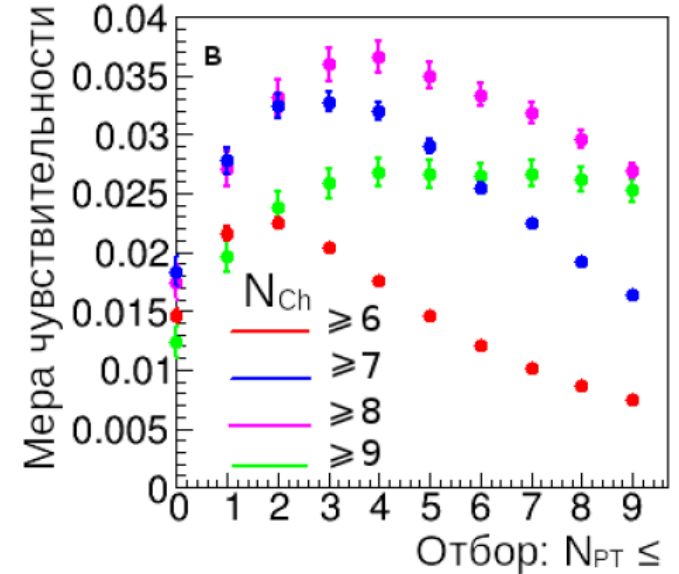
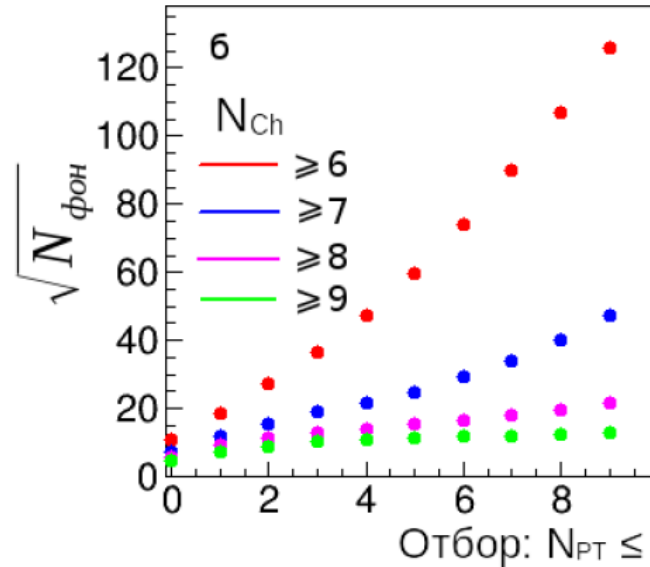
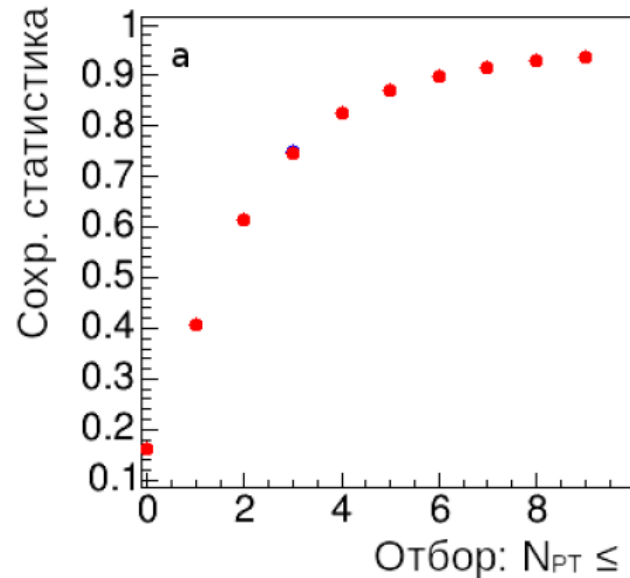
+

Флуктуации постоянного фона

Отборы и их оптимизация

N_{PT} — число импульсов в «претрейсе», ограничение интенсивности фосфоресценции

N_{Ch} — число импульсов в 3 мкс окне сигнала, ограничение влияния «черенковских» импульсов



Оптимизация проходила на основе AC ROI на части статистики при включенном ускорителе

Оптимальная пара ограничений: $N_{PT} \leq 4$, $N_{Ch} \geq 8$

Фоны

1. Коррелированные со сбросом пучка: «прямые» нейтроны, нейтроны от вз-ий ν в Pb (NIN)

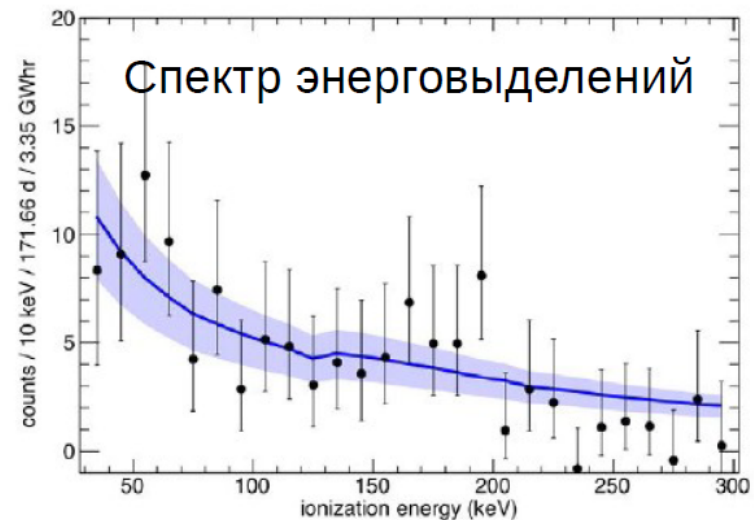
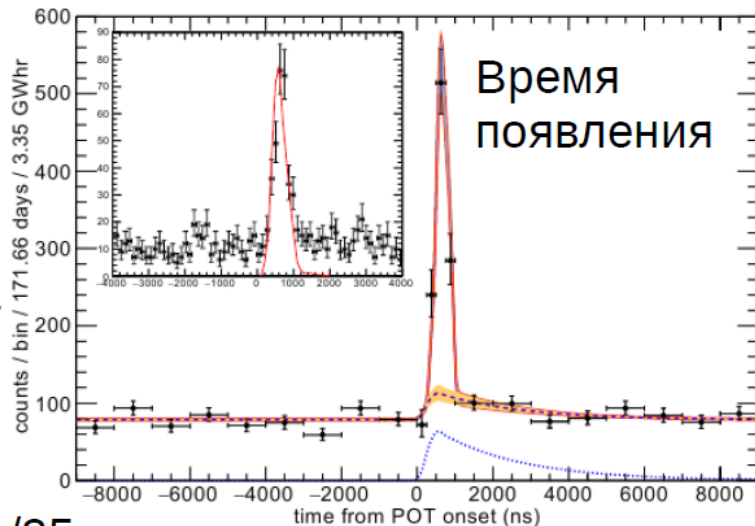
Жидкий сцинтиллятор
EJ-301 (3 литра) в
защите CsI[Na]



Оценка скорости счёта
нейтронного фона



«Прямые» n / УКРН = 1/25
NIN/ УКРН = 1/47



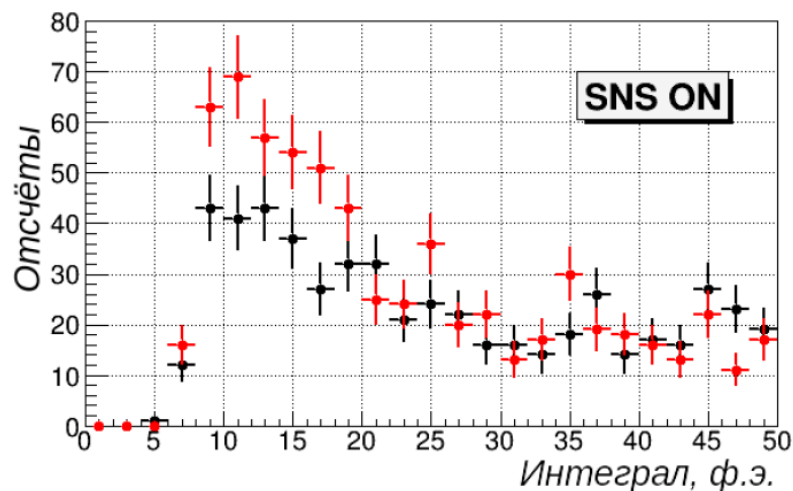
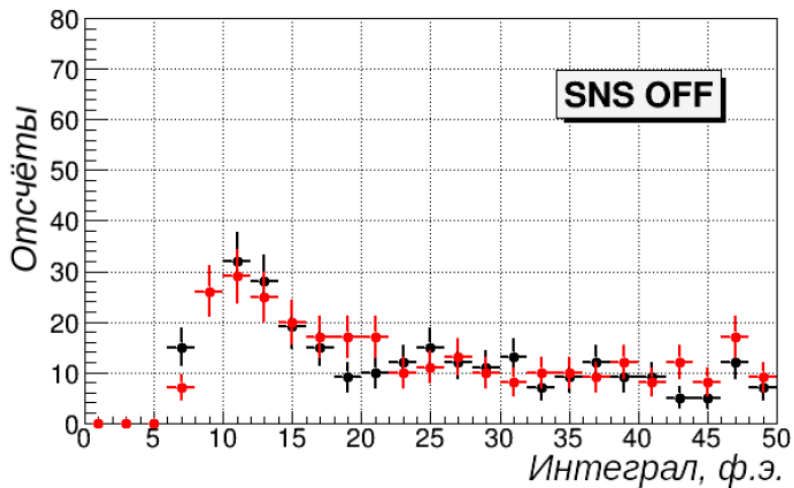
2. Постоянный фон: реальные взаимодействия и остаточная флуоресценция

Вклад постоянного фона оценивается по области AC ROI, сигнал/фон = 1 / 4

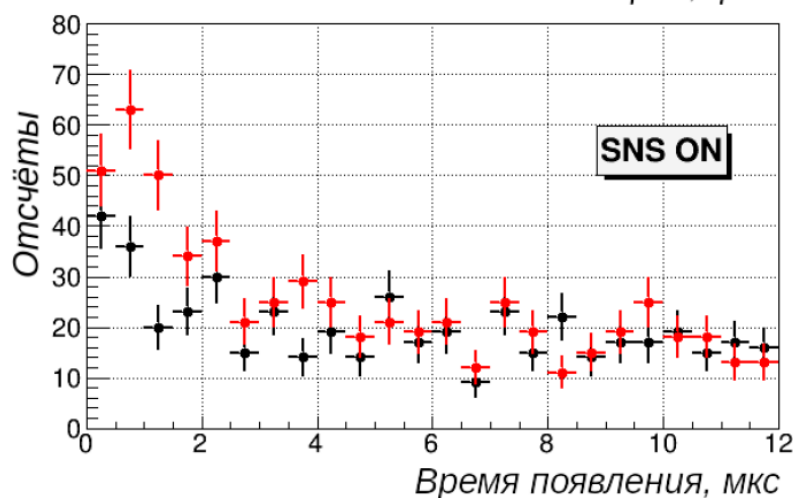
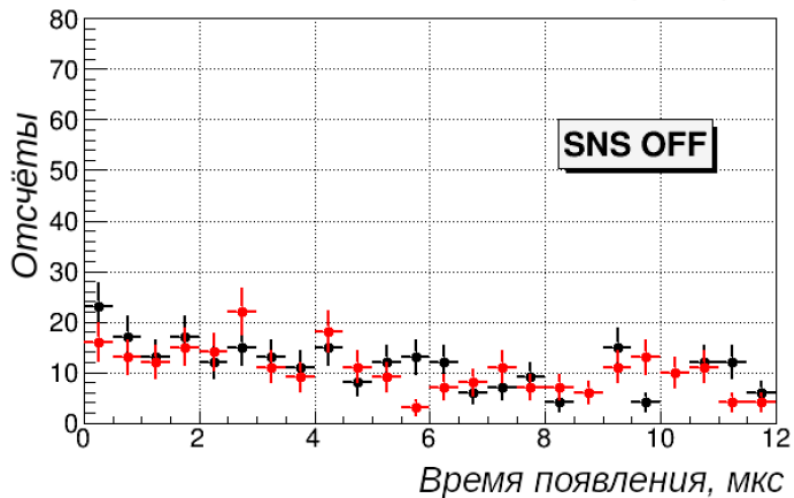
Первое наблюдение УКРН: ON и OFF

Красный — С ROI, чёрный — АС ROI

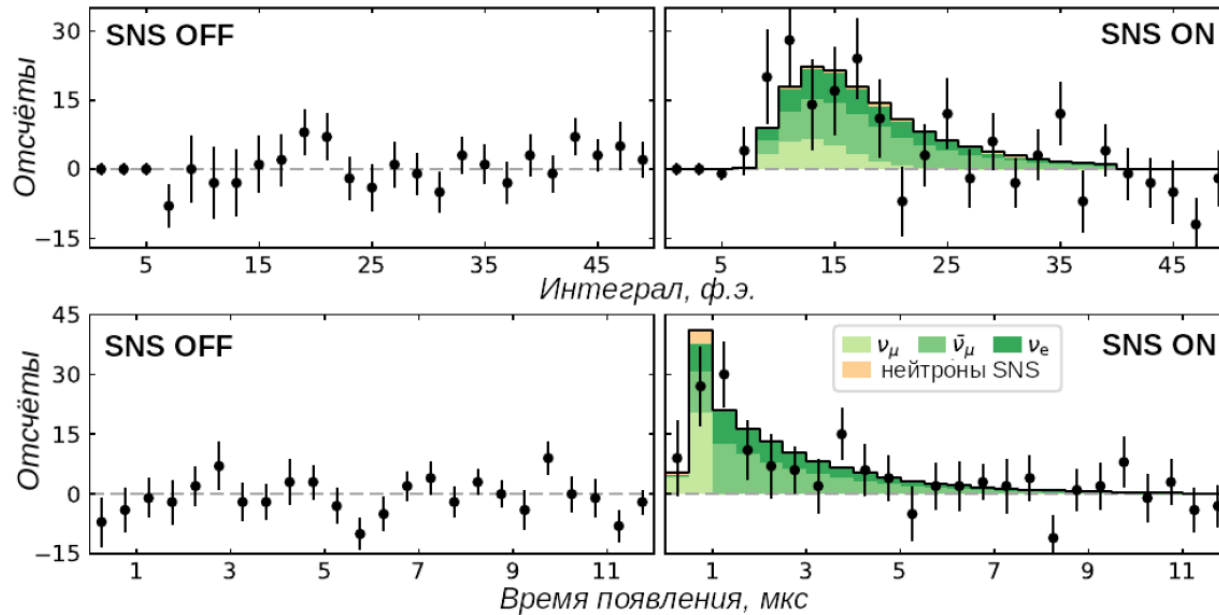
Энергия



Время



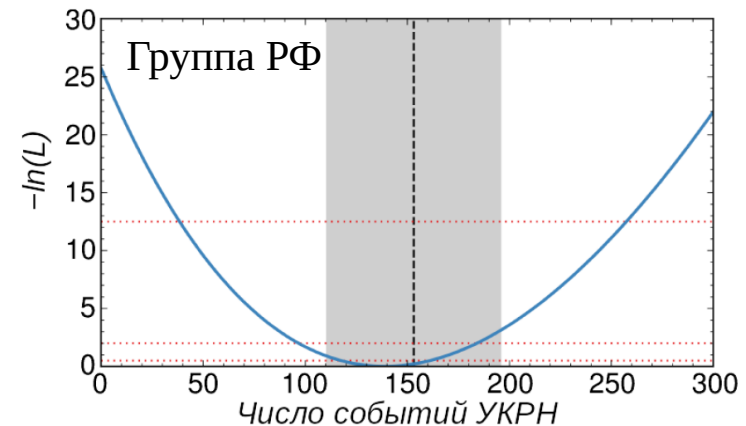
Первое наблюдение УКРН



Результаты статистического анализа данных CsI[Na].

Анализ	Предсказание СМ	Лучший фит	Значимость
Группа США	173 ± 48	134 ± 22	6.7σ
Группа РФ	153 ± 43	132 ± 22	7.2σ

Первое в мире наблюдение УКРН!



Квенчинг-фактор (КФ) ядер отдачи в CsI[Na]

При УКРН ν передают энергию ядрам,
отклик CsI[Na] на ядра отдачи подавлен

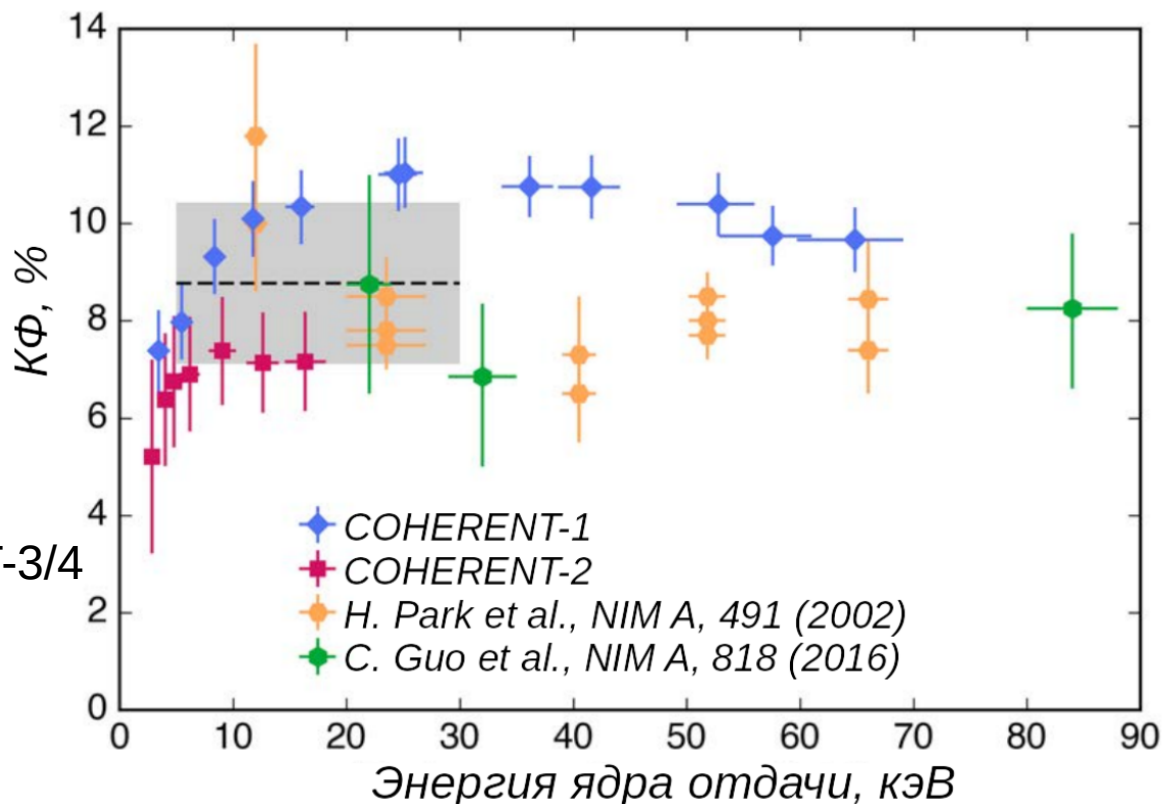
$$QF = \frac{\text{Отклик на ядра отдачи}}{\text{Отклик на эл-ны отдачи}}$$

при одинаковой переданной энергии

Подзадачи:

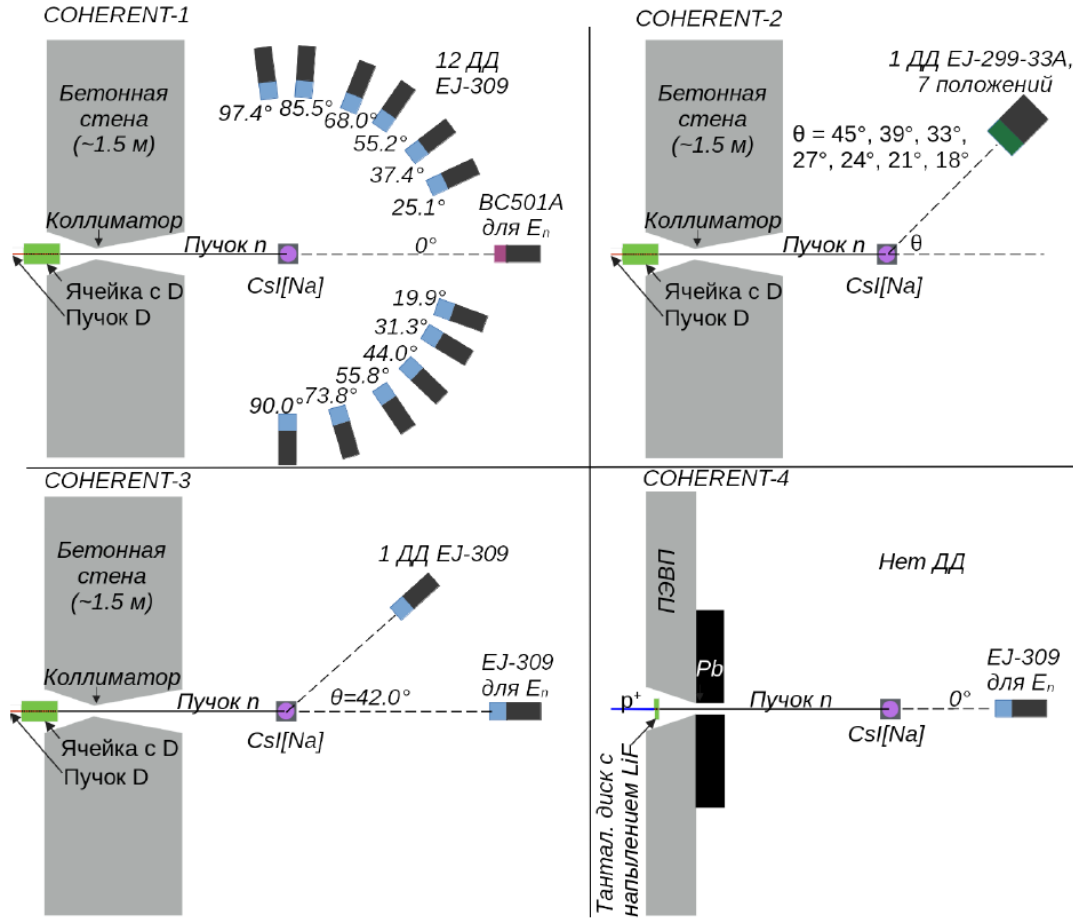
1. Повторный анализ COHERENT-1/2
2. Анализ новых измерений COHERENT-3/4

Значение КФ, использованное для предсказания
УКРН при первом наблюдении: $8.8 \pm 1.7\%$



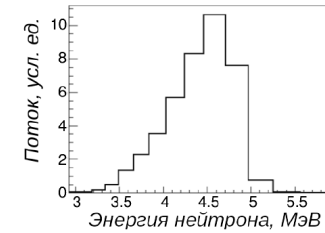
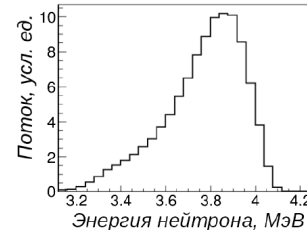
Измерения КФ в TUNL

Схемы установок



Характеристики пучков нейтронов

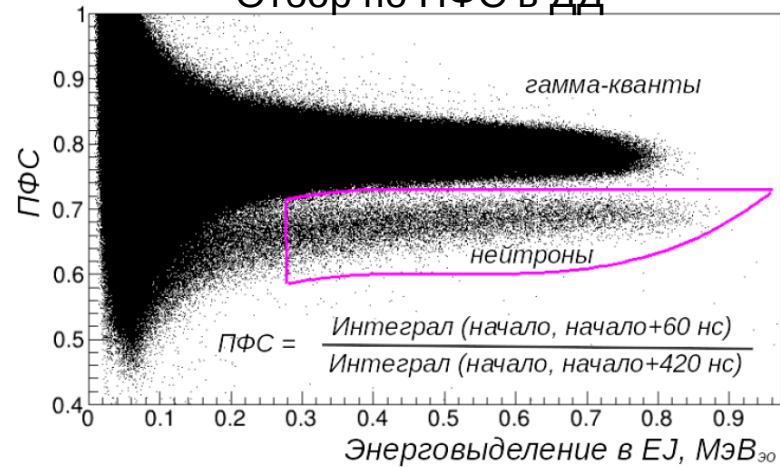
Измерение	Реакция	Среднее, МэВ	Неопр-сть	Ширина, МэВ
COHERENT-1	D(D,n) ³ He	3.8	2%	0.4
COHERENT-2	D(D,n) ³ He	3.8	2%	0.4
COHERENT-3	D(D,n) ³ He	4.4	4%	0.8
COHERENT-4	⁷ Li(p,n) ⁷ Be	0.94 / 1.26	5% / 4%	0.1 / 0.1



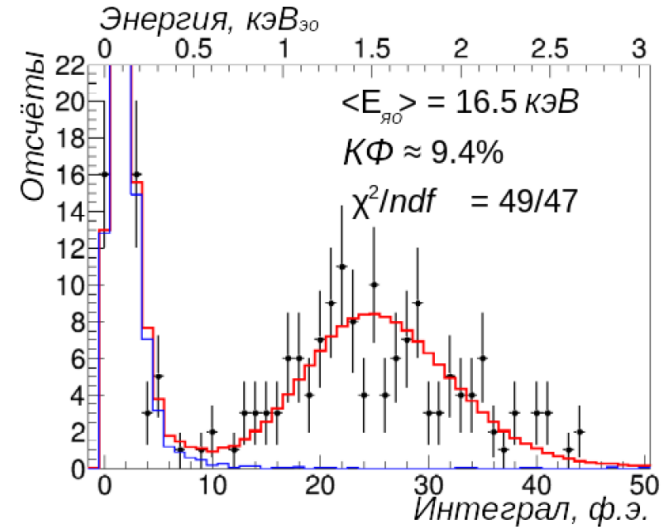
Восстановлены по времени пролёта

Измерения методом «меченых ядер»

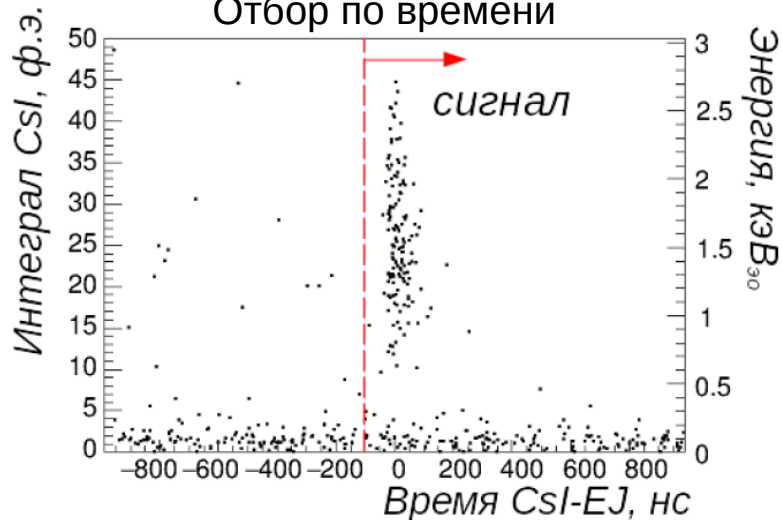
Отбор по ПФС в ДД



Пример
результата →



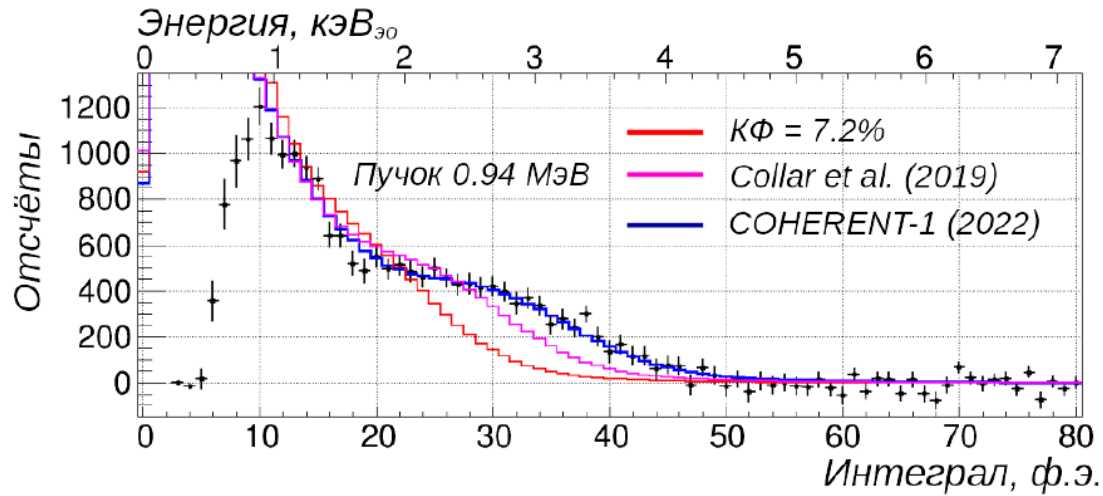
Отбор по времени



Общие результаты:

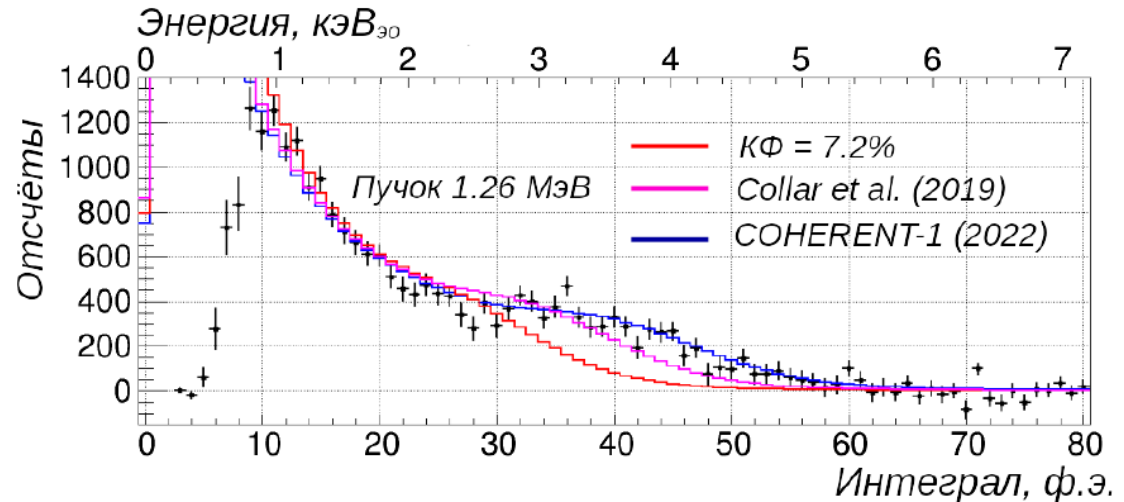
1. Результат COHERENT-1 воспроизведён
2. Результат COHERENT-2 не воспроизводим, найдена ошибка в процедуре анализа
3. COHERENT-3 воспроизводит COHERENT-1

Измерения методом «конечной точки»



Модель	χ^2/ndf
COHERENT-2	538/65
Collar et al. (2019)	180/65
COHERENT-1	60/65

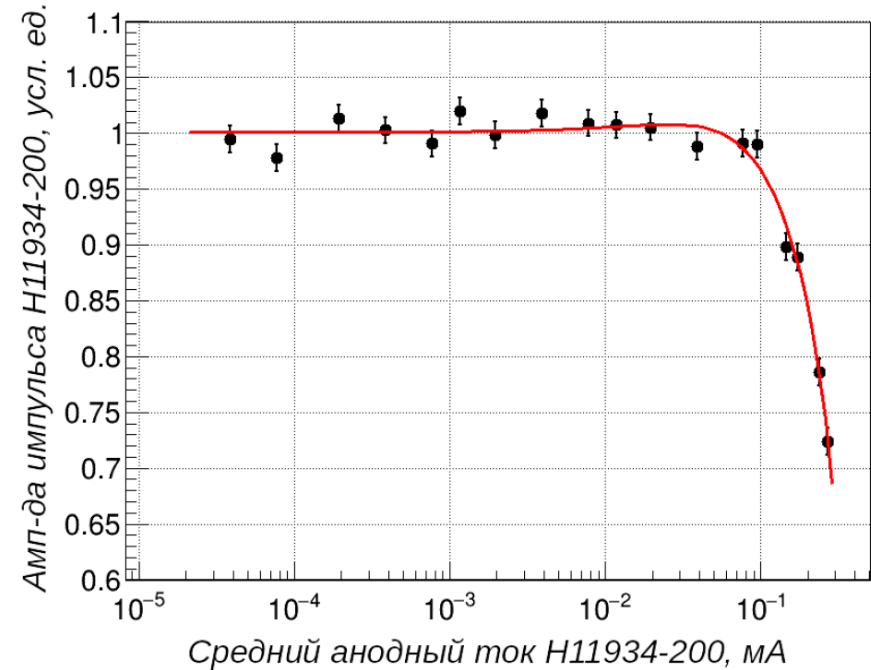
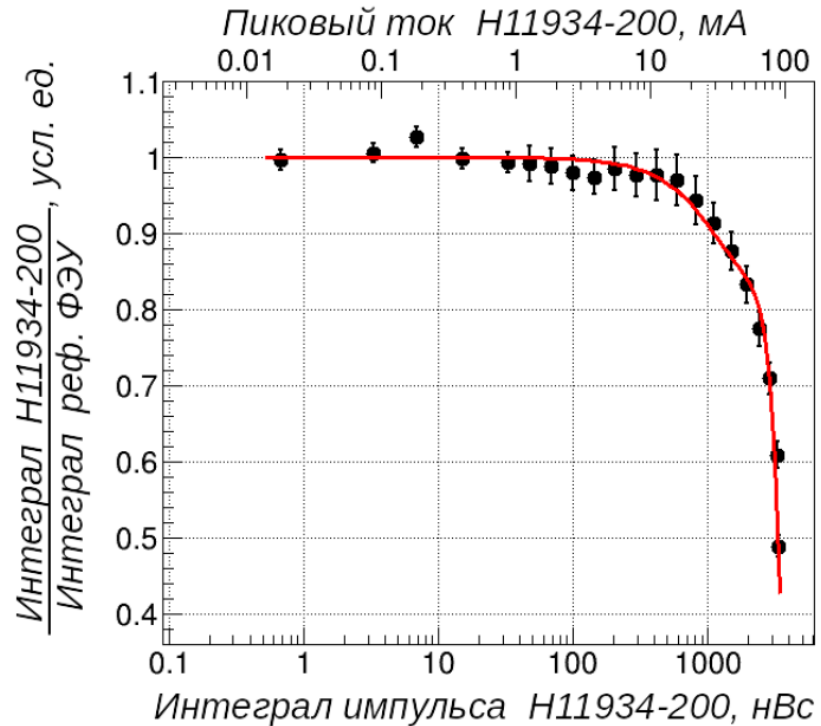
Модель	χ^2/ndf
COHERENT-2	372/65
Collar et al. (2019)	139/65
COHERENT-1	82/65



Результаты COHERENT-4 согласуются с COHERENT-1!

Линейность ФЭУ Н11934-200

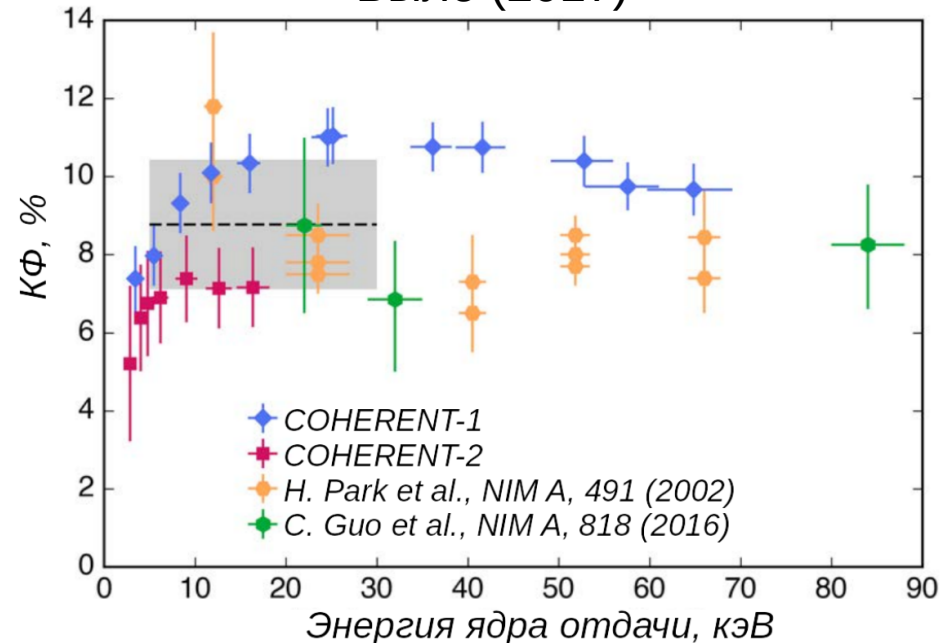
Одна из гипотез о причине расхождения СОНЕРЕНТ-1/2 — нелинейность ФЭУ



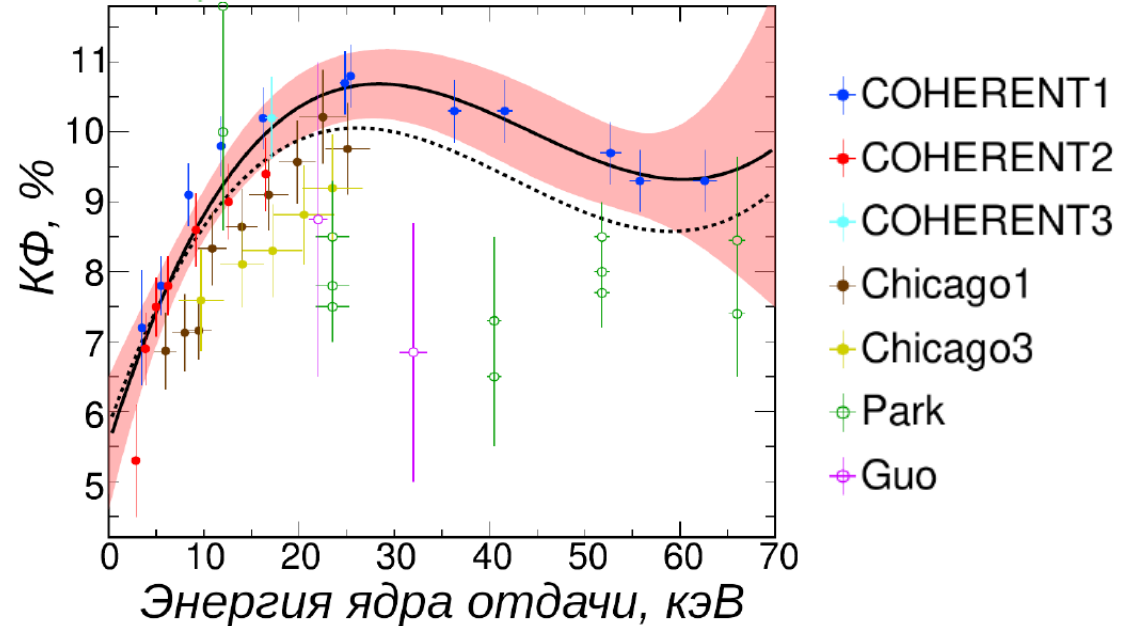
ФЭУ, использовавшийся в измерениях КФ, был прислан в Москву и испытан в лаборатории в МИФИ. Линейность в области интереса подтверждена

Результаты исследования КФ

Было (2017)



Стало (2020-2022)

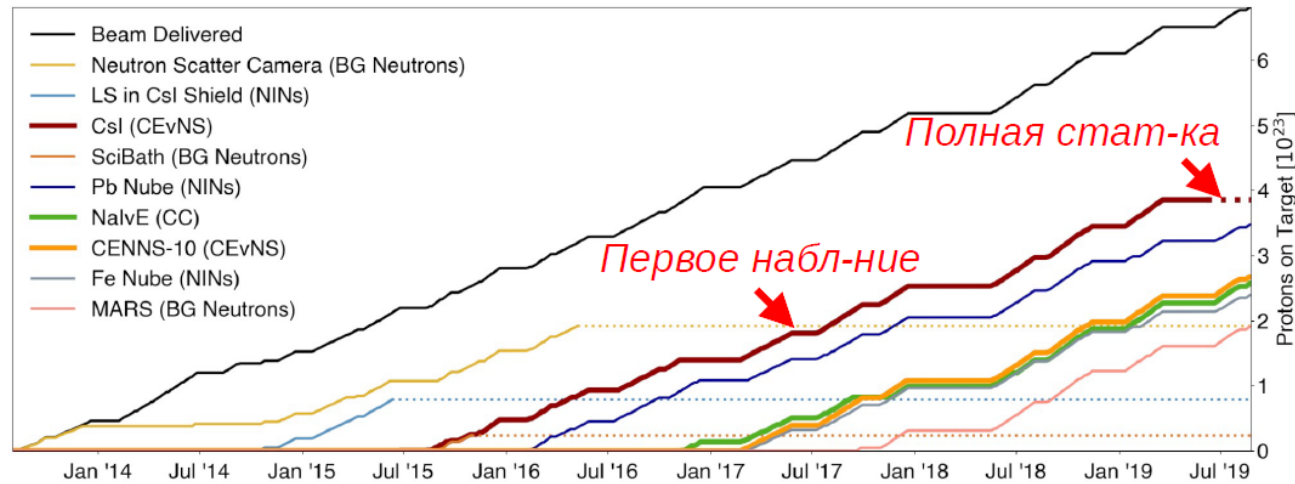


Процедура - аппроксимация полиномом 4 степени, расширение доверительного интервала для обеспечения $\chi^2/\text{ndf} = 1$ (рекомендовано PDG) + тест альтернативного подхода

Результат — сокращение влияния неопределённости КФ на измерение сечения УКРН с ~25% до 4%, что ниже статистической неопределённости на полном наборе данных CsI

Полная статистика CsI[Na] на SNS

К лету 2019 г. CsI[Na] примерно в 2 раза больше «сигнальной» статистики по сравнению с 2017 г.



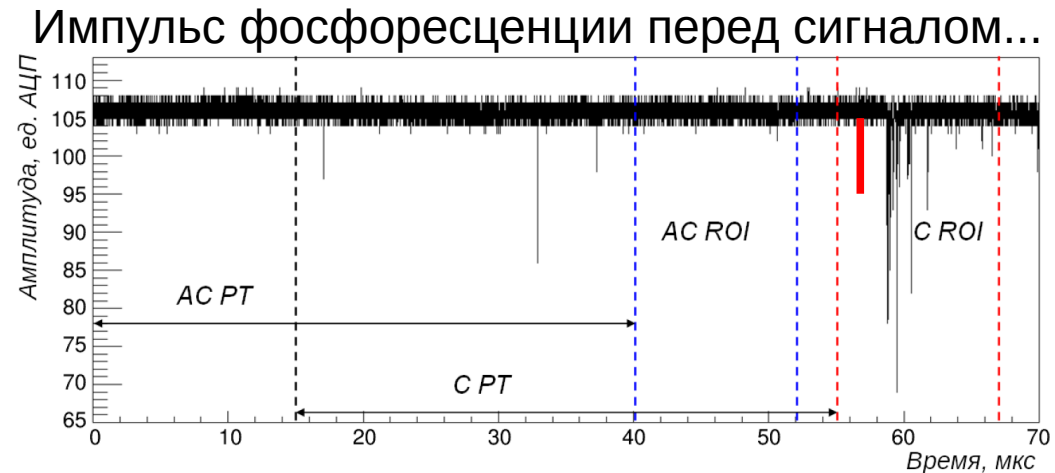
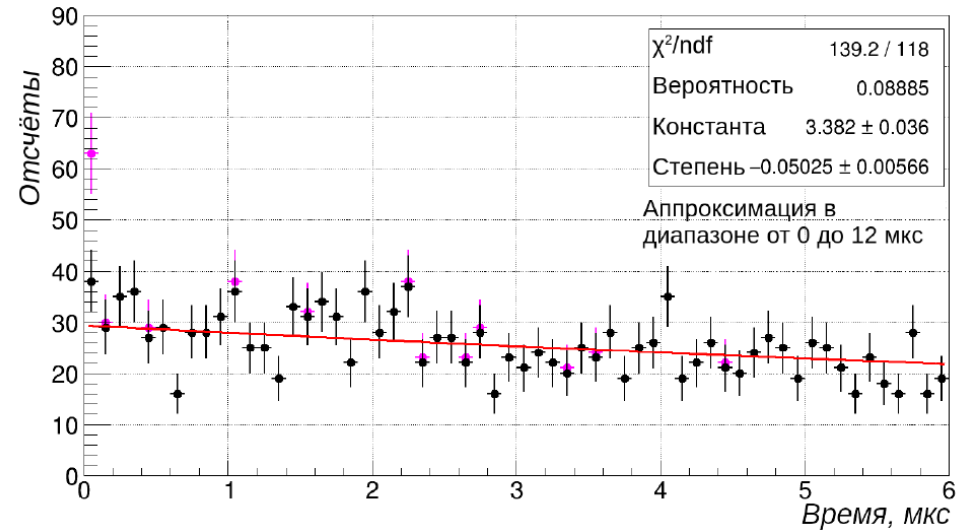
Неопределённость

Источник	Вклад, %
Статистика	10
Поток ν	10
КФ	4
Эфф-сть отборов	4
Модель пост. фона	3
Фон от n SNS	3
Световой выход	1
Форм-фактор	1

Был проведён анализ полного набора данных CsI[Na], процедура анализа и фитирования экспериментальных спектров была доработана

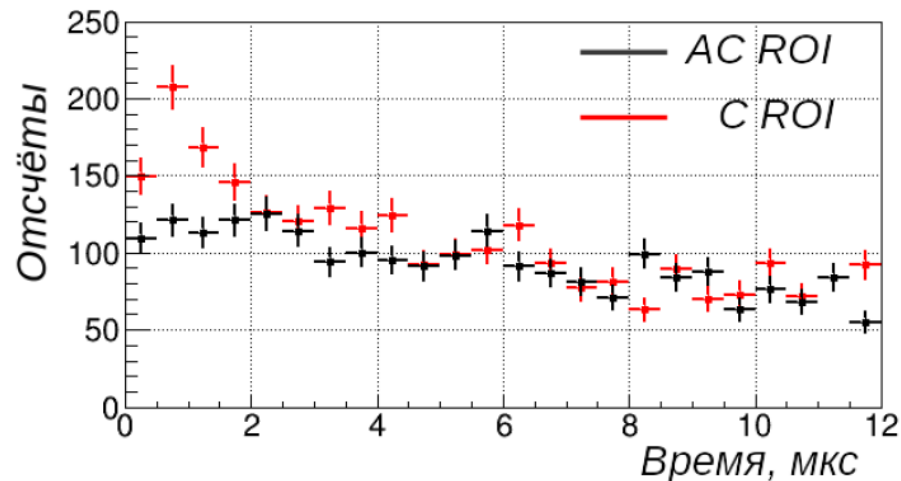
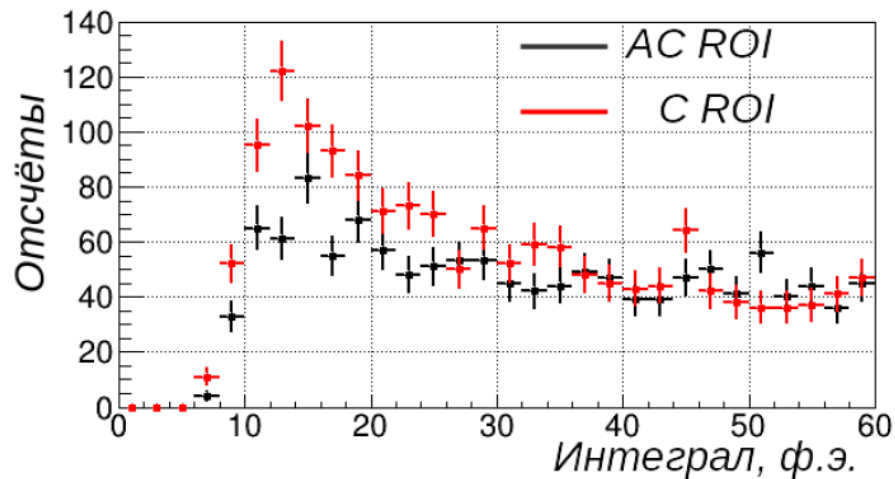
Изменения в процедуре анализа

1. Устранение аномального семейства сигналов в первых 100 нс временного распределения (~4%)
2. Учёт потери сигналов с некорректно восстановленным началом (~2% эффект)
3. Исправление сдвига временного сдвига в базе данных мощности пучка (~7% эффект)
4. Учёт ширины однофотонного распределения ФЭУ в модели разрешения

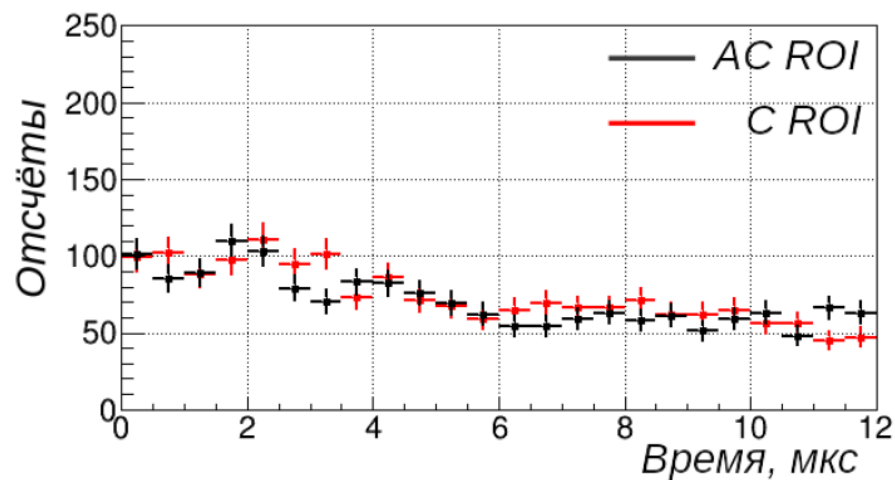
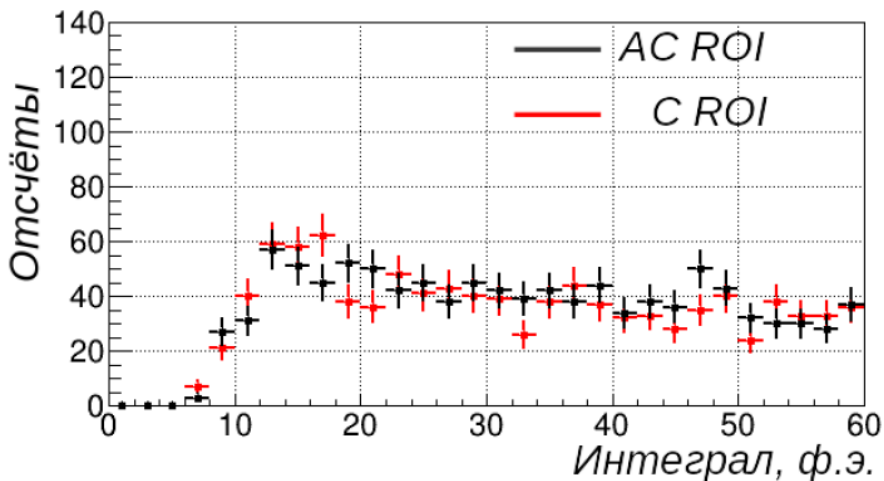


Измеренные распределения

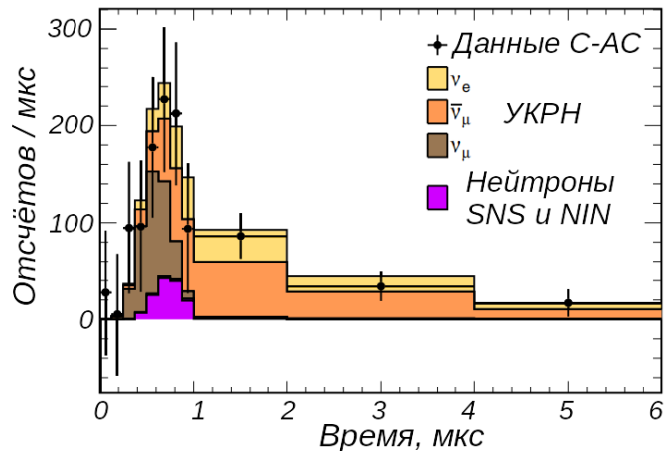
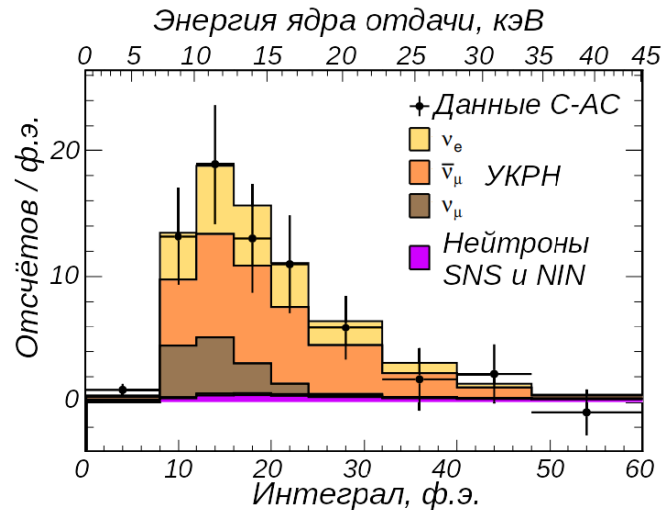
SNS ON



SNS OFF



Измерение сечения УКРН

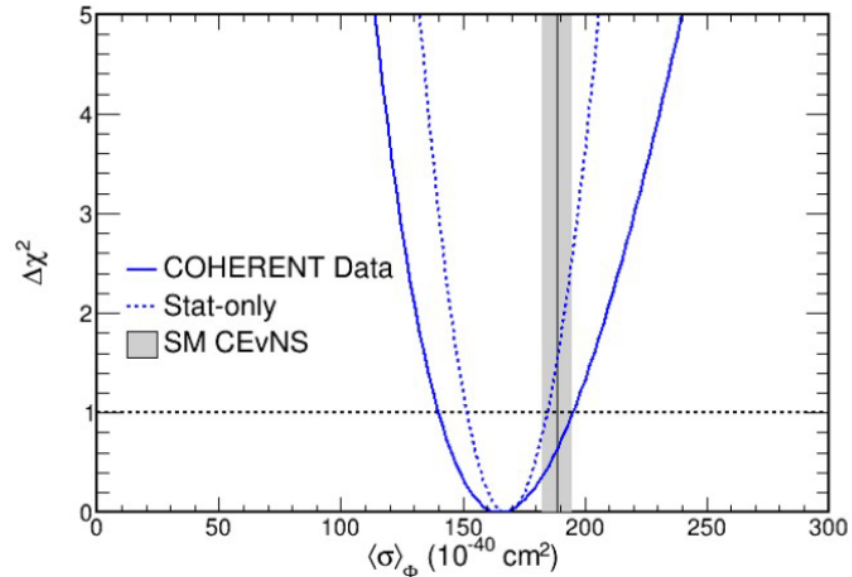


Подтверждаем наблюдение УКРН:

- значимость **11.6 σ**

- наблюдается: **306 ± 20** событий, предсказано SM: **341 ± 42**

- взвешенное по потоку SNS сечение: **$(165^{+30}_{-25}) \times 10^{-40} \text{ см}^2$**



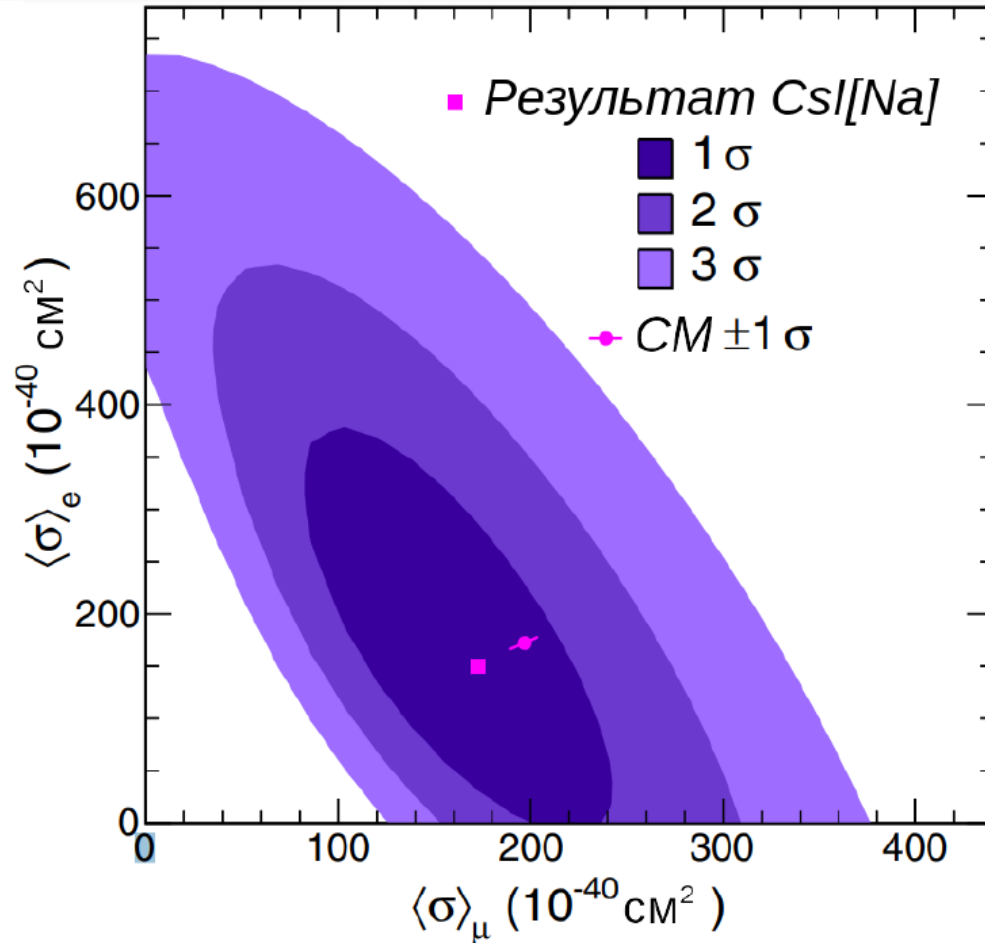
Результаты

1. Первая в мире регистрация УКРН на ядре атома. Значимость результата — 7σ .
2. Измерение усреднённого по спектру энергий нейтрино SNS сечения УКРН на ядрах атомов CsI: $\langle\sigma\rangle_{\Phi} = (165_{-25}^{+30}) \times 10^{-40} \text{ см}^2$.

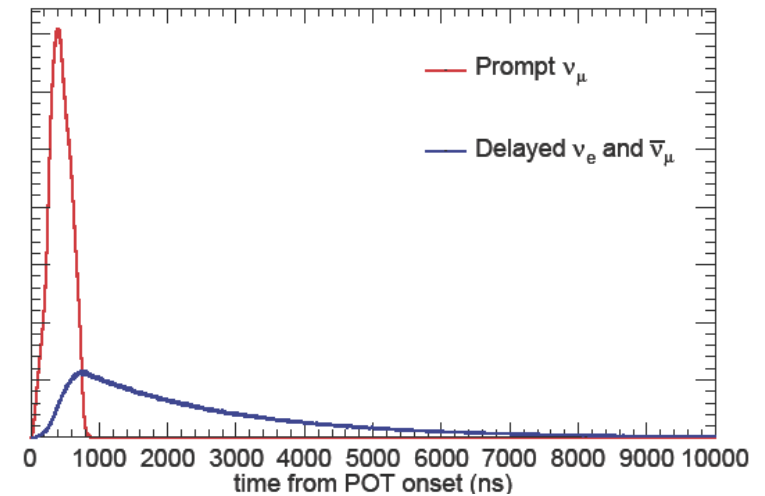
Работы

1. *Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering // Science. — 2017 — Vol. 357, p.1123-1126*
2. *Coherent elastic neutrino scattering on atomic nucleus: recently discovered type of low-energy neutrino interaction // Physics-Uspekhi — 2019 — Vol. 62, p. 166-178*
3. *Measurement of the Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering Cross Section on CsI by COHERENT // Physical Review Letters — 2022 — Vol. 129, 081801*
4. *Measurement of scintillation response of CsI[Na] to low-energy nuclear recoils by COHERENT // JINST. — 2022 — Vol. 17, P10034*

УКРН различных типов нейтрино



Чувствительность к сечению нейтрино разных типов обеспечено временным профилем потока

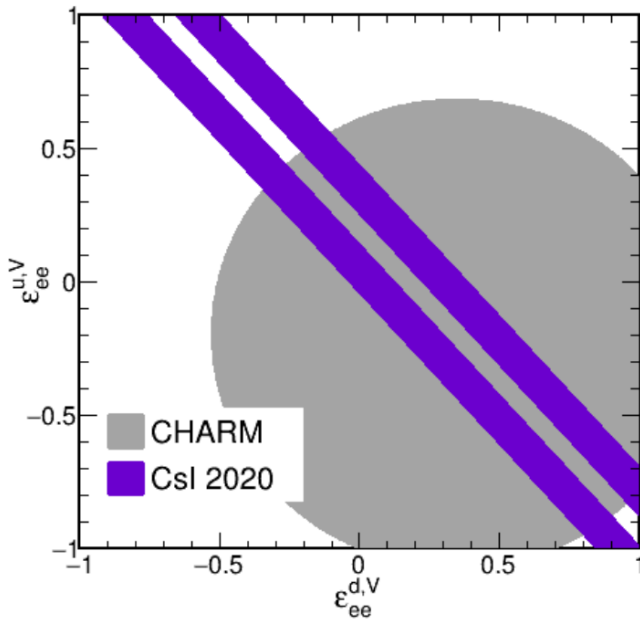


Значимость наблюдения отдельных сечений ниже 3 σ

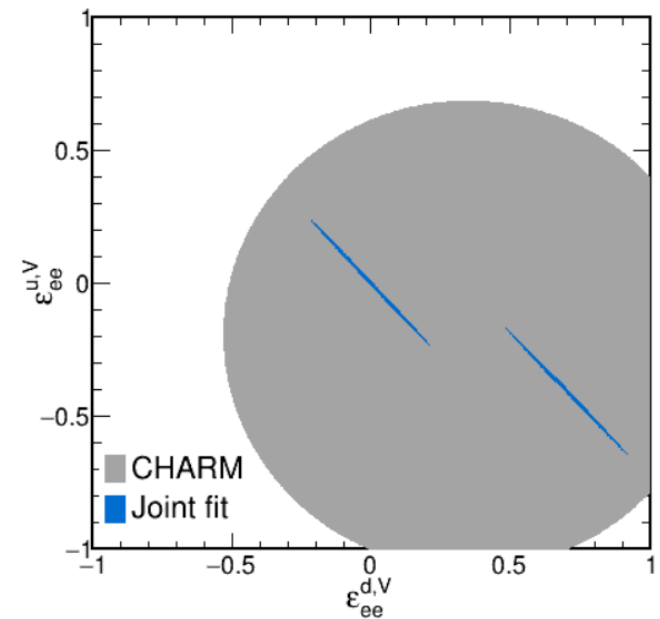
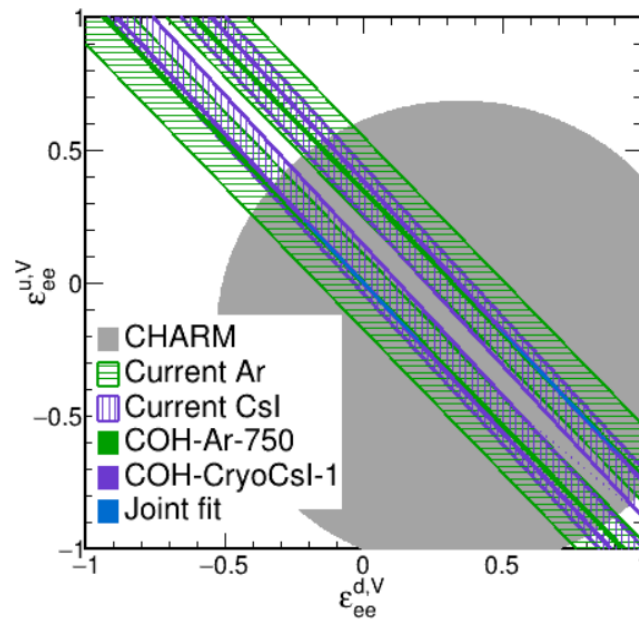
Нестандартные взаимодействия

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

На основе Csl[Na]

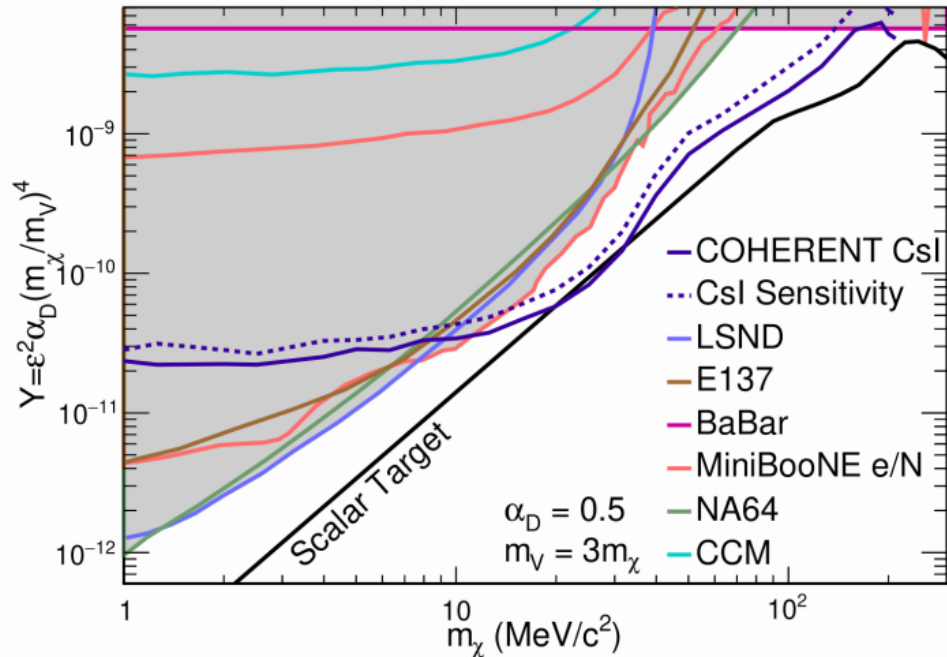
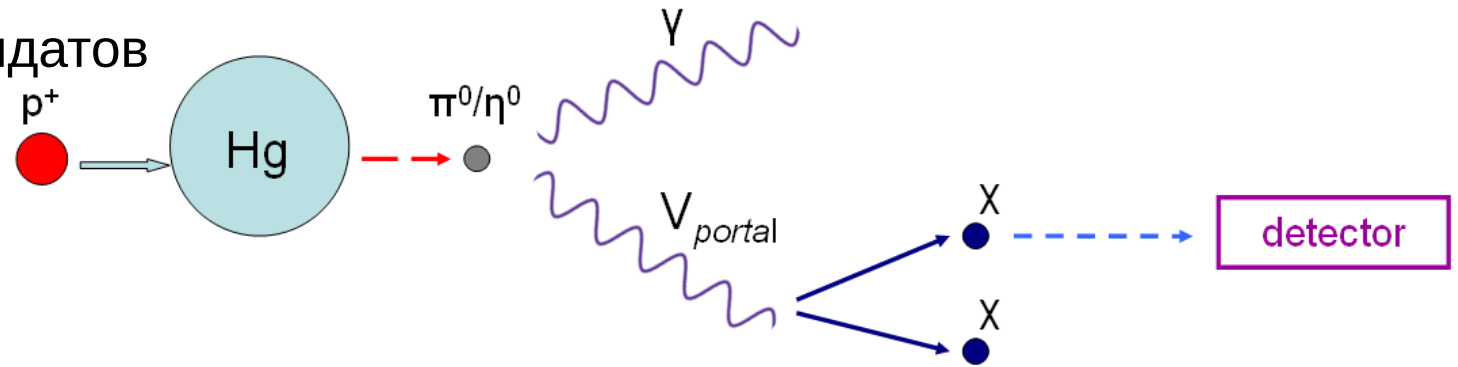


Планы COHERENT



Темная материя на SNS

Рождение частиц-кандидатов
на роль ТМ на SNS



Кинетическое смешивание V с фотоном

PRL 130, 051803 (2023)

«Лептофобная» ТМ

PRD 106, 052004 (2022)

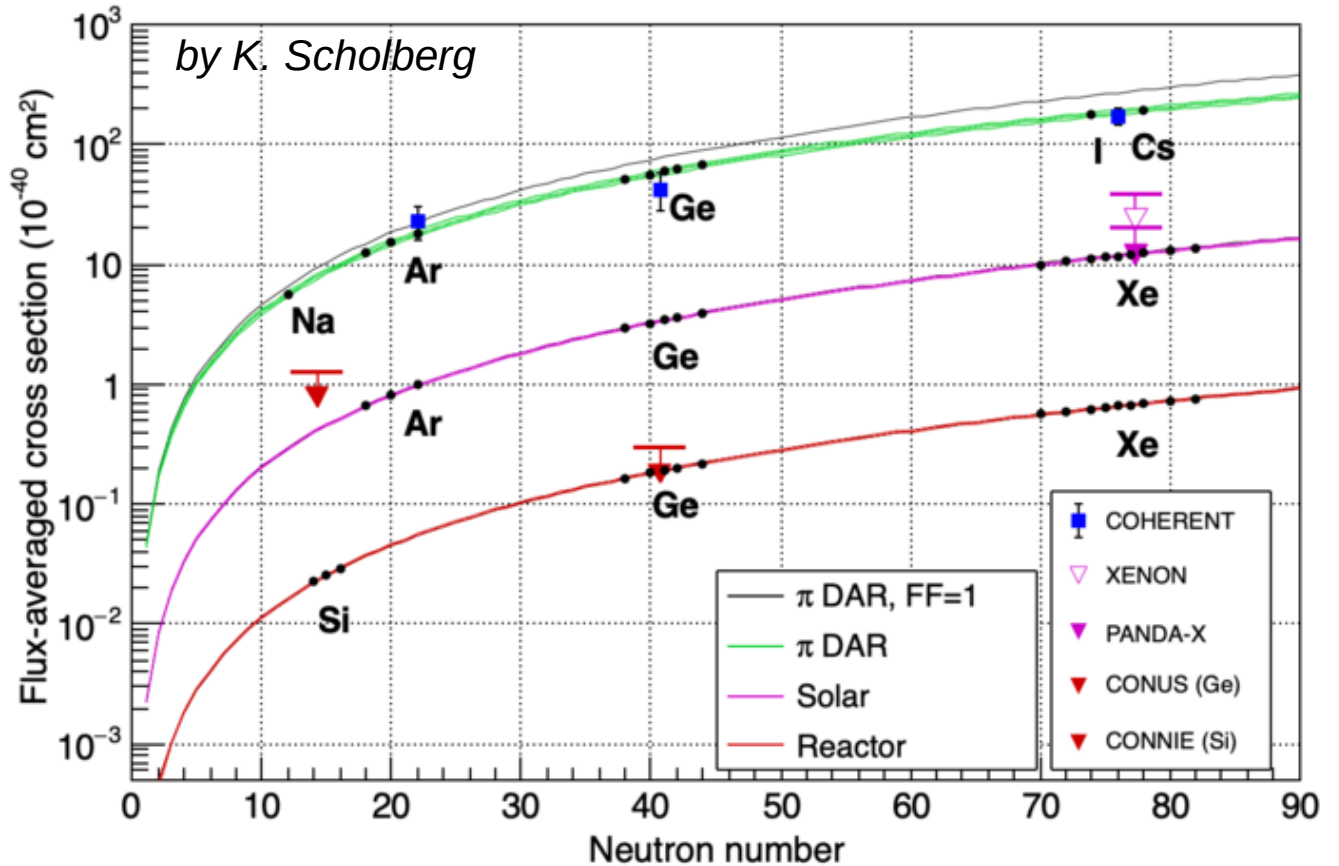
Наблюдение УКРН на других ядрах

COHERENT:

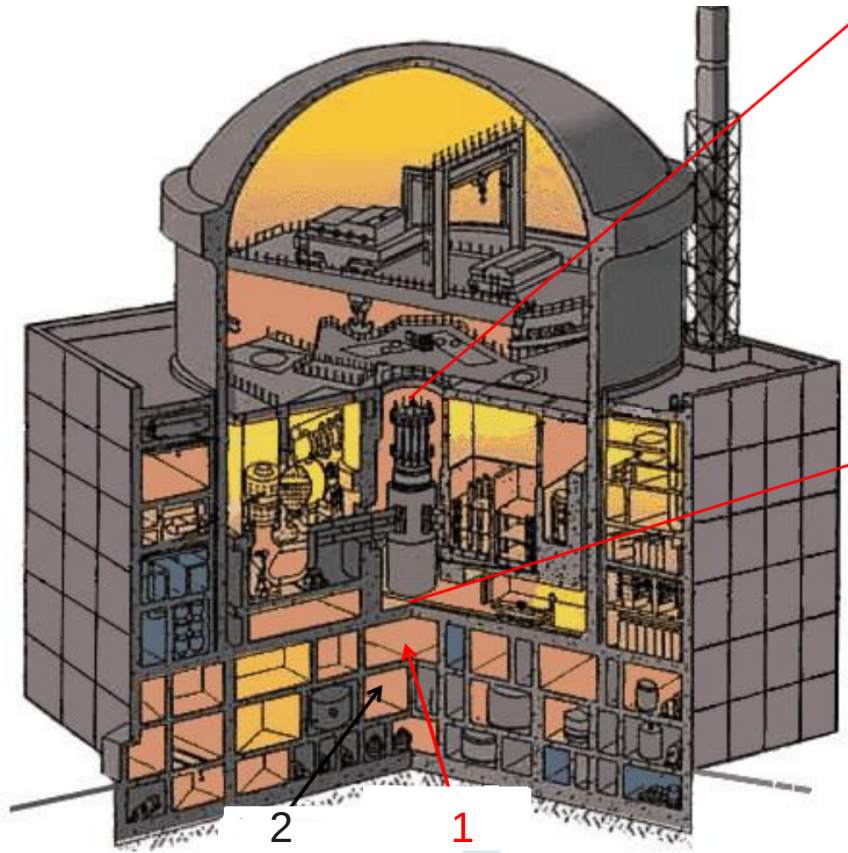
1. CsI (2017): $7\sigma \rightarrow 12\sigma$
2. Ar (2020): $\sim 3.5\sigma$
3. Ge (2023!): $> 3\sigma$

Реакторные:

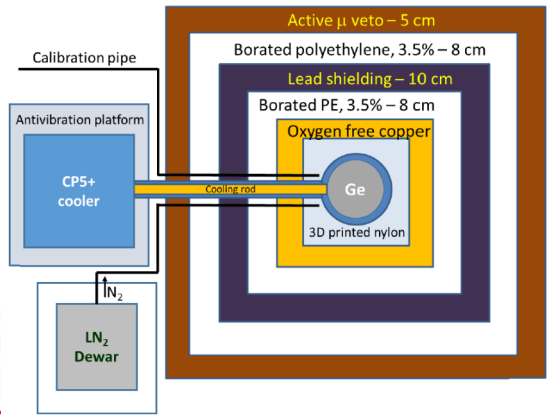
Заявление Dresden-II,
противоречащее
пределу CONUS (Ge)



Российские эксперименты

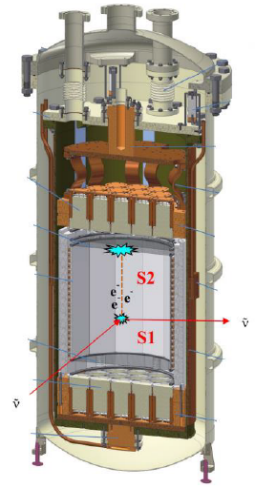


vGeN (ОИЯИ, ФИАН)



1.41 кг HPGE,
порог 0.3 кэV_{ee}

RED-100 (МИФИ, НИЦ КИ)



~100 кг LXe->LAR,
порог 0.3 кэV_{ee}

Блок	3	4
«1»	vGeN	DANSS
«2»	iDream	RED-100

- Произведено первое наблюдение процесса УКРН
- Измеренное сечение УКРН (C_{SI}) — наиболее точное из всех и единственное со значимостью выше 5σ

Область исследований активно развивается, в ближайшие 5-10 лет могут быть зарегистрированы УКРН реакторных $\bar{\nu}$ и солнечных ν

Спасибо за внимание!

Васкир: КФ, результаты повторного анализа

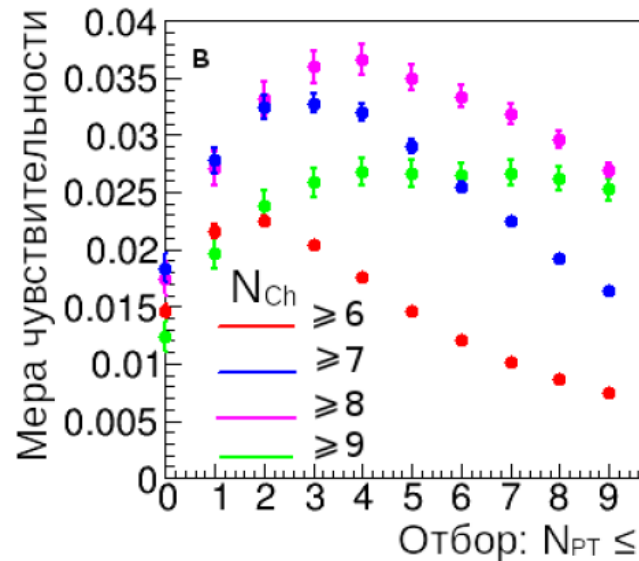
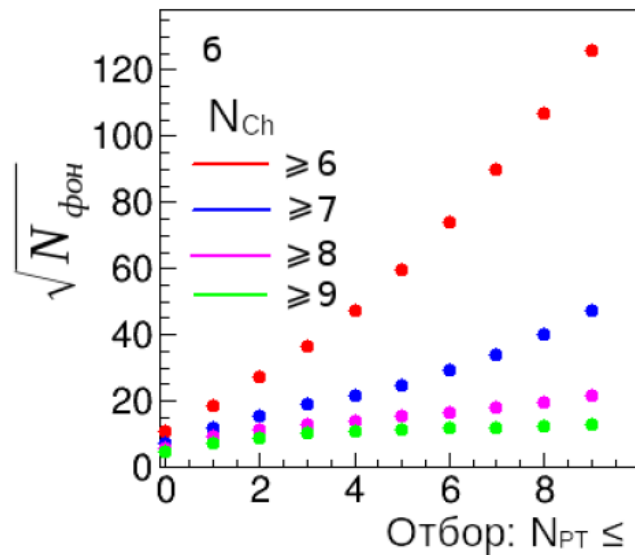
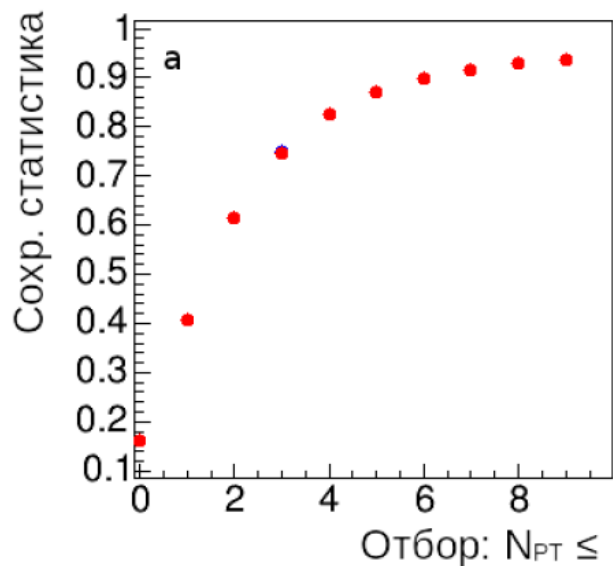
Результаты измерения COHERENT-1

Угол, °	Среднее $E_{яо}, \text{кэВ}$	СКО $E_{яо}, \text{кэВ}$	Отр. ЕJ, $\text{кэВ}_{эо}$	$E_{\text{вид}}, \text{кэВ}_{эо}$	КФ, % (эта работа)	КФ, % ([134])
19.9	3.5 ± 0.1	0.4	270	0.25 ± 0.02	7.2 ± 0.8	$7.38^{+0.10}_{-0.14}$
25.1	5.5 ± 0.1	0.5	310	0.43 ± 0.02	7.8 ± 0.4	$7.97^{+0.13}_{-0.12}$
31.3	8.4 ± 0.2	0.7	330	0.76 ± 0.03	9.1 ± 0.4	9.32 ± 0.08
37.4	11.8 ± 0.2	1.0	280	1.16 ± 0.03	9.8 ± 0.4	$10.10^{+0.09}_{-0.10}$
44.0	16.2 ± 0.3	1.4	600	1.65 ± 0.05	10.2 ± 0.4	10.34 ± 0.13
55.2	24.8 ± 0.5	1.8	810	2.65 ± 0.07	10.7 ± 0.4	11.00 ± 0.13
55.8	25.4 ± 0.5	1.8	800	2.75 ± 0.08	10.8 ± 0.4	11.04 ± 0.18
68.0	36.3 ± 0.7	2.5	810	3.75 ± 0.09	10.3 ± 0.4	10.76 ± 0.11
73.8	41.6 ± 0.8	2.9	810	4.29 ± 0.11	10.3 ± 0.4	10.75 ± 0.12
85.5	52.7 ± 1.1	3.7	810	5.14 ± 0.23	9.7 ± 0.4	10.40 ± 0.15
90.0	55.8 ± 1.1	4.7	600	5.18 ± 0.21	9.3 ± 0.4	9.75 ± 0.20
97.1	62.6 ± 1.3	5.2	580	5.82 ± 0.27	9.3 ± 0.4	9.67 ± 0.23

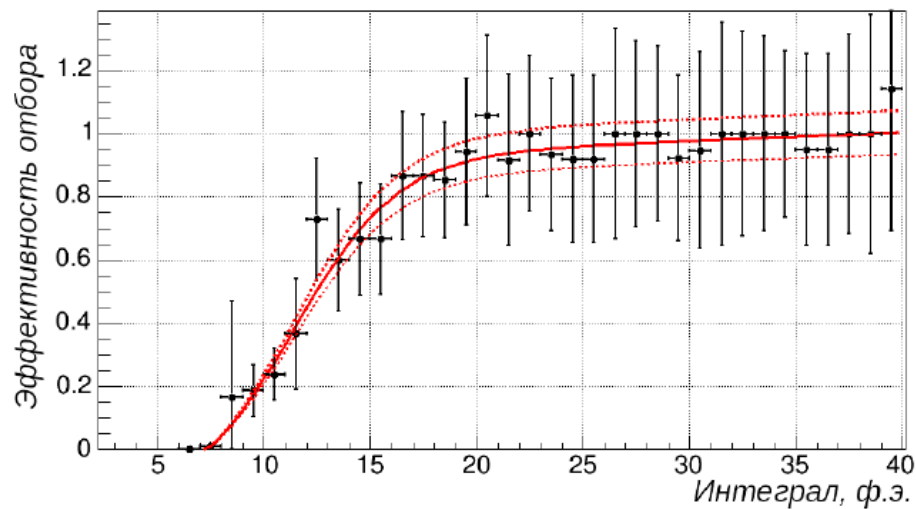
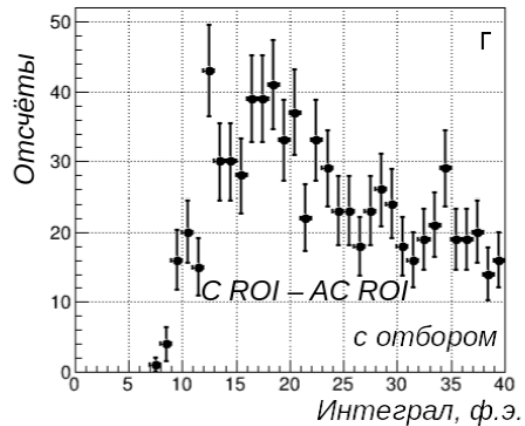
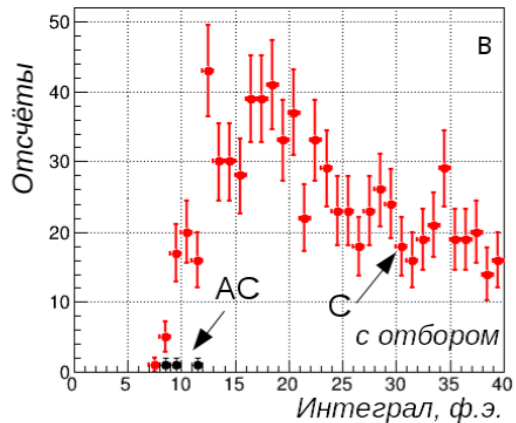
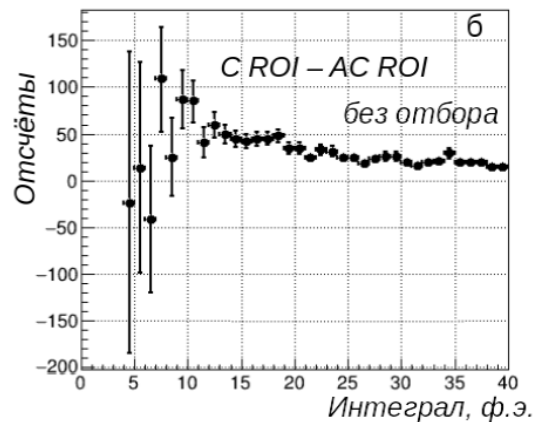
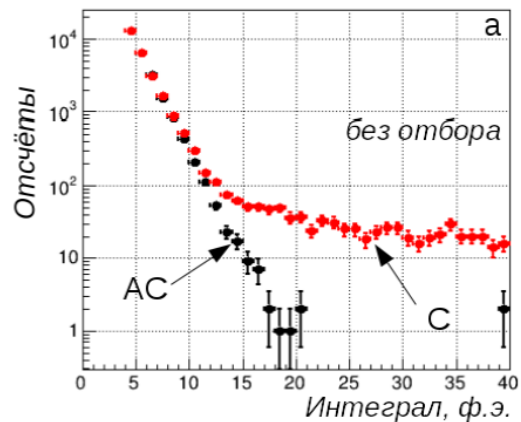
Результаты измерения COHERENT-2

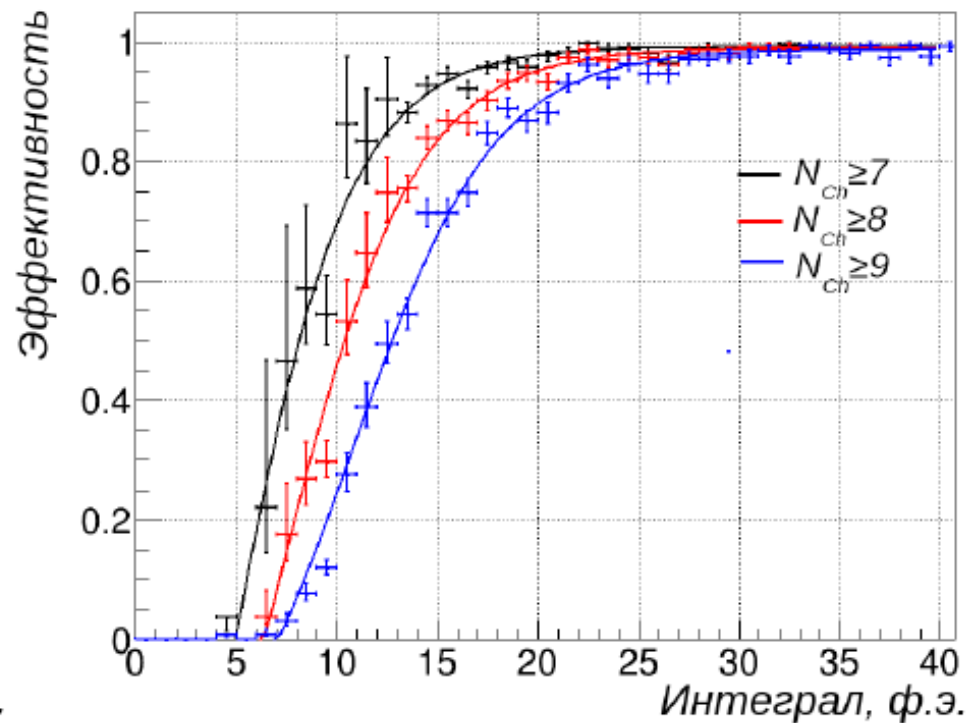
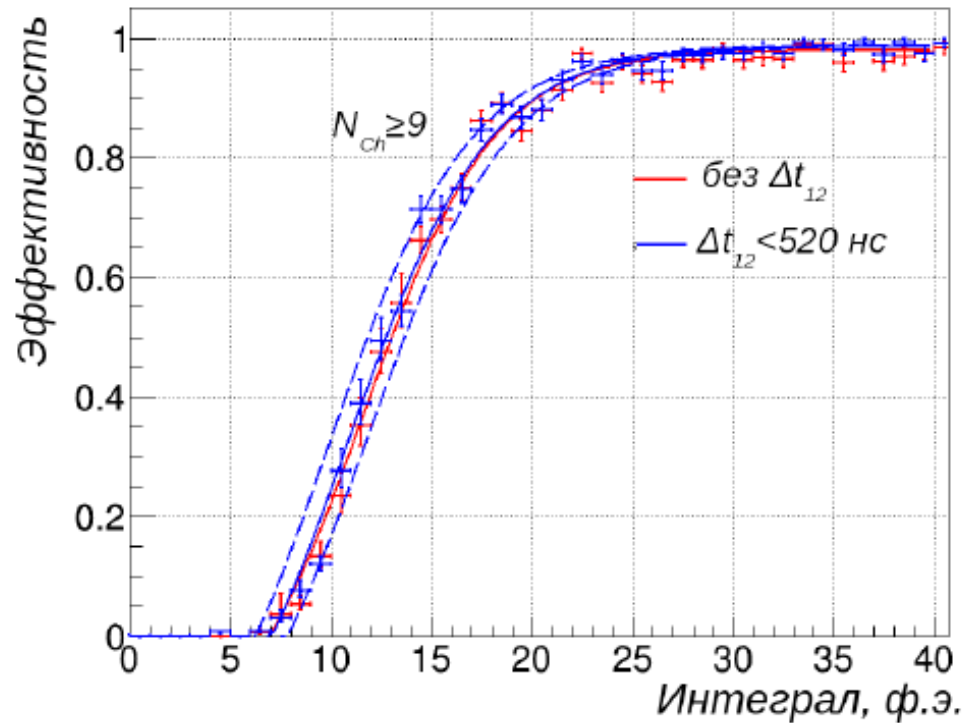
Угол, °	Средн. $E_{nr}, \text{кэВ}_{яо}$	СКО $E_{nr}, \text{кэВ}_{яо}$	$E_{\text{вид}}, \text{кэВ}_{эо}$	КФ, % (эта работа)	КФ, % (из [131])
18	2.85 ± 0.06	0.51	0.151 ± 0.023	5.3 ± 0.8	5.21 ± 1.74
21	3.85 ± 0.08	0.65	0.266 ± 0.017	6.9 ± 0.5	6.38 ± 0.76
24	4.98 ± 0.10	0.74	0.374 ± 0.021	7.5 ± 0.4	6.75 ± 0.75
27	6.24 ± 0.12	0.83	0.49 ± 0.03	7.8 ± 0.4	6.90 ± 0.65
33	9.17 ± 0.18	1.12	0.79 ± 0.04	8.6 ± 0.5	7.38 ± 0.51
39	12.6 ± 0.3	1.4	1.13 ± 0.06	9.0 ± 0.5	7.14 ± 0.67
45	16.5 ± 0.3	1.8	1.55 ± 0.08	9.4 ± 0.5	7.16 ± 0.63

Васкир: отборы и их оптимизация

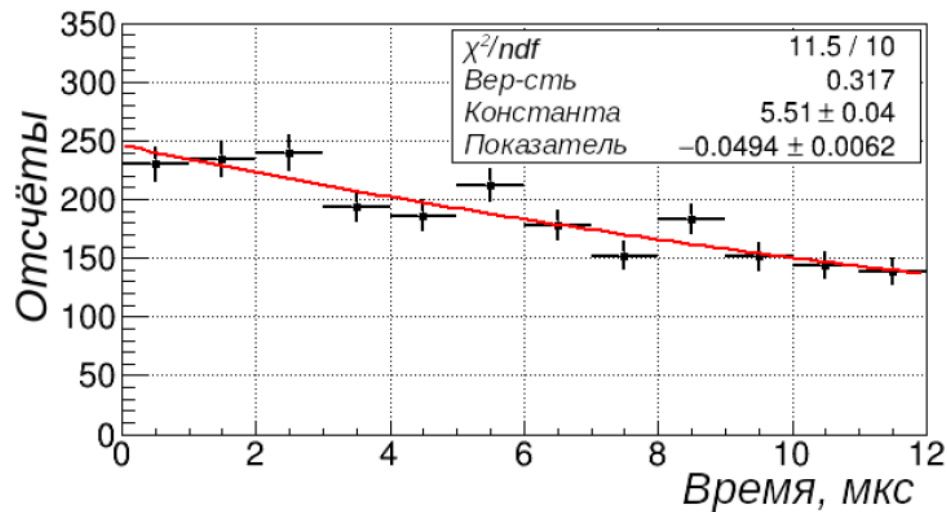
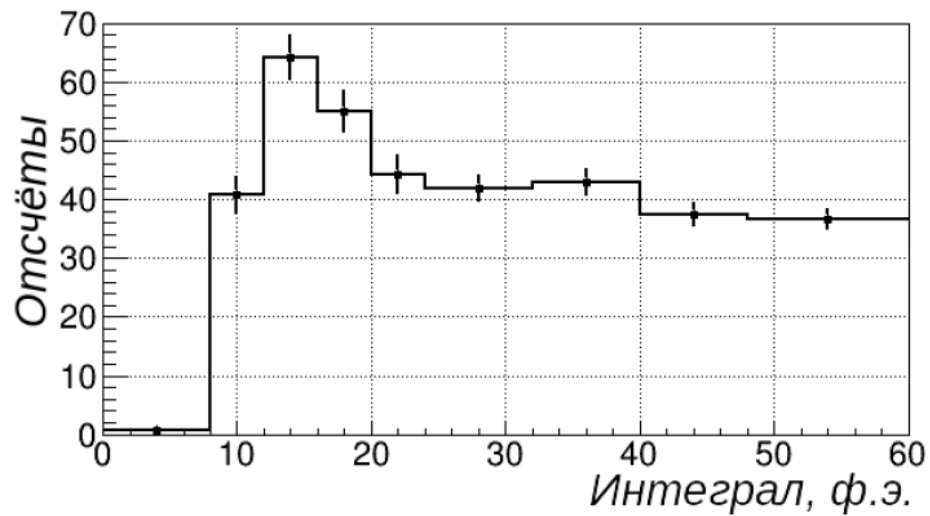


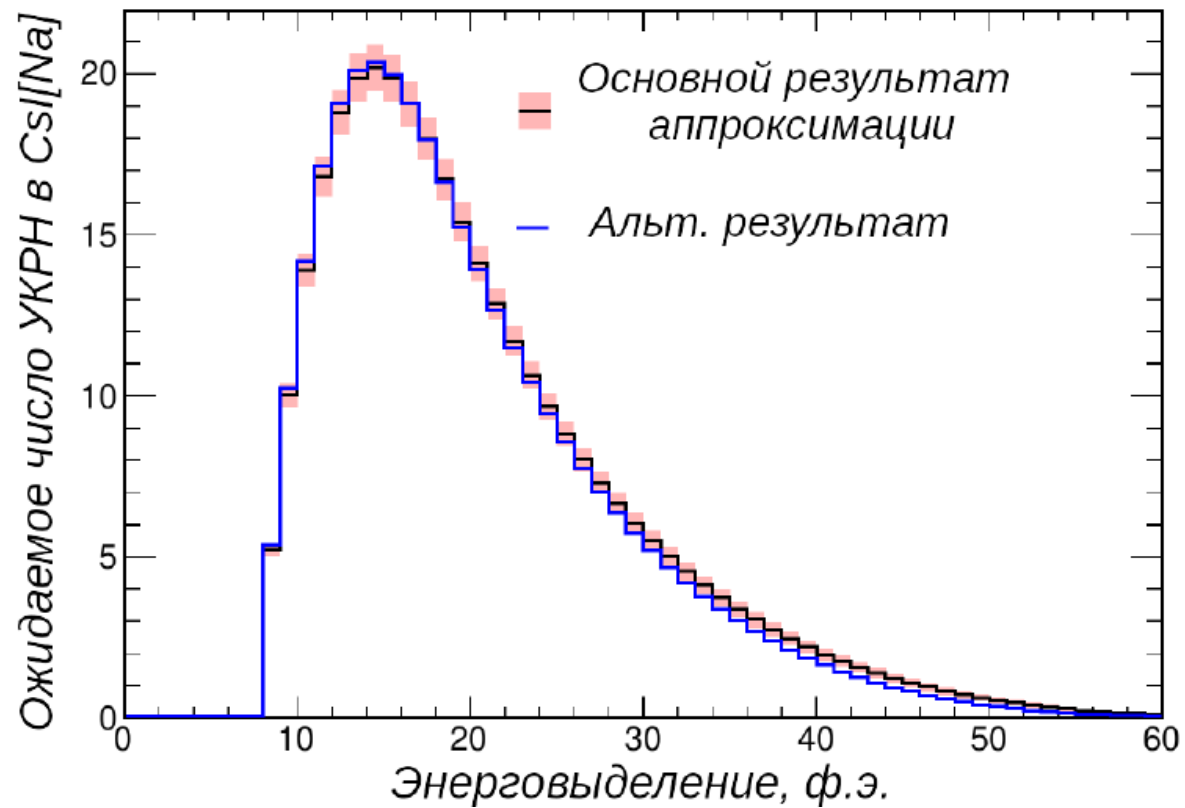
Васкир: калибровка ^{133}Ba и эффективность отборов

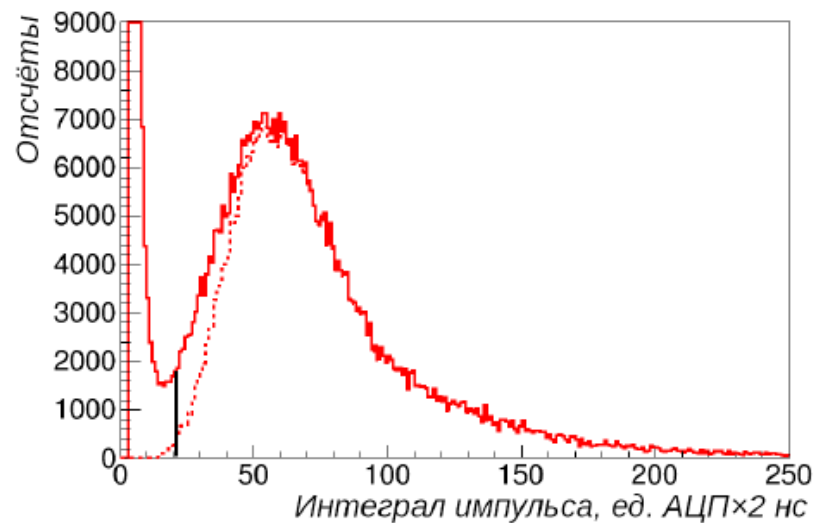
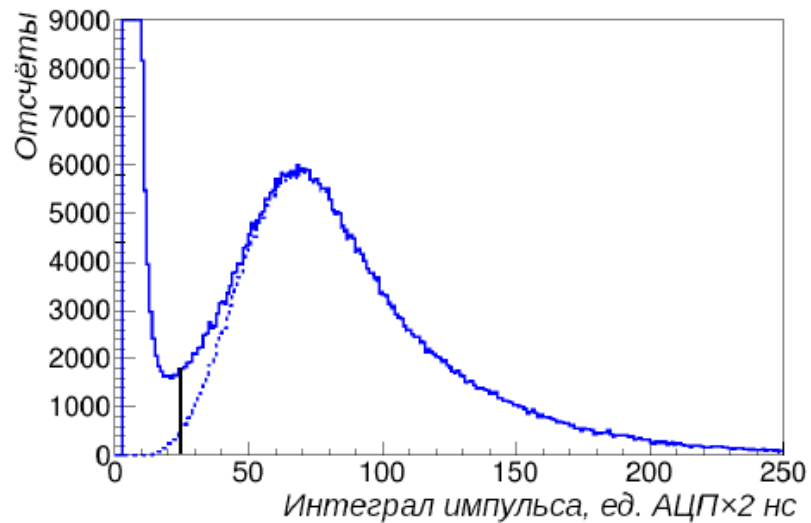
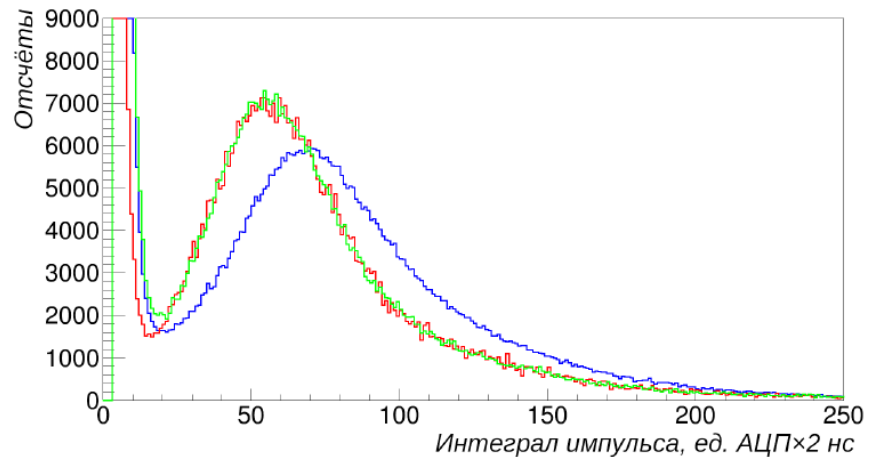


Васкир: калибровка ^{133}Ba и эффективность отборов

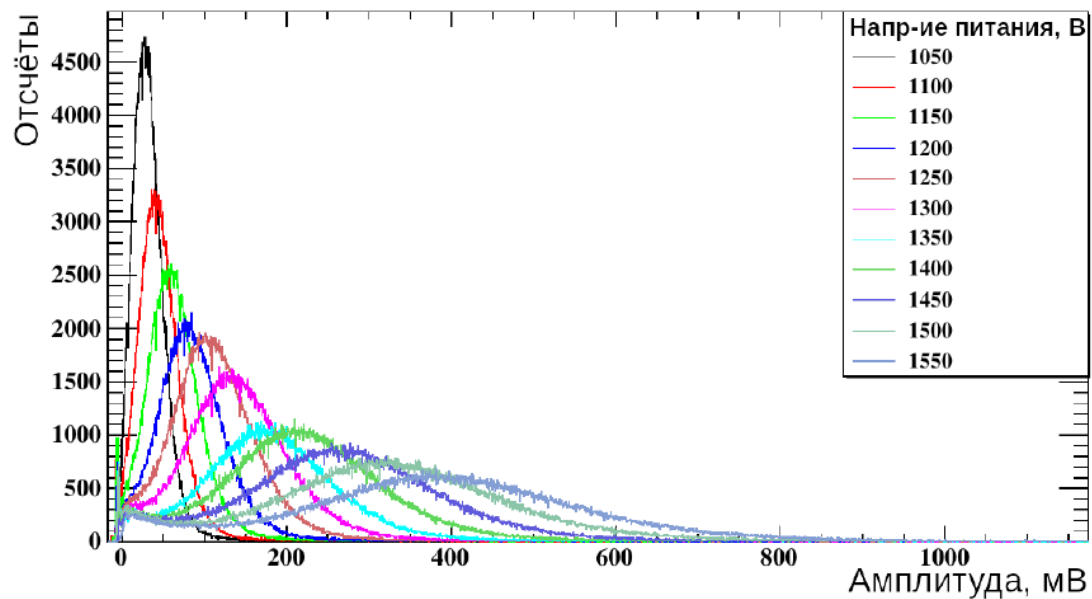
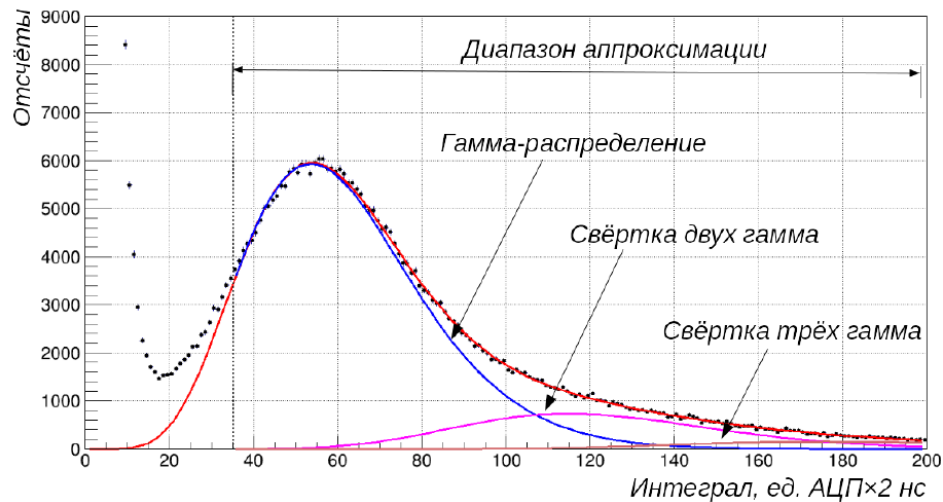
Васкир: модель постоянного фона

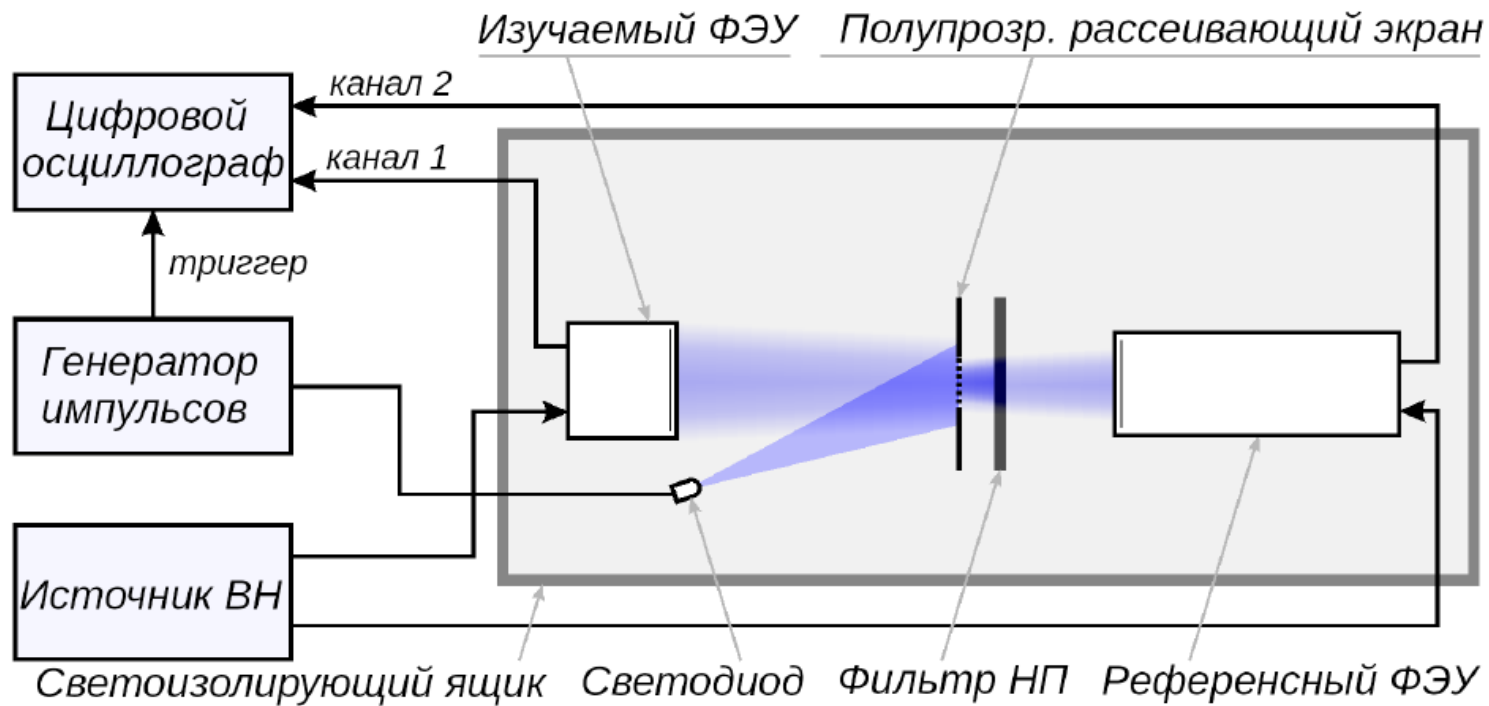


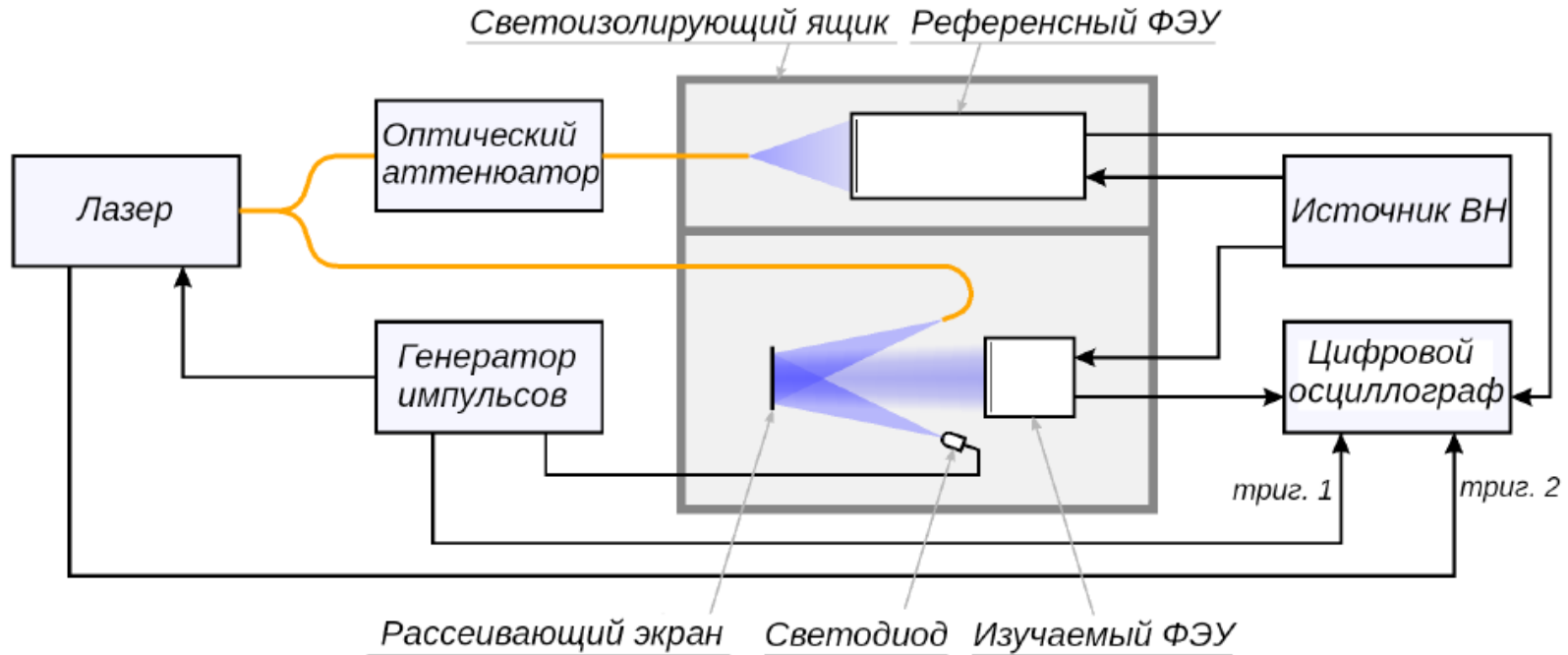




Васкур: описание SPE







Изменения процедуры и исправление недочетов:

1. Смягчение порога отбора однофотоэлектронных импульсов, восстановление эквивалентности отборов между данными SNS и данными калибровки ^{133}Ba
2. Ужесточение порога по числу импульсов в сигнале — восстановление независимости интеграла и времени появления в модели фона
3. Устранение аномального семейства сигналов в первых 100 нс временного распределения
4. Учёт потери сигналов с некорректно восстановленным началом (~2% эффект)
5. Исправление сдвига временного сдвига в базе данных мощности пучка (~7% эффект)
6. Дополнение модели разрешения учётом ширины распределения заряда SPE