

Поиск упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах ксенона в эксперименте РЭД-100

Ольга Разуваева
коллорабация РЭД-100
OERazuvaeva@mephi.ru

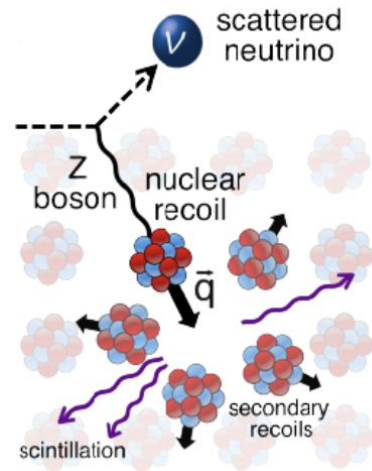
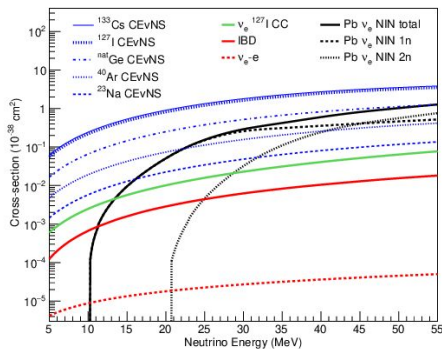
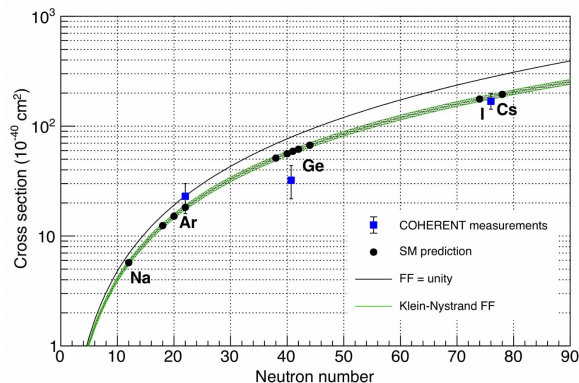
Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

Упругое когерентное рассеяние нейтрино

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

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

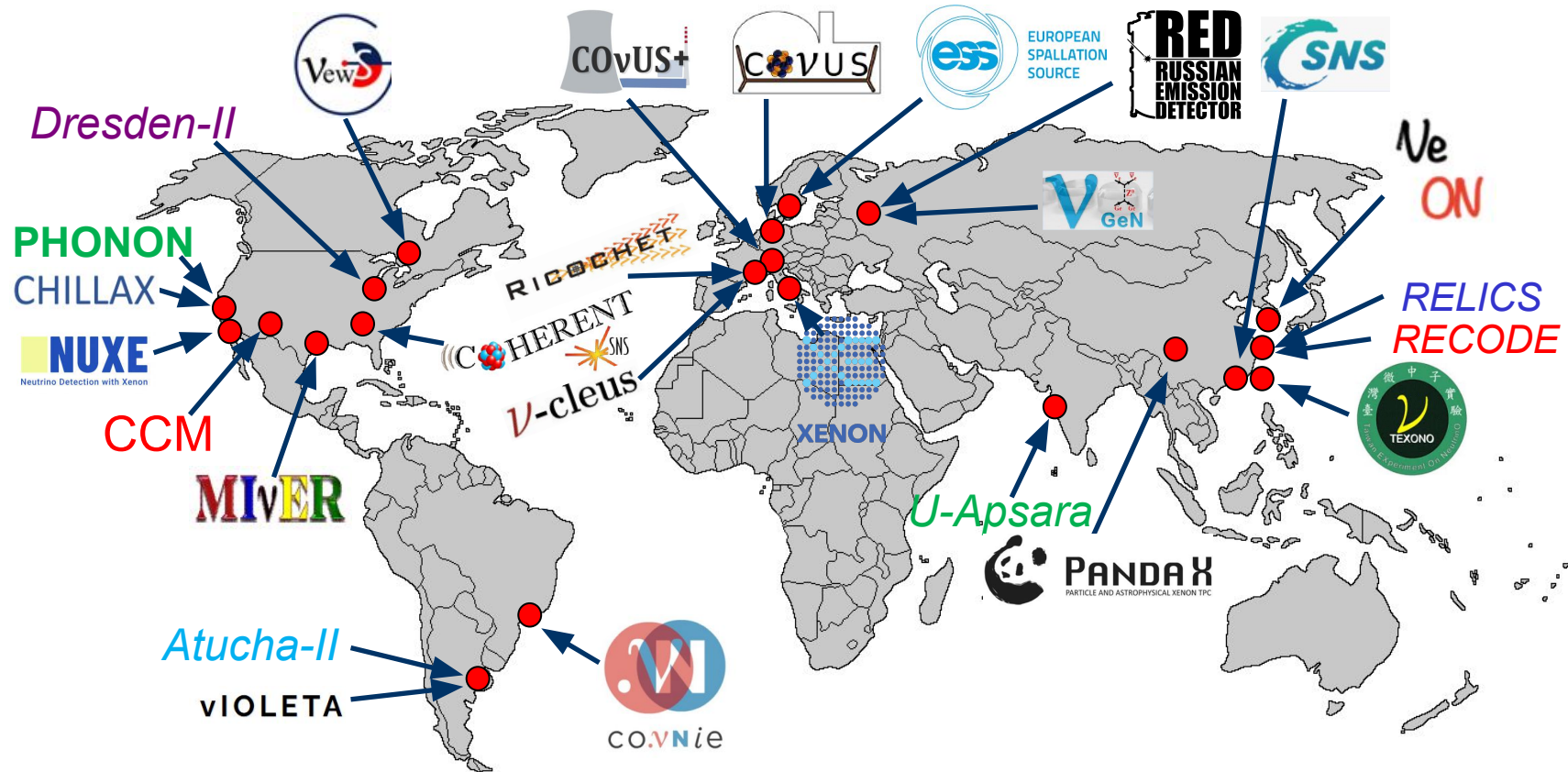
- процесс, предсказанный в рамках СМ в 1974 году
- в 2017 году экспериментально зарегистрирован коллаборацией COHERENT на SNS
- очень низкая энергия ядер отдачи (1-10 кэВ)



Мотивация исследований

- подтверждение СМ
- поиск “новой физики”
- мониторинг ядерных реакторов

Эксперименты по исследованию CEvNS (I)



Эксперименты по исследованию CEvNS (II)

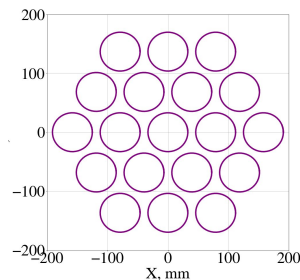
Последние результаты экспериментов

	Ускорительные ν	Реакторные ν	Солнечные ν
Cs/I	✓ (COHERENT, 2017)	—	—
Ar	✓ (COHERENT, 2019)	—	—
Ge	✓ (COHERENT, 2024)	✓ (CONUS+, 2025)	—
Xe		ограничение (РЭД-100, 2024)	✓ (XENON, PandaX, 2024)
Si		ограничение (CONNIE, 2019)	

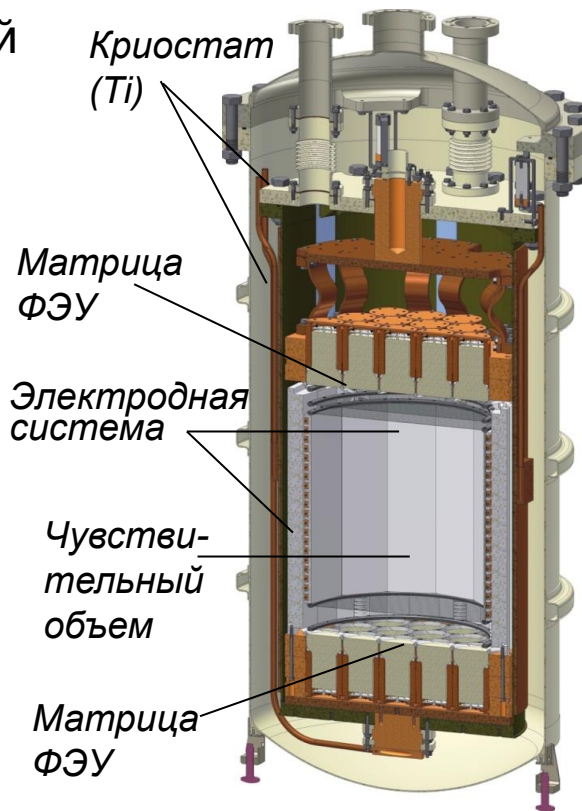
И. Житников, “Статус и результаты эксперимента nuGeN”

Детектор РЭД-100

- Двухфазный эмиссионный детектор
- Содержит ~200 кг LXe (~100 кг в чувствительном объеме)
- 26 ФЭУ Hamamatsu R11410-20 (19 в верхней матрице, 7 в нижней)
- Термосифонная система охлаждения (LN_2)

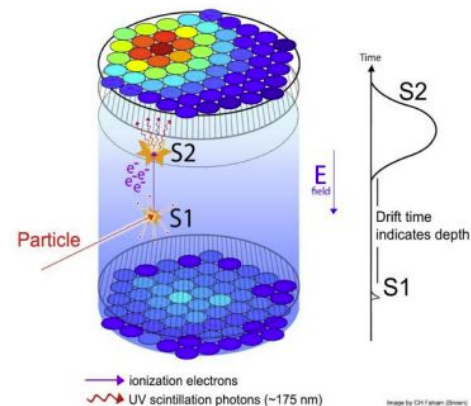


Геометрия матрицы и фото ФЭУ



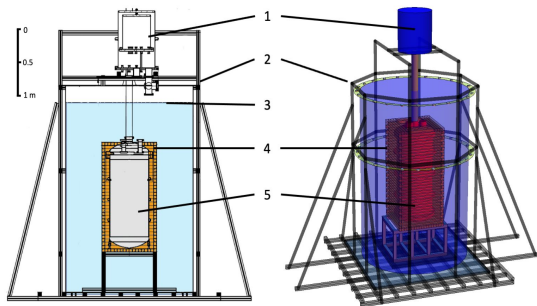
JINST 15 (2020) 02, P02020

Технология двухфазного метода регистрации частиц



Детектор чувствителен к одиночным электронам ионизации.
Ожидаемый сигнал от $\text{CE}\nu\text{NS}$ содержит до 10 электронов ионизации

Эксперимент РЭД-100 на Калининской АЭС



Конструкция пассивной защиты.

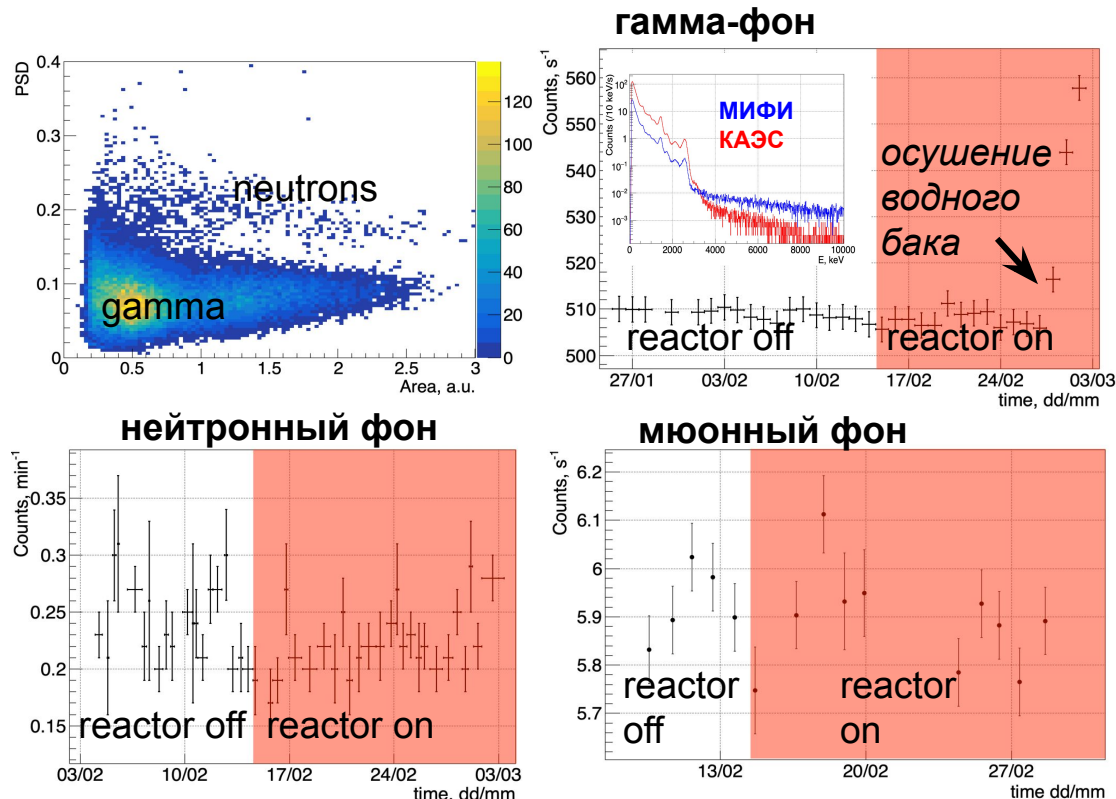
- 1 — термосифон,
- 2 — поддерживающий каркас,
- 3 — водный бак,
- 4 — медная защита,
- 5 — криостат детектора РЭД-100

- детектор находился в 19 метрах от реактора четвертого энергоблока
- пассивная защита: 5 см меди + 60 см воды + здание энергоблока
- 2019: тест в МИФИ, 2022: набор данных на КАЭС
- периоды как с выключенным так и с включенным реактором

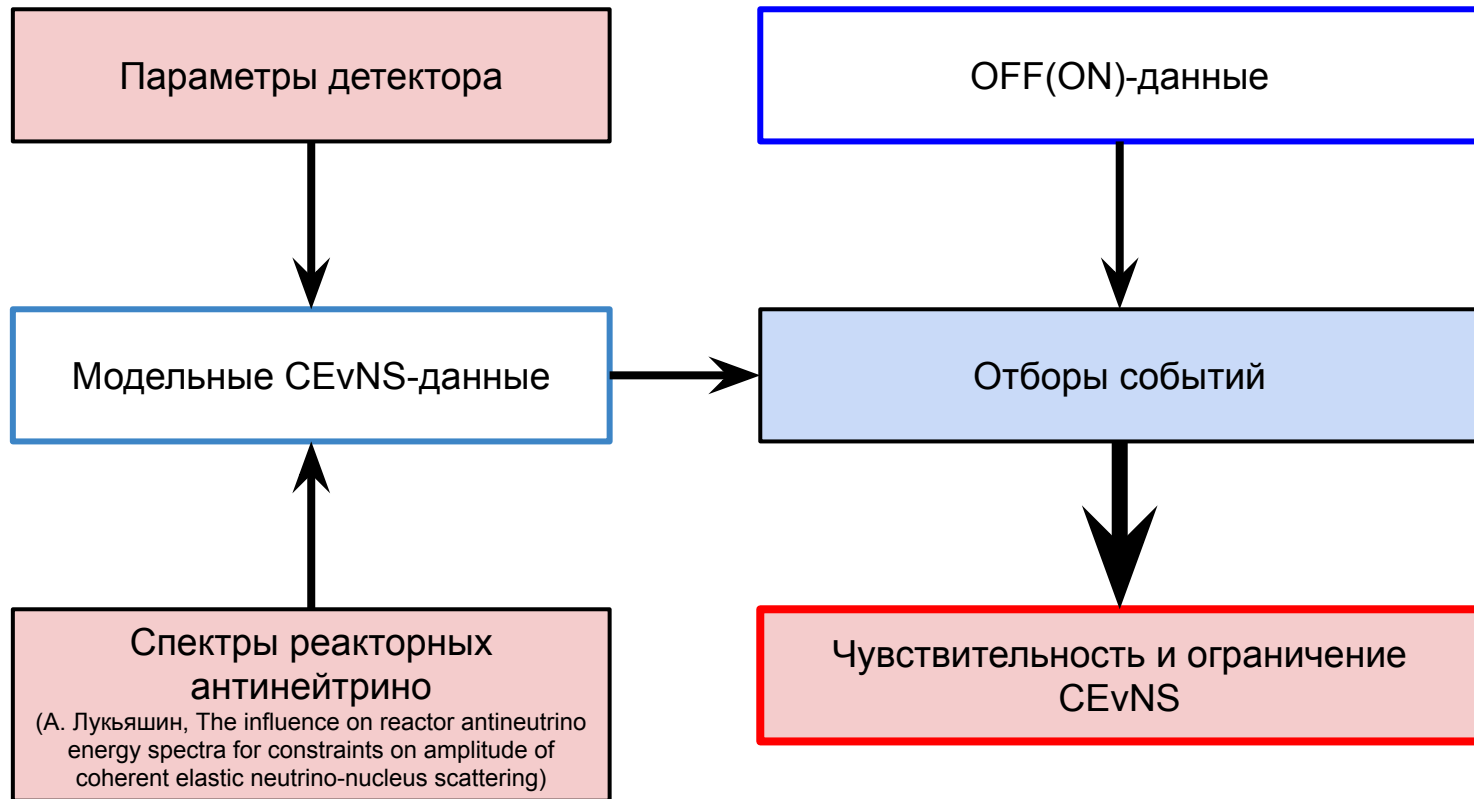


Измерения внешнего фона

- для измерения фона использовался детектор РЭД-100 и вспомогательные детекторы:
 - NaI[Tl]: гамма-фон
 - Bicron (BC501A LS): нейтронный фон
- мюонный фон измерялся при помощи детектора РЭД-100
- не обнаружено корреляций между уровнем фона и состоянием реактора



Упрощенная схема анализа данных



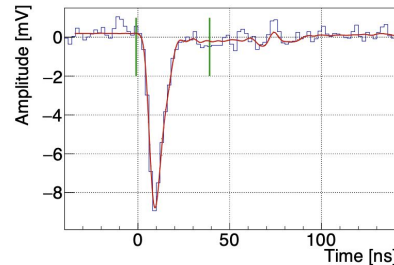
Калибровка и параметризация детектора (I)

Измеряемые параметры:

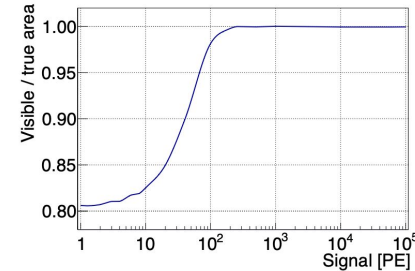
- параметры однофотозлектронных импульсов
- время жизни электронов при дрейфе в жидкой фазе
- функции эффективности светосбора в зависимости от положения S2
- параметры сигнала от одного электрона ионизации (SE)
- коэффициент экстракции электронов при переходе границы раздела фаз (electron extraction efficiency — EEE)

Калибровочные данные:

- LED-данные
- мюонные данные
- данные с нулевым порогом
- данные с гамма-источниками

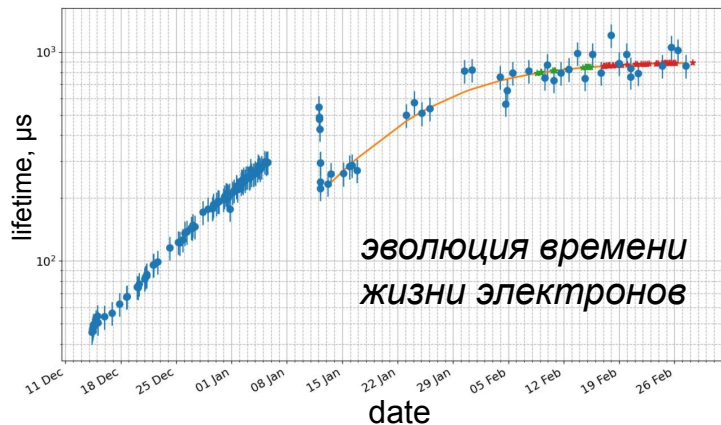


*форма SPE-
сигнала*

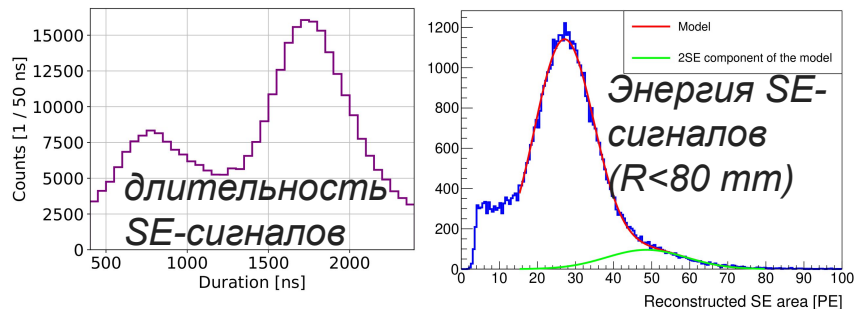


*эфф-ть определения
площади SPE сигнала*

Калибровка и параметризация детектора (II)



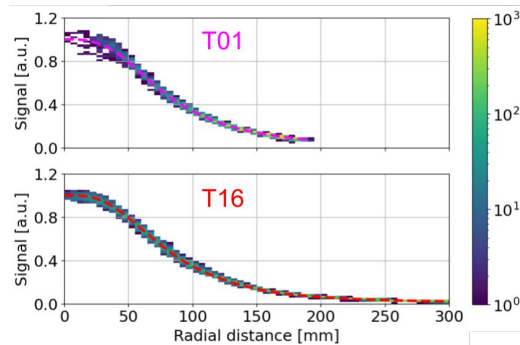
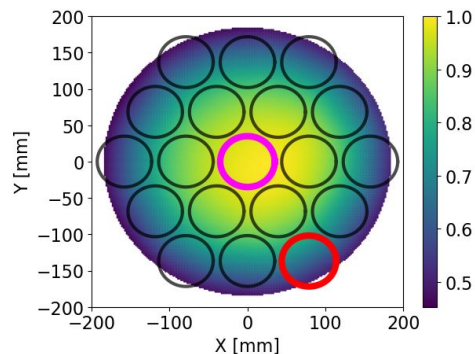
- время жизни электронов определялось по мюонным сигналам
- после продолжительной периода очистки удалось достичь значения **870 ± 20 мкс**



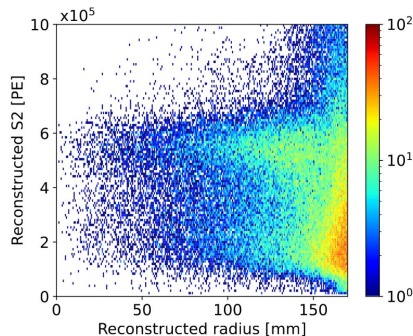
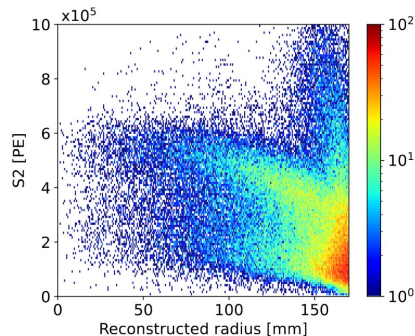
- данные с нулевым порогом позволяют наблюдать спонтанные SE
- размер SE (single electron gain — SEG): **27.0 ± 0.1 PE/SE**

JINST 19 (2024) 11, T11004

Калибровка и параметризация детектора (III)



Эффективность светосбора в зависимости от положения S2



Зависимость величины S2 от радиуса до и после коррекции

JINST 19 (2024) 11, T11004

- для составления карты эффективности светосбора использовались данные ^{60}Co
- коррекция величины S2 позволяет избежать зависимости от положения **для всех типов данных**

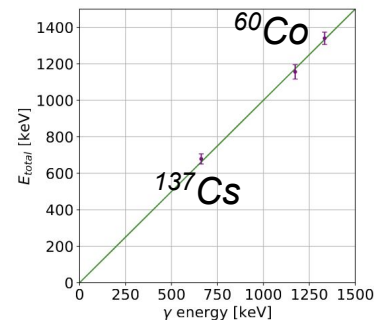
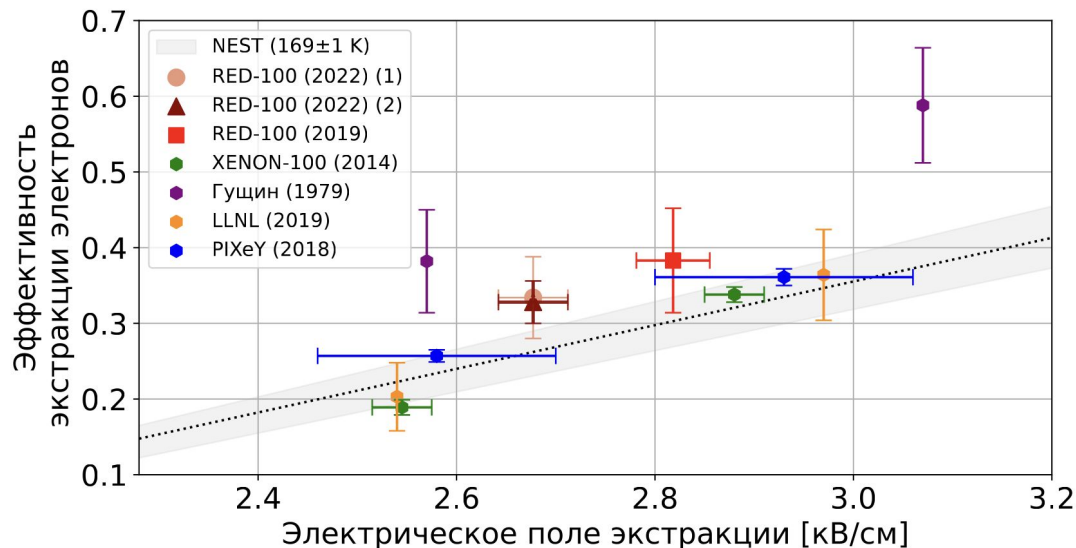


график энергетической калибровки

Калибровка и параметризация детектора (IV)

Эффективность экстракции электронов (EEE) — это вероятность выхода электрона из жидкой фазы в электролюминесцентный зазор

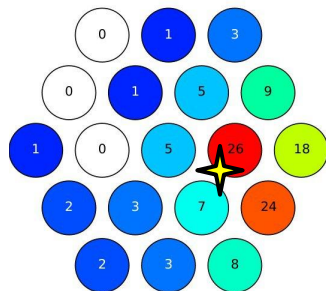
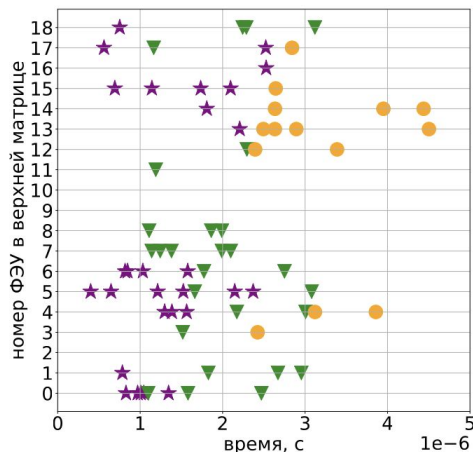
Полученное значение:
EEE = $32.8 \pm 2.8\%$



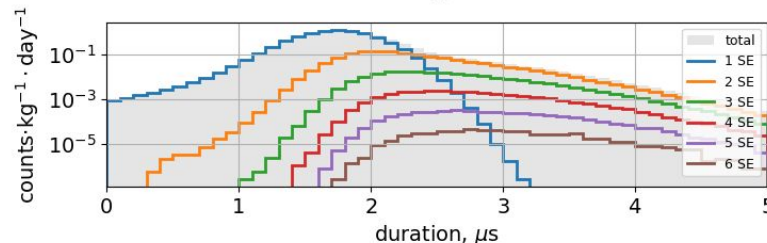
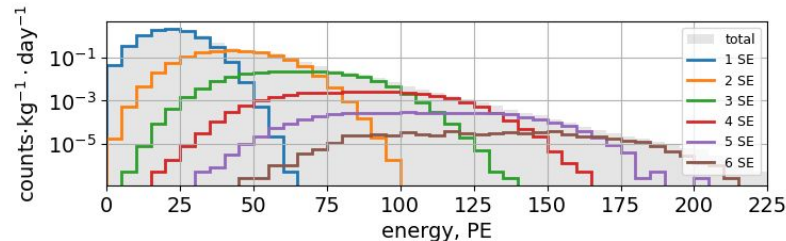
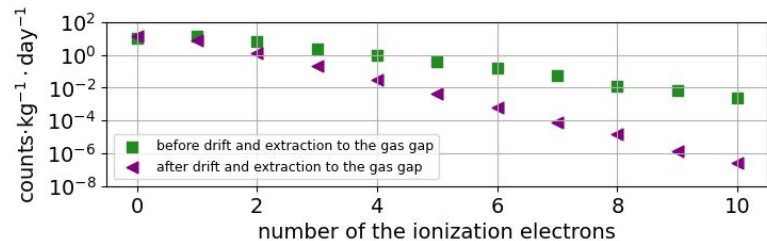
Результаты измерений EEE в эксперименте РЭД-100 и другими группами

Моделирование сигнала CEvNS

- Зарядовый выход рассчитан с использованием NEST v 2.4*
- Сигналы моделировались с использованием измеренных параметров детектора

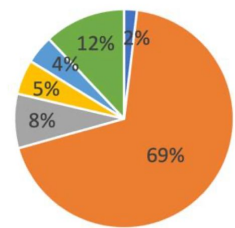
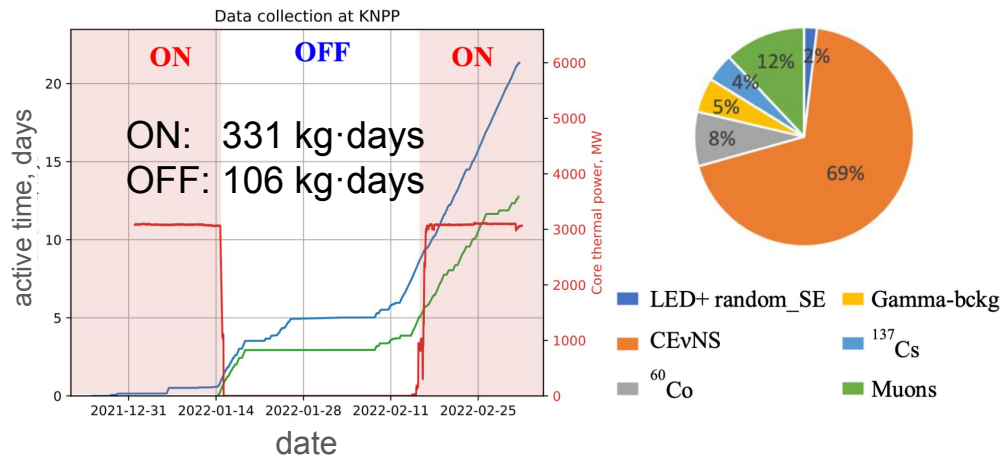


2411.18641 [hep-ex]

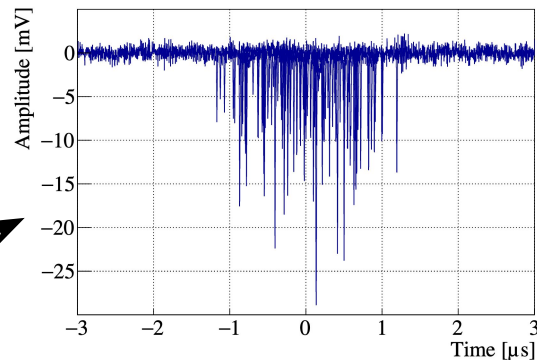


* Noble element simulation technique

Набор данных в области интереса



Форма сигнала события от
нескольких электронов ионизации



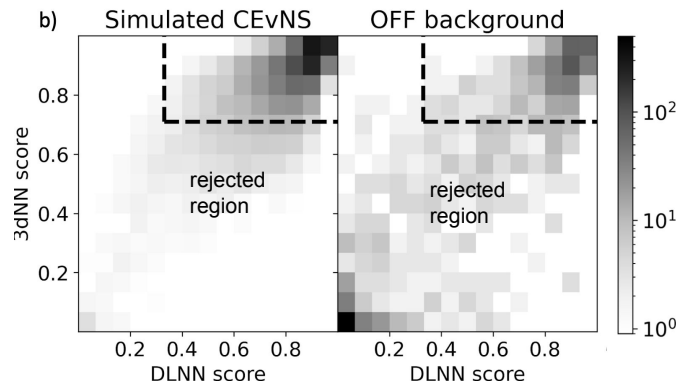
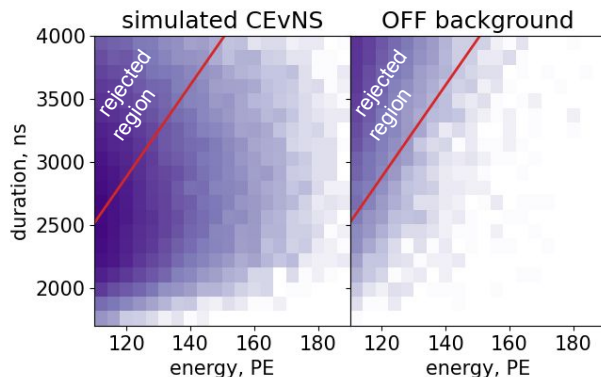
очень малая ионизация (<10 электронов)

Триггер:

- основан на подсчете SPE в интервале 2 мкс (>57 PE)
- набор блокируется после прохождения мюонов и больших гамма-квантов
- измеренное живое время ~60%

2411.18641 [hep-ex]

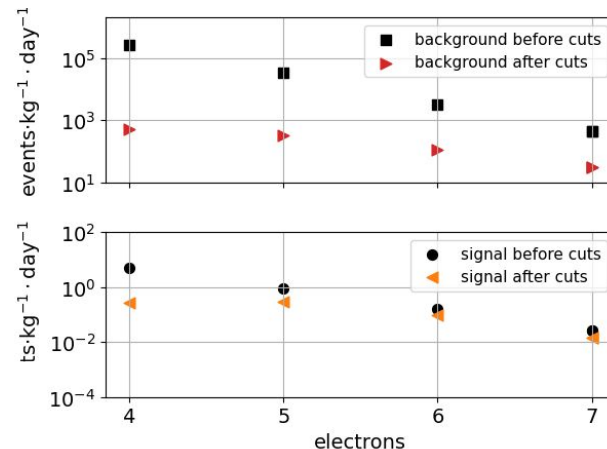
Обработка данных в области интереса



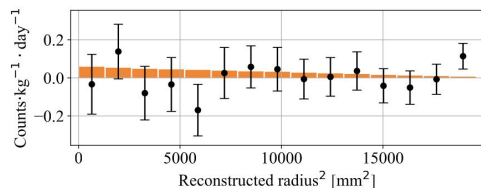
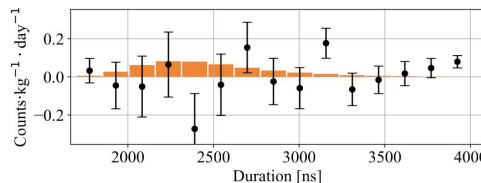
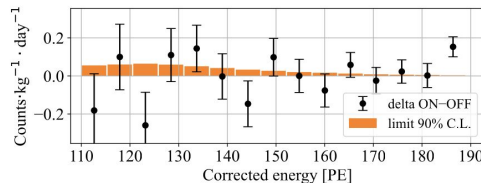
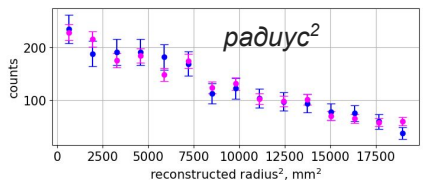
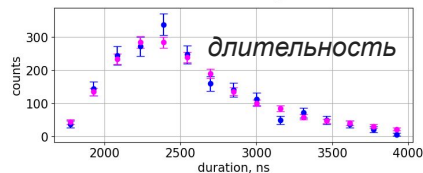
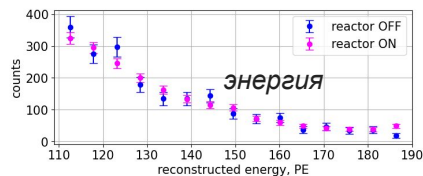
Отборы:

- по количеству случайных SPE до и после области триггера
- по энергии (>4 видимых электронов ионизации)
- по восстановленному радиусу (<140 мм)
- по длительности (отбор зависит от энергии)
- по точности (на основе нейронных сетей)

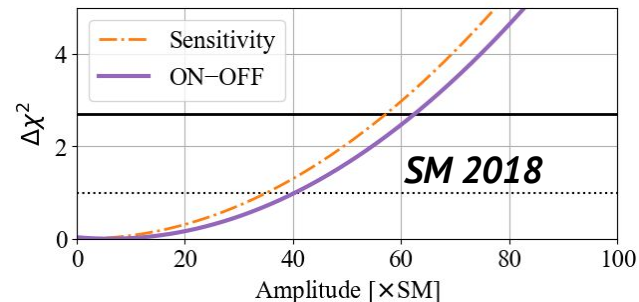
2411.18641 [hep-ex]



Анализ разностного спектра



- использована комбинированная гистограмма (энергия+длительность+радиус)
- для расчета ограничения — разница ON и OFF данных
- результат находится на уровне первых рангов других экспериментов на реакторах



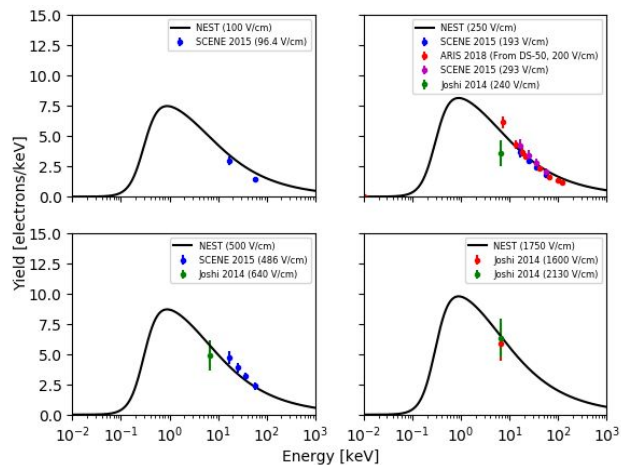
2411.18641 [hep-ex]

90% C.L.

sp. model	SM 2018	KI	DB	INR
sens.(× SM)	58	90	56	64
limit(× SM)	63	94	61	70

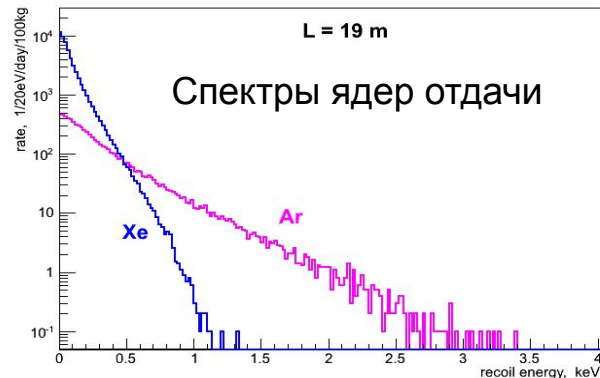
Замена рабочего вещества на аргон

- Использование аргона увеличит энергию ядер отдачи и сигнал в единицах электронов ионизации, при этом спонтанная эмиссия SE уменьшится.
- Для регистрации сцинтилляционного света от аргона на ФЭУ был напылен слой спектросместителя тетрафенил-бутадиена (TPB)



Зарядовый выход для ядер отдачи

ФЭУ с
напыленным TPB



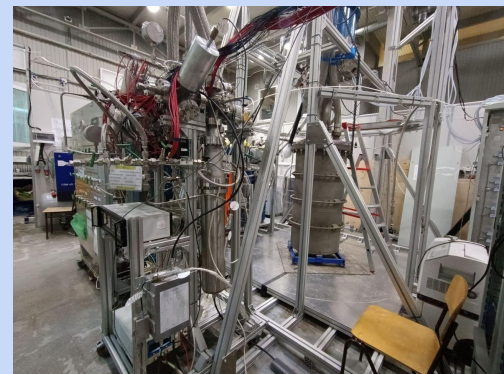
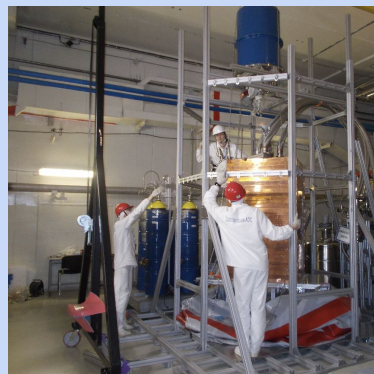
Заключение

- Поставлен эксперимент РЭД-100 на Калининской АЭС для изучения упругого когерентного рассеяния нейтрино
- Проведен комплексный анализ данных, включающий в себя калибровку, анализ фоновых условий и чувствительности детектора к $\text{CE}\nu\text{NS}$
- **Впервые** получено ограничение на $\text{CE}\nu\text{NS}$ от реакторных антинейтрино на ксеноне, соответствующее масштабному фактору **63** относительно CM
- ведутся работы по модернизации детектора для использования аргона в качестве рабочего вещества

(Ф. Ата-Курбонова, “Разработка методики калибровки двухфазного эмиссионного детектора RED-100 при помощи Ar-37”)

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-12-00082

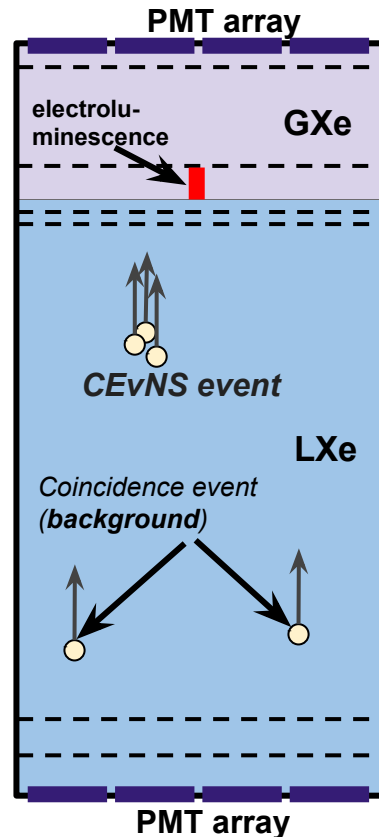
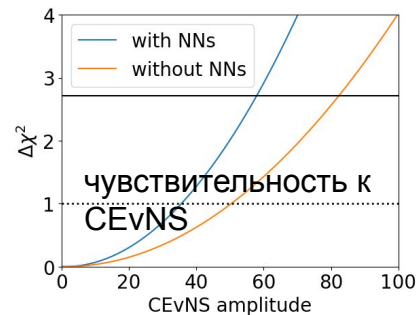
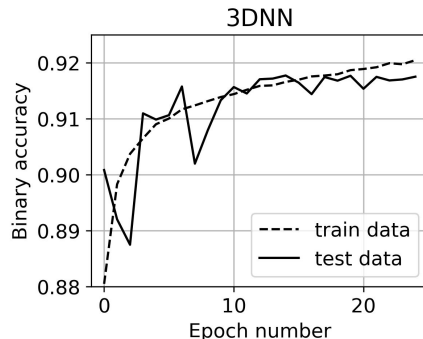
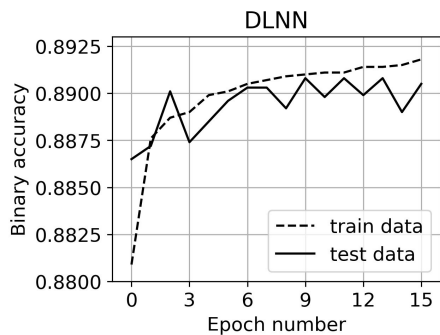
Спасибо за внимание!



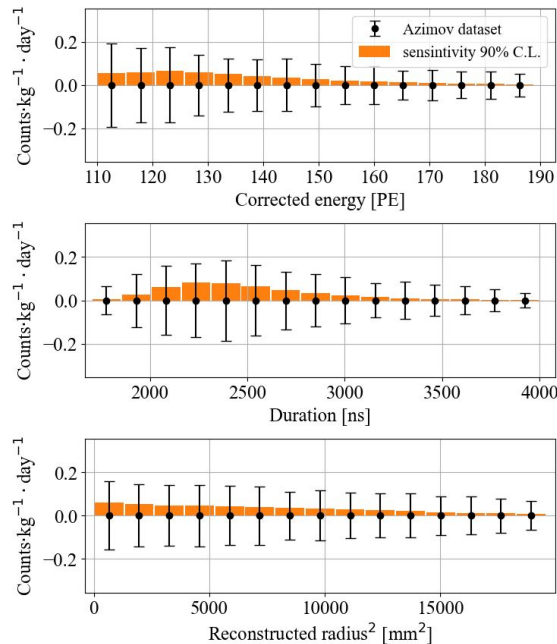
Запасные слайды

Подавление фона SE-совпадений

- спонтанные SE могут совпадать во времени и производить сигнал идентичный сигналу от $CE_{\nu}NS$
- произведено моделирование как $CE_{\nu}NS$ событий, так и совпадений случайных SE
- были обучены две нейронные сети (neural networks — NN):
 - DLNN (deep learning NN) (использует только распределение света по матрице ФЭУ)
 - 3D-NN (использует трехмерное “изображение” сигнала)
- отбор событий основан на предсказаниях обеих сетей

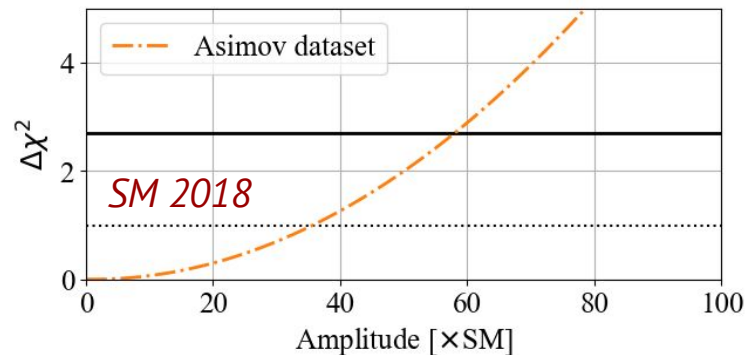


Анализ чувствительности

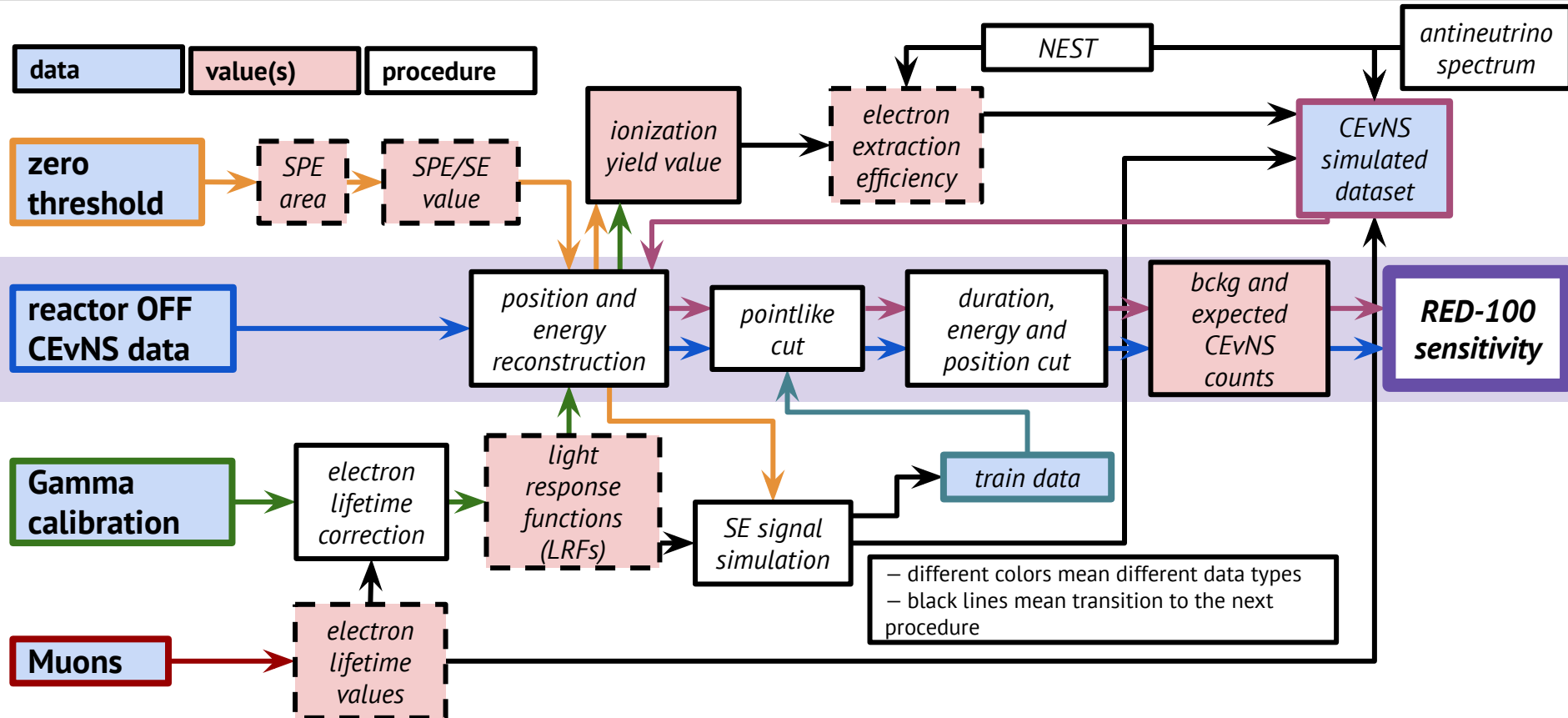


- использована комбинированная гистограмма (энергия+длительность+радиус)
- для расчета чувствительности — датасет Азимова
- чувствительность использовалась для оптимизации отборов

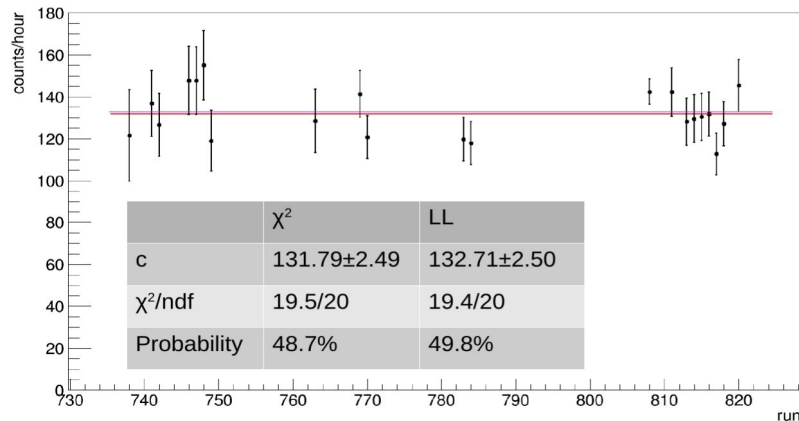
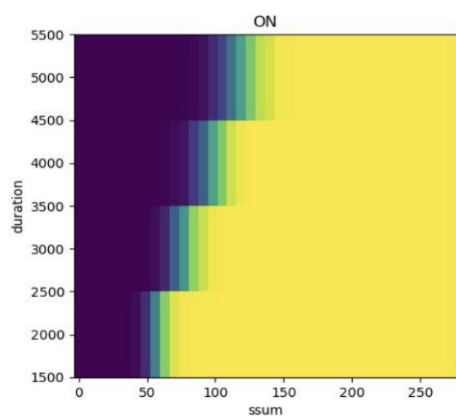
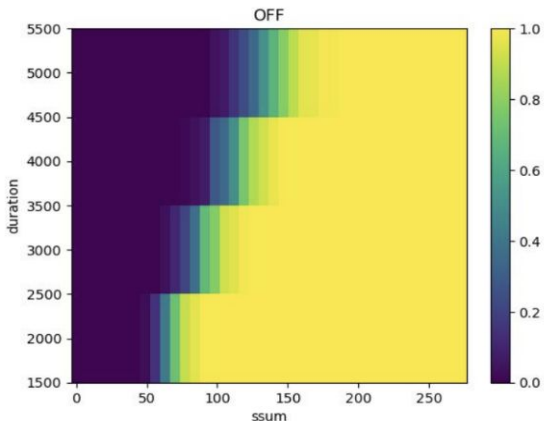
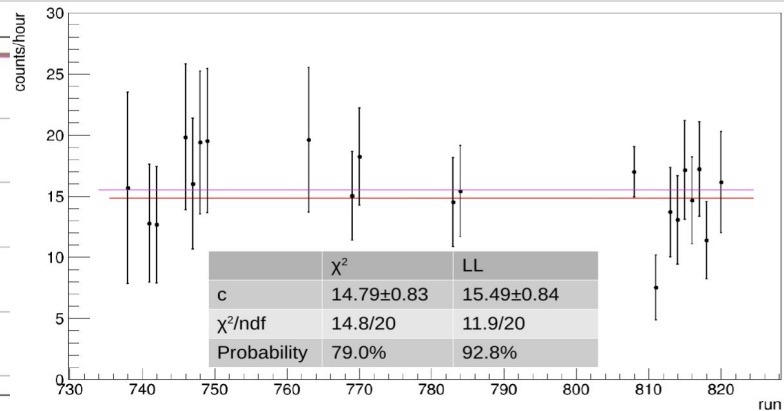
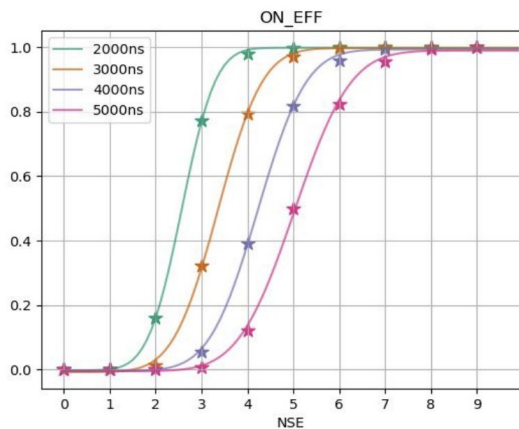
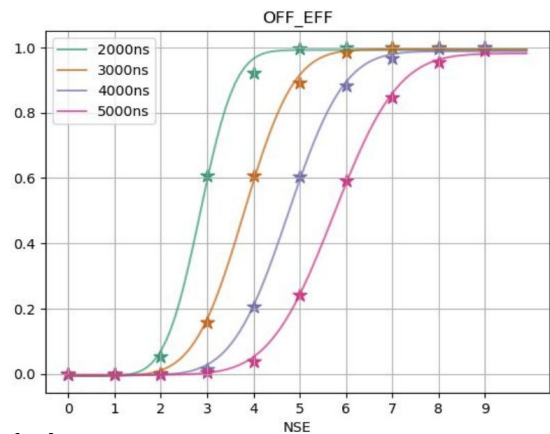
90% C.L.	SM 2018	KI	DB	INR
sens.($\times$ SM)	58	90	56	64



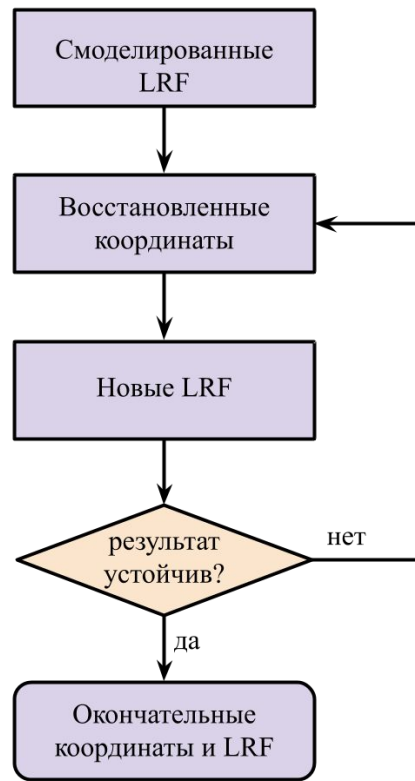
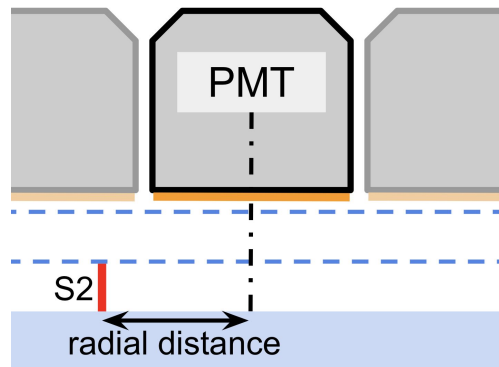
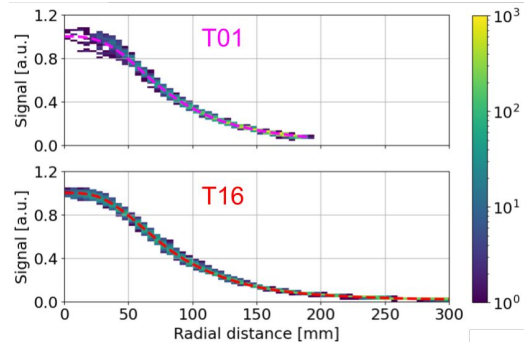
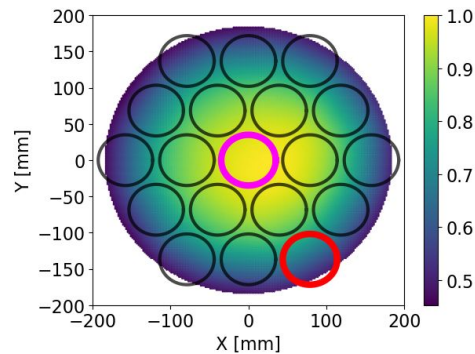
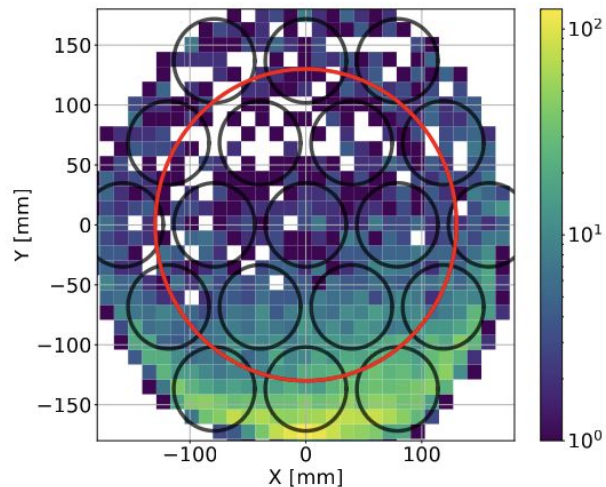
Полная схема анализа



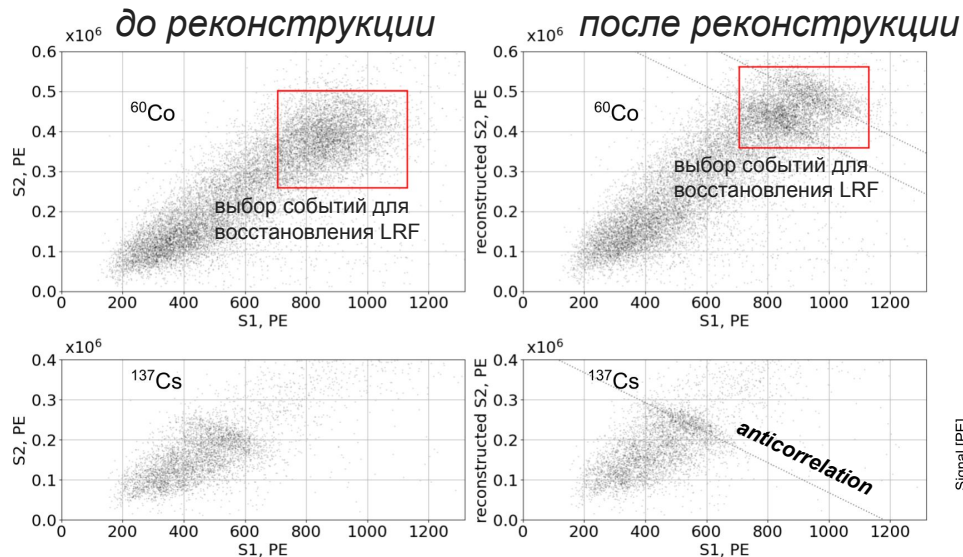
Эффективность триггера и стабильность



Определение LRF



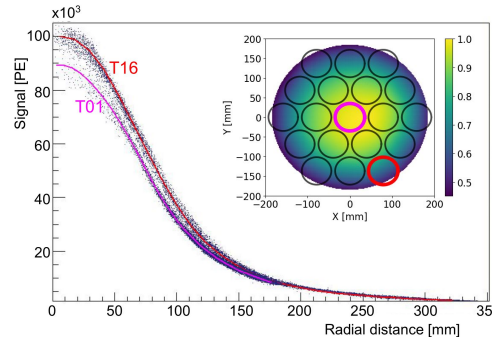
Реконструкция событий



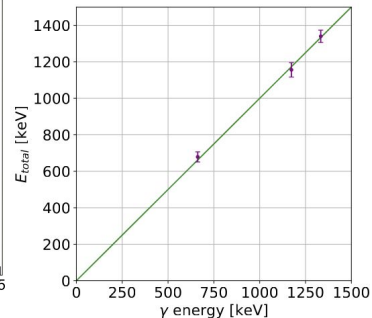
$$E = W(S1/g1 + S2/g2)$$

- рассчитаны коэффициенты $g1$ и $g2$:
- $g1: 2.6 \pm 0.3 \cdot 10^{-2} \text{ phd/photon}$
- $g2: 8.8 \pm 0.8 \text{ phd/electron}$

- данные ^{60}Co для итеративного восстановления LRF
- LRF использовались для пространственного восстановления всех типов данных



LRF и карта
эффективности
светобора



калибровочный
график

Различные подходы к расчету ЕЕЕ

Подход 1:

$$EEE = Q_{el}/QY$$

Q_{el} — количество электронов вышедших в электролюминесцентный зазор, нормированное на энергию

QY — количество электронов ионизации, предсказанное NEST нормированное на энергию

$$\Rightarrow EEE = 33.4 \pm 5.4\% \text{ (2022)}$$

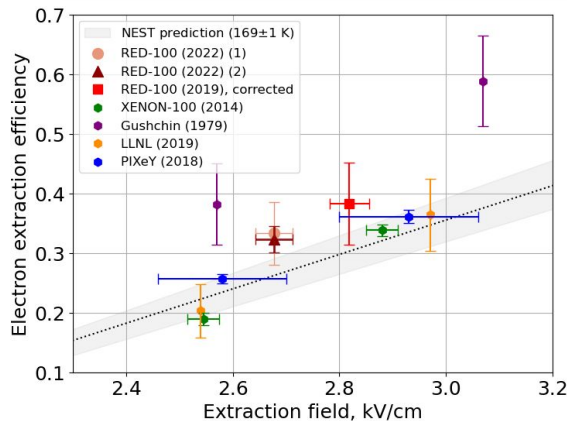
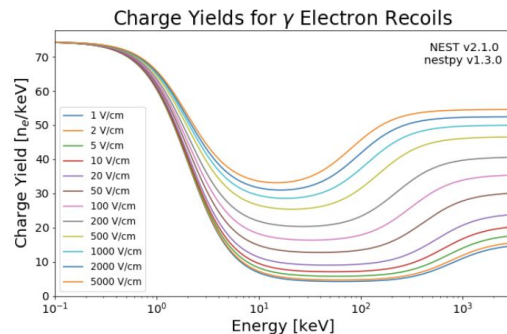
$$\Rightarrow EEE = 38.5 \pm 6.9\% \text{ (2019)}$$

Подход 2:

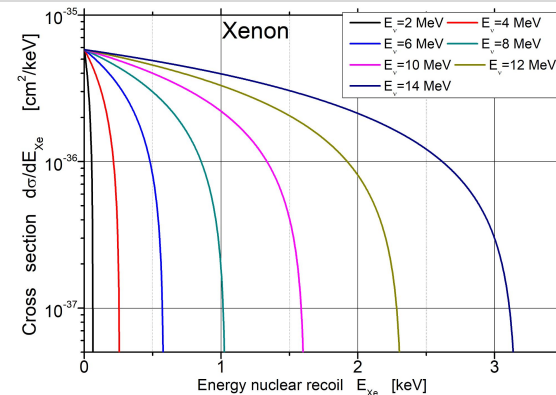
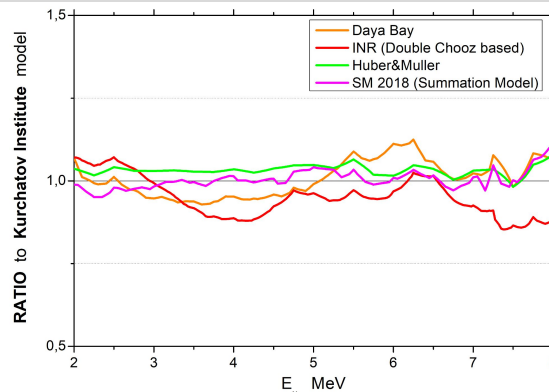
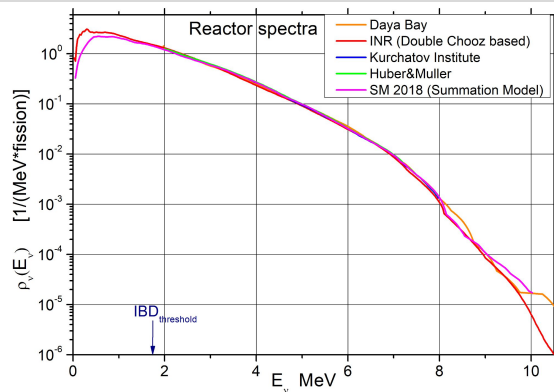
$$E = W(S1/g1 + S2/g2), \text{ где } g2 = EEE \cdot SEG$$

$$W = 13.8 \pm 0.9 \text{ эВ}$$

$$\Rightarrow EEE = 32.8 \pm 2.8\% \text{ (2022)}$$



Спектры реакторных антинейтрино



- В области интереса (>4 электронов) значительный вклад от энергий > 8 МэВ

- Изотопный состав топлива принят неизменным за время сеанса

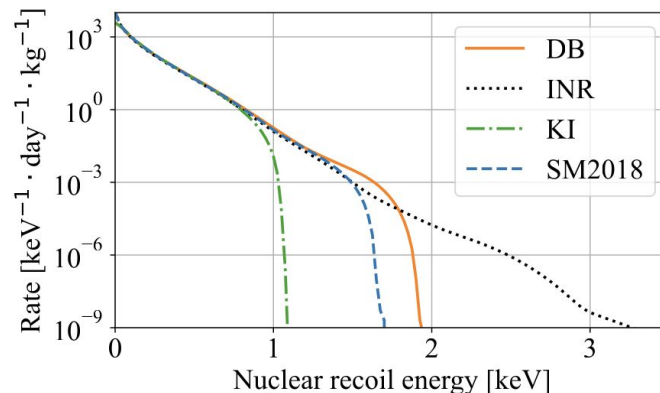
T. A. Mueller et al, Phys. Rev. C 83, 054615 (2011)

P. Huber, Phys. Rev. C 84, 024617 (2012)

V. I. Kopeikin et al, Phys. Rev. D 104, L071301 (2021)

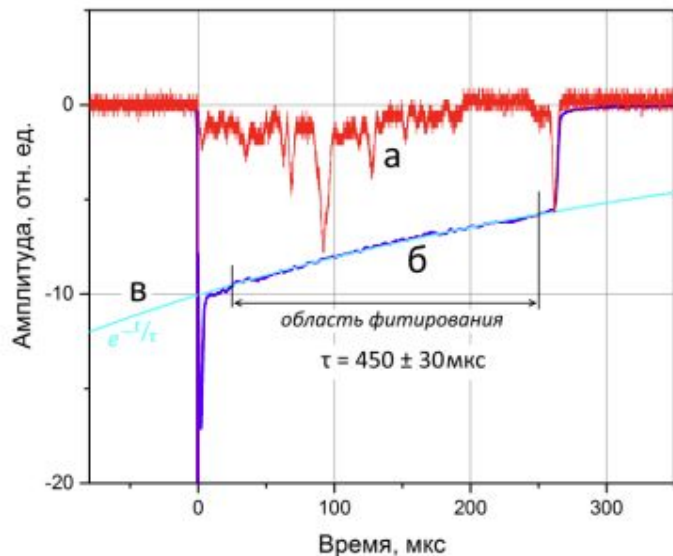
M. Estienne et al, Phys. Rev. Lett. 123, 022502 (2019)

F. P. An et al, Chinese Physics C 45, 073001 (2021)



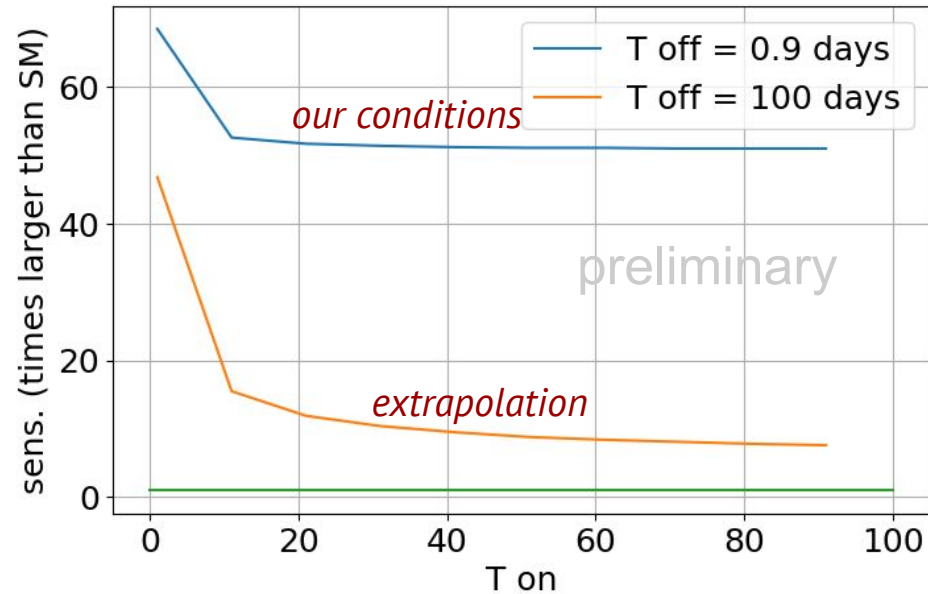
Время жизни

пример мюонного сигнала и усредненной формы сигнала (2019)



- мюонные данные набирались в специальном режиме работы детектора с пониженным напряжением на ФЭУ
- время жизни свободных электронов определялось путем фитирования усредненных мюонных сигналов экспоненциальной функцией
- после продолжительной периода очистки удалось достичь значения $870 \pm 20 \text{ мкс}$

Экстраполяция на большее живое время



*100 days reactor OFF livetime requires
at least 10 years detector exposition at
the KNPP*