

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

Ольга Разуваева  
коллорабация РЭД-100  
[OERazuvaeva@mephi.ru](mailto:OERazuvaeva@mephi.ru)

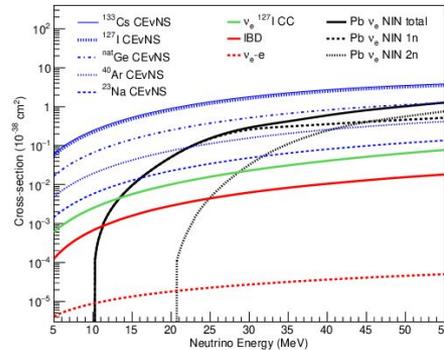
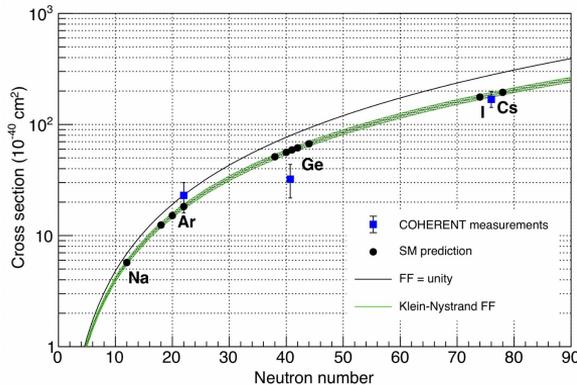
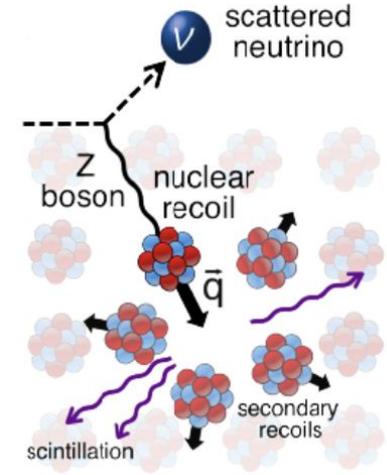
Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

# Упругое когерентное рассеяние нейтрино

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

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

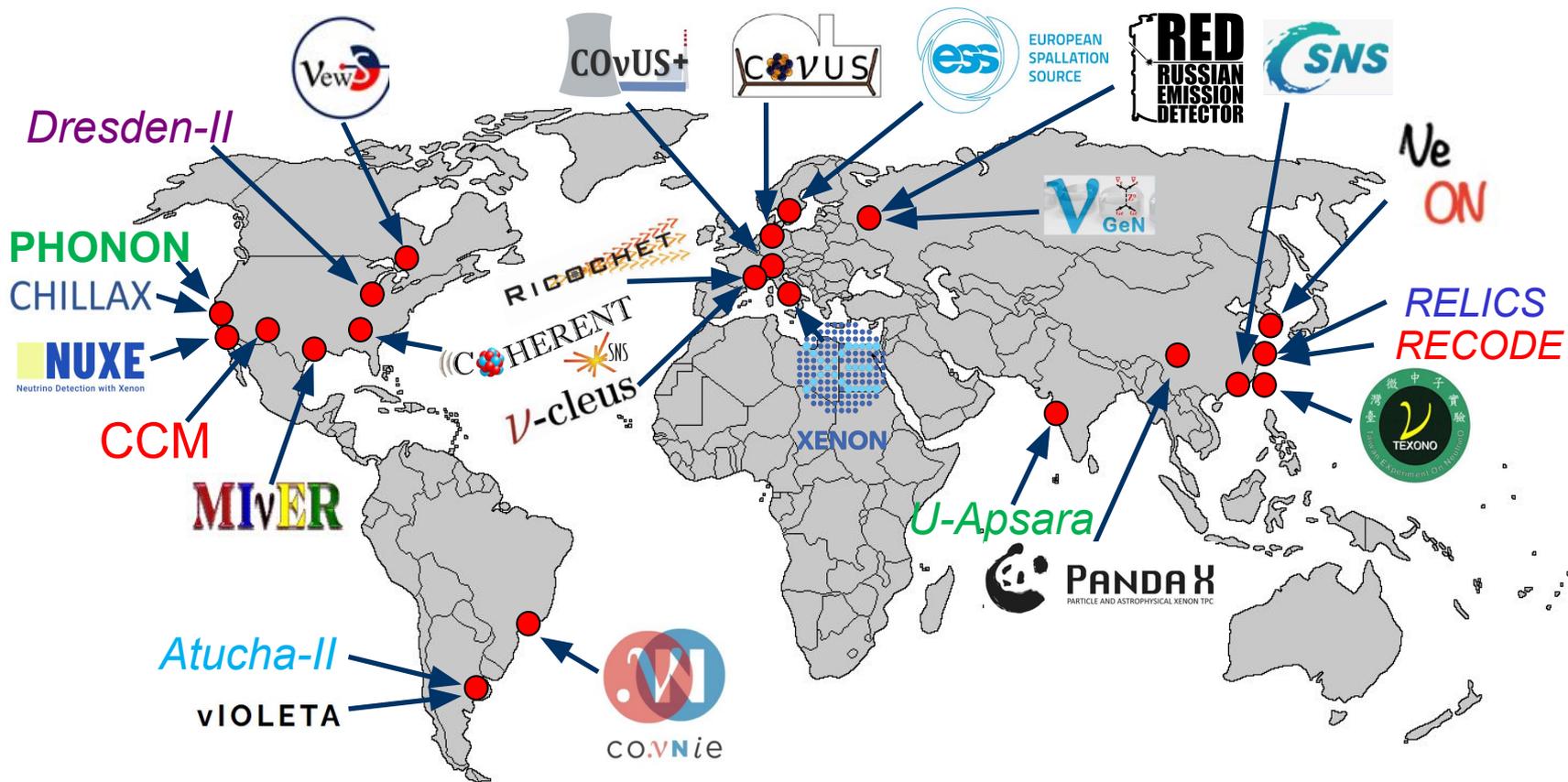
- процесс, предсказанный в рамках СМ в 1974 году
- в 2017 году экспериментально зарегистрирован коллаборацией COHERENT на SNS
- очень низкая энергия ядер отдачи (1-10 кэВ)



## Мотивация исследований

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

# Эксперименты по исследованию CEvNS (I)



# Эксперименты по исследованию CE $\nu$ NS (II)

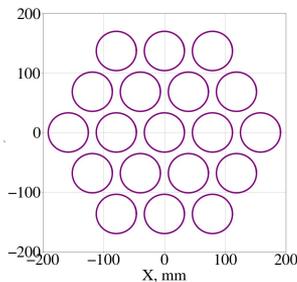
## Последние результаты экспериментов

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

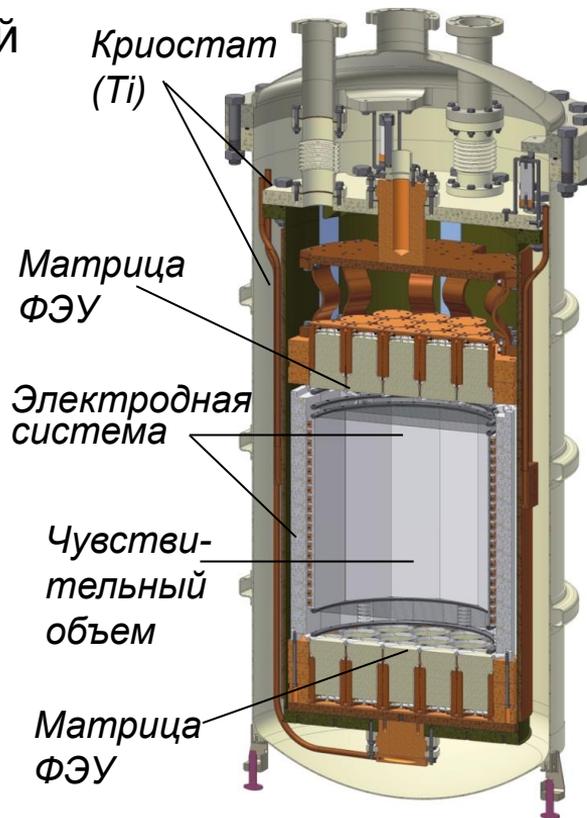
И. Житников, “Статус и результаты эксперимента nuGeN”

# 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 ( $\text{LN}_2$ )

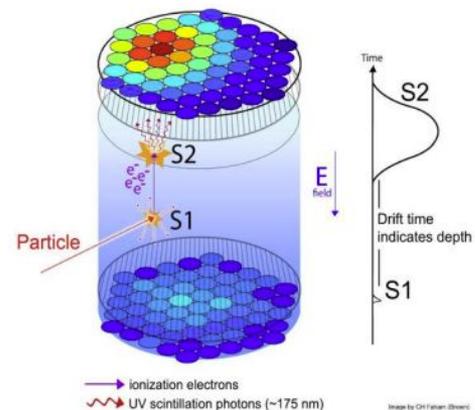


Геометрия матрицы и фото ФЭУ



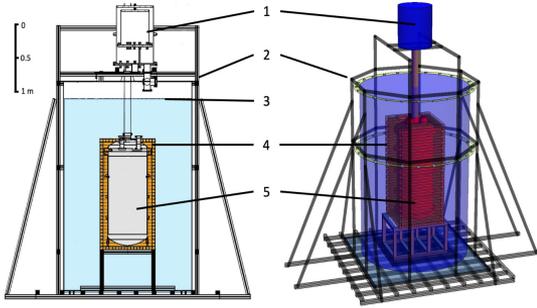
JINST 15 (2020) 02, P02020

## 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



- 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

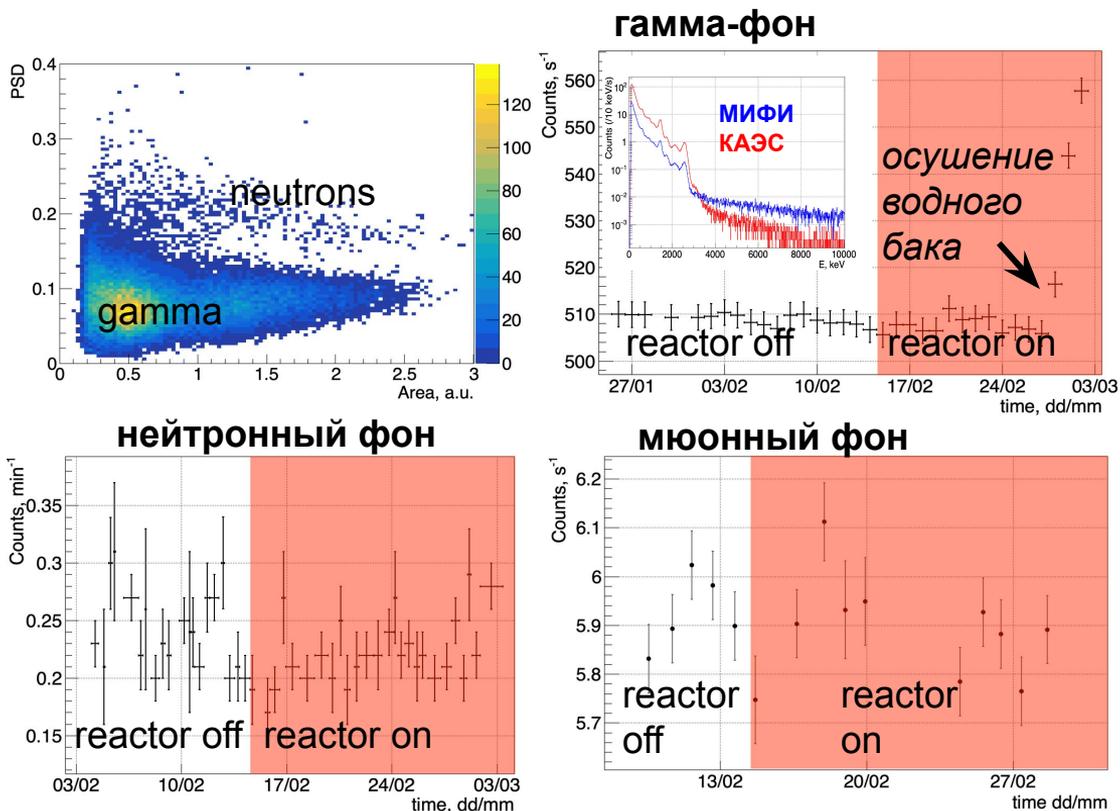
*Конструкция пассивной защиты.*

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

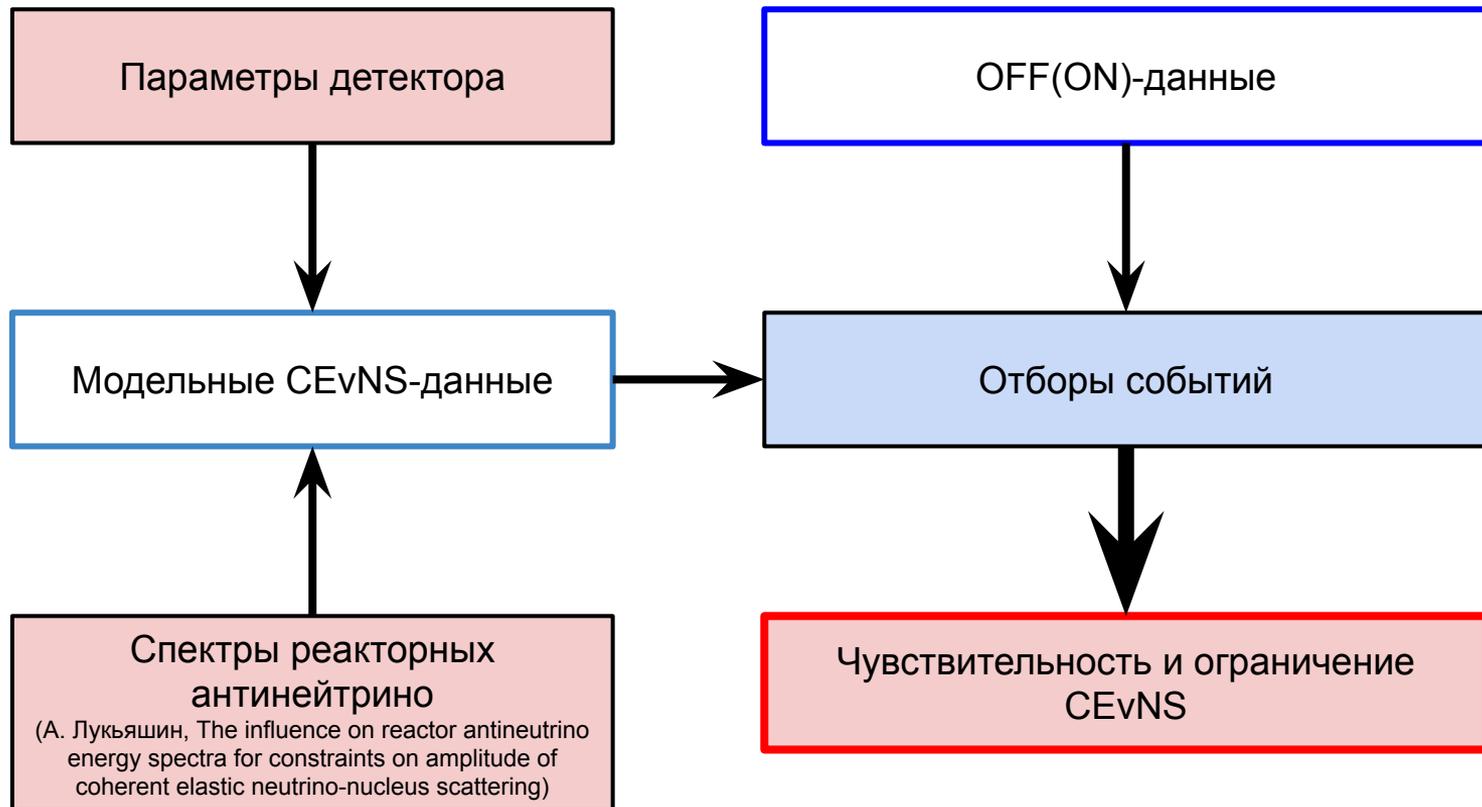


# Измерения внешнего фона

- 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)

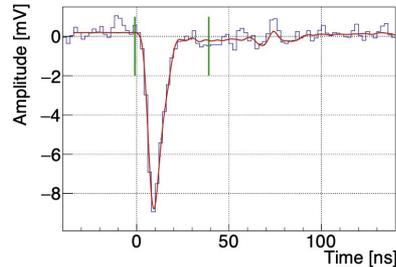
## Измеряемые параметры:

- параметры однофотонных 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)

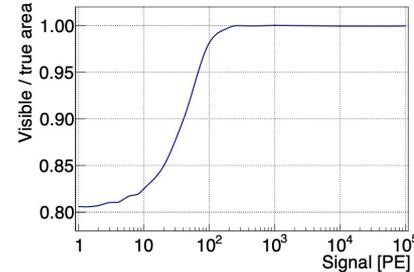
## Калибровочные данные:

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

JINST 19 (2024) 11, T11004

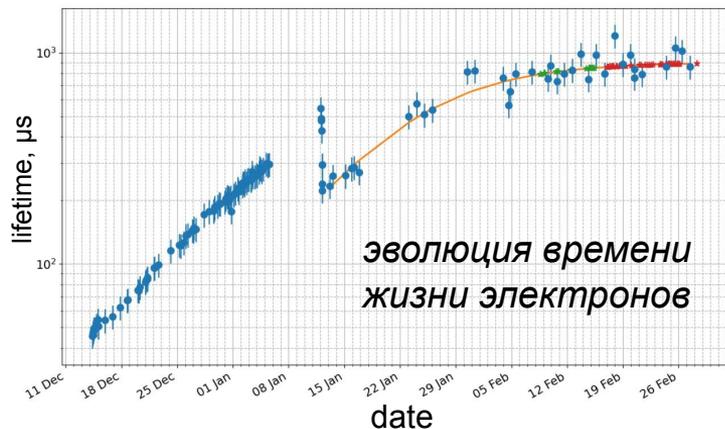


*форма SPE-  
сигнала*



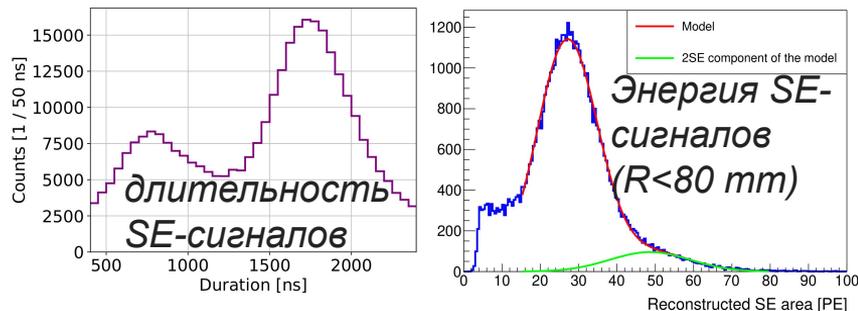
*эфф-ть определения  
площади SPE сигнала*

# Калибровка и параметризация детектора (II)



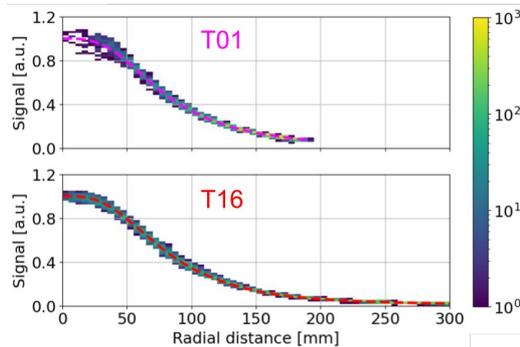
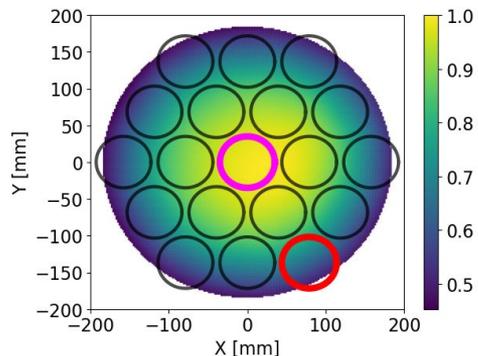
- время жизни электронов определялось по мюонным сигналам
- после продолжительной периода очистки удалось достичь значения  **$870 \pm 20$  мкс**

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



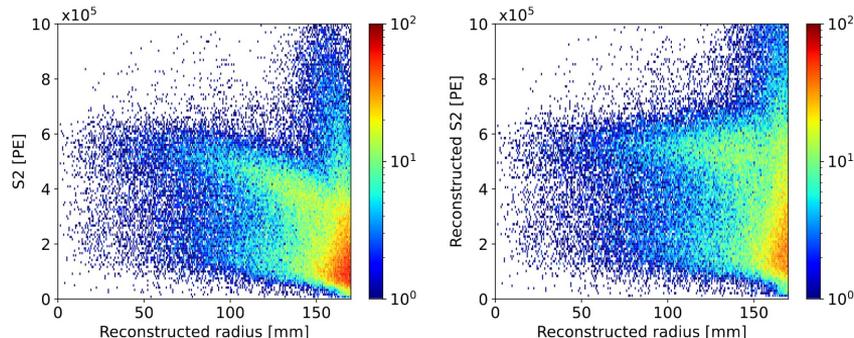
JINST 19 (2024) 11, T11004

# Калибровка и параметризация детектора (III)



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

Эффективность светосбора в зависимости от положения S2



Зависимость величины S2 от радиуса до и после коррекции

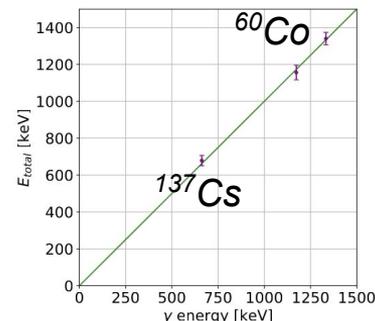
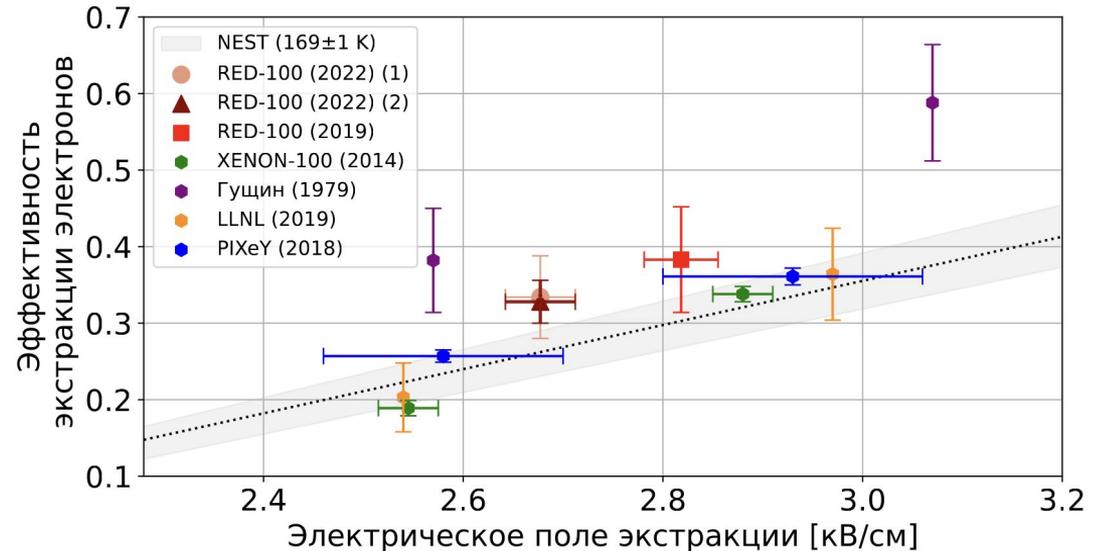


график энергетической калибровки

# Калибровка и параметризация детектора (IV)

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

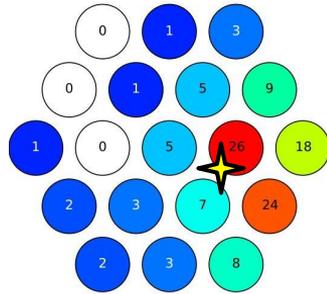
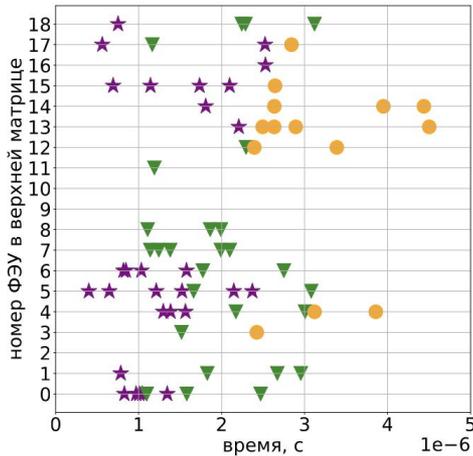
Полученное значение:  
**EEE =  $32.8 \pm 2.8\%$**



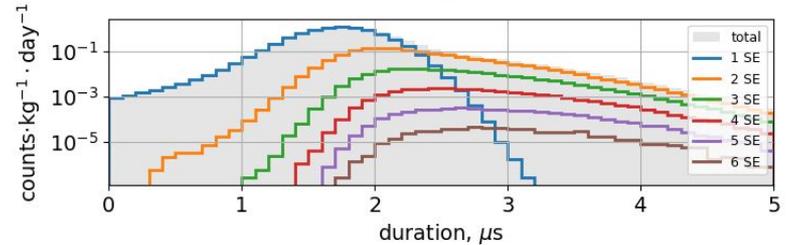
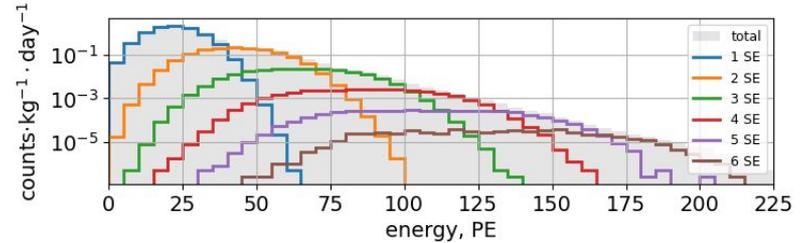
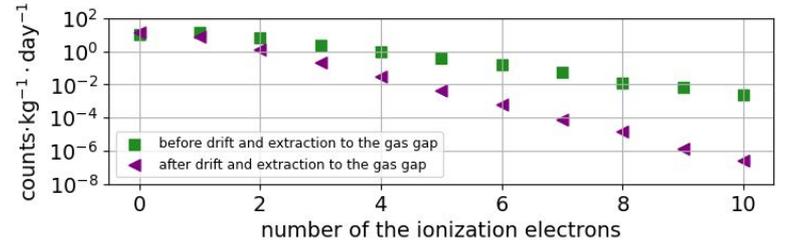
Результаты измерений EEE в эксперименте РЭД-100 и другими группами

# Моделирование сигнала CEνNS

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

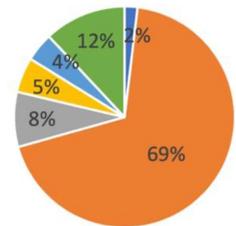
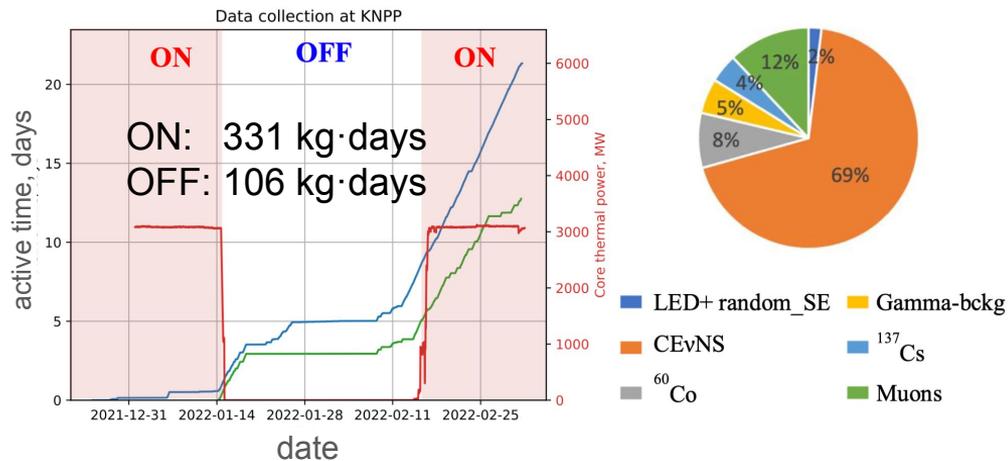


2411.18641 [hep-ex]



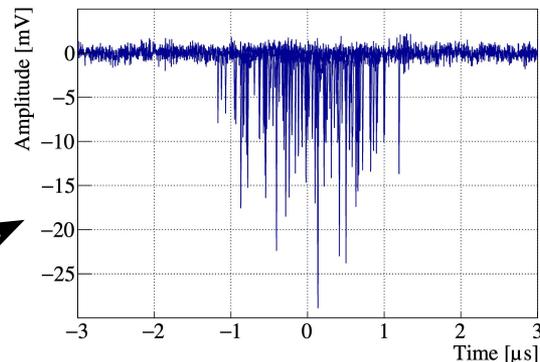
\* Noble element simulation technique

# Набор данных в области интереса



LED+ random\_SE    Gamma-bckg  
CEvNS     $^{137}\text{Cs}$   
 $^{60}\text{Co}$     Muons

Форма сигнала события от  
нескольких электронов ионизации



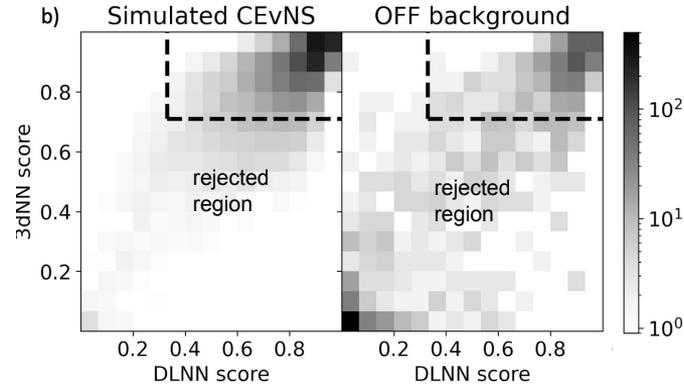
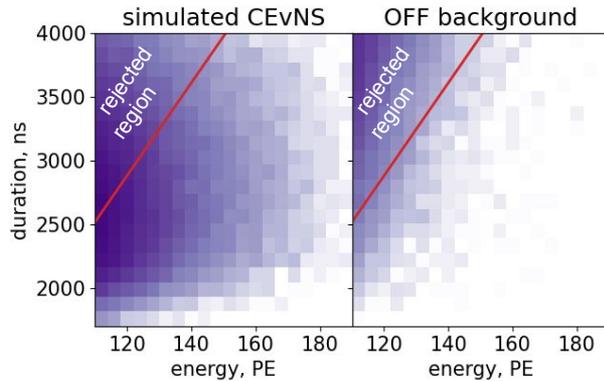
очень малая ионизация (<10 электронов)

## 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]

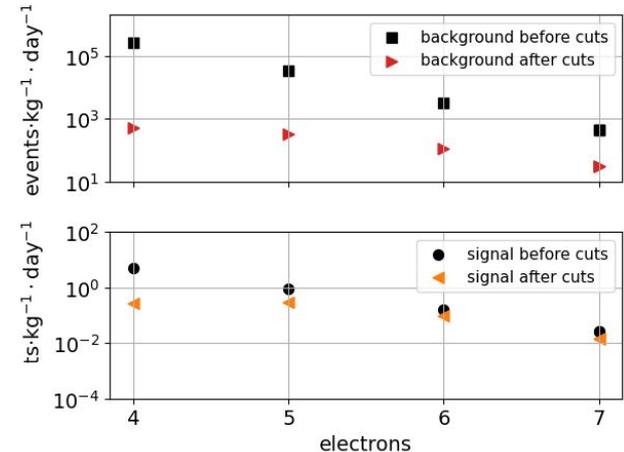
# Обработка данных в области интереса



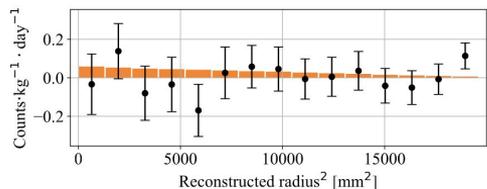
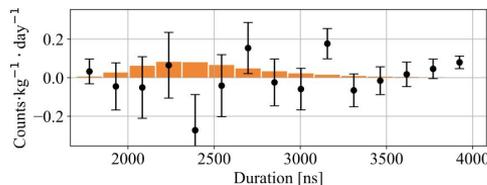
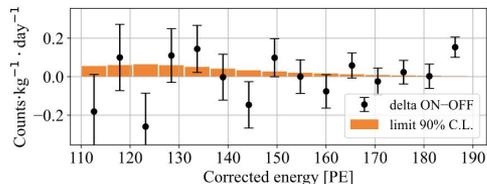
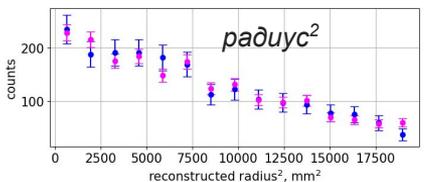
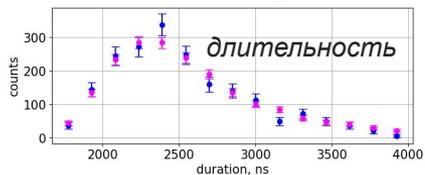
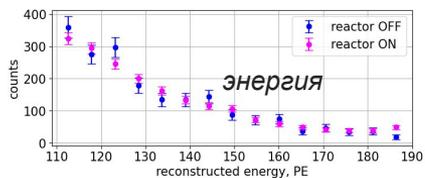
## Отборы:

- 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)

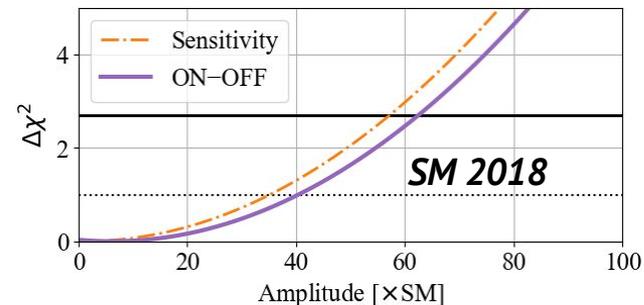
[2411.18641 \[hep-ex\]](#)



# 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



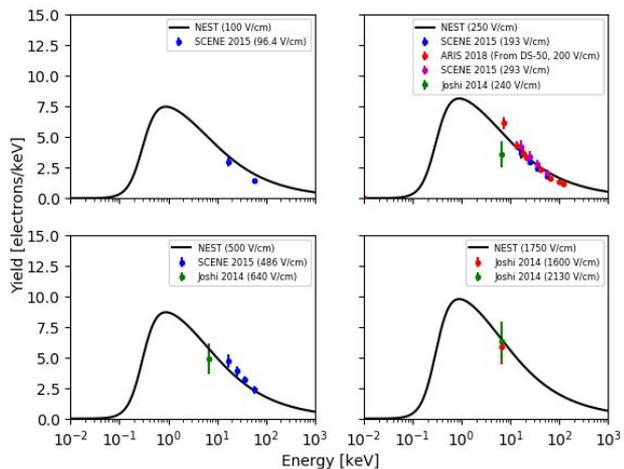
2411.18641 [hep-ex]

90% C.L.

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

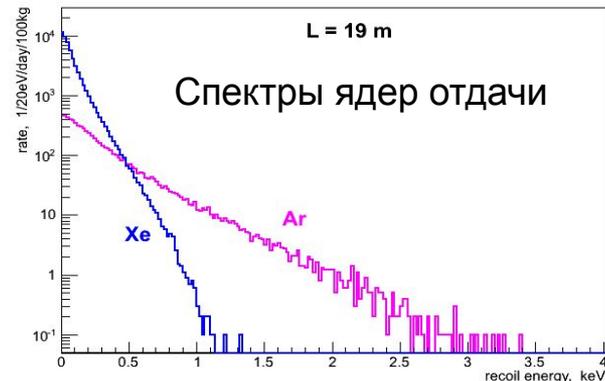
# Замена рабочего вещества на аргон

- 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  $CE\nu NS$
- **Впервые** получено ограничение на  $CE\nu NS$  от реакторных антинейтрино на ксеноне, соответствующее масштабному фактору **63** относительно  $SM$
- 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 РФФ 22-12-00082

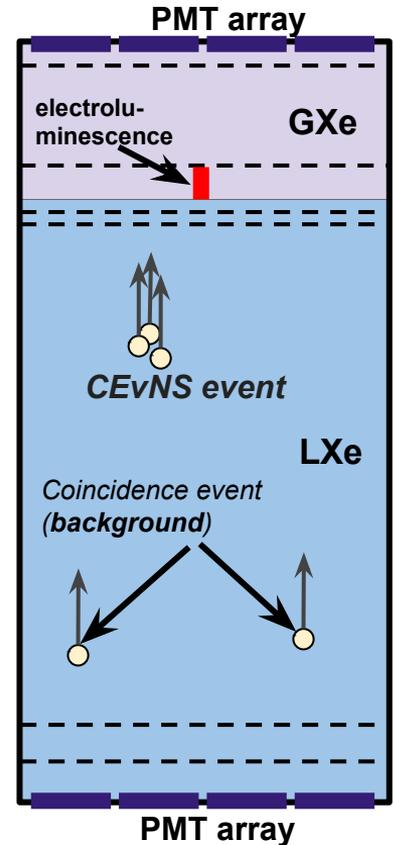
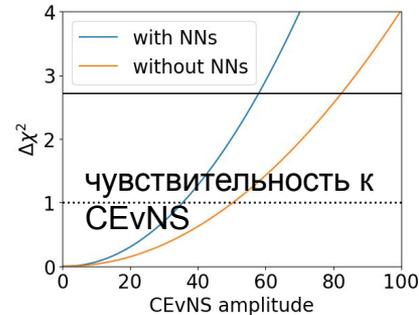
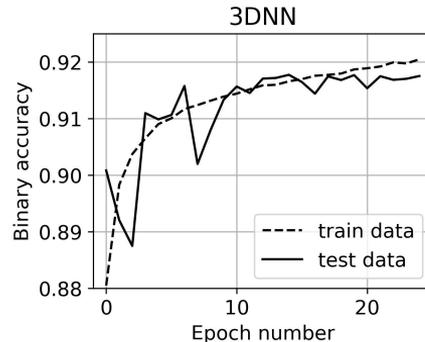
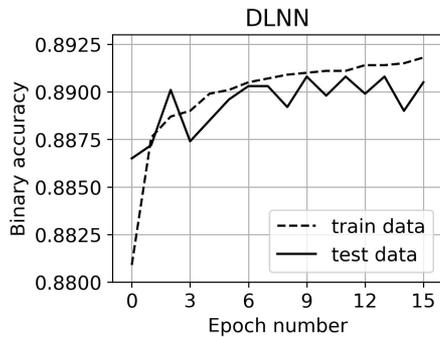
# Спасибо за внимание!



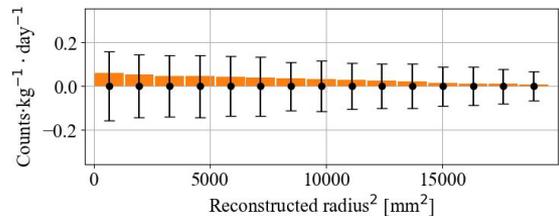
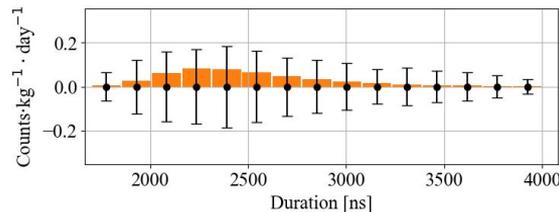
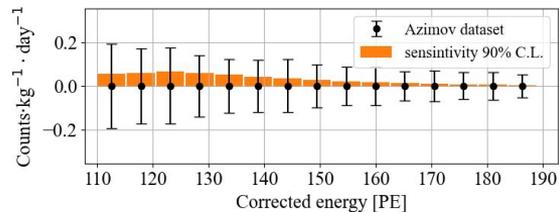
**Запасные слайды**

# Подавление фона SE-совпадений

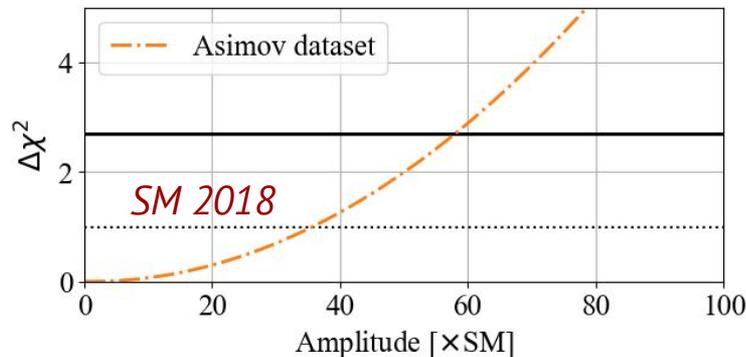
- спонтанные SE могут совпадать во времени и производить сигнал идентичный сигналу от  $CE_{\nu}NS$
- произведено моделирование как  $CE_{\nu}NS$  событий, так и совпадений случайных SE
- были обучены две нейронные сети (neural networks — NN):
  - DLNN (deep learning NN) (использует только распределение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



# Анализ чувствительности



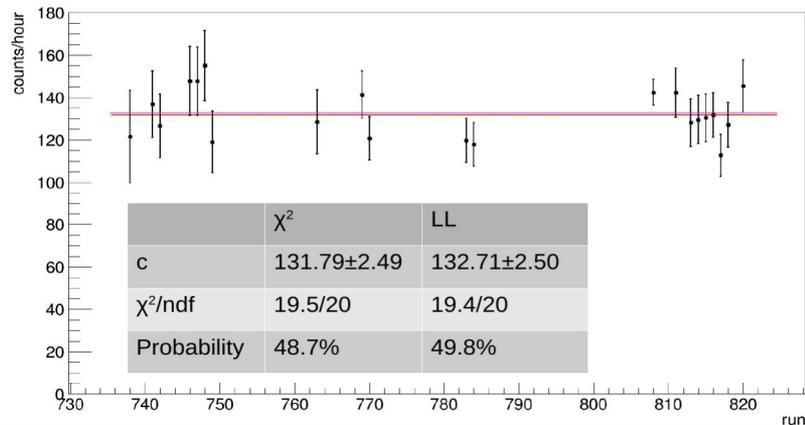
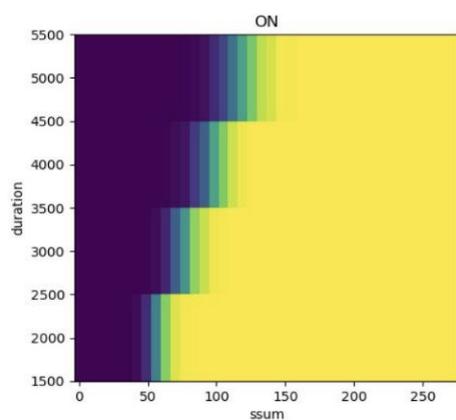
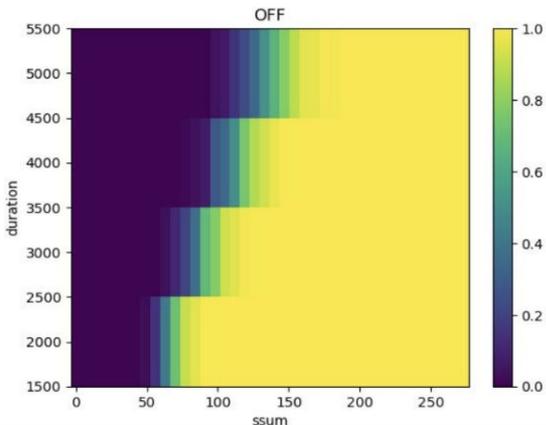
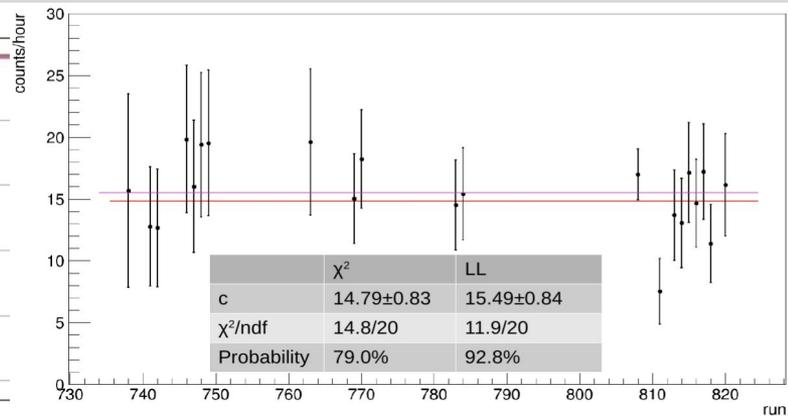
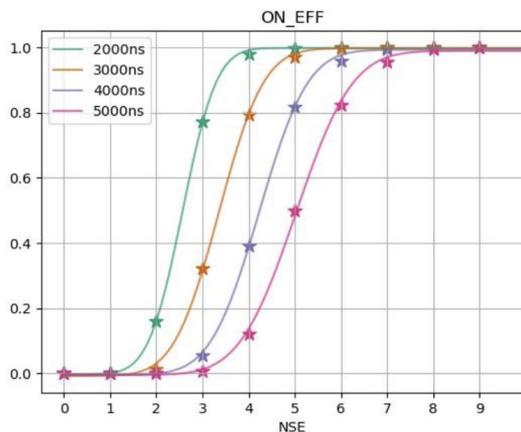
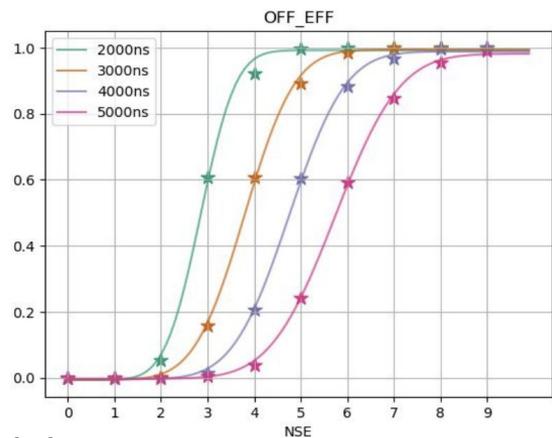
- использована комбинированная гистограмма (энергия+длительность+радиус)
- для расчета чувствительности — датасет Азимова
- чувствительность использовалась для оптимизации отборов



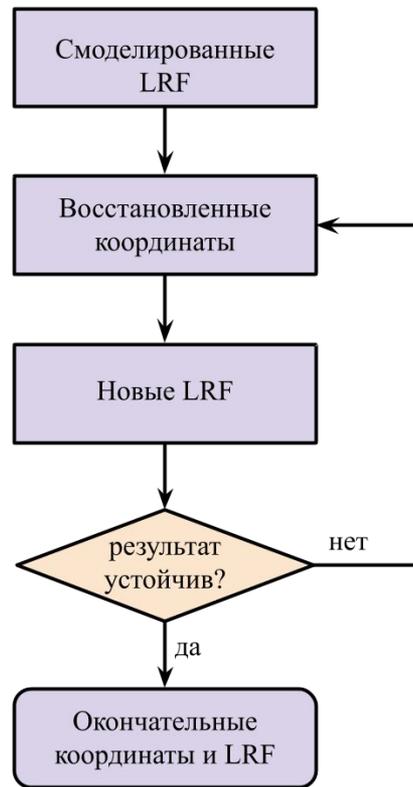
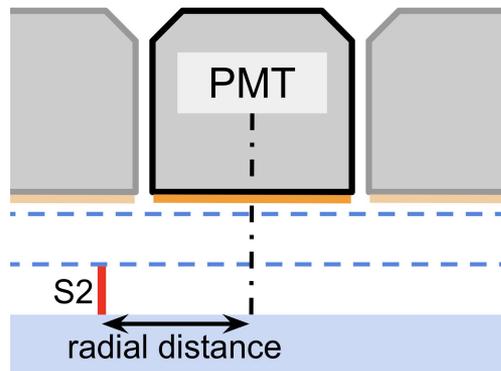
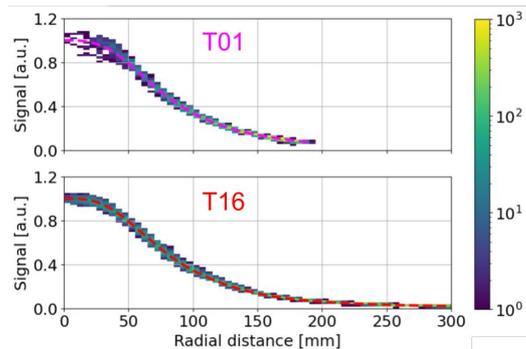
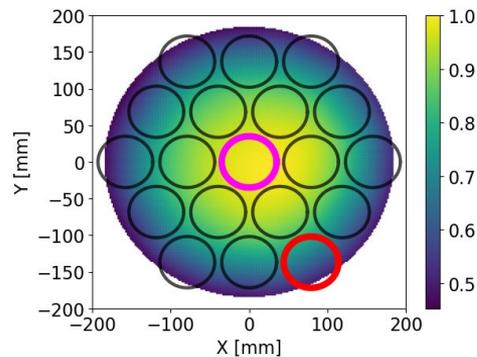
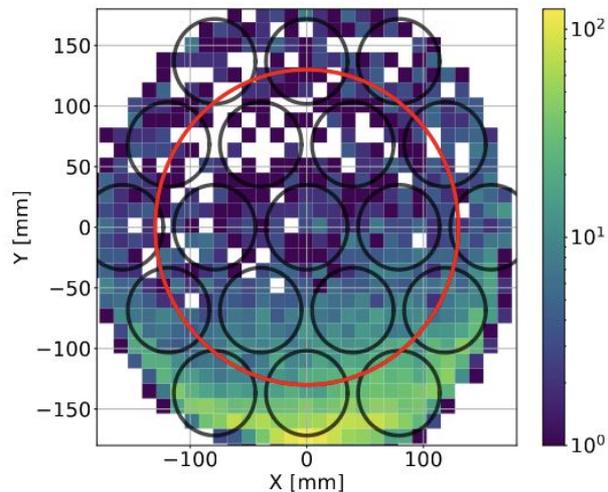
90% C.L.	SM 2018	KI	DB	INR
sens.(×SM)	58	90	56	64



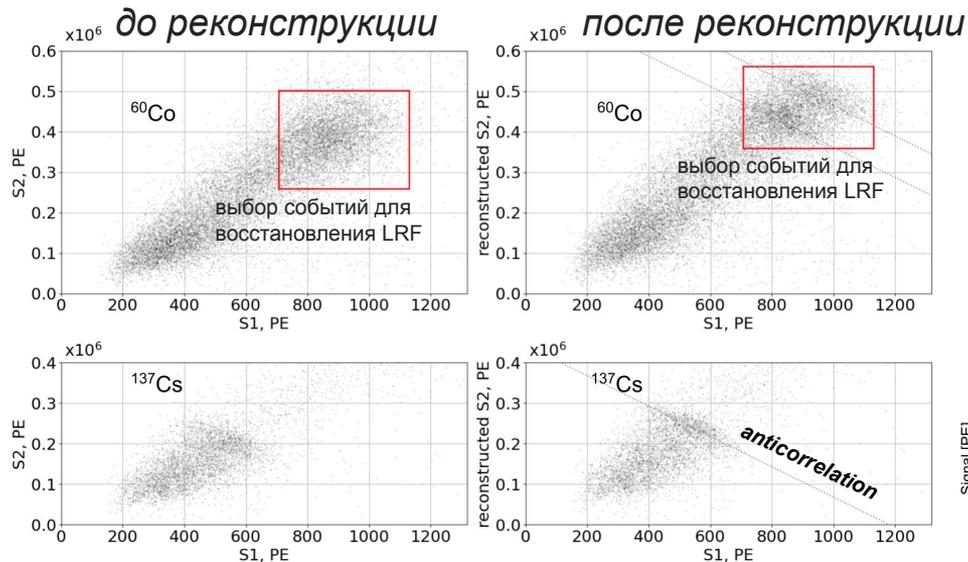
# Эффективность триггера и стабильность



# Определение LRF



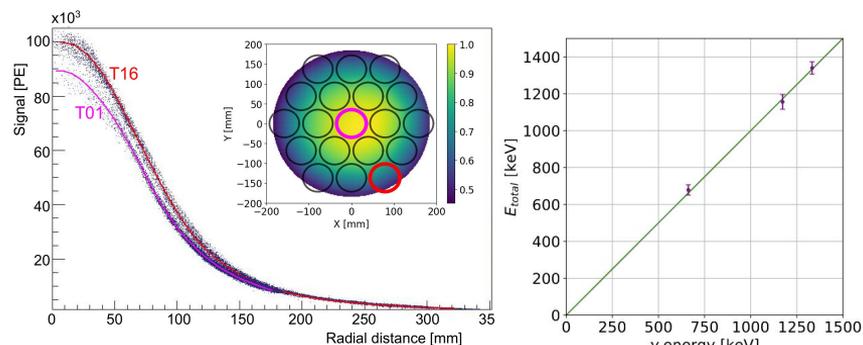
# Реконструкция событий



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

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

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



LRF и карта  
эффективности  
светообора

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

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

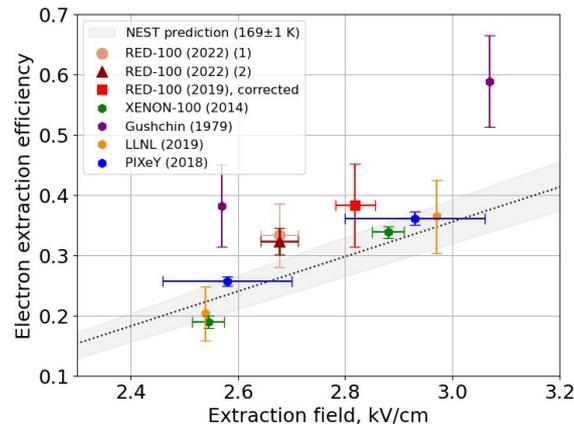
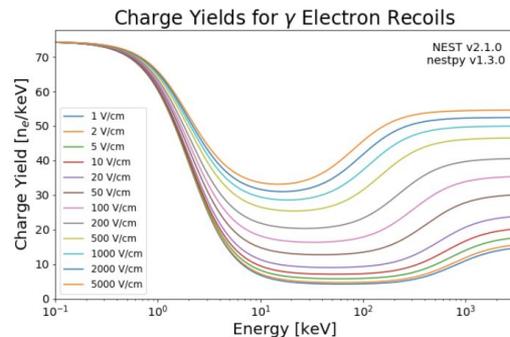
$$\Rightarrow EEE = 38.5 \pm 6.9\% \text{ (2019)}$$

## Подход 2:

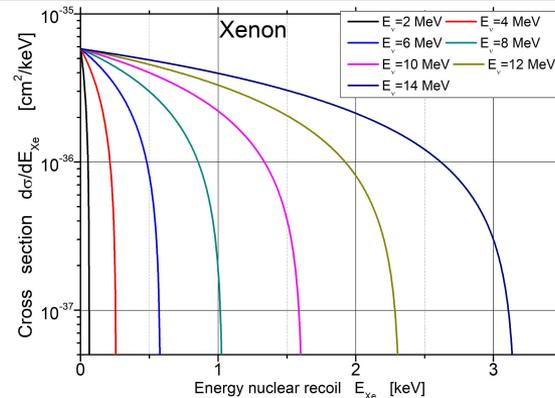
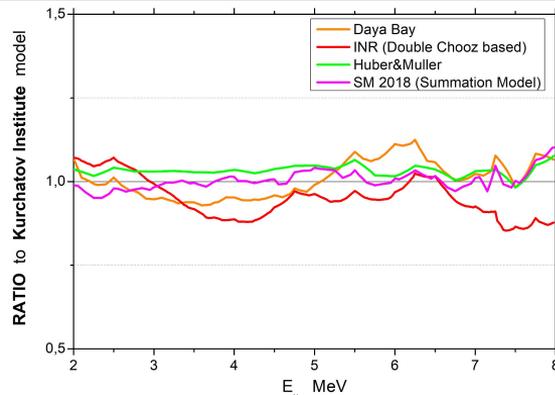
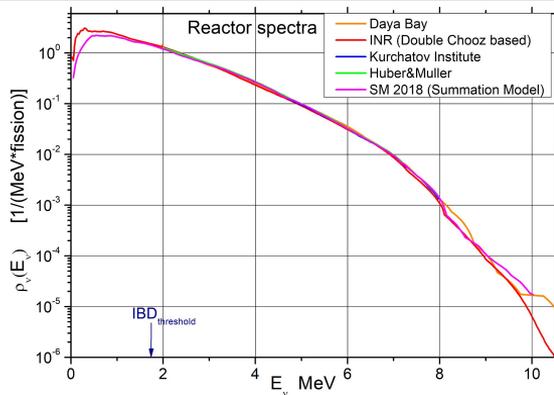
$$E = W(S1/g1+S2/g2), \text{ где } g2 = EEE \cdot SEG$$

$$W = 13.8 \pm 0.9 \text{ эВ}$$

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



# Спектры реакторных антинейтрино



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

- Изотопный состав топлива принят неизменным за время сеанса

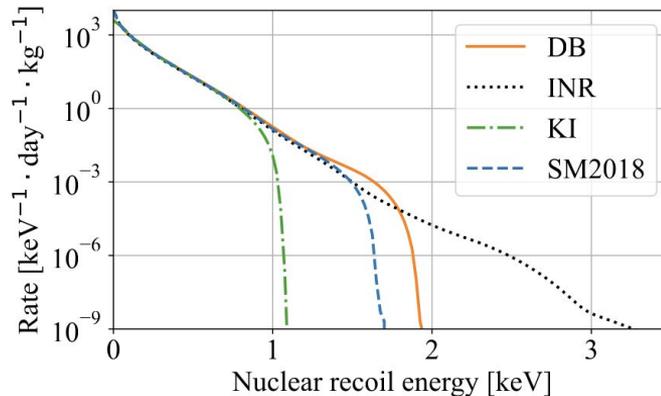
T. A. Mueller et al, Phys. Rev. C 83, 054615 (2011)

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

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

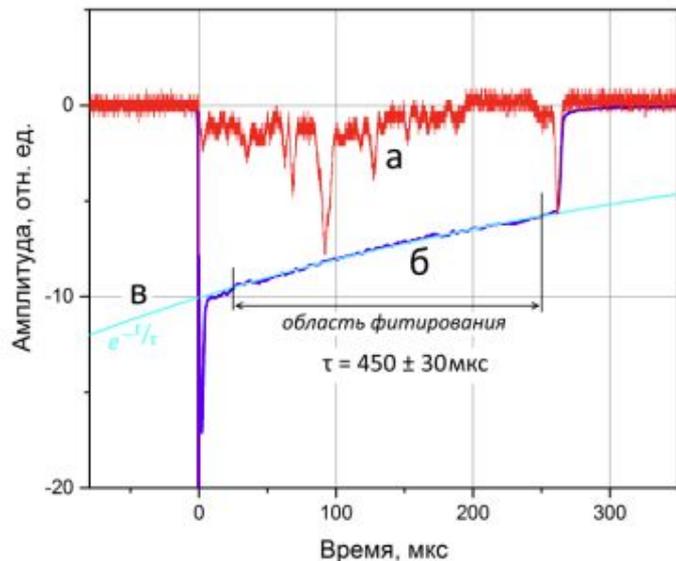
M. Estienne et al, Phys. Rev. Lett. 123, 022502 (2019)

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



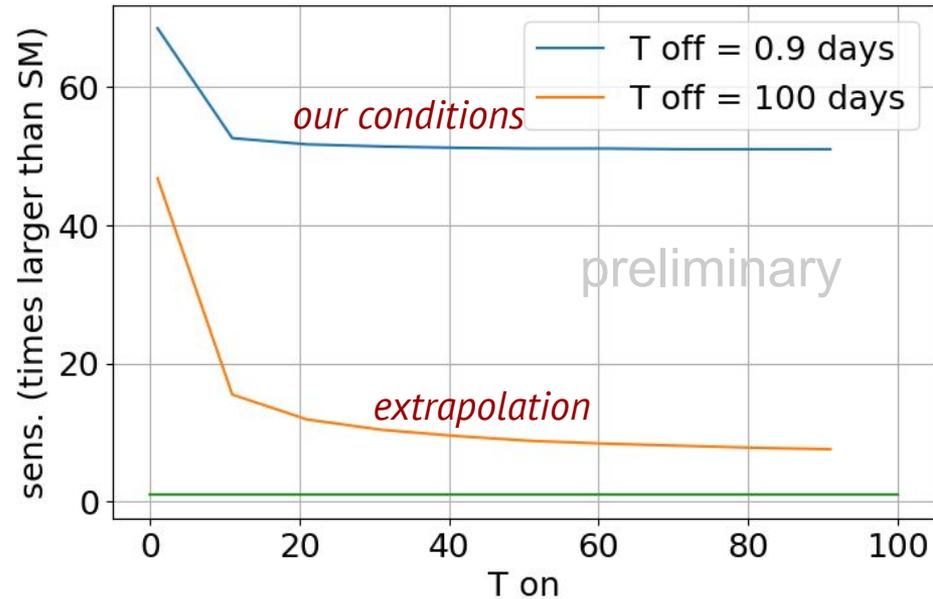
# Время жизни

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  $870 \pm 20$  мкс

# Экстраполяция на большее живое время



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