

Анализ полной экспозиции эксперимента CENNS-10

Бугрей П.С.

НИЯУ МИФИ

`pbugrey@mail.ru`

22 июня 2026 г.

- 1 Эксперимент COHERENT
- 2 Детектор CENNS-10
- 3 Обработка калибровочных данных
 - Пакет REDOffline
 - Распределения SPE
 - Распределения по энергии
 - PSD распределения
- 4 Фитирование B-сплайнами
 - Пакет BSpliner
 - Эволюция SPE
 - Эволюция LY
- 5 Заключение

Упругое когерентное рассеяние нейтрино ($\text{CE}\nu\text{NS}$)

- Предсказан в 1974 г. (Фридман, Копелиович и Франкфурт).
- Нейтрино рассеивается на ядре как на целом (обмен Z^0 -бозоном).
- Сечение пропорционально N^2 (число нейтронов в ядре).
- Энергия ядра отдачи: единицы-десятки кэВ.
- Впервые зарегистрирован коллаборацией COHERENT в 2017 г. на детекторе CsI[Na].

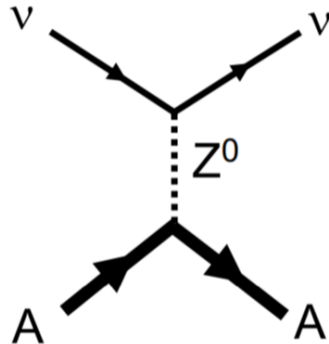


Рис. 1: Диаграмма Фейнмана для $\text{CE}\nu\text{NS}$

Источник нейтрино — Spallation Neutron Source (SNS)

- Местоположение: Ок-Риджская национальная лаборатория (ORNL, США).
- Принцип работы: Протоны с энергией ~ 1 ГэВ сбрасываются на ртутную мишень с частотой 60 Гц.
- Рождение нейтрино: Распад остановившихся π^+ -мезонов (π -DAR).

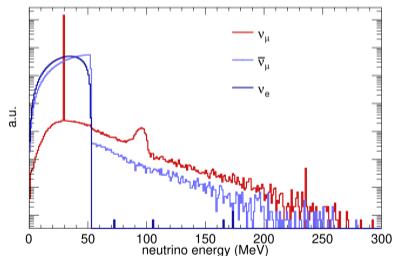


Рис. 2.1: Энергетические спектры

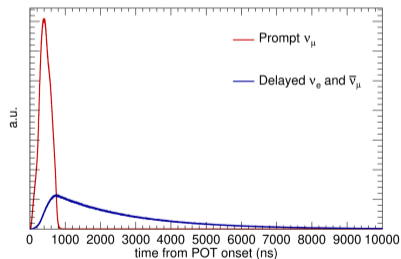
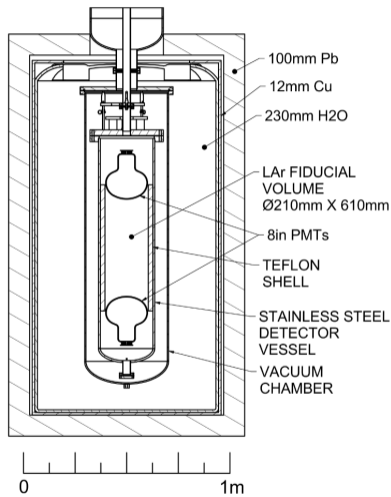


Рис. 2.2: Временная структура

Конструкция детектора CENNS-10



- Однофазный сцинтилляционный детектор.
- Активный объём: 24.4 кг жидкого аргона.
- Два ФЭУ Hamamatsu R5912-02 (сверху и снизу).
- TPВ — спектросместитель.
- Чистота аргона: < 1 ppb примесей.
- Экспозиция: Июль 2017 — май 2021 (почти 4 года).

Рис. 4: Схема детектора CENNS-10

Почему REDOffline?

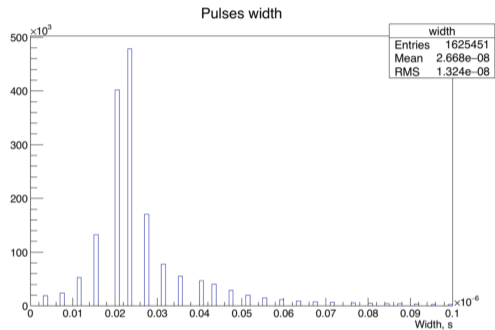
- Разработан для обработки данных детектора RED-100.
- Построен на основе библиотеки ROOT.
- Модульная архитектура — легко адаптируется для разных экспериментов.
- Успешно применяется для CENNS-10, RED-100 и Csl.
- Настройка через конфигурационный файл.

Алгоритм обработки данных в REDOffline:

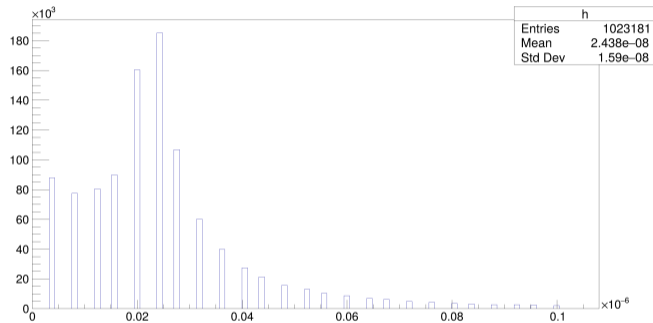
- 1 Восстановление базовой линии (ballistic deficit).
- 2 Выделение импульсов от ФЭУ (метод двойного порога).
- 3 Группировка связанных импульсов в одно физическое событие (Кластеризация).

- Результат обработки — файл формата `.root`.
- Сохраняются параметры импульсов и кластеров.
- Осциллограммы не сохраняются — экономия памяти.
- Основные параметры кластера:
 - Площадь (Q) — интегральный заряд.
 - Амплитуда.
 - Длительность.
 - $F90$ — параметр формы сигнала.
 - Время начала.

Распределения SPE по ширине



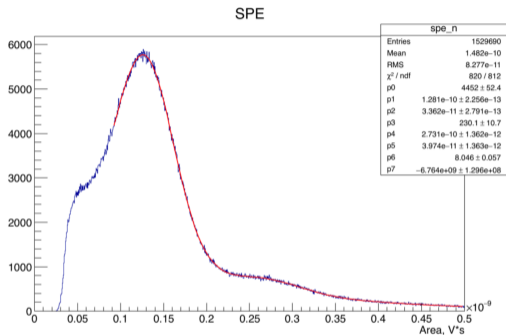
Предыдущий анализ



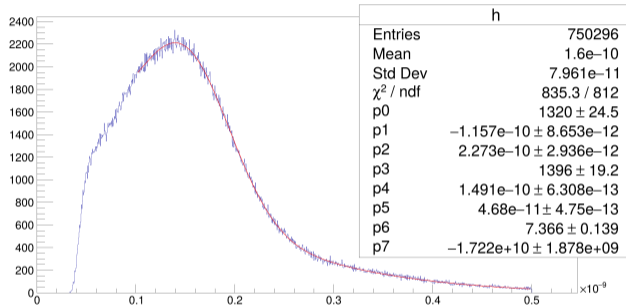
Нынешний анализ

Рис. 6: Распределение SPE-импульсов по ширине

Распределения SPE по площади



Предыдущий анализ



Нынешний анализ

Рис. 7: Распределение SPE-импульсов по площади

- Количество фотоэлектронов:

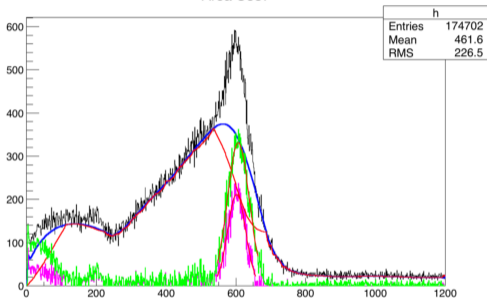
$$N_{\text{PE}} = \frac{Q}{Q_{\text{SPE}}} \quad (1)$$

- Световыход:

$$LY = \frac{N_{\text{PE}}}{E_{\gamma}} \quad (2)$$

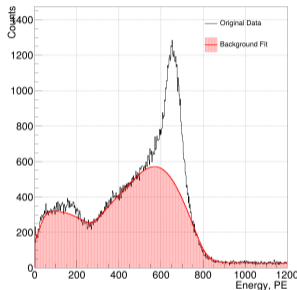
Распределения событий по энергии (PE)

Area Co57

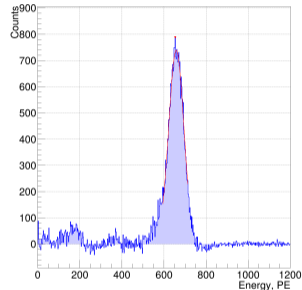


Предыдущий анализ

Original with Background Fit



Background Subtracted



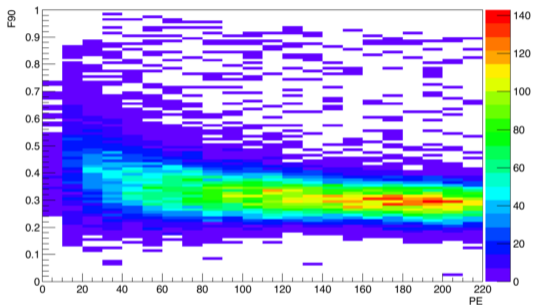
Нынешний анализ

Рис. 8: Распределения событий по количеству фотоэлектронов (PE)

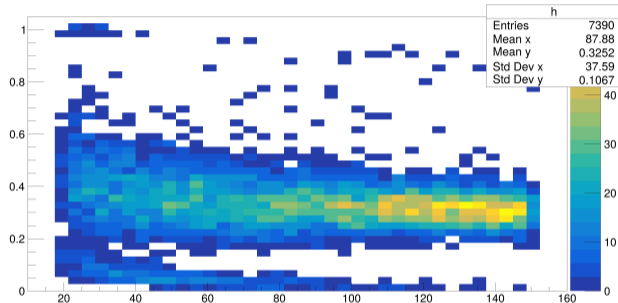
- $F90$ — отношение заряда в первые 90 нс к полному заряду импульса:

$$F90 = \frac{Q_{0-90}}{Q_{\text{total}}} \quad (3)$$

- **Электроны отдачи (ER):** $F90 \lesssim 0.5$ (медленная компонента)
- **Ядра отдачи (NR):** $F90 \gtrsim 0.5$ (быстрая компонента)
- Калибровочные данные с ^{57}Co содержат только популяцию ER.



Предыдущий анализ



Нынешний анализ

Рис. 9: Двумерные распределения событий по $F90$ и PE

- Разработан специализированный набор функций `BSpliner` на C++.
- Интегрирован с библиотекой ROOT.
- Позволяет строить B-сплайны произвольного порядка.
- **Основные модули:**
 - `BSpline.hh` — рекурсивная реализация базисных функций.
 - `Fitting_BSpline.hh` — построение сплайнов методом МНК и χ^2 .
 - `ConfidenceBand.hh` — построение доверительных полос (95%).
 - `WriteAndRead_BSpline.hh` — сохранение и загрузка сплайнов.

- В-сплайн порядка N определяется рекурсивно (формула Кокса-де-Бура):

$$B_{i,0}(x) = \begin{cases} 1, & x_i \leq x < x_{i+1} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

$$B_{i,N}(x) = \frac{x - x_i}{x_{i+N} - x_i} B_{i,N-1}(x) + \frac{x_{i+N+1} - x}{x_{i+N+1} - x_{i+1}} B_{i+1,N-1}(x) \quad (5)$$

- Конечный сплайн:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{m-1} c_i B_{i,N}(x) \quad (6)$$

- Решение системы методом прогонки благодаря ленточной структуре матрицы.

Эволюция SPE (полная экспозиция)

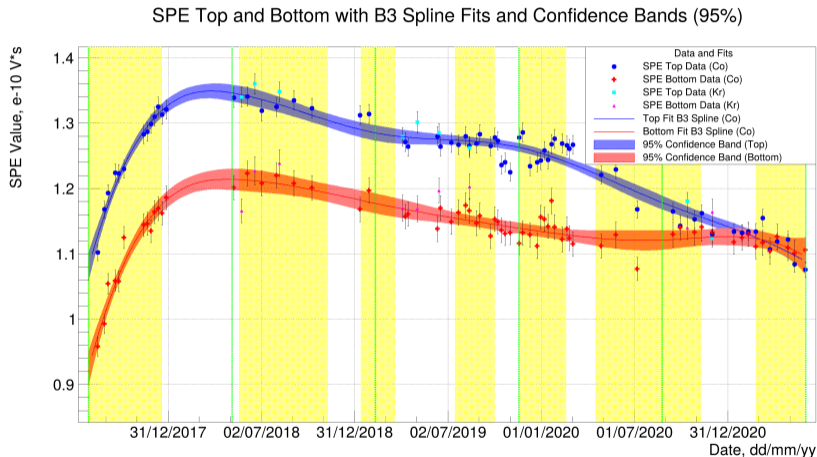
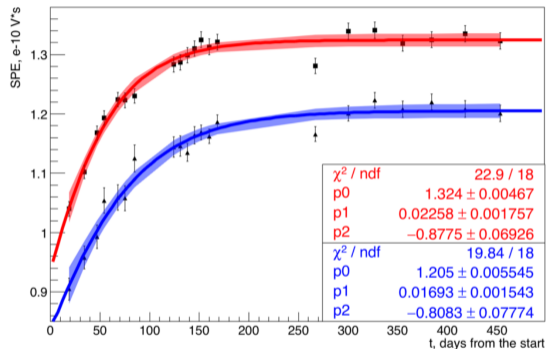
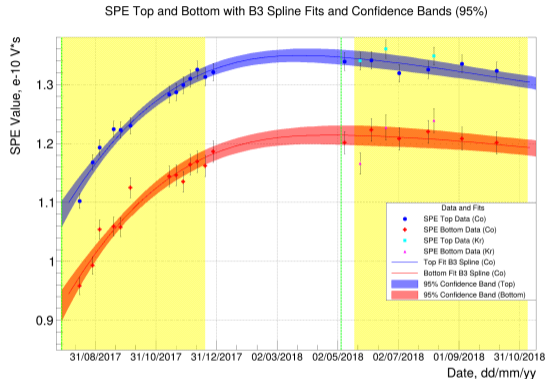


Рис. 10: Эволюция SPE для всех RunSet, аппроксимированная кубическим В-сплайном

Сравнение законов эволюции SPE



Предыдущий анализ (логистическая функция)



Нынешний анализ (B-сплайн)

Рис. 11: Эволюция SPE в RunSet1 и RunSet2

- Световыход:

$$LY(t) = \frac{N_{PE}(t)}{E_\gamma} \quad (7)$$

- $N_{PE}(t)$ — энергия фотопика ^{57}Co в PE в момент времени t .
- $E_\gamma = 122$ кэВ.
- Регулярные еженедельные калибровки с ^{57}Co .
- Аппроксимация кубическим B-сплайном.

LY Evolution with B3 Spline Fit and Confidence Band (95%)

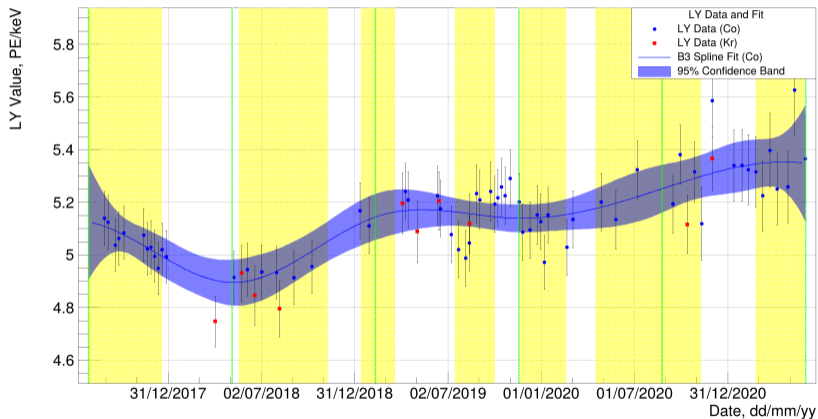


Рис. 12: Эволюция световыхода LY для всех RunSet

- Освоен пакет **REDOffline**: построены распределения SPE-импульсов по ширине и площади, распределения событий по энергии и $F90$.
- Разработан пакет **BSpliner**: для фитирования В-сплайнами с сохранением, загрузкой и доверительными полосами.
- Построены законы эволюции **SPE** и **LY**: с использованием кубического В-сплайна для полной экспозиции (почти 4 года).
- Полученные законы эволюции позволяют корректно восстанавливать энергетическую шкалу детектора.

Спасибо за внимание!

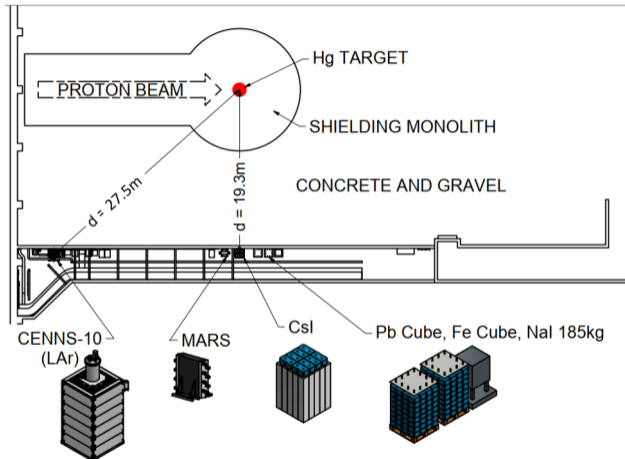


Рис. 3: Размещение детекторов COHERENT в Нейтринной Аллее

- Эксперимент расположен в «Нейтринной Аллее» на расстоянии 19–28 м от мишени.
- Основные детекторы:
 - **CsI[Na]** — первый детектор, зарегистрировавший $\text{CE}\nu\text{NS}$ (2017 г.).
 - **CENNS-10 (LAr)** — однофазный жидкоаргоновый детектор.
 - **NaI[Tl]** — массив кристаллов иодида натрия.
 - **HPGe** — детектор на основе сверхчистого германия.



Рис. 5: CENNS-10 в пассивной защите

- **Многослойная защита (снаружи внутрь):**
 - Свинец (10 см) — защита от γ -излучения.
 - Медь (1.25 см).
 - Вода (20 см) — защита от нейтронов.
- **Экспозиция:** Июль 2017 — май 2021 (почти 4 года).