

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

Институт ядерной физики и технологий  
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

Отчёт по НИРС

На тему:

«Анализ полной экспозиции эксперимента  
CENNS-10»

Студент: Бугрей П.С.

Группа: M25-112

Научный руководитель: Белов В.А.

Оценка руководителя: из 50 \_\_\_\_\_

## **Аннотация**

В ходе научно-исследовательской работы студента была освоена работа пакета REDOffline на примере обработки калибровочных файлов и построены распределения калибровочных событий по выделившейся энергии, длительности импульса и параметру формы сигнала F90. Так же был написан код для приближения долговременных трендов значений временных трендов SPE и LY при помощи B-сплайнов.

Работа проводилась на базе Лаборатории экспериментальной ядерной физики НИЯУ МИФИ.

## **Abstract**

During the student's research work, the REDOffline software package was mastered on the example of processing calibration files, and distributions of calibration events by deposited energy, pulse duration, and the pulse shape parameter F90 were constructed. Code was also written to approximate long-term trends of SPE and LY values using B-splines.

The work was carried out at the Laboratory of Experimental Nuclear Physics National Research Nuclear University MEPHI.

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Упругое когерентное рассеяние нейтрино(УКРН)</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>CENNS-10</b>	<b>6</b>
3.1	Схема эксперимента COHERENT . . . . .	6
3.2	Конструкция детектора CENNS-10 . . . . .	8
<b>4</b>	<b>REDOffline</b>	<b>11</b>
4.1	Основные определения . . . . .	11
4.2	Алгоритм обработки данных . . . . .	11
4.3	Восстановление базовой линии . . . . .	12
4.4	Выходной формат . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Анализ калибровочных рангов</b>	<b>14</b>
5.1	SPE распределения . . . . .	14
5.2	Распределения по энергии . . . . .	15
5.3	PSD распределения . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Фитирование законов эволюции</b>	<b>19</b>
6.1	Пакет для фитирования В-сплайнами . . . . .	19
6.2	Эволюция SPE . . . . .	23
6.3	Эволюция LY . . . . .	24
<b>7</b>	<b>Заключение</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Список литературы</b>	<b>28</b>

## 1. Введение

Процесс упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах (УКРН, или  $CE\nu NS$ ) представляет собой уникальный инструмент современной физики элементарных частиц. УКРН обладает относительно большим сечением по сравнению с другими нейтринными взаимодействиями, что делает его особенно привлекательным для экспериментального изучения. Однако, несмотря на это, предсказанный более полувека назад, процесс долгое время оставался недоступным для прямой регистрации. Главным препятствием являлось крайне малое выделение энергии (единицы кэВ), передаваемое ядру при рассеянии, что лежит ниже порога чувствительности большинства детекторов. Лишь с развитием технологий низкороговых детекторов и мощных ускорительных источников нейтрино УКРН превратился не только в важный тест предсказаний Стандартной Модели, но и в перспективный канал для поисков физики за её пределами, включая изучение свойств нейтрино, ядерных форм-факторов и природы тёмной материи.

Настоящий отчёт посвящён работе с данными, полученными в ходе эксперимента CENNS-10 — одного из ключевых проектов по наблюдению УКРН на пучке нейтрино от ускорителя SNS в Ок-Риджской национальной лаборатории. В работе рассматриваются этапы обработки экспериментальных данных с использованием программного пакета REDOffline, разработанного для анализа событий в детекторе. Особое внимание уделяется калибровочным ранам, позволяющим восстановить энергетический отклик установки, а также построению распределений по энергии и спектральным характеристикам (SPE, LY).

Важной частью анализа является применение современных методов математической обработки, в частности фитирования законов эволюции с помощью В-сплайнов. В заключительной части работы обсуждаются полученные результаты и их значение для дальнейших исследований в области когерентного рассеяния нейтрино.

## 2. Упругое когерентное рассеяние нейтрино(УКРН)

УКРН — это процесс, который был предсказан более 50 лет назад. Он заключается в том, что нейтрино (или антинейтрино) упруго рассеивается на ансамбле нуклонов ядра путем обмена виртуальным  $Z$ -бозоном и передачи части своей энергии (рис. 2.1).

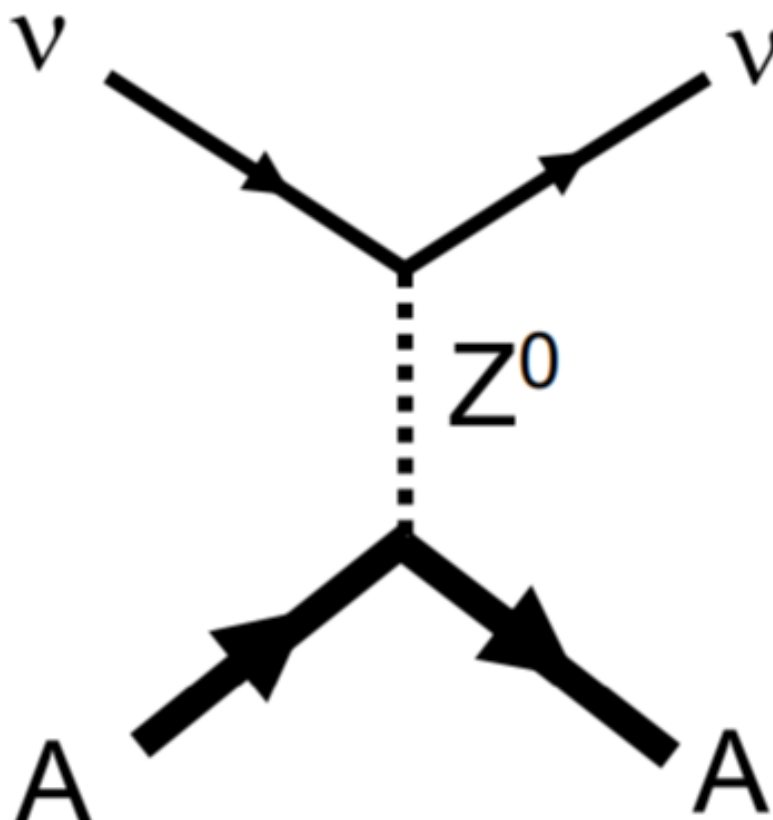


Рис. 2.1 – Диаграмма Фейнмана для УКРН

В случае малой переданной энергии неопределённость координаты нейтрино, обусловленная соотношением Гейзенберга, превосходит размер ядра. Вследствие этого низкоэнергетическое нейтрино может взаимодействовать когерентно со всеми нуклонами ядра, а не с одним из них. Для того, чтобы процесс УКРН протекал эффективно, энергия нейтрино должна быть не больше 50 МэВ, иначе условие когерентности будет выполняться не для всех углов рассеяния. Большие потоки нейтрино можно получить либо от ядерных реакторов, либо от сильноточного ускорителя, с которого пучок будет выводиться и сбрасываться в мишень полного поглощения.

Процесс УКРН играет важную роль в изучении процессов, связанных с

формированием Вселенной и эволюцией звезд. Отличия измеренного сечения взаимодействия УКРН от предсказаний в Стандартной Модели может свидетельствовать о том, что есть ещё какая-то новая физика за рамками Стандартной Модели, подобные результаты могут помочь найти новые, ранее не известные явления. Также есть потенциал для использования УКРН в изучении таких вещей, как ядерный форм-фактор и магнитный момент нейтрино.

Упругое когерентное рассеяние атмосферных и солнечных нейтрино может быть фоном для будущих экспериментов по поиску темной материи в виде массивных слабовзаимодействующих частиц вимпов. Поэтому экспериментальные данные о величине сечения УКРН могут использоваться для повышения чувствительности таких экспериментов. Также УКРН может быть использован для разработки новых технологий компактных детекторов, которые могут применяться для мониторинга состояния активной зоны ядерных реакторов.

### 3. CENNS-10

#### 3.1 Схема эксперимента COHERENT

В этой главе описывается экспериментальная установка, на которой было проведено первое наблюдение упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах аргона. Центральное место в этом исследовании занимает эксперимент COHERENT, расположенный на мощном источнике нейтрино — импульсном источнике нейтронов (Spallation Neutron Source, SNS) в Ок-Риджской национальной лаборатории (США). В рамках данной работы ключевым элементом установки являлся однофазный жидкоаргоновый детектор CENNS-10.

#### Источник нейтрино — Spallation Neutron Source (SNS)

Эксперимент COHERENT использует уникальную энергетическую (рис. 3.1) и временную (рис. 3.2) структуру нейтринного пучка, генерируемого на ускорительном комплексе SNS. Протоны с энергией около 1 ГэВ сбрасываются на ртутную мишень с частотой 60 Гц. В результате взаимодействий рождаются различные частицы, включая  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезоны. Поскольку  $\pi^-$ -мезоны быстро захватываются ядрами мишени, основной вклад в нейтринный поток даёт распад остановившихся  $\pi^+$ -мезонов (pion-decay-at-rest,  $\pi$ -DAR). Этот процесс происходит в два этапа:

1. **Немедленный сигнал (нейтрино «быстрой» компоненты):**  $\pi^+$ -мезон распадается с образованием мюона и мюонного нейтрино ( $\nu_\mu$ ). Время жизни пиона составляет 26 нс, поэтому эти нейтрино рождаются практически одновременно с импульсом протонного пучка. Энергия  $\nu_\mu$  строго фиксирована и составляет 29.8 МэВ.
2. **Задержанный сигнал («медленная» компонента):** Образовавшийся положительный мюон, имеющий время жизни 2.2 мкс, в свою очередь распадается на позитрон, электронное нейтрино ( $\nu_e$ ) и мюонное антинейтрино ( $\bar{\nu}_\mu$ ). Эти нейтрино имеют непрерывный энергетический спектр вплоть до 52.8 МэВ.

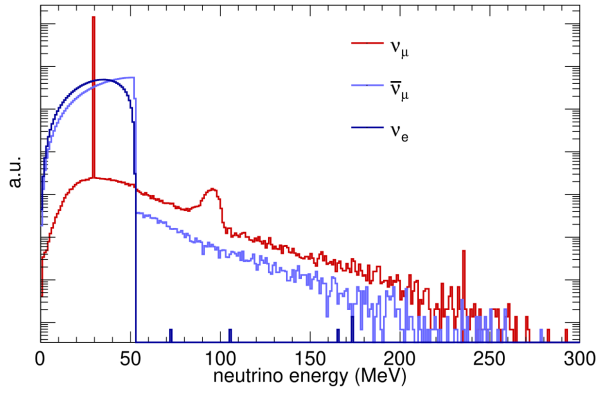


Рис. 3.1 – Энергетические спектры нейтрино, рождающихся на SNS.

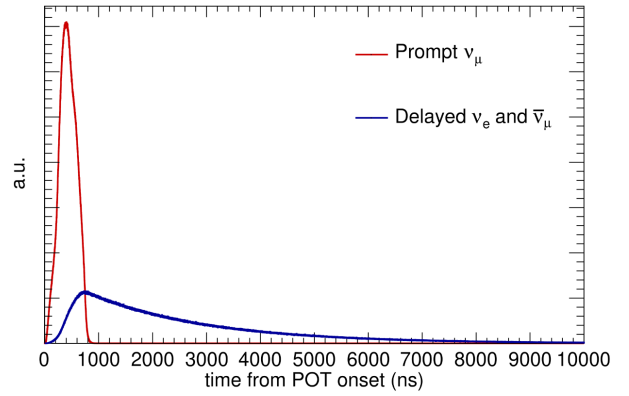


Рис. 3.2 – Временная структура рождения нейтрино на SNS.

Благодаря тому, что разные типы нейтрино приходят в детектор в разное время, сигнал на SNS можно эффективно выделять на фоне шумов. Ожидаемый поток нейтрино хорошо описывается теоретическими моделями.

## Общая конфигурация эксперимента COHERENT

Экспериментальная установка COHERENT расположена в специальном коридоре, получившем название «Нейтринная Аллея», на расстоянии 19–28 метров от ртутной мишени SNS (рис. 3.3). Такое расположение было выбрано в результате тщательного изучения фоновых условий. Конструктивные особенности здания обеспечивают естественную защиту от космических лучей, а стена, отделяющая Нейтринную Аллею от мишени, ослабляет поток нейтронов, рождающихся в самой мишени.

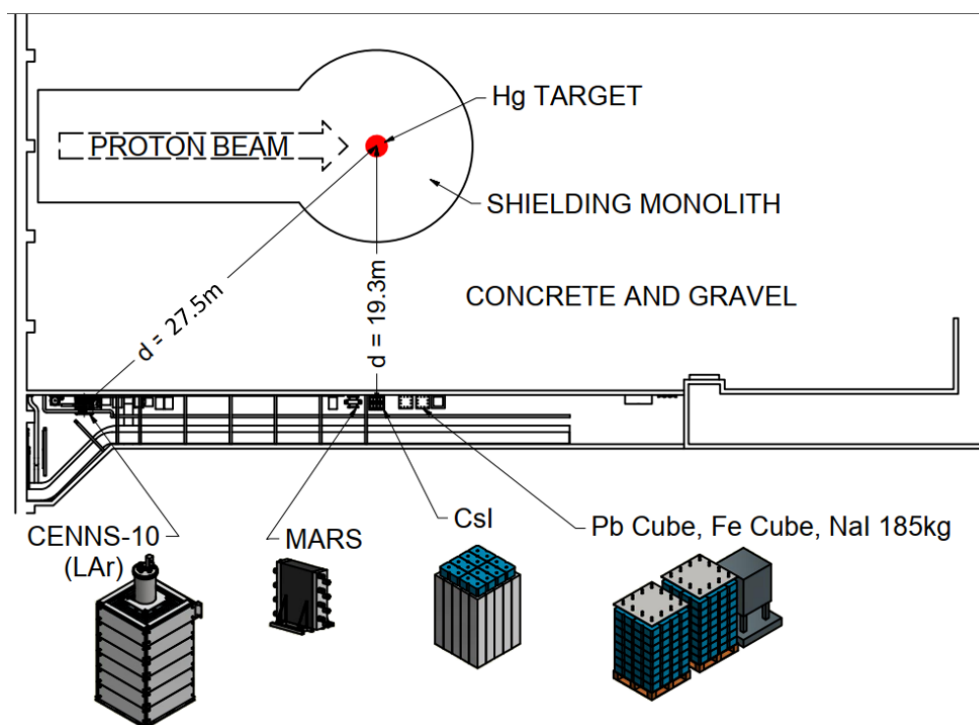


Рис. 3.3 – Текущий набор детекторов эксперимента SOHERENT и их размещение в Нейтринной Аллее.

Научная программа SOHERENT предполагает использование нескольких детекторных технологий с различными ядрами-мишенями для прецизионного изучения УКРН и поиска физики за пределами Стандартной Модели. Основные детекторы коллаборации включают:

- **CsI[Na]:** Кристаллический сцинтилляционный детектор, на котором в 2017 году было впервые зарегистрировано УКРН.
- **CENNS-10 (LAr):** Однофазный жидкоаргоновый детектор, которому посвящена данная работа.
- **NaI[Tl]:** Массив кристаллов иодида натрия, используемый, в том числе, для изучения взаимодействий по заряженному току.
- **HPGe:** Детектор на основе сверхчистого германия.

### 3.2 Конструкция детектора CENNS-10

Детектор CENNS-10 является однофазным сцинтилляционным детектором на жидком аргоне.



Для снижения уровня фона детектор помещен в многослойную пассивную защиту (рис. 3.5), состоящую из (снаружи внутрь):

- Свинцового слоя толщиной 10 см для ослабления внешнего  $\gamma$ -излучения.
- Медного слоя толщиной 1.25 см.
- Водяного бака толщиной 20 см, который служит эффективной защитой от нейтронов.



Рис. 3.5 – Детектор CENNS-10 в пассивной защите.

Детектор CENNS-10 набирал данные с декабря 2016 по май 2017 года (пробная фаза), а затем, после модернизации, с июля 2017 года до мая 2021 (основная фаза). Суммарная экспозиция для анализа составила почти 4 года данных, набранных с активным объёмом 24.4 кг жидкого аргона. Первая часть данных (пробная фаза) была признана непригодной для измерения УКРН из-за недостаточного световыхода, однако анализ данных, набранных после модернизации (основная фаза, RunSet1 и RunSet2), позволил впервые зарегистрировать УКРН на ядрах аргона со значимостью более  $3\sigma$ . Измеренное сечение, усреднённое по потоку нейтрино, составило  $(2.3 \pm 0.7) \times 10^{-39} \text{ см}^2$ , что согласуется с предсказаниями Стандартной модели.

## 4. REDOffline

Для анализа данных эксперимента CENNS-10 использовалась программа REDOffline, изначально разработанная для обработки и анализа данных детектора RED-100. Программа построена на основе пакета библиотек ROOT, широко применяемого в физике высоких энергий для анализа данных. Благодаря своей модульной архитектуре, REDOffline может быть легко адаптирована для обработки данных различных экспериментов. Все необходимые для работы программы параметры передаются через конфигурационный файл, что обеспечивает гибкость и универсальность. В рамках коллаборации COHERENT программа REDOffline успешно применяется для обработки данных экспериментов RED-100, CENNS-10 и CsI.

### 4.1 Основные определения

При описании работы программы используются следующие ключевые понятия:

- **Осциллограмма (waveform)** — отражает изменение состояния оцифрованного электрического сигнала в пределах заданного временного окна;
- **Базовая линия (baseline)** — шумовая линия сигнала с ФЭУ;
- **Импульс (pulse)** — любой электрический сигнал, амплитуда которого выше значения порога. Длительность импульса определяется как промежуток времени между точками пересечения порога в сторону увеличения и уменьшения амплитуды сигнала;
- **Кластер (cluster)** — физическое событие, конструируемое программой путем группировки обнаруженных на осциллограмме импульсов в соответствии с заданными в конфигурации параметрами. Процедура формирования физического события из импульсов называется кластеризацией.

### 4.2 Алгоритм обработки данных

Логика работы REDOffline с данными детектора CENNS-10 разбита на следующие последовательные шаги:

1. **Предварительная подготовка осциллограммы к обработке** —

включает в себя восстановление базовой линии и коррекцию систематических искажений;

2. **Поиск базовой линии и импульсов на осциллограмме** — определение уровня электронного шума и выделение импульсов приходящих с ФЭУ;
3. **Конструирование физического события из найденных импульсов** — группировка набора связанных импульсов в кластеры, которые описывают одну сцинтилляционную вспышку, для дальнейшего физического анализа.

### 4.3 Восстановление базовой линии

Особенностью осциллограмм, записываемых системой сбора данных, является выброс в противоположную сигналу сторону относительно базовой линии (ballistic deficit). Для коррекции этого эффекта используется специальный метод на основе рекуррентного соотношения, учитывающего RC-константу усилителя (рис. 4.1).

Оптимальные параметры коррекции были подобраны методом варьирования. Погрешность процедуры восстановления базовой линии составляет 1.3% систематической погрешности [1].

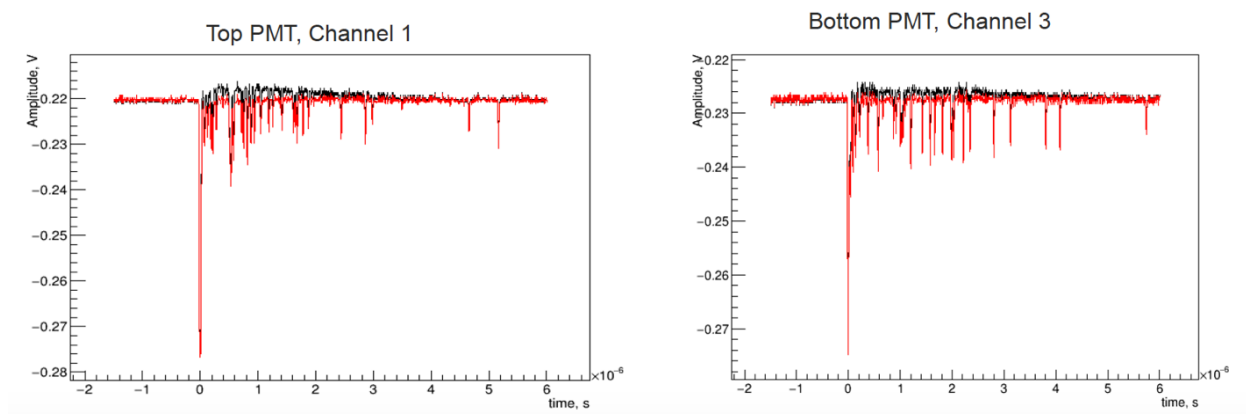


Рис. 4.1 – Результат работы процедуры восстановления базовой линии. Чёрным цветом выделена исходная осциллограмма, красным — результат восстановления.

После коррекции осциллограммы программа определяет положение базовой линии и её ширину. Для этого строится гистограмма значений амплитуды для каждого отсчета АЦП. Поскольку базовая линия состоит в

основном из множества малых шумовых импульсов, распределение амплитуд имеет форму гауссианы с дополнительным хвостом, связанным с сигналом. Среднее значение распределения даёт оценку базовой линии, а для её точного определения используется аппроксимация гауссовой функцией в пределах небольшого амплитудного окна.

#### 4.4 Выходной формат

Результатом работы REDOffline является выходной файл формата .root, в котором сохранены параметры обнаруженных импульсов и кластеров. В дальнейшем анализе осциллограммы не используются, что позволяет существенно сократить объём обрабатываемых данных. Такой подход обеспечивает высокую скорость последующего статистического анализа и позволяет сосредоточиться на физической интерпретации результатов.

## 5. Анализ калибровочных рангов

### 5.1 SPE распределения

Одним из ключевых понятий при обработке данных с фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) является однофотоэлектронный сигнал (Single Photoelectron, SPE). SPE представляет собой электрический импульс на выходе ФЭУ, возникающий при регистрации одного электрона, выбиваемого фотоном из фотокатода. Этот сигнал служит фундаментальной единицей измерения при калибровке детектора, поскольку позволяет установить однозначное соответствие между зарядом, собранным на аноде ФЭУ, и количеством зарегистрированных фотонов.

Для детектора CENNS-10 калибровка SPE является критически важной процедурой, поскольку она напрямую определяет точность энергетического восстановления событий. Зная площадь SPE-импульса, можно пересчитать интегральный заряд любого зарегистрированного сигнала в количество фотоэлектронов (PE), а затем, используя калибровочную кривую, — в энергию, выделившуюся в детекторе. SPE-калибровка проводится с помощью светодиода, а также извлекается из хвостов событий при калибровках с радиоактивными источниками. Полученное значение площади SPE позволяет отслеживать временную стабильность работы ФЭУ и вносить соответствующие поправки в энергетическую шкалу детектора.

В рамках изучения выходных данных REDOffline были построены распределения SPE-импульсов по ширине (рис. 5.1) с ограничениями на амплитуду  $[0.0025, 0.6]$ В и время появления импульса относительно триггера  $>4$ мкс.

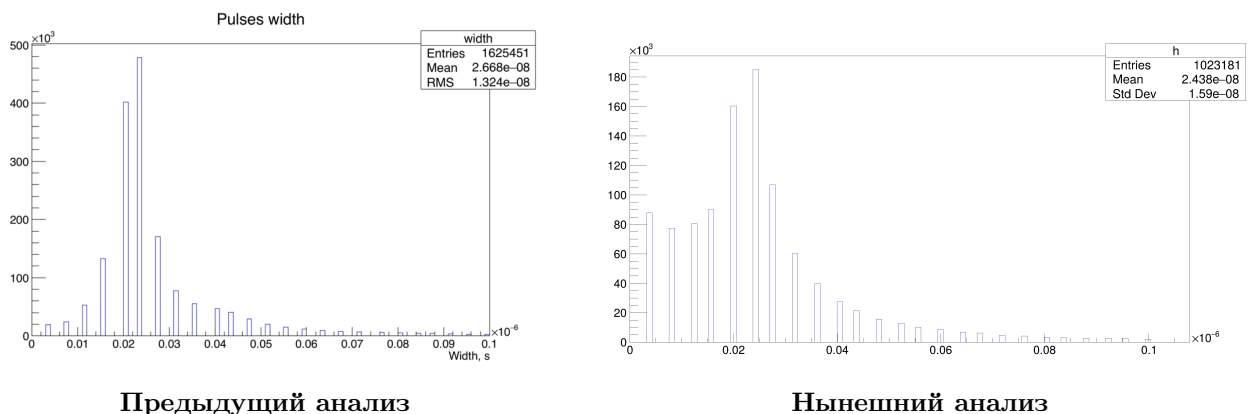


Рис. 5.1 – Распределение SPE-импульсов по ширине

После анализа распределения по ширине SPE-импульсов было добавлено ограничение на ширину  $[0.016, 0.1]$  мкс и построены распределения SPE-импульсов по площади (рис. 5.2).

Для анализа распределения SPE-импульсов по площади была выполнена аппроксимация гистограммы суммой экспоненциальной функции и двух гауссовых пиков. Экспоненциальная компонента описывает фоновые шумовые импульсы, в то время как первый гауссов пик соответствует однофотонным событиям, а второй гауссов пик — событиям с двумя фотонами. Положение первого гауссова пика (среднее значение распределения) было использовано для определения средней площади однофотонного сигнала  $Q_{SPE}$  для данного калибровочного рана. Данная процедура позволяет надежно извлекать значение  $Q_{SPE}$  даже при наличии фоновой компоненты и событий с несколькими фотонами. Полученное значение  $Q_{SPE}$  используется для пересчёта интегрального заряда любого зарегистрированного сигнала в количество фотоэлектронов и последующего энергетического восстановления событий.

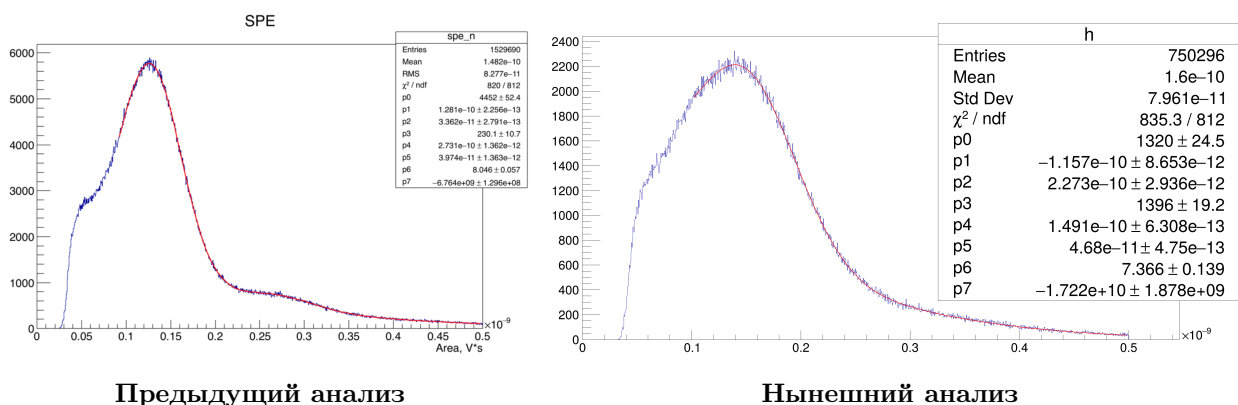


Рис. 5.2 – Распределение SPE-импульсов по площади

## 5.2 Распределения по энергии

Для анализа энергетического отклика детектора CENNS-10 и проверки корректности работы программы REDOffline были построены распределения зарегистрированных событий, набранных с источником  $^{57}\text{Co}$ , по количеству фотоэлектронов (PE) (рис. 5.3). При построении отбирались события с одним кластером.

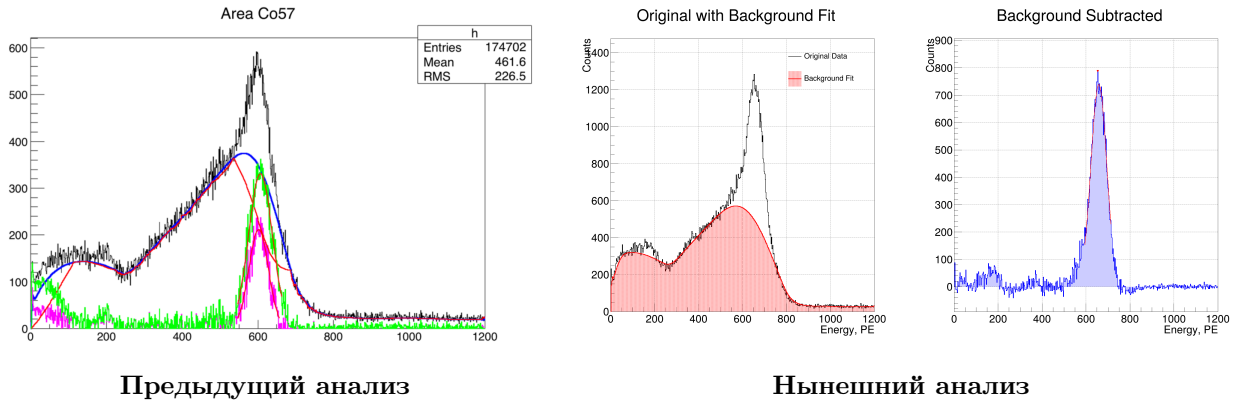


Рис. 5.3 – Распределения событий по PE

Количество фотоэлектронов  $N_{PE}$  вычисляется как отношение интегрального заряда кластера  $Q$  к площади однофотоэлектронного сигнала  $Q_{SPE}$ :

$$N_{PE} = \frac{Q}{Q_{SPE}} \quad (5.1)$$

Полученные распределения отражают энергетический спектр событий, зарегистрированных детектором в ходе калибровочных измерений. На распределении в области  $\sim 650$  PE отчётливо виден пик, соответствующий фотопику от калибровочного источника  $^{57}\text{Co}$  (энергия 122 кэВ). Наличие этого пика подтверждает корректность энергетической калибровки детектора и позволяет определить световыход:

$$LY = \frac{N_{PE}}{E_\gamma}, \quad (5.2)$$

где  $E_\gamma = 122$  кэВ — энергия гамма-кванта от  $^{57}\text{Co}$ .

### 5.3 PSD распределения

Параметр формы сигнала (Pulse Shape Discrimination, PSD) является важным инструментом для различения типов взаимодействий в жидком аргоне. Сцинтилляционный сигнал в жидком аргоне имеет две компоненты: быструю (синглетную) с характерным временем высвечивания  $\sim 6$  нс и медленную (триплетную) с характерным временем  $\sim 1.5$  мкс. Отношение интенсивностей этих компонент зависит от типа взаимодействующей частицы: для электронов отдачи (гамма- и бета-события) доля медленной компоненты выше, тогда как для ядер отдачи, возникающих при рассея-

нии нейтронов, преобладает быстрая компонента. Это различие позволяет эффективно подавлять фоновые события, связанные с электронными и гамма-взаимодействиями.

В качестве параметра разделения по форме сигнала в эксперименте CENNS-10 используется величина  $F90$ , определяемая как отношение заряда, собранного в первые 90 нс от начала импульса, к полному заряду импульса:

$$F90 = \frac{Q_{0-90}}{Q_{\text{total}}} \quad (5.3)$$

Для ядер отдачи, дающих преимущественно быструю компоненту сцинтилляции, значение  $F90 \gtrsim 0.5$ . Для электронов отдачи, у которых вклад медленной компоненты выше, значение  $F90$  существенно ниже. Это позволяет установить критерии отбора для выделения сигнала УКРН на фоне электронных и гамма-событий.

На рис. 5.4 представлены двумерные распределения событий по параметру  $F90$  и количеству фотоэлектронов (PE) для предыдущего и нынешнего анализов соответственно. Поскольку калибровочные раны набирались с  $\gamma$ -источником  $^{57}\text{Co}$ , в распределениях присутствует только популяция электронов отдачи (ER). Данные распределения отражают поведение параметра  $F90$  для электронных событий и используются для характеристики отклика детектора на электроны отдачи.

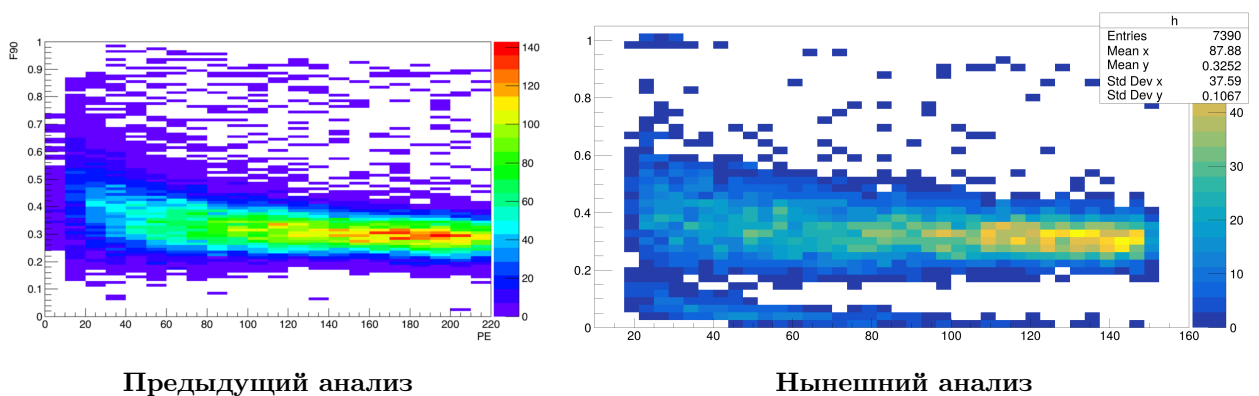


Рис. 5.4 – Двумерные распределения событий по параметру  $F90$  и количеству фотоэлектронов (PE) для калибровочных данных с источником  $^{57}\text{Co}$ .

В представленных распределениях видно, что основная популяция событий сосредоточена в области значений  $F90 \lesssim 0.5$ , что характерно для

электронов отдачи. Наблюдается небольшой рост  $F90$  при малых энергиях, что связано с ухудшением отношения сигнал/шум в области низких амплитуд.

Сравнение распределений из предыдущего и нынешнего анализов показывает хорошее качественное согласие. Основные особенности популяции электронов отдачи воспроизводятся в обоих анализах, что подтверждает стабильность процедур обработки данных и корректность отбора событий по форме сигнала. Различия в плотности распределений обусловлены разным объёмом статистики при обработке данных.

Полученные распределения  $F90$  для электронов отдачи служат основой для построения критериев отбора, позволяющих отделять ER события от NR событий.

## 6. Фитирование законов эволюции

### 6.1 Пакет для фитирования В-сплайнами

Для аппроксимации экспериментальных данных и построения гладких функций, описывающих эволюцию различных параметров детектора во времени, был разработан специализированный набор функций *BSpliner* для фитирования В-сплайнами. *BSpliner* представляет собой набор функций на языке C++, интегрированных с библиотекой ROOT, и предназначен для построения, сохранения и анализа В-сплайнов произвольного порядка.

#### Математическое описание В-сплайнов

В-сплайн (basis spline) представляет собой кусочно-полиномиальную функцию, обладающую свойством минимального носителя. Математически В-сплайн порядка  $N$  определяется рекурсивно с помощью формулы Кокса-де-Бура. Базисные функции нулевого порядка определяются как:

$$B_{i,0}(x) = \begin{cases} 1, & x_i \leq x < x_{i+1} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (6.1)$$

Для порядка  $N > 0$  базисные функции вычисляются рекурсивно:

$$B_{i,N}(x) = \frac{x - x_i}{x_{i+N} - x_i} B_{i,N-1}(x) + \frac{x_{i+N+1} - x}{x_{i+N+1} - x_{i+1}} B_{i+1,N-1}(x) \quad (6.2)$$

где  $\{x_i\}$  — набор узлов сплайна. Конечный В-сплайн представляется в виде линейной комбинации базисных функций:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{m-1} c_i B_{i,N}(x) \quad (6.3)$$

где  $c_i$  — коэффициенты, определяемые при фитировании, а  $m$  — количество базисных функций.

## Структура пакета

Разработанный пакет состоит из нескольких заголовочных файлов, каждый из которых отвечает за определённый функционал:

- **BSpline.hh** — ядро пакета, содержащее рекурсивную реализацию базисных функций В-сплайна и функцию построения сплайна  $S(x)$ .
- **ScalMult\_func.hh** — модуль для вычисления скалярных произведений сплайнов с использованием численного интегрирования.
- **ScalMult\_points.hh** — модуль для вычисления дискретных скалярных произведений по точкам, включая взвешенный вариант для данных с ошибками.
- **Fitting\_BSpline.hh** — основной модуль, реализующий процедуры построения сплайнов по экспериментальным данным методом наименьших квадратов и методом наименьшего  $\chi^2$ .
- **ConfidenceBand.hh** — модуль для построения доверительных полос сплайна на основе результатов фитирования.
- **WriteAndRead\_BSpline.hh** — модуль для сохранения и загрузки сплайнов в текстовый файл.
- **BSpliner.hh** — заголовочный файл, объединяющий все модули для удобства использования.

## Алгоритм построения сплайна

Процесс построения В-сплайна по экспериментальным данным состоит из следующих шагов:

### 1. Расширение узлового вектора

Для корректного учёта граничных условий исходный набор узлов  $\{x_0, x_1, \dots, x_{n-1}\}$  расширяется добавлением  $N$  узлов слева и справа:

$$x'_{N-1-i} = x_0 - \Delta x_{\text{left}} \cdot (i + 1), \quad i = 0, \dots, N - 1 \quad (6.4)$$

$$x'_{n+N+i} = x_{n-1} + \Delta x_{\text{right}} \cdot (i + 1), \quad i = 0, \dots, N - 1 \quad (6.5)$$

где  $\Delta x_{\text{left}} = x_1 - x_0$  и  $\Delta x_{\text{right}} = x_{n-1} - x_{n-2}$ . Такое расширение обеспечивает гибкое поведение сплайна на границах области определения.

## 2. Решение системы линейных уравнений

Для определения коэффициентов  $c_i$  методом наименьших квадратов решается система линейных уравнений:

$$\sum_j c_j \langle B_i, B_j \rangle = \langle f, B_i \rangle \quad (6.6)$$

где  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  обозначает скалярное произведение, а  $f$  — аппроксимируемая функция. Поскольку наши данные экспериментальные и имеют ошибки, используется взвешенный вариант:

$$\langle f, B_i \rangle = \sum_k \frac{y_k B_i(x_k)}{\sigma_k^2}, \quad \langle B_i, B_j \rangle = \sum_k \frac{B_i(x_k) B_j(x_k)}{\sigma_k^2} \quad (6.7)$$

## 3. Решение трёхдиагональной системы

Благодаря свойству локальности В-сплайнов (каждая базисная функция отлична от нуля только на  $N + 1$  интервалах), матрица скалярных произведений является ленточной с шириной  $2N + 1$ . Это позволяет эффективно решать систему методом прогонки [2]. В пакете реализован алгоритм, использующий компактное хранение ленточной матрицы и последовательное исключение переменных.

### Функционал пакета

#### Построение сплайна

Пакет предоставляет несколько способов построения В-сплайнов:

- `GetBSplineByFunc` — построение сплайна по функции с использованием численного интегрирования.
- `GetBSplineByPoints` — построение сплайна по дискретным точкам *TGraph*.
- Поддержка взвешенного фитирования для *TGraphErrors* с учётом ошибок точек.

- Возможность задания произвольного набора узлов или автоматического равномерного распределения.

## Сохранение и загрузка

Реализована возможность сохранения сплайна в текстовый файл со следующей структурой:

```
# B-Spline saved from ROOT
# Format: order, nKnots, knots_expansion, coefficients
3
10
0.0 1.0 2.0 ... 9.0
0.5 1.2 0.8 ...
```

Загрузка сплайна из файла позволяет восстанавливать ранее построенные аппроксимации без повторного выполнения фитирования.

## Доверительные полосы

При фитировании трендов в физическом эксперименте важно оценивать возникающие ошибки. Модуль `ConfidenceBand.hh` обеспечивает построение доверительных полос сплайна на заданном уровне значимости (по умолчанию 95%). Алгоритм использует встроенные средства ROOT для вычисления доверительных интервалов на основе ковариационной матрицы параметров фитирования.

## Применение в анализе данных

Данный пакет используется для аппроксимации различных зависимостей в эксперименте CENNS-10. В частности, с его помощью:

- Строятся калибровочные кривые для перевода фотоэлектронов в энергию.
- Описывается эволюция однофотоэлектронного сигнала во времени.

Использование B-сплайнов обеспечивает высокую гибкость аппроксимации благодаря локальному характеру базисных функций и позволяет

избежать нефизических осцилляций, характерных для полиномов высоких порядков.

## 6.2 Эволюция SPE

Одной из ключевых задач калибровки детектора CENNS-10 является отслеживание временной стабильности работы фотоэлектронных умножителей. Площадь однофотоэлектронного сигнала  $Q_{\text{SPE}}$  определяет масштабный коэффициент для перевода интегрального заряда в количество фотоэлектронов и, следовательно, напрямую влияет на точность энергетической калибровки. В течение длительного сеанса набора данных (почти 4 года) наблюдалось постепенное изменение площади SPE, связанное с изменением коэффициента усиления и нестабильностью других параметров регистрирующей электроники.

На рис. 6.1 представлено сравнение закона эволюции SPE, полученного в предыдущем анализе и в нынешнем. Для описания временной зависимости SPE ранее использовалась функция вида:

$$Q_{\text{SPE}}(t) = \frac{p_0}{1 + e^{-p_1 t + p_2}} \quad (6.8)$$

где  $t$  — время, прошедшее с начала сеанса (в днях). Данная аппроксимация позволила описать плавное изменение SPE на небольшом временном промежутке однако для описания эволюции на протяжении всего эксперимента этой функции оказалось не достаточно.

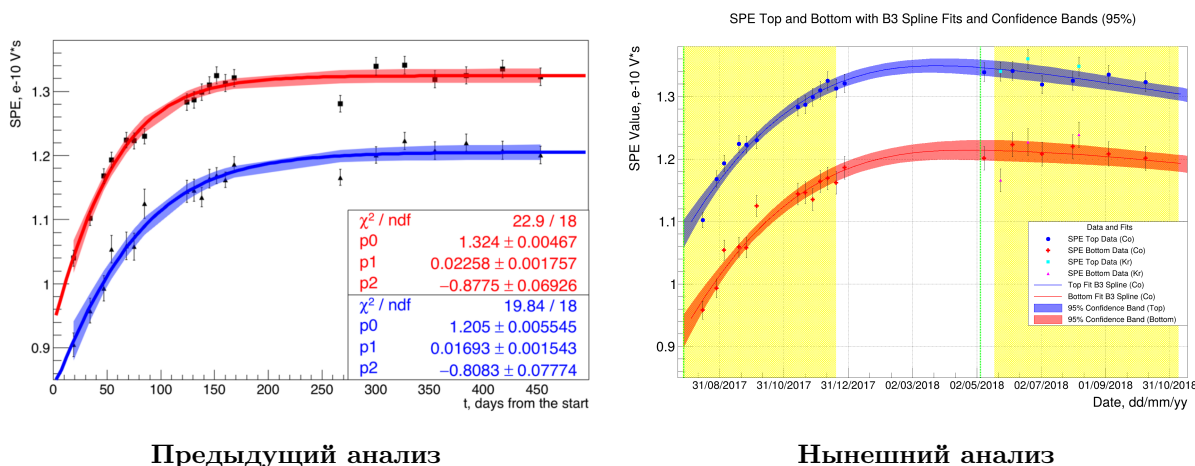


Рис. 6.1 – Эволюция SPE в RunSet1 и RunSet2

В рамках нынешнего анализа для аппроксимации эволюции SPE был

использован В-сплайн третьего порядка (кубический В-сплайн). Использование В-сплайна обеспечивает более высокую гибкость описания локальных особенностей поведения SPE, гарантируя гладкость функции. На рис. 6.2 показаны экспериментальные точки и закон эволюции SPE, полученный с помощью В-сплайна. Как видно из рисунка, В-сплайн хорошо воспроизводит экспериментальные точки и даёт более точное описание в областях с изменением усиления ФЭУ.

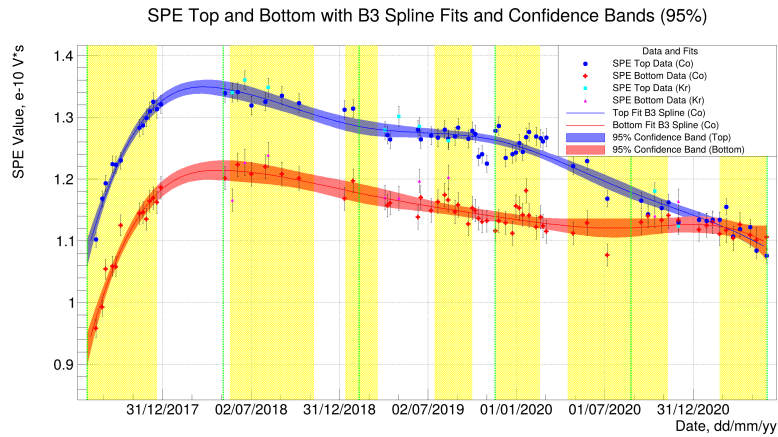


Рис. 6.2 – Эволюция SPE в RunSet1 и RunSet2, аппроксимированная кубическим В-сплайном (нынешний анализ).

### 6.3 Эволюция LY

Световой выход  $LY$  (Light Yield) является фундаментальной характеристикой детектора, определяющей количество фотоэлектронов, регистрируемых на единицу выделившейся энергии. Световой выход зависит от множества факторов, включая чистоту жидкого аргона, эффективность сбора света, квантовую эффективность ФЭУ и качество нанесения спектросместителя ТРВ. В течение длительного сеанса набора данных световой выход может изменяться вследствие изменения оптических свойств материалов, изменения уровня примесей в аргоне или нестабильности работы электроники.

Эволюция светового выхода во времени определяется как отношение положения фотопика калибровочного источника  $^{57}\text{Co}$  (энергия 122 кэВ) в единицах фотоэлектронов к табличному значению энергии источника:

$$LY(t) = \frac{N_{\text{PE}}(t)}{E_{\gamma}} \quad (6.9)$$

где  $N_{PE}(t)$  — энергия фотопика  $^{57}\text{Co}$  в PE в момент времени  $t$ ,  $E_\gamma = 122$  кэВ.

На рис. 6.3 представлена эволюция световыхода  $LY$  в течение всего сеанса набора данных. Значения световыхода получены из регулярных калибровок с источником  $^{57}\text{Co}$ , проводившихся еженедельно.

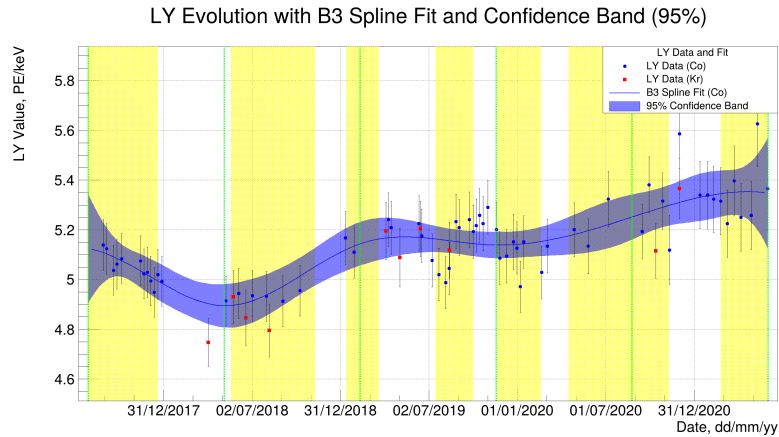


Рис. 6.3 – Эволюция световыхода  $LY$

Для описания эволюции световыхода также использовался кубический В-сплайн, обеспечивающий гладкую аппроксимацию с учётом локальных особенностей. Полученная зависимость  $LY(t)$  используется для корректного пересчёта количества фотоэлектронов в энергию для каждого события с учётом времени его регистрации. Применение временной коррекции световыхода позволяет уменьшить систематическую погрешность восстановления энергии событий, особенно для событий с малой энергией, где точность энергетической шкалы критически важна.

Таким образом, учёт эволюции SPE и световыхода является необходимым условием для получения корректных результатов при анализе экспериментальных данных, особенно при работе с длительными сеансами набора данных, где временная нестабильность параметров детектора может вносить существенный вклад в систематическую погрешность.

# Заключение

В ходе выполнения данной научно-исследовательской работы был проведён повторный анализ калибровочных данных эксперимента CENNS-10, направленный на улучшение учёта законов эволюции ключевых параметров детектора и проверку корректности процедур обработки данных.

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

- 1. Освоение пакета REDOffline.** В рамках работы был освоен программный пакет REDOffline, предназначенный для обработки данных детектора CENNS-10. Обработка калибровочных данных позволила получить распределения SPE-импульсов по ширине и площади, а также построить распределения событий по количеству фотоэлектронов и параметру F90. Полученные распределения демонстрируют хорошее согласие с результатами предыдущего анализа, что подтверждает корректность работы программного обеспечения и воспроизводимость процедур обработки данных.
- 2. Разработка пакета для фитирования B-сплайнами.** Для аппроксимации временных законов эволюции SPE и LY был разработан специализированный пакет функций на языке C++, интегрированный с библиотекой ROOT. Пакет реализует построение B-сплайнов произвольного порядка с использованием метода наименьших квадратов и метода наименьшего  $\chi^2$ , а также предоставляет функционал для сохранения, загрузки и построения доверительных полос сплайнов. Использование B-сплайнов обеспечивает высокую гибкость аппроксимации благодаря локальному характеру базисных функций и позволяет избежать нефизических осцилляций, характерных для полиномиальных моделей.
- 3. Анализ эволюции SPE.** Построен закон эволюции площади однофотонного сигнала  $Q_{\text{SPE}}(t)$ . Для аппроксимации временной зависимости SPE использовался кубический B-сплайн, обеспечивающий гибкое и точное описание локальных особенностей поведения SPE. Полученный закон эволюции SPE позволяет отслеживать временную нестабильность работы ФЭУ и применяется для коррекции энергетической шкалы каждого события в зависимости от времени его регистрации.

4. **Анализ эволюции LY.** Построен закон эволюции световыхода  $LY(t)$ , полученный на основе регулярных калибровок с источником  $^{57}\text{Co}$ . Для аппроксимации использовался кубический B-сплайн, обеспечивающий гладкое описание временной зависимости. Полученная зависимость  $LY(t)$  применяется для корректного пересчёта количества фотоэлектронов в энергию с учётом времени регистрации события, что позволяет уменьшить систематическую погрешность энергетического восстановления.

Разработанный пакет для фитирования B-сплайнами может быть использован не только в рамках эксперимента CENNS-10, но и в других физических экспериментах, требующих гибкой и точной аппроксимации экспериментальных данных. Полученные законы эволюции SPE и LY являются важным элементом калибровочной процедуры, обеспечивающим корректное восстановление энергетической шкалы детектора на протяжении всего длительного сеанса набора данных.

Таким образом, результаты данной работы вносят вклад в улучшение методики обработки данных эксперимента CENNS-10 и могут быть использованы при подготовке финальных результатов по измерению сечения упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах аргона. Дальнейшее развитие работы предполагает применение разработанных методов для полного набора экспериментальных данных и проведение Likelihood-анализа для выделения сигнала УКРН.

## Список литературы

- [1] Кумпан А.В. *Первое наблюдение упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах аргона*. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, НИЯУ МИФИ, Москва, 2023.
- [2] Васильев Н.П., Вагизов М.Р. Семидиагональный метод прогонки для решения задач В-сплайн аппроксимации. *Геодезия и картография*, № 1 (1027), сс. 9–16, 2026.
- [3] Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering. *Science*, **357**(6356), 1123–1126, 2017.
- [4] Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). First constraint on coherent elastic neutrino-nucleus scattering in argon. *Physical Review D*, **100**(11), 115020, 2019.
- [5] Tayloe R. for the COHERENT Collaboration. The CENNS-10 Liquid Argon Detector to measure CEvNS at the Spallation Neutron Source, 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/1801.00086>
- [6] Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). First measurement of coherent elastic neutrino-nucleus scattering on argon. *Physical Review Letters*, **126**(1), 012002, 2021.
- [7] Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). The COHERENT Experiment at the Spallation Neutron Source, 2016. — URL: <https://arxiv.org/abs/1509.08702>