

Изучение характеристик двухфазного детектора на сжиженном благородном газе

Аперян Степан Мгерович

Научный руководитель: Наумов П. Ю.

Научный консультант: Акимов Д. Ю.

Актуальность и цель работы

Актуальность

- ▶ Двухфазные эмиссионные детекторы являются важным инструментом современной низкофоновой физики.
- ▶ Используются в экспериментах по поиску тёмной материи и регистрации упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах.
- ▶ Основаны на регистрации электролюминесцентного сигнала от электронов ионизации.

Цель работы

Исследование характеристик двухфазных детекторов РЭД-100 и РЭД-1:

- ▶ измерение времени жизни электронов с целью контроля степени очистки рабочей среды.
- ▶ исследование зависимости электролюминесценции от напряжённости поля.

Принцип работы эмиссионного детектора на жидком благородном газе

Детектор РЭД-100

- ▶ Двухфазный эмиссионный детектор на жидком аргоне.
- ▶ Предназначен для регистрации слабых и редких событий.
- ▶ Активный объём содержит жидкую и газовую фазы аргона.
- ▶ Электрическое поле формируется электродной системой.

Принцип регистрации

- ▶ Частица создаёт сцинтилляцию S1 и электроны ионизации.
- ▶ Электроны под действием приложенного электрического поля вытягиваются в газовую фазу.
- ▶ В газовой фазе возникает электролюминесцентный сигнал S2.

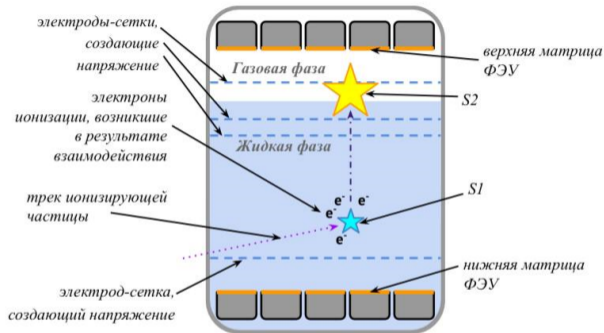


Схема формирования сигналов S1 и S2 в двухфазном детекторе.

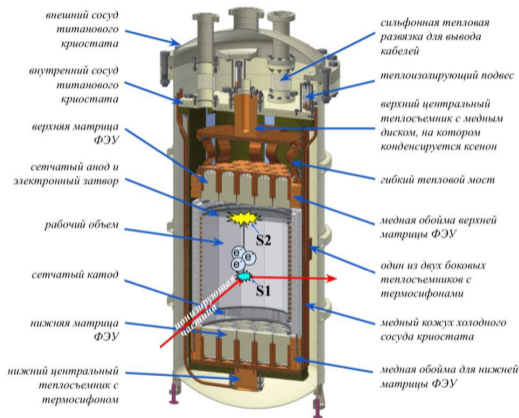
Конструкция детектора РЭД-100

Общая конструкция

- ▶ Основным элементом является вакуумный титановый криостат.
- ▶ Внутри криостата размещён активный объём с жидким аргоном.
- ▶ Над поверхностью жидкости формируется газовая фаза.
- ▶ Над поверхностью жидкости формируется газовая фаза.
- ▶ Верхняя и нижняя матрицы ФЭУ регистрируют световые сигналы.

Электродная система

- ▶ Катод.
- ▶ Анод.
- ▶ Электронный затвор.
- ▶ Экстракционные сетки.
- ▶ Формирующие кольца.



Общая конструкция двухфазного детектора РЭД-100.

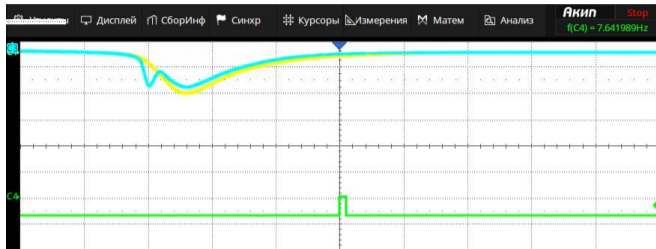
РЭД-100. Регистрация электролюминесцентного сигнала

Условия измерения

- ▶ Для исследования зависимости электролюминесценции от напряжённости электрического поля использовался газовый зазор между анодом и верхней сеткой затвора детектора РЭД-100.
- ▶ Во время измерений затвор был закрыт.
- ▶ Ионизация создавалась мюонами, проходящими через слой жидкого аргона толщиной 5 мм, расположенный над верхней сеткой затвора $G1$.
- ▶ Напряжённость электрического поля рассчитывалась по значениям потенциалов:

$$U_A = 3-9 \text{ кВ}, \quad U_{G1} = -5 \text{ кВ}.$$

- ▶ При расчётах учитывалась диэлектрическая проницаемость жидкого аргона $\epsilon = 1.5$.



Оциллограмма сигналов при $U_A = 8 \text{ кВ}$.

Определение амплитуды

- ▶ C1 — сигнал верхней матрицы ФЭУ.
- ▶ C3 — сигнал нижней матрицы ФЭУ.
- ▶ C4 — триггерный сигнал.
- ▶ Амплитуда относительно базовой линии.

РЭД-100. Амплитуда сигнала при разных напряжениях

U_A , кВ	Верхняя матрица ФЭУ, мВ	Нижняя матрица ФЭУ, мВ
9	387 ± 7	16.3 ± 0.6
8	307 ± 7	12.7 ± 0.6
7	220 ± 7	9.6
6	146.7 ± 4.5	6.5 ± 0.1
5	99 ± 2.7	4.3 ± 0.1
4	60 ± 1.7	2.7 ± 0.1
3	47 ± 1.7	нет

Значения амплитуды сигналов верхней и нижней матриц ФЭУ при различных анодных напряжениях.

РЭД-100. Электролюминесценция

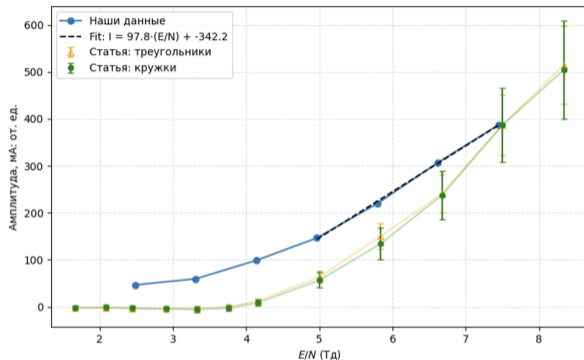
Условия измерений

- ▶ Исследовалась зависимость сигнала от анодного напряжения.
- ▶ Измерения проводились при семи значениях напряжения от 3 до 9 кВ.
- ▶ Поле пересчитывалось в приведённую напряжённость E/N [36].

Результат

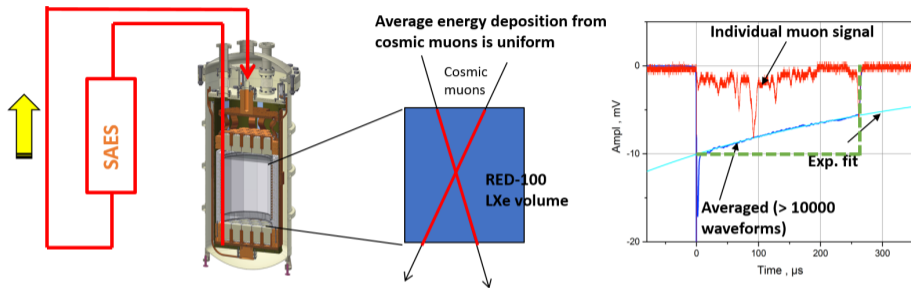
Получена линейная зависимость амплитуды электролюминесцентного сигнала от E/N .

Рост сигнала соответствует режиму чистой электролюминесценции без развития электронных лавин.



Экспериментальная зависимость сигнала электролюминесценции от E/N .

Метод контроля чистоты



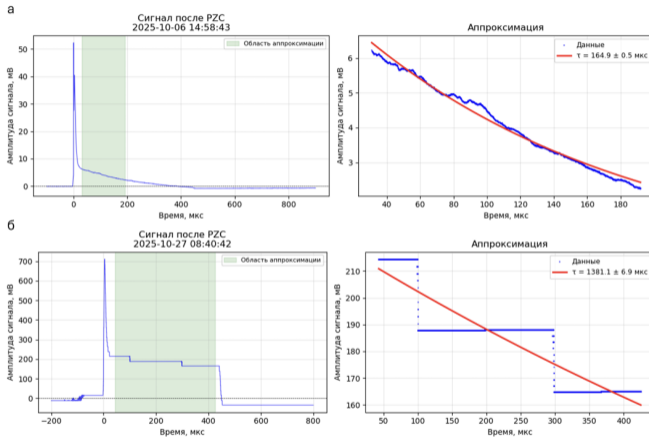
Идея метода

При усреднении большого числа сигналов от космических мюонов энерговыделение вдоль трека считается равномерным. При отсутствии электроотрицательных примесей усреднённый сигнал имеет линейную форму. Отклонение от линейной зависимости обусловлено захватом электронов примесями и используется для определения времени жизни электронов и контроля чистоты жидкого аргона.

РЭД-100. Определение времени жизни электронов

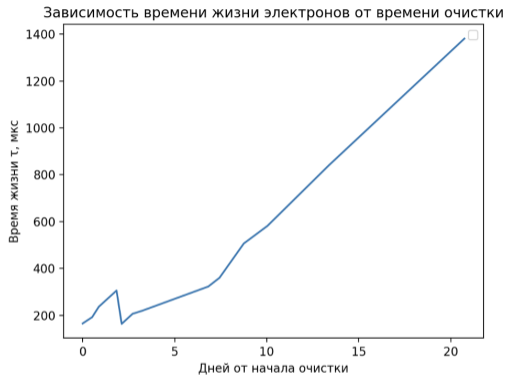
Методика

- ▶ Выделялась область экспоненциального спада сигнала.
- ▶ Время жизни электронов определялось экспоненциальной аппроксимацией.



Определение времени жизни электронов по экспоненциальной аппроксимации сигнала.

РЭД-100. Очистка рабочей среды



Результат

Для всех измерений предварительно выполнялась процедура очистки рабочей среды и контроль времени жизни электронов.

В процессе непрерывной очистки рабочей среды время жизни электронов увеличилось

$$165 \mu\text{S} \rightarrow 1381 \mu\text{S}$$

Измерение времени жизни свободных электронов в ксеноне

Детектор РЭД-1

- ▶ Двухфазный ксеноновый детектор.
- ▶ Активная масса жидкого ксенона около (0,6) кг.
- ▶ Используется для лабораторных тестов.
- ▶ Свет регистрируется матрицей из 7 ФЭУ.

Принцип регистрации

- ▶ Атмосферный мюон проходит через жидкий ксенон.
- ▶ Образуются электроны ионизации.
- ▶ Электроны дрейфуют к газовой фазе.
- ▶ В газовой фазе возникает электролюминесценция.

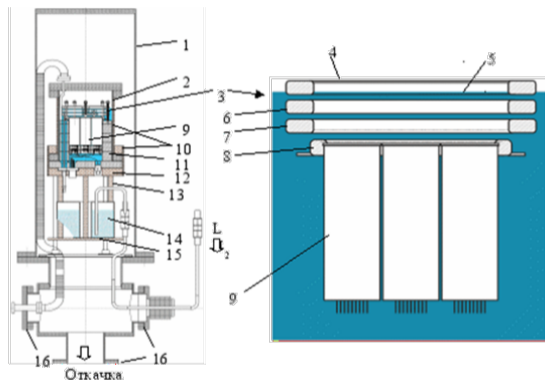
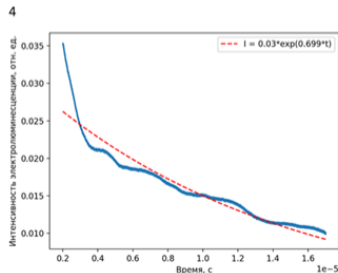
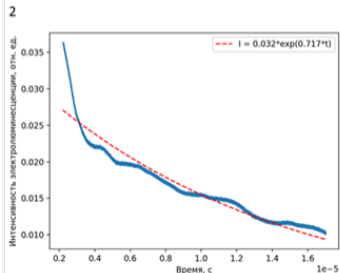
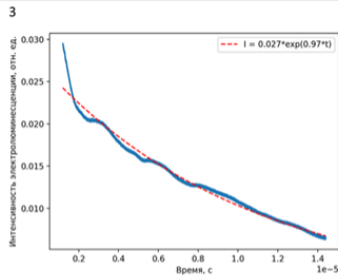
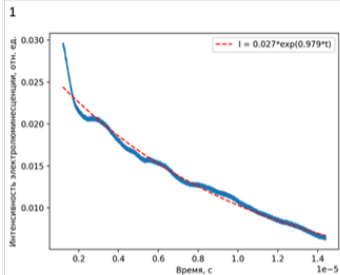


Схема работы двухфазного детектора РЭД-1.

РЭД-1. Экспериментальные зависимости



Экспериментальные зависимости электролюминесцентного сигнала от времени и экспоненциальные аппроксимации.

- 1 — С2 без очистки,
- 2 — С2 после очистки,
- 3 — С3 без очистки,
- 4 — С3 после очистки.

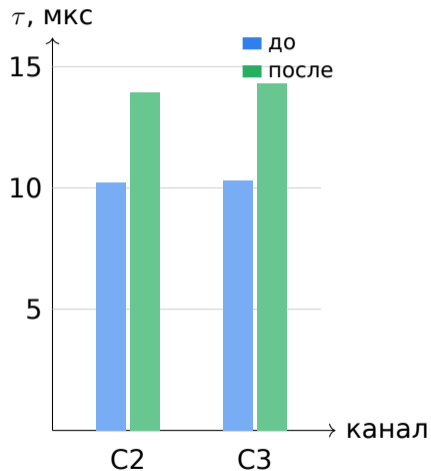
РЭД-1. Время жизни электронов

““

Канал	до, мкс	после, мкс
C2	10.21 ± 0.01	13.95 ± 0.02
C3	10.31 ± 0.01	14.31 ± 0.02

Результат

После очистки время жизни электронов увеличилось на 38%.



Полученные значения остаются сопоставимыми со временем дрейфа электронов (~ 15 мкс), что указывает на необходимость дальнейшей очистки. 13/16

РЭД-1. Интерпретация результата

Ограничение результата

Полученные времена жизни электронов имеют тот же порядок, что и время дрейфа в РЭД-1:

$$\tau \approx 14 \mu\text{с}, \quad t_{\text{др}} \approx 15 \mu\text{с}$$

- ▶ Условие $\tau \gg t_{\text{др}}$ пока не выполнено.
- ▶ Часть электронов всё ещё теряется при захвате примесями.
- ▶ Для улучшения формы сигнала нужна дальнейшая очистка.

Вывод

- ▶ Очистка увеличивает время жизни электронов.
- ▶ Рост τ связан со снижением концентрации примесей.
- ▶ Для оптимального режима требуется более глубокая очистка.

Основные результаты

По детектору РЭД-100:

- ▶ построена зависимость сигнала электролюминесценции от приведённой напряжённости поля E/N , которая в целом согласуется с литературными данными;
- ▶ достигнуто увеличение времени жизни электронов более чем на порядок.

По детектору РЭД-1:

- ▶ измерены времена жизни электронов до и после очистки;
- ▶ установлено увеличение времени жизни на 38%;
- ▶ показана необходимость дальнейшей очистки.

Полученные результаты могут использоваться при оптимизации режимов работы двухфазных детекторов для низкофоновых экспериментов.

Спасибо за внимание!

Готов ответить на вопросы