

ВКР

Двухфазные
детекторы
на жидких
благородных газах

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 когерентного рассеяния нейтрино.
- ▶ Основаны на регистрации электролюминесцентного сигнала от электронов ионизации.

Цель работы

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

- ▶ очистка рабочей среды;
- ▶ измерение времени жизни электронов;
- ▶ исследование зависимости электролюминесценции от напряжённости поля.

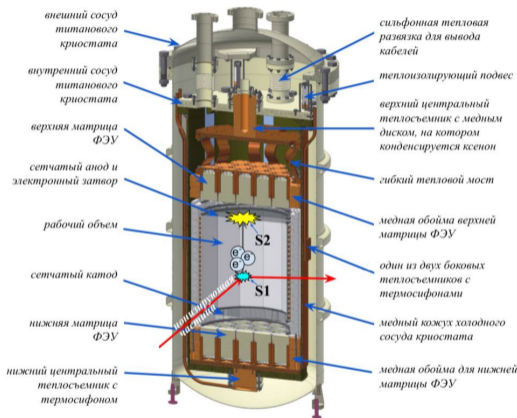
Конструкция детектора РЭД-100

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.

Принцип работы детектора РЭД-100

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 первичную сцинтилляцию S1.
- ▶ Возникают электроны ионизации.
- ▶ Электроны дрейфуют к поверхности жидкости.
- ▶ В газовой фазе возникает электролюминесцентный сигнал S2.

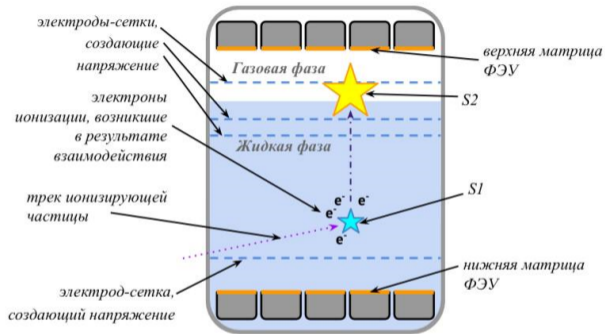


Схема формирования сигналов S1 и S2 в двухфазном детекторе.

РЭД-100. Регистрация электролюминесцентного сигнала

Приведённая напряжённость поля

Для анализа используется величина

$$\frac{E}{N}$$

где E — напряжённость поля,
 N — концентрация атомов газа.

$$N = \frac{p}{k_B T}$$

$$1 \text{ Td} = 10^{-21} \text{ В} \cdot \text{м}^2$$

Определение амплитуды

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



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

РЭД-100. Амплитуда сигнала при разных напряжениях

U_A , кВ	Амплитуда сигнала вверх, мВ	Амплитуда сигнала вверх-вниз, 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 при различных анодных напряжениях.

Результат

- ▶ При увеличении анодного напряжения амплитуда электролюминесцентного сигнала возрастает.
- ▶ Основной вклад в сигнал вносит верхняя матрица фотоумножителей.
- ▶ Полученные значения использовались для построения зависимости амплитуды сигнала от приведённой напряжённости поля E/N .
- ▶ Наблюдаемый рост сигнала соответствует режиму электролюминесценции в газовой фазе.

РЭД-100. Электролюминесценция

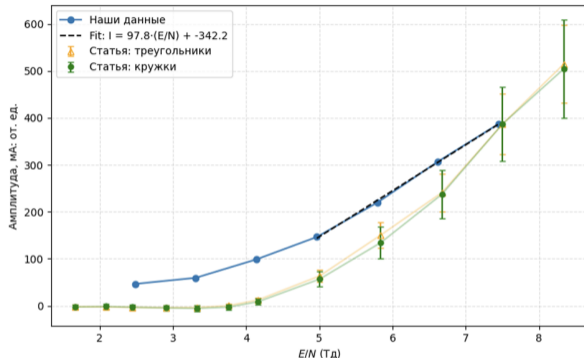
Условия измерений

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

Результат

Получена линейная зависимость амплитуды электролюминесцентного сигнала от E/N .

Рост сигнала соответствует режиму чистой электролюминесценции без развития электронных лавин.

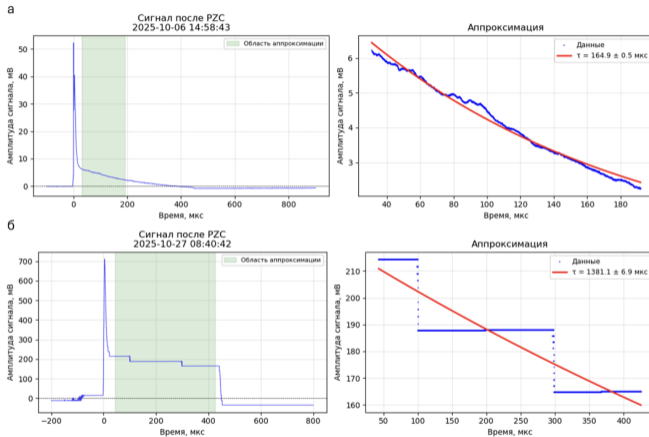


Экспериментальная зависимость сигнала электролюминесценции от E/N .

РЭД-100. Определение времени жизни электронов

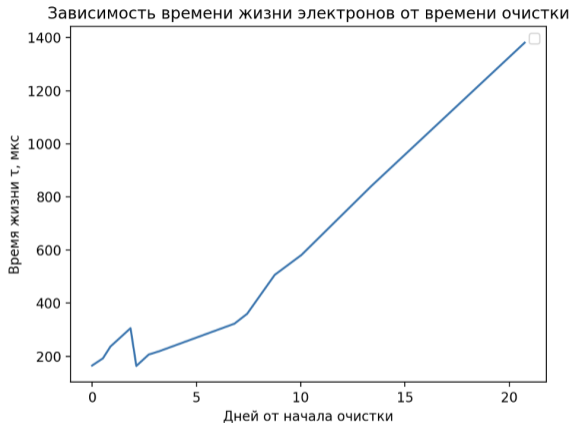
Методика

- ▶ Сигналы обрабатывались методом Pole-Zero Cancellation (PZC).
- ▶ 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

В процессе непрерывной очистки рабочей среды время жизни электронов увеличилось

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

Принцип работы детектора РЭД-1

Детектор РЭД-1

- ▶ Двухфазный ксеноновый детектор.
- ▶ Активная масса жидкого ксенона около (0,6) кг.
- ▶ Используется для регистрации слабых и редких событий.
- ▶ 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.

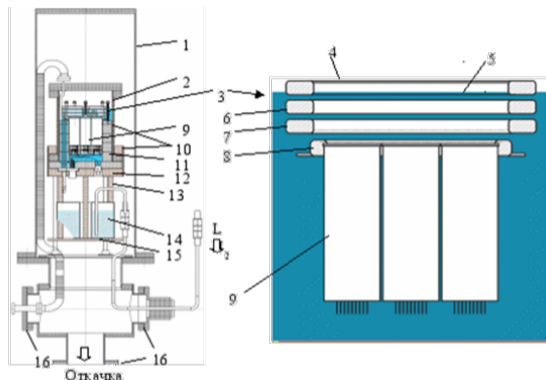


Схема работы двухфазного детектора РЭД-1.

Этапы измерений

- ▶ Измерения до начала очистки ксенона.
- ▶ Измерения после очистки через горячий геттер MonoTorr.
- ▶ Регистрация сигналов С2 и С3 на осциллографе АК ИП.
- ▶ Усреднение сигналов и вычитание фона.

Определение времени жизни

Сигнал аппроксимировался экспоненциальной функцией:

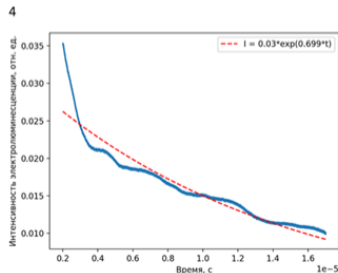
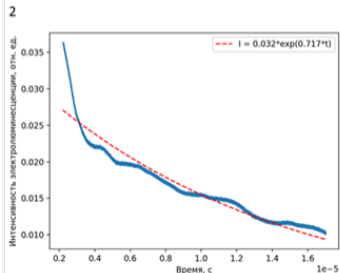
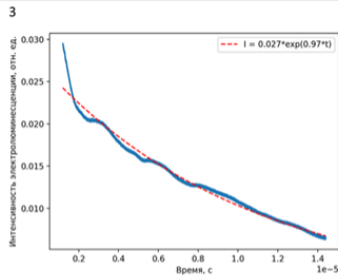
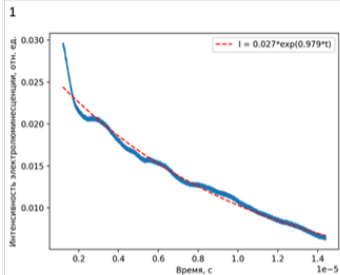
$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$$

где τ — время жизни свободных электронов до захвата примесями.

Физический смысл

Если τ мало, электроны активно захватываются примесями, и сигнал быстрее убывает.

РЭД-1. Экспериментальные зависимости



Экспериментальные зависимости электролюминесцентного сигнала от времени и экспоненциальные аппроксимации.

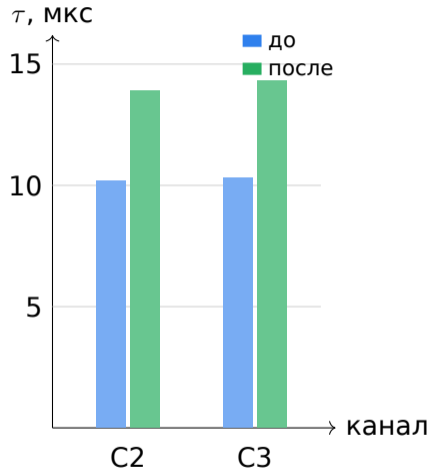
- 1 — С2 без очистки,
- 2 — С2 после очистки,
- 3 — С3 без очистки,
- 4 — С3 после очистки.

РЭД-1. Время жизни электронов

Канал	до, мкс	после, мкс
C2	10,2	13,9
C3	10,3	14,3

Результат

После очистки время жизни электронов увеличилось примерно на 40%.



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

РЭД-1. Интерпретация результата

Ограничение результата

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

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

- ▶ 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 ;
- ▶ реализована программная коррекция баллистического дефицита;
- ▶ 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 примерно на 40%;
- ▶ показана необходимость дальнейшей очистки.

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

Спасибо за внимание!

Готов ответить на вопросы