



Исследование одноэлектронных шумов от космических мюонов в детекторе RED-100

Выполнил студент группы M25-101: Узунян Александр.
Научный руководитель: д.ф - м.н Болоздыня Александр
Иванович.
Москва, 2026

Детектор RED-100

Детектор RED-100 - это двухфазный эмиссионный детектор, разработанный для нахождения событий упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. В установке используется жидкий аргон Ar. Проходящие через детектор частицы вызывают образование электронов, вытягивающихся в верхнюю фазу детектора, где эти электроны вызывают сцинтилляцию (световую вспышку), затем, фиксируемую фотоумножителями.

Общая схема детектора указана на слайде 2.

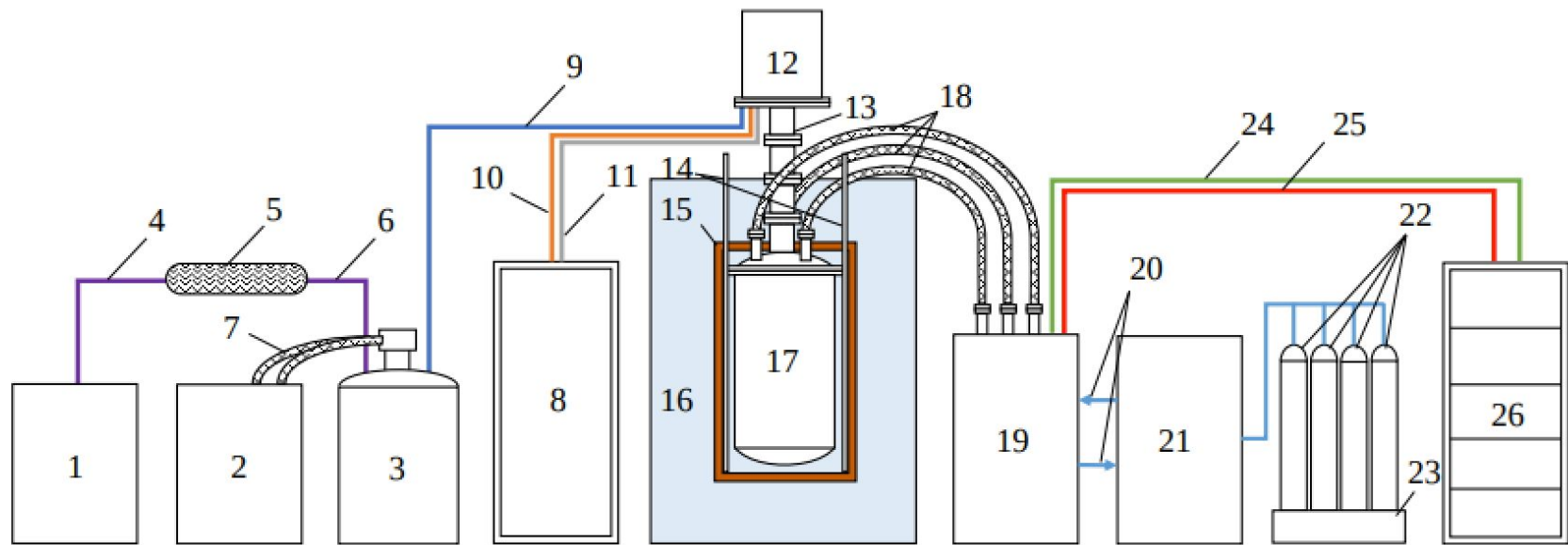


Рисунок 1. Блок-схема (вверху) и общий вид (внизу) установки RED-100: 1 — воздушный компрессор, 2 – гелиевый компрессор, 3 – сосуд Дьюара с жидким азотом и холодной головкой, 4 – линия сжатого воздуха, 5 – мембранный сепаратор азота и кислорода, 6 – линия чистого азота, 7 – линии гелия высокого давления, 8 – стойка управления термосифоном, 9 – линия охлаждения жидким азотом, 10 – кабель терморегулятора, 11 – трубопроводы подачи азота термосифона, 12 – криостат криогенной системы термосифона, 13 – сильфоны с трубами термосифона, 14 – калибровочные трубы, 15 – медный экран, 16 – резервуар для воды, 17 – детектор RED-100, 18 – сильфонные кабелепроводы, 19 – интерфейсный блок, 20 – входные и выходные линии ксенона, 21 – система очистки газа с панелью управления, 22 – система хранения ксенона, 23 – весы, 24 – сигнальная кабельная разводка, 25 – высоковольтная кабельная разводка, 26 – стойка с электронным оборудованием и системой сбора данных. На фотографии узлы 8 и 26 находятся на заднем плане и не видны.

Схема детектора РЭД-100 в разрезе

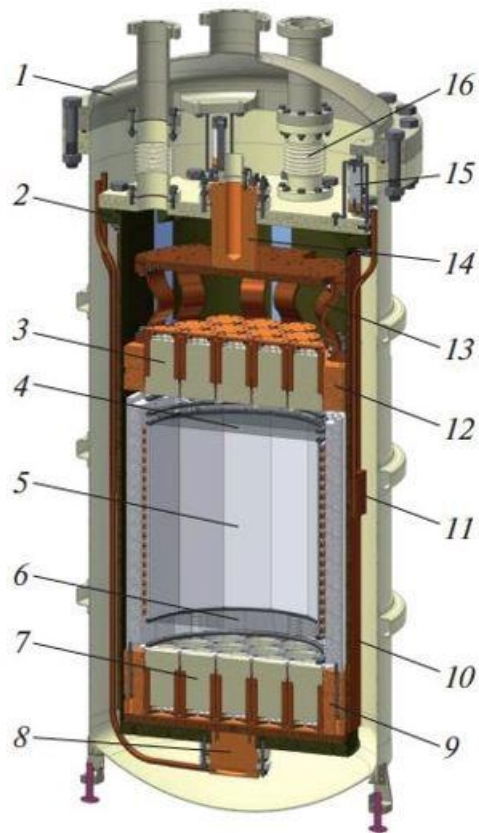


Рис. 2. Устройство детектора РЭД-100. 1 – внешний (теплый) сосуд криостата; 2 – внутренний (холодный) сосуд криостата; 3 – верхняя матрица из девятнадцати ф.э.у. типа НАМАМАТСУ R11410-20; 4 – сетчатый анод и вытягивающая сетка; 5 – рабочий объем, окруженный тefлоновым отражателем со встроенными полезадающими электродами; 6 – сетчатый катод; 7 – нижняя матрица из девятнадцати ф.э.у.; 8 – нижний центральный теплосъемник с термосифоном; 9 – медная обойма для нижней матрицы ф.э.у.; 10 – медный кожух холодного сосуда криостата; 11 – один из двух боковых теплосъемников с термосифонами; 12 – медная обойма верхней матрицы ф.э.у.; 13 – гибкий тепловой мост; 14 – верхний центральный теплосъемник с медным диском, на котором конденсируется ксенон; 15 – теплоизолирующий подвес на основе материала Vespel; 16 – сильфонная тепловая развязка на трубопроводе для вывода кабелей.

Актуальность проблемы возникновения одноэлектронных шумов.

Современные двухфазные эмиссионные детекторы способны регистрировать даже одиночные электроны. Благодаря такой чувствительности они используются в экспериментах по поиску темной материи, регистрации нейтрино и других редких процессов. Однако высокая чувствительность приводит к появлению специфического фона — одноэлектронных шумов. Эти сигналы не связаны с исследуемым физическим процессом, но могут маскировать полезные события.

Проблема одноэлектронных шумов на детекторе РЭД-100.

Для детектора РЭД-100 особое значение имеют космические мюоны. В отличие от подземных установок, РЭД-100 работает в условиях значительного потока космического излучения. Проходящий через детектор мюон создает большое количество ионизационных электронов. Часть этих электронов может задерживаться или захватываться в объеме детектора и затем высвобождаться в течение длительного времени. В результате возникает интенсивный поток одноэлектронных сигналов. Частота такого шума достигает примерно ~ 200 кГц.

Два вида SE-шумов на детекторе РЭД-100

В детекторе РЭД-100 наблюдаются два основных источника одноэлектронных сигналов:

1. Первый связан с электронами, задержанными возле поверхности раздела жидкой и газовой фаз.

2. Второй, и наиболее важный, связан с процессами в объеме детектора. После прохождения космического мюона образуется большое количество электронов, часть которых захватывается примесями и затем постепенно высвобождается. Это приводит к возникновению длительного потока одноэлектронных сигналов.

Временные характеристики SE-шумов на детекторе РЭД-100

Одноэлектронные сигналы SE в РЭД-100 сохраняются длительное время. После прохождения космического мюона фон может сохраняться в течение нескольких секунд и достигать до 6-7 секунд.

Сравнение характеристик SE-шумов для различных экспериментов - ключевые различия.

В подземных установках, таких как ZEPLIN-II и LUX доминируют процессы фотоионизации примесей и задержанной эмиссии электронов. В RED-100, работающем на поверхности, решающую роль играют космические мюоны и связанные с ними процессы захвата и освобождения электронов. Поэтому интенсивность одноэлектронного фона в RED-100 значительно выше и может достигать 200 кГц.

Параметр	ZEPLIN-II (31 кг)	LUX (250 кг)	RED-100 (100 кг)
Условия работы	Подземная лаборатория (Boulby, 1100 м) (низкий фон)	Подземная лаборатория (SURF, 1500 м) (очень низкий фон)	Наземная установка, значительный поток космических μ
Основные компоненты SE	Фотонионизация от S1 (фотонионизация ксенона/примесей)	Фотоионизация ксенона от S1/S2; задержанные (подповерхностные) электроны и захват-освобождение электронов на ионах	Захваченные электроны (на границе жидкость–газ и на примесях/отрицательных ионах); сильный всплеск SE после интенсивных событий (например, мюонных событий)
Характерное время	В основном < 100–300 мкс (между S1 и S2, вплоть до максимального времени дрейфа ~325 мкс)	От < 325 мкс (мгновенный фотоионизационный фон) до секунд (медленный «хвост» фоновых SE)	Временной масштаб до 7 секунд, связанный с медленным высвобождением захваченных примесями электронов)
Частота / интенсивность	пропорционально энергии S1 (чем больше первичная световая вспышка, тем больше SE)	Интенсивность растёт с размером S2 (линейно); наблюдаются «кластерные» выбросы (e-бурсты) после больших импульсов S2	Очень высокая интенсивность после мюонных событий (кластеры SE); ~200 кГц в открытом режиме (наземный фон)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Investigation of background electron emission in the LUX detector arXiv:2004.07791 D. S. Akerib, S. Alsum [physics.ins-det]
2. Two distinct components of the delayed single electron background signals in liquid xenon emission detectors P. Sorensen, K. Kamdin arXiv:1711.07025 [physics.ins-det]
3. Negative ions in liquid xenon A. G. Khrapak & K. F. Volykhin; Journal of Experimental and Theoretical Physics
4. Measurement of single electron emission in two-phase xenon B. Edwards, H. M. Araujo arXiv:0708.0768 [physics.ins-det]
5. ЭЛЕКТРОННЫЙ ШУМ, ГЕНЕРИРУЕМЫЙ КОСМИЧЕСКИМИ МЮОНАМИ В ДВУХФАЗНОМ КСЕНОНОВОМ ЭМИССИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ РЭД-100 Д. Ю. Акимов, И. С. Александров, В. А. Белов, А. И. Болоздыня

Спасибо за внимание!