

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»

УДК 539.12

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ СОБЫТИЙ В
ДЕТЕКТОРЕ DARKSIDE-50**

Студент _____ В. В. Верзакова

Научный руководитель,

к.ф.-м.н.

_____ А. В. Гробов

Москва 2021

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ СОБЫТИЙ В
ДЕТЕКТОРЕ DARKSIDE-50**

Студент _____ В. В. Верзакова

Научный руководитель,
к.ф.-м.н. _____ А. В. Гробов

Рецензент,
к.ф.-м.н. _____ О. А. Титов

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Поиск частиц темной материи	4
1.1 Эксперименты по прямому поиску	4
1.1.1 Детектор DarkSide-50	6
2 Основная часть	10
2.1 Одноэлектронные события	10
2.1.1 Запаздывающие сигналы	10
2.1.2 Анализ данных	11
2.1.3 Критерий отбора	13
2.2 Анализ данных с включенным геттером	16
3 Исследование спектра Аргона-37	20
3.1 Аргон-37 в эксперименте DarkSide-50	20
Заключение	23
Список использованных источников	25

ВВЕДЕНИЕ

Концепция темной материи была разработана более 80 лет назад для объяснения аномального движения галактик, гравитационно связанных в скоплениях.

С тех пор продолжают накапливаться наблюдательные доказательства, включая кривые вращения галактик и их скоплений и расхождения в распределениях массы скоплений галактик, оцененных по светимости в сравнении с гравитационным линзированием [1]. На то, что эта материя не только темная, но и холодная и небарионная, настойчиво указывают моделирование наблюдаемой крупномасштабной структуры Вселенной, флуктуации космического микроволнового фонового излучения, нуклеосинтез при Большом взрыве.

Одним из наиболее предпочтительных кандидатов в темную материю является слабо взаимодействующая массивная частица (WIMP) [2], которая объясняет текущее изобилие темной материи как тепловой реликт большого взрыва. Большинство моделей предсказывают массы WIMP темной материи вблизи электрослабого масштаба в сотни ГэВ/ c^2 . Однако массы частиц темной материи ≤ 10 ГэВ/ c^2 могут быть совместимы с экспериментальными ограничениями, если значительная асимметрия между темной материей и ее античастицами существовала в течение длительного времени. [3]

1. ПОИСК ЧАСТИЦ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Обнаружение существования тёмной материи имеет фундаментальное значение для космологии, астрофизики и физики элементарных частиц, и сейчас в этом направлении проводится множество экспериментов, в основе которых лежат кардинально различные подходы, которые можно разделить на три класса: прямой поиск, непрямой поиск и эксперименты на коллайдерах.

1.1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРЯМОМУ ПОИСКУ

Для эффективной регистрации ядер отдачи, на которых рассеялись вимпы, нужны детекторы с низким энергетическим порогом. Почти все эксперименты регистрируют рассеяния с такой низкой энергией в виде трех видов сигналов: тепловых, сцинтилляционных и ионизационных. Некоторые эксперименты регистрируют комбинацию каких-либо двух из этих сигналов, что обеспечивает высокую степень исключения фоновых событий.

Регистрация тепловых сигналов основана на передаче ядром отдачи почти всей своей энергии кристаллической решетке кристалла, которая диссипирует через фононы, что приводит к измеримому нагреву материала. Для криогенных детекторов, регистрирующих тепловые сигналы, достигнута крайне высокая чувствительность и разрешение, энергетический порог в них достигает величины ниже 1 кэВ. Также такие детекторы могут регистрировать заряд частицы, что отражается в высокой степени подавления фона.

Сцинтилляционный сигнал образуется путем передачи энергии ядра отдачи молекулам рабочего вещества, в результате чего последние возбуждаются и испускают фотоны с характерной длиной волны. В качестве сцинтилляционных детекторов в наше время используют сцинтилляторы на основе кристаллов (например, NaI), а также чистых благородных газов (например, гелий, ксенон или аргон). В таких детекторах в свет преобра-

зается около 10% энергии ядра отдачи. Для увеличения числа взаимодействий вимпов с ядрами используются большие массы детектора, так как текущие возможности позволяют регистрировать менее 0.001 взаимодействий/кг/день.

Ионизационные сигналы возникают при передаче атомам рабочего вещества достаточной для их ионизации энергии; образовавшиеся электроны затем выводятся сильным электрическим полем. Для регистрации ионизационных сигналов используются полупроводниковые германиевые детекторы, имеющие весьма низкий энергетический порог и высокое разрешение, а также двухфазные детекторы на основе благородных газов, в которых электроны из жидкой фазы выводятся в газовую, где происходит электролюминесценция. Число ионизационных электронов, оставшихся после рекомбинации, зависит от типа провзаимодействовавшей частицы, что способствует подавлению фона.

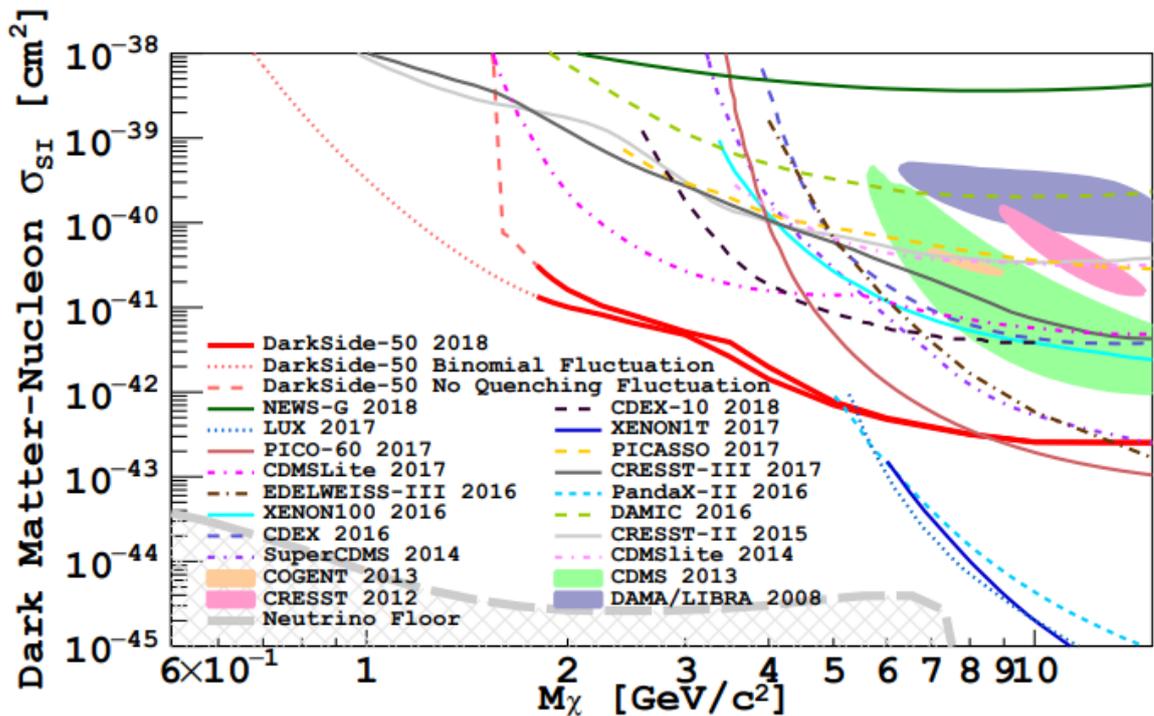


Рисунок 1.1 — Пределы на сечение взаимодействия вимп-ядро, полученные экспериментально к настоящему времени.

На рис. 1.1 отображены текущие пределы на сечение взаимодействия вимп-ядро, полученные различными экспериментами. Пределы в области массы вимпа более 10 ГэВ/\$c^2\$ установлены по большей части эксперимента-

ми, в качестве рабочего вещества у которых служат жидкие благородные газы, в частности, XENON и LUX, использующими двухфазные ксеноновые детекторы, и DarkSide имеет схожую конфигурацию, но с применением аргона.

1.1.1. ДЕТЕКТОР DARKSIDE-50

Детектор Darkside-50 представляет собой двухфазную аргоновую времяпроекционную камеру, схематически представленную на рисунке 1.2а. В качестве рабочего вещества используется 50 кг ^{40}Ar высокой степени очистки [4]. Жидкая фаза аргона кипит, образуя слой газообразной фазы толщиной 3 см. В жидкой фазе поддерживается однородное поле напряженностью 200 В/см, на границе раздела фаз для экстракции электронов поле имеет напряженность 2,8 кВ/см, в газовой фазе поддерживается ускоряющее поле 4,2 кВ/см. На верхней и нижней поверхности расположены массивами 19 фотоэлектронных умножителей

Боковая поверхность активного объема LAr представляет собой тефлоновый отражатель [5]. Внутренние поверхности тефлонового рефлектора покрыты тетрафенилбутадиеном, который смещает 128 нм аргонового сцинтилляционного света до 420 нм, позволяя быть обнаруженным ФЭУ [6].

Времяпроекционную камеру окружает вето, заполненное 30 тоннами жидкого сцинтиллятора с примесью бора, предназначенное для регистрации фоновых нейтронов. Вето окружает черенковский детектор, наполненный 1000 тоннами воды высочайшей степени очистки. [7] Черенковский детектор служит как пассивной защитой от внешних нейтронов и γ -излучения, так и активным детектором мюонов, проходящих сквозь времяпроекционную камеру или достаточно близко к ней, чтобы в результате взаимодействия с веществом создать частицы, которые могут быть источниками фона.

При взаимодействии частицы с рабочим веществом в жидкой фазе, её энергия передается атомам и молекулам аргона путем возбуждения и ионизации. Механизм их образования зависит от вида взаимодействия: нейтральные частицы испытывают упругое рассеяние на ядре аргона, в

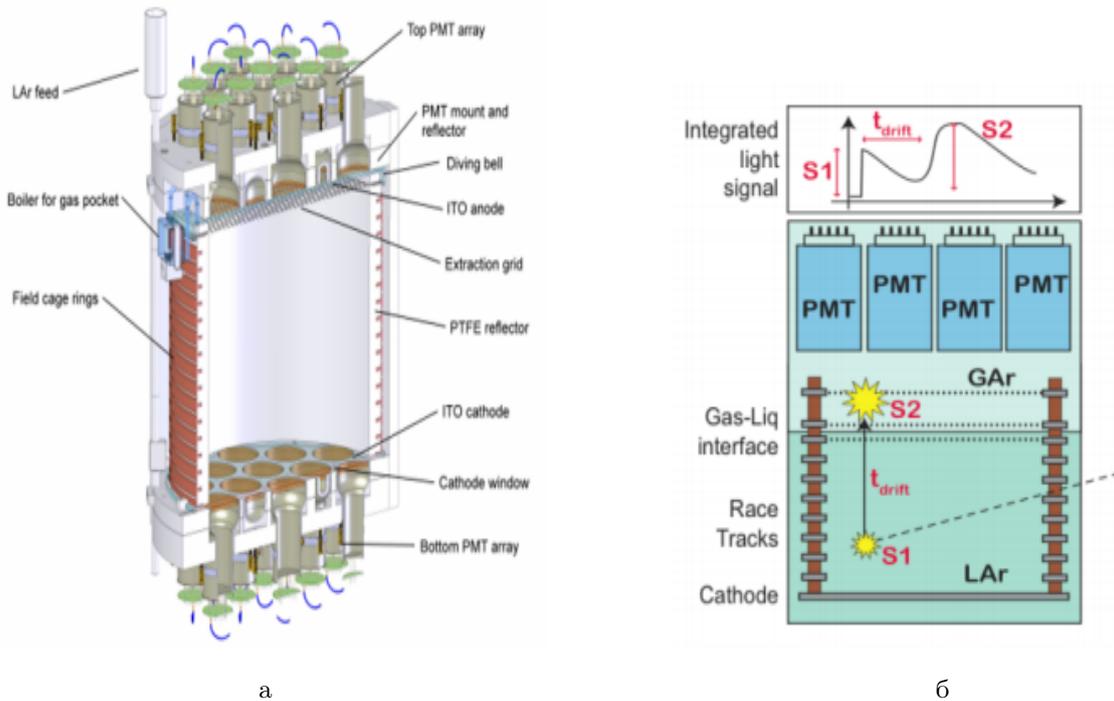


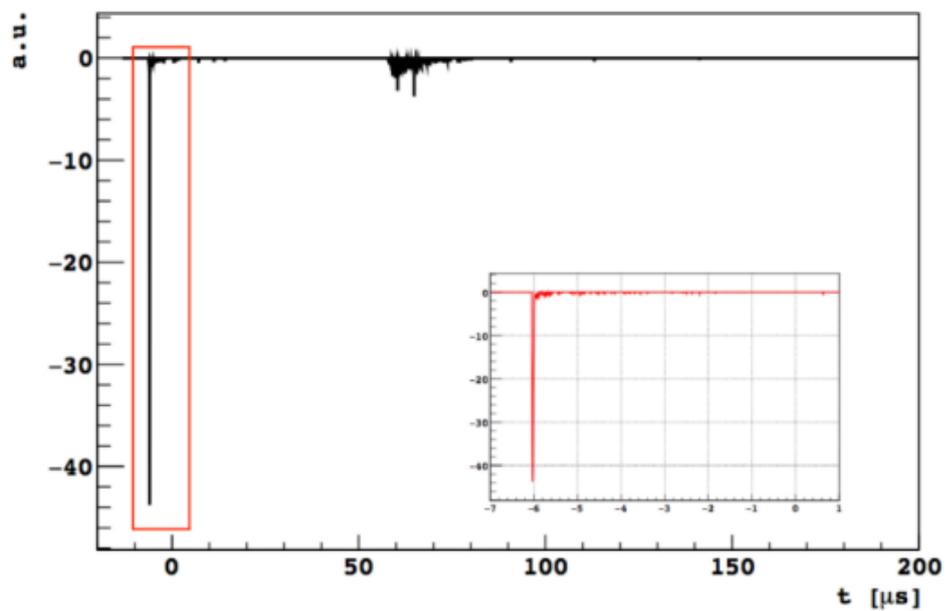
Рисунок 1.2 — **а** - Принцип работы времяпроекционной камеры детектора Darkside-50. В верхней части рисунка схематично изображена форма сигнала. **б** - Устройство времяпроекционной камеры детектора.

результате отдачи которого и остается трек возбужденных и ионизированных атомов; заряженные частицы испытывают многократное рассеяние на атомах аргона, в результате которого также остается трек возбужденных и ионизированных атомов. Возбужденные атомы аргона образуют возбужденные димеры, которые снимают возбуждение путем испускания УФ фотонов. Некоторые ионы рекомбинируют, образуют возбужденные димеры, и в итоге также происходит излучение УФ фотонов. Эти фотоны регистрируются фотоумножителями и таким образом регистрируется сцинтилляционный сигнал (S1). Электроны, отделившиеся от ионизированных атомов, поднимаются электрическим полем к границе раздела фаз и извлекаются в газовую фазу экстракционным полем, после чего в газовой фазе ускоряются более сильным электрическим полем, возбуждая (но не ионизируя) атомы аргона, которые также снимают возбуждение, испуская УФ фотоны. Так образуется ионизационный сигнал (S2) (рис. 1.26).

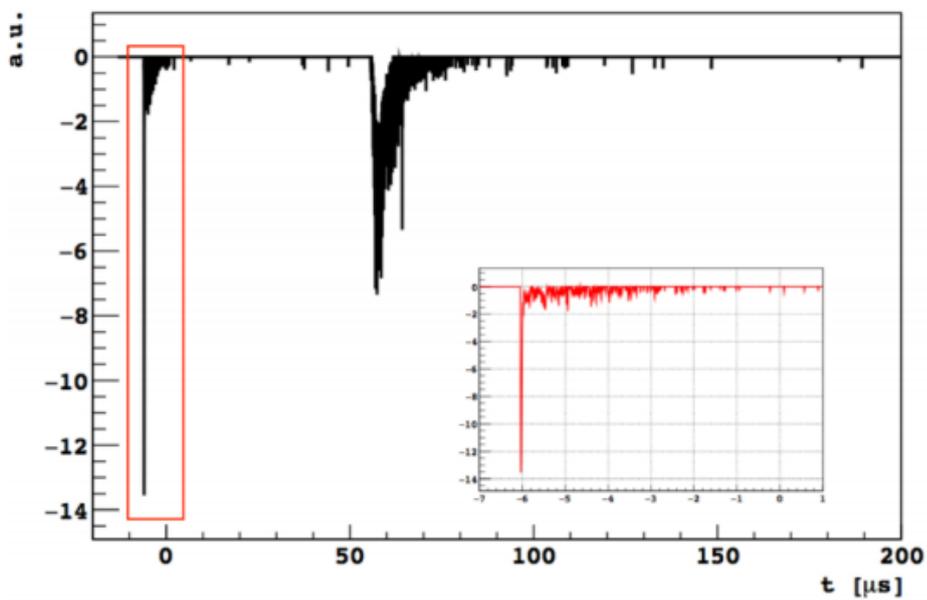
Данная конфигурация характеризуется крайне высокой степенью режекции фоновых событий, обеспечиваемой зависимостью отношения сцинтилляции и ионизации от градиента электрического поля для регистриру-

емой частицы. Эта зависимость возникает из-за наличия двух возбужденных состояний димера аргона: синглетного и триплетного. Синглетное состояние имеет время жизни на три порядка меньше, чем триплетное. Тип частицы, вызывавшей рассеяние, значительным образом влияет на отношение числа синглетных к числу триплетных состояний: для рассеяний на ядре оно ~ 3 , в то время как для рассеяний на электроне оно ~ 0.3 . Благодаря этому можно различить β/γ -частицы от частиц, взаимодействующих с ядром, в первую очередь, нейтронов и вимпов, сравнивая форму сигнала для различных частиц. Использование одного только этого метода отбора позволяет добиваться степени режекции фоновых событий (она характеризуется как число событий, распознанных как рассеяние на электроне, на одно событие, неверно распознанное как рассеяние на ядре) порядка 10^7 . Отношение $S2/S1$ также зависит от типа рассеяния и может быть использовано как дополнительный инструмент для разделения рассеяний на ядрах и на электронах, что еще больше увеличивает степень режекции фоновых событий. Взаимодействие с ядром характеризуется значительно более резким затуханием сигнала $S1$ и малой величиной сигнала $S2$ в сравнении с сигналами, соответствующими взаимодействию заряженной частицы с атомом аргона.

Таким образом, перечисленные методики отбора позволяют отделить существенно превалирующие взаимодействия β/γ -частицами, что особенно важно в аргоне, так как в нем присутствует электронный фон, обеспечиваемый примесью β^- -активного изотопа ^{39}Ar .



а



б

Рисунок 1.3 — Примеры сигналов, соответствующих двум различным типам рассеяния с приблизительно одинаковой величиной сигнала S1: а - на ядре, б - на электроне

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ СОБЫТИЯ

Энергетическое разрешение детектора ограничивает снизу энергию взаимодействия, которое может быть зарегистрировано. Таким образом, поиск вимпов в области низких масс (порядка ГэВ/ c^2), с использованием метода, описанного выше, ограничен технологическими возможностями.

Для поиска вимпов в области низких масс используется другой метод анализа, заключающийся в рассмотрении только событий S2, которые имеют значительно больший энергетический выход, чем события S1, и, соответственно, могут быть зарегистрированы в случае таких взаимодействий, величина сигнала S1 от которых недостаточно велика для регистрации.

При анализе низкоэнергетической области рассматривается интервал энергий, соответствующий извлечению в газовую фазу от одного до четырех ионизационных электронов ($N_{e^-} = 1..4e^-$) Триггер события срабатывает, когда в течение 100 нс сигнал на двух или более фотоэлектронных умножителях превышает 0.6 фотоэлектронов (PE). Эффективность этого триггера достигает 100% для сигналов S2, равных 30 PE и более, что значительно ниже границы $N_{e^-} = 4e^-$ (или энергии отдачи ядра $E_R = 0.1$ кэВ). [8]

2.1.1. ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ СИГНАЛЫ

Самым слабым сигналам S2 соответствуют события, в которых после взаимодействия из жидкой фазы извлекается только один электрон. Такие сигналы могут соответствовать не только взаимодействиям частиц с низкой энергией с рабочим веществом, но и электронам, которые по каким-либо причинам попадали в газовую фазу с задержкой относительно прочих электронов, образовавшихся в этом событии. Одной из причин возникновения данных событий может являться наличие в рабочем веществе

примесей. Проверялась гипотеза, предполагающая наличие примесей в рабочем веществе детектора. После взаимодействия частицы с ядром аргона дрейфующие в электрическом поле электроны могут на некоторое время присоединиться к молекулам примесей. Отделившийся от примеси электрон доставляется полем в газовую фазу, где происходит люминесценция и срабатывает триггер событий. Таким образом, запаздывающий электрон регистрируется как отдельное событие. Схематично процесс образования таких сигналов изображен на рис. 2.1 [9].

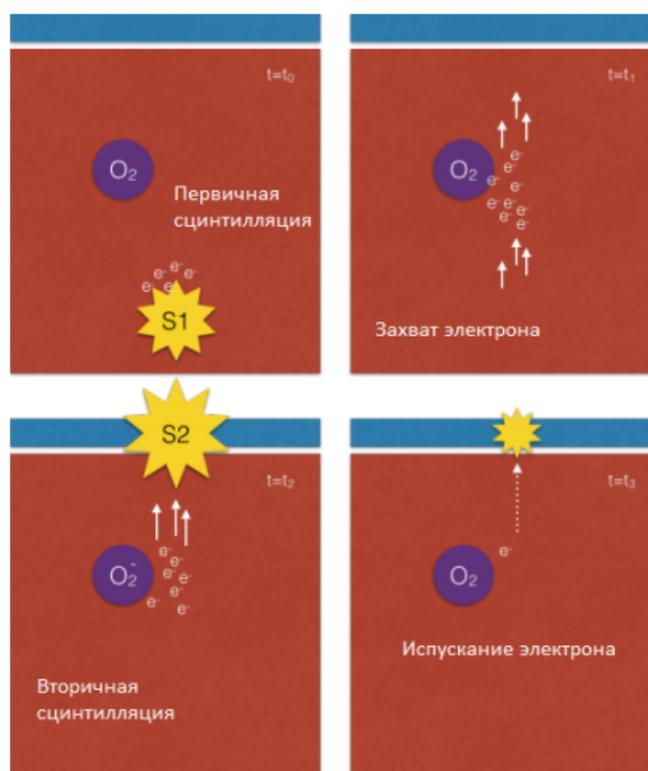


Рисунок 2.1 — Схематичное изображение механизма возникновения запаздывающего сигнала

2.1.2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализ данных с эксперимента проводился с помощью программных пакетов объектно-ориентированной программы CERN ROOT. Данные, полученные в ходе эксперимента собираются в SLAD-файл. В первой части работы рассматривался период работы детектора при выключенном фильтрующем устройстве (геттере). В период отключения геттера аргон циркулирует без фильтрации, поэтому со временем растет концентрация приме-

сей. Соответственно, наблюдается рост количества одноэлектронных событий со временем. Принцип записи данных о событии таков, что если событие S1 имело недостаточно высокую энергию для регистрации, то сигнал S2 записывается как сигнал S1, а переменной, соответствующей энергии сигналу S2 присваивается нулевое значение. Так как в случае одноэлектронных событий сигнал S1 в силу малой энергии не регистрируется, для учета таких событий был применен отбор по форме сигнала. Он применим, потому что в случаях сцинтилляции в жидкой фазе и электролюминесценции в газовой фазе времена жизни соответствующих возбужденных состояний различаются. Для отбора по форме сигнала используется параметр f_{90} ,

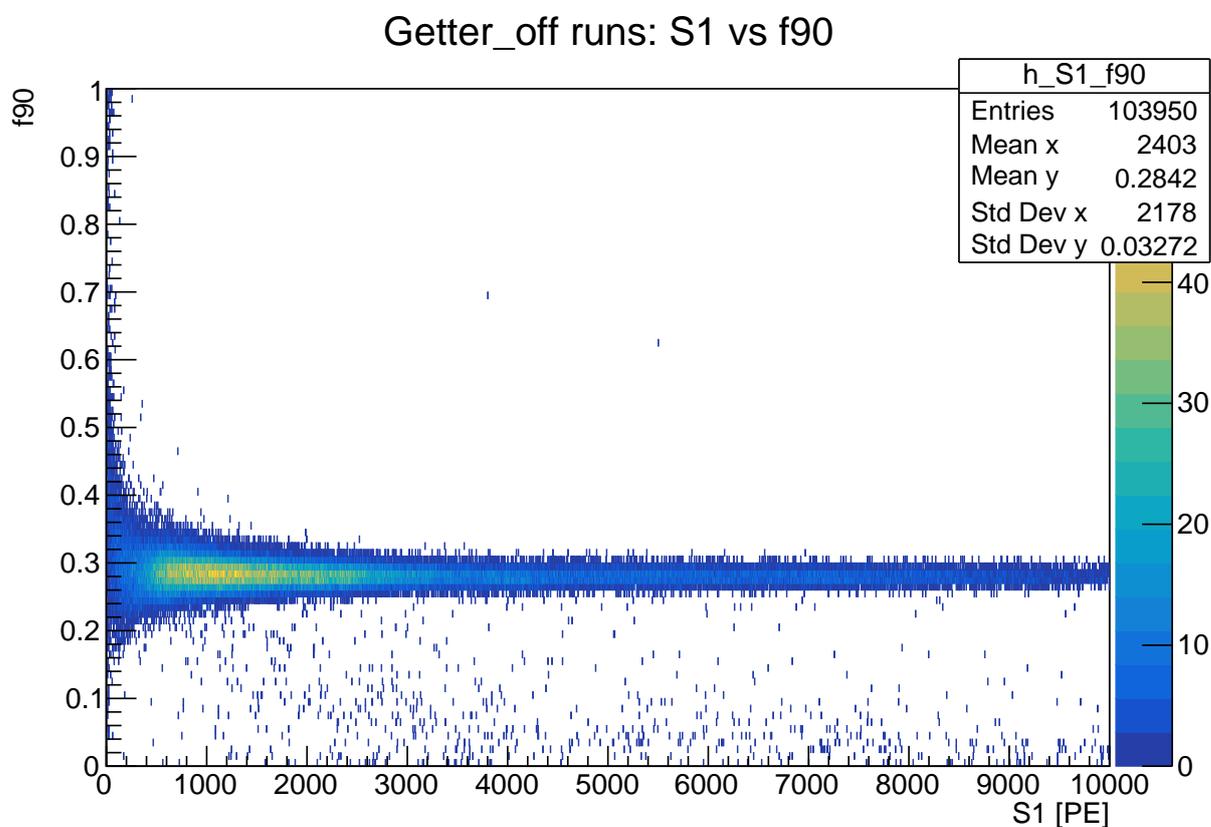


Рисунок 2.2 — f_{90} сигнала S1: одноэлектронным событиям соответствует область с $f_{90} < 0.15$.

который равен отношению интеграла сигнала за первые 90 нс к интегралу сигнала за полное время события.(2.1)

$$f_{90} = \frac{\int_0^{90ns} S1 dt}{\int_0^{7mcs} S1 dt} \quad (2.1)$$

2.1.3. КРИТЕРИЙ ОТБОРА

Для выделения одноэлектронных событий необходимо найти характерную величину сигнала S2, приходящуюся на извлечение одного ионизационного электрона в газовую фазу. На рисунке 2.3 представлен энергетический спектр сигналов S2, который аппроксимируется совокупностью нормальных распределений; каждому гауссиану соответствует один ионизационный электрон. Таким образом, было получено, что на один ионизационный электрон приходится примерно 23 PE.

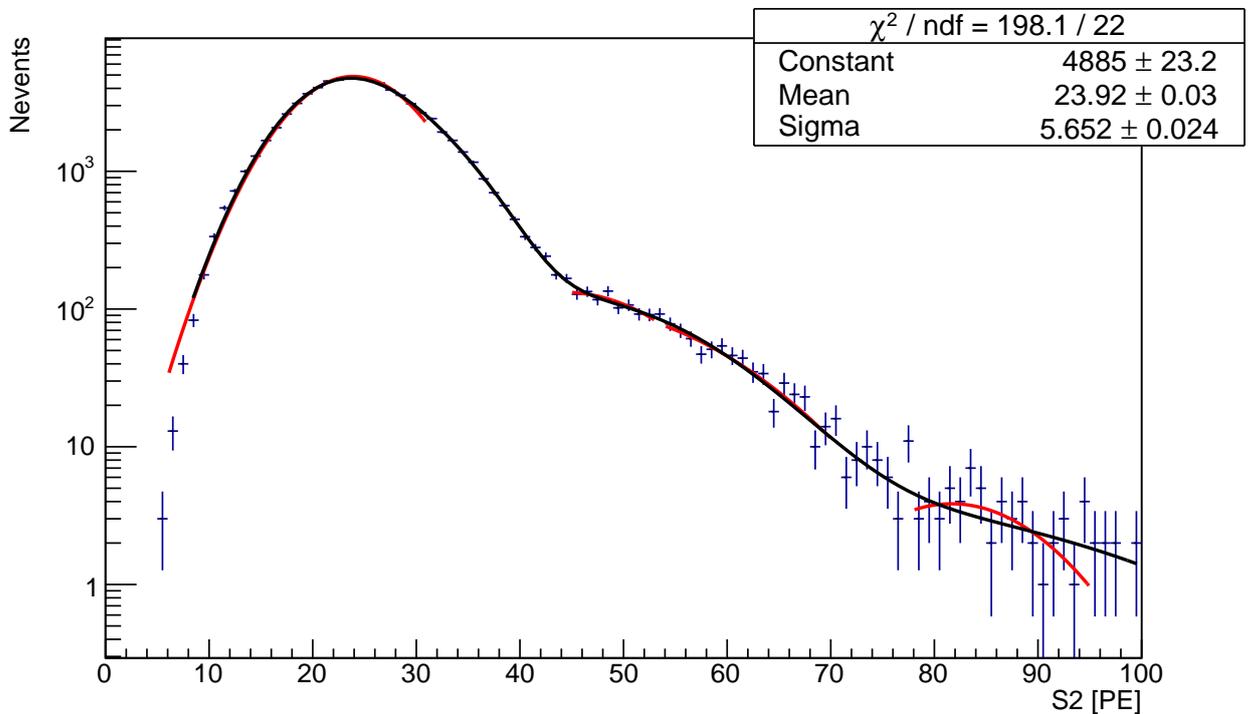


Рисунок 2.3 — Энергетический спектр сигналов S2. Красная линия: аппроксимация каждого отдельного пика, черная: суммарная аппроксимация.

Ожидается, что запаздывающие события будут возникать преимущественно после взаимодействий с частицами, имеющими достаточно большую энергию для возникновения существенного количества ионизационных электронов, так как с ростом числа электронов увеличивается вероятность их объединения с примесными частицами, что служит одной из причин регистрации запаздывающих сигналов.

В качестве критерия отбора использовалось величина энергетического выхода сигналов S1 исходного события. Был определен параметр p (2.2),

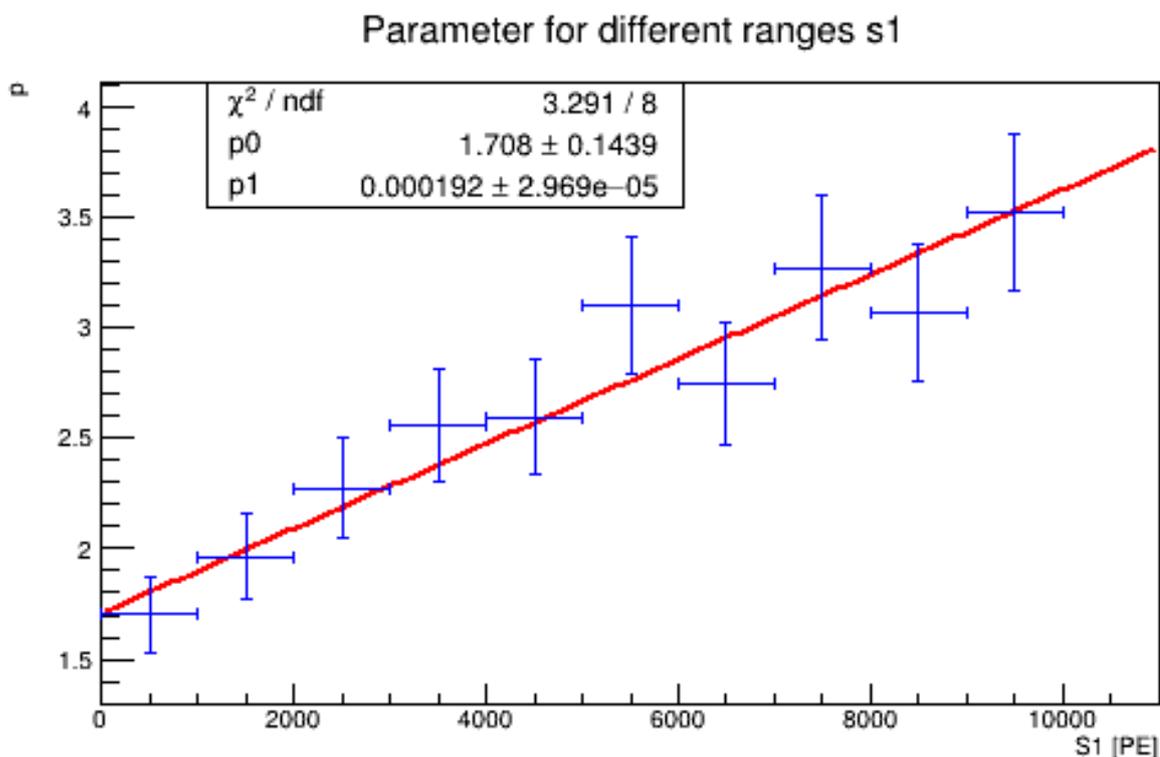


Рисунок 2.4 — График зависимости величины параметра p от величины соответствующих энергетических выходов сигналов $S1$

соответствующий отношению количества одноэлектронных событий, приходящихся на общее число предшествующих этому событию сигналов $S1$. Было рассчитано 10 значений, относящихся к 10 различным диапазонам величины $S1$, с шагом в 1000PE. Посторен соответствующий график, представленный на рисунке 2.4.

$$p = \frac{N_{S1}}{N_{S2only}} \quad (2.2)$$

По графику наблюдается рост значения параметра для больших диапазонов, следовательно, для большим энергиям $S1$ соответствует большее число одноэлектронных событий.

А также было рассчитано время, прошедшее с момента предшествующего сигнала $S1$ и построены графики зависимости числа запаздывающих одноэлектронных событий от полученного времени для 10 диапазонов величины $S1$. Графики для различных диапазонов величины $S1$ качественно не отличаются друг от друга; все они аппроксимируются суммой двух затухающих экспонет, поэтому на рисунке 2.5 представлены зависимости для 3 первых и 3 последних диапазонов.

Из параметров аппроксимации можно оценить характерное время задержки электронов на атомах примесей, содержащихся в рабочем веществе. Время задержки - величина вероятностная, поэтому предполагается, что некоторые электроны могут оделяться от атомов примесей довольно быстро, в то время как другие могут подниматься на газовую поверхность спустя некоторое более продолжительное время. Для первой экспоненты: $\tau_1 \in (7; 14)s$, для второй: $\tau_2 \in (50; 500)ms$

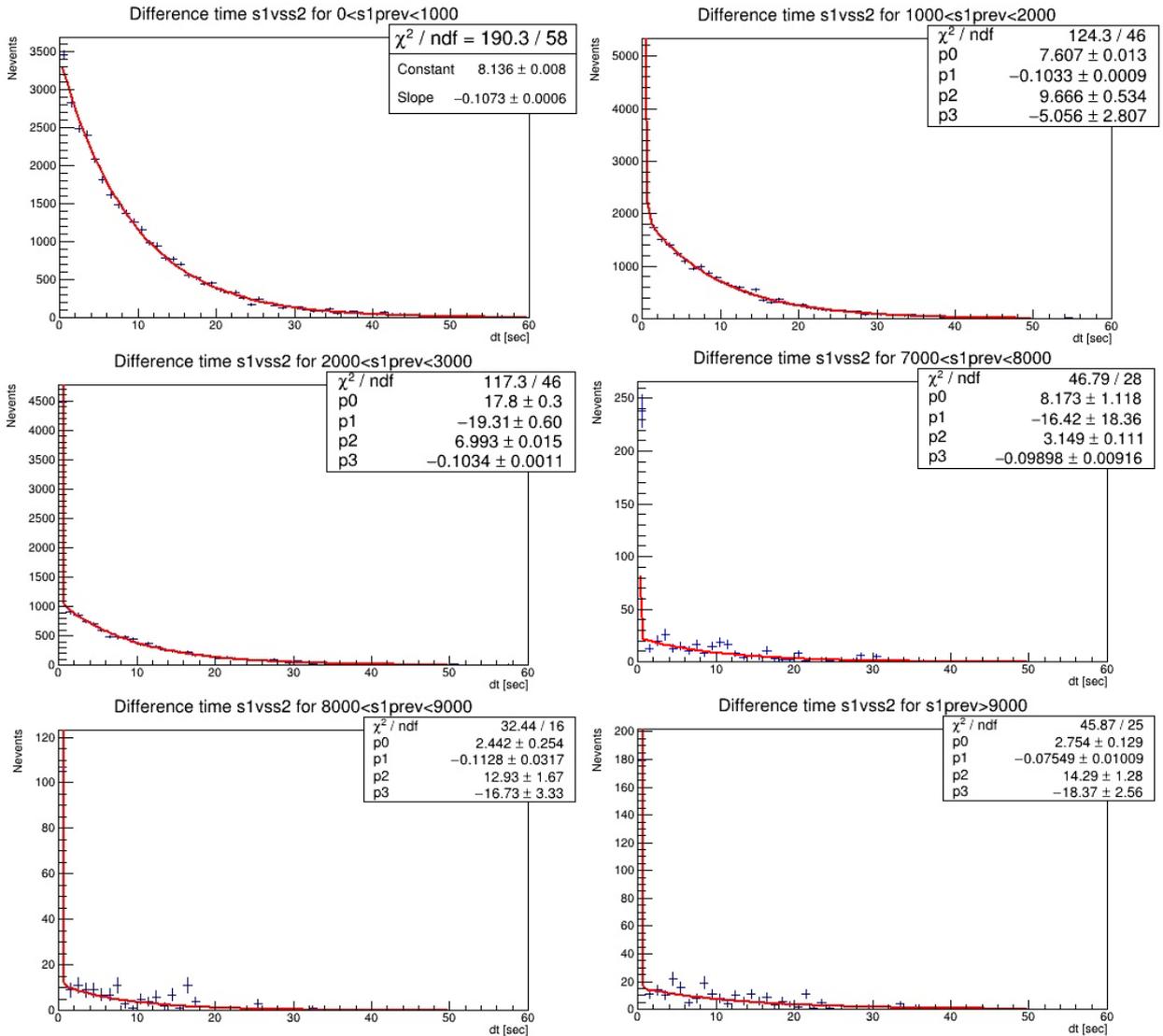


Рисунок 2.5 — Графики зависимости числа запаздывающих событий от времени, прошедшего после исходного события для различных диапазонов предшествующих сигналов S1. Красной кривой соответствует аппроксимация данных суммой двух затухающих экспонент

2.2. АНАЛИЗ ДАННЫХ С ВКЛЮЧЕННЫМ ГЕТТЕРОМ

В 2017 году в лаборатории в течение непродолжительного времени происходило резкое включение и выключение света (блэкаут), после чего при анализе данных наблюдаются запаздывающие сигналы, имеющие схожий характер с событиями выделенными при рассмотрении периода работы с выключенным фильтрующим устройством. Предполагалось, что во время аварии в детекторе аргон мог проходить также без очищения, а значит одноэлектронные события могут быть объяснены примесями в детекторе.

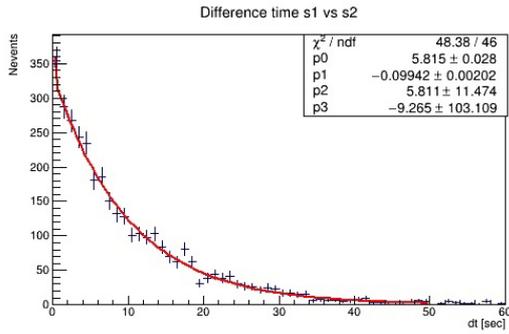
Поэтому проводился сравнительный анализ для SLAD-файлов, собранных в период нормальной работы детектора (до блэкаута) и данных полученных после аварии (после блэкаута), с анализом ранов в период отключения геттера.

Были построены графики зависимости числа одноэлектронных событий от времени, прошедшего между одноэлектронным событием и предшествующем ему сигналом S1 для обоих файлов. Графики фитируются экспонентой, по параметру фита оценено характерное время задержки электрона на предполагаемом атоме примеси.

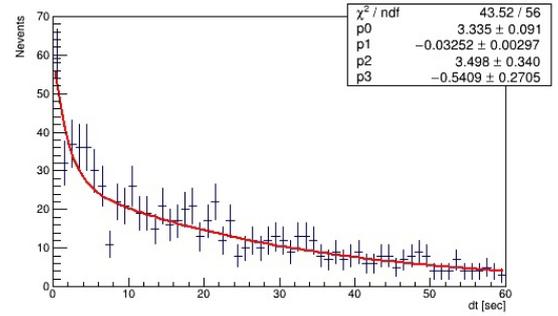
Также для обоих файлов были получены подобные гистограммы для различных промежутков величины предшествующего сигнала S1. Для ранов, собранных до аварии (рисунок 2.5а) характерное время задержки составило: $\tau_2 \approx 110ms$ для одной экспоненты и $\tau_1 \in (3; 12)s$ - для второй. Результат оказался схожим с тем, что был получен при отключенном геттере.

Однако параметры фита (рисунок 2.5б) для ранов, собранных после аварии отличны от тех, что собраны при выключенном фильтрующем устройстве: для одной экспоненты - $\tau_1 \in (20; 200)s$, для второй - $\tau_2 \approx 400ms$.

А также были построены графики зависимости величины параметра p , определенного отношением числа одноэлектронных событий к числу предшествующих сигналов S1 от величины соответствующих энергетических выходов сигналов S1.



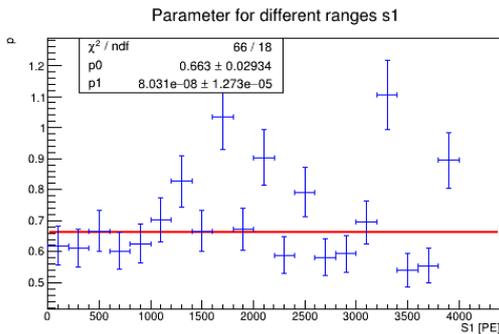
а



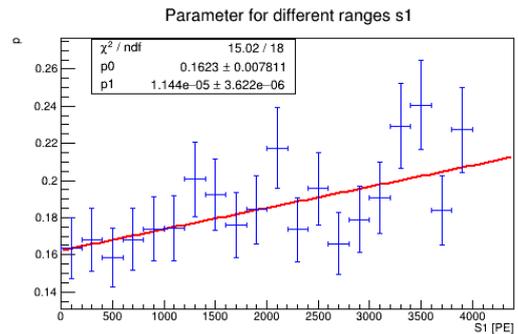
б

Рисунок 2.6 — Графики зависимости числа запаздывающих событий от времени, прошедшего после исходного события для различных диапазонов предшествующих сигналов S1. Красной кривой соответствует аппроксимация данных суммой двух затухающих экспонент: **а** соответствует до блэкаута, **б** - после блэкаута

В случае выключенного геттера зависимость носила линейный характер, так как большим сигналам S1 соответствует большее число одноэлектронных событий. Ожидалось, что с ростом энергии предшествующего



а

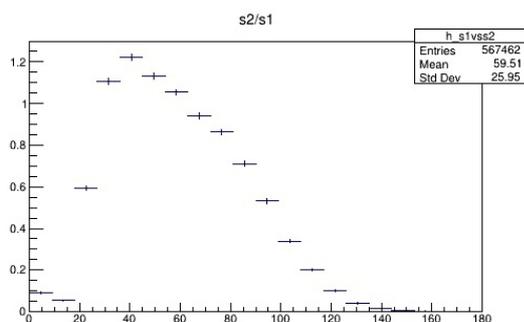


б

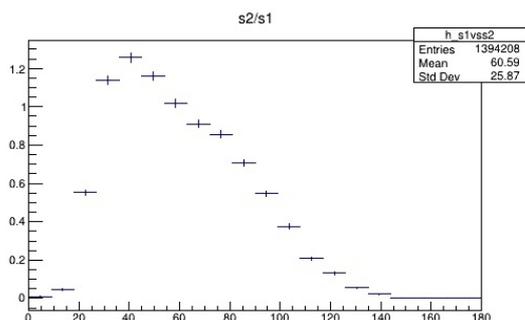
Рисунок 2.7 — Графики зависимости величины параметра частоты обнаружения одноэлектронных событий от величины соответствующих энергетических выходов сигналов S1: **б** соответствует до блэкаута, **а** - после блэкаута

сигнала S1, будет наблюдаться увеличение значения данного параметра. Однако, можно заметить на графике, что для данных, собранных после аварии эта зависимость не носит линейный характер (рисунок 2.6а).

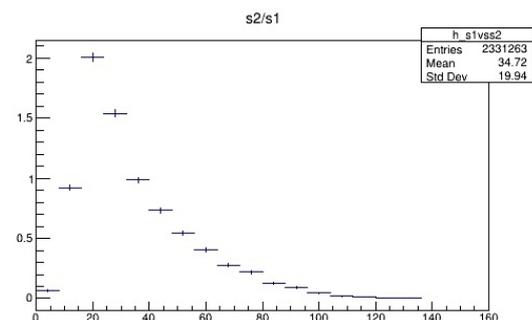
По результатам отбора по выбранным критериям примеси в рабочем веществе не являются источником основного фона в детекторе после происшествия, соответственно требуется найти иную причину, обуславливающую наличие одноэлектронных событий.



а



б



в

Рисунок 2.8 — Графики зависимости отношения величины сигнала S2 к величине сигнала S1, номированные по количеству событий: **а** - геттер офф, **б** - до блэкаута, **в** - после блэкаута

Были построены графики зависимости отношения величины сигнала S2 к величине сигнала S1. В связи с тем, что различным SLAD-файлам соответствует различное число событий, графики были нормированы по количеству событий.

Можно заметить по графикам, что распределения для выключенного геттера и данных, собранных во время нормальной работы детектора носят схожий характер, в то время как распределение для данных, полученных после аварии отличается.

Исходя из рисунка 2.7 можно сделать вывод о том, что сигналы S2 детектируются искаженно после аварии.

Возможной причиной может являться, предположительно, наличие на поверхности рабочего вещества частиц тетрафинилбутадиена (ТРВ), который используется для смещения длины волны в область видимого спектра.

ТРВ во время происшествия за счет сильного кипения аргона внутри детектора мог частично отвалиться со стенок и остаться на поверхности,

тем самым задерживая на себе часть электронов, образованных после события S1.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА АРГОНА-37

Аргон - третий по распространенности газ в атмосфере Земли, составляющий примерно 0,93% атмосферы по объему. Аргон, извлеченный из атмосферы, состоит в основном из стабильных изотопов ^{40}Ar , ^{36}Ar и ^{38}Ar . Однако, благодаря взаимодействию космических лучей, атмосферный аргон также содержит три долгоживущих радиоактивных изотопа: ^{39}Ar , ^{37}Ar и ^{42}Ar . В данной главе будет рассмотрен радиоизотоп, который значим для экспериментов с темной материей на основе аргона: ^{37}Ar .

В производстве ^{37}Ar в атмосфере преобладает взаимодействие нейтронов на аргоне. 93% общего производства в тропосфере приходится на быстрые нейтроны через $^{40}\text{Ar}(n, 4n)^{37}\text{Ar}$, а оставшаяся часть - на захват тепловых и эпитепловых нейтронов через $^{36}\text{Ar}(n, \gamma)^{37}\text{Ar}$. ^{37}Ar распадается исключительно путем захвата электронов, производя рентгеновское излучение низкой энергии и оже-электроны, с относительно коротким периодом полураспада 35,01 дня. [10]

3.1. АРГОН-37 В ЭКСПЕРИМЕНТЕ DARKSIDE-50

Коллаборация DarkSide-50 использует аргон, добываемый глубоко под землей (UAr). Использование UAr вместо атмосферного аргона (AAr) позволило снизить энергетический порог и расширить допустимые значения ядерной отдачи при сохранении бесфоновых поиска темной материи. Кроме того, использование UAr с низкой радиоактивностью имеет решающее значение для поиска темной материи малой массы, которая простирается до более низких энергетических порогов, чем стандартный поиск вимпов.

Как и при промышленном производстве аргона из атмосферы, UAr необходимо добывать из природных газов под землей. В случае эксперимента DarkSide-50 таким газом является CO_2 , добываемый из газовой скважины.

ны в Кортесе, штат Колорадо, США. Обработка, транспортировка и хранение UAr на поверхности Земли подвергает UAr воздействию космических лучей, таким образом в результате взаимодействия образуется ^{37}Ar . [5]

Для исследования событий с низкой энергией был использован код, разработанный для выделения одноэлектронных запаздывающих сигналов.

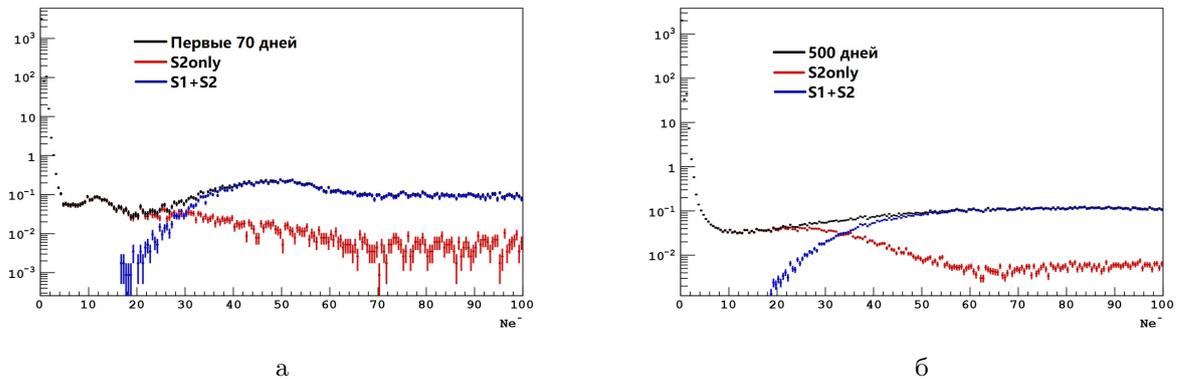


Рисунок 3.1 — Нормированные по количеству событий графики зависимости от числа ионизационных электронов. Черные точки - спектры для аргона-37: **а** - за первые 70 дней после транспортировки, **б** - за последние 500 дней. Красные точки: спектр от событий только с импульсом S2. Синие: спектр от событий с одним импульсом S1 и одним импульсом S2.

Были получены нормированные N_{e^-} спектры для первых 100 дней (рисунок 3.1а) после заполнения UAr и последних 500 дней работы (рисунок 3.1б), которые начинаются примерно через 80 дней после окончания 100 дней. На 100-дневном образце видны две особенности при N_{e^-} около 10 и 50, которые более четко видны на вставке, где вычитается соответствующим образом нормализованный 500-дневный спектр (рисунок 3.2).

Эти особенности соответствуют энергиям после захвата электронов в ^{37}Ar в L-оболочке - 0,27 кэВ и K-оболочке - 2,82 кэВ. [11] Они четко видны в спектре первых 100 дней и отсутствуют в остальной части набора данных, как и ожидалось, учитывая период полураспада ^{37}Ar 35,04 дня. Отдельные вклады от событий с одним S2 и событий с S1+S2 из 500-дневной выборки также показаны на рисунке 3.2. Хвост одиночных событий S2, простирающийся выше 50 e^- , составляющий около 4% от общего количества событий, обусловлен неразрешенными событиями S1+S2. Эти события неправильно классифицированы, но они не влияют на общую форму спектра. Всплеск при очень низких N_{e^-} объясняется электронами, захваченными атомами

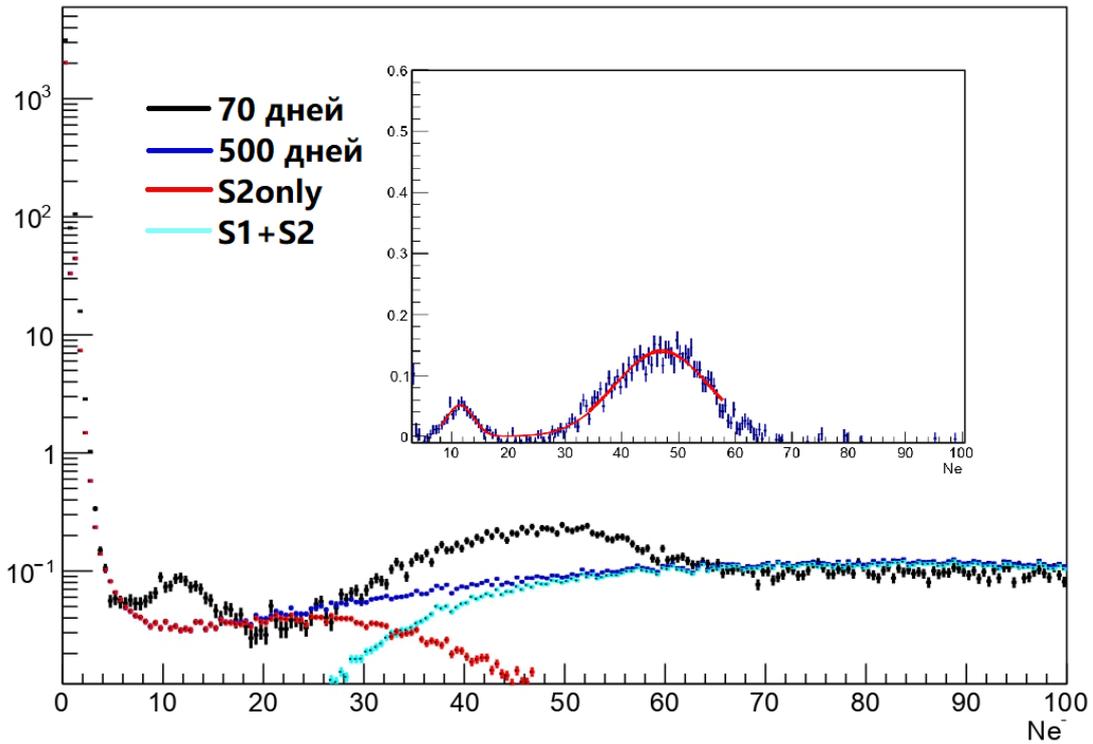


Рисунок 3.2 — Спектр, показывающий космогенные вклады аргона 37 и их распад. Черные точки: первые 70 дней нынешнего облучения. Синий: последние 500 дней. Красный и голубой цвета показывают соответственно вклады в синий спектр от событий только с импульсом S2 и от событий с одним импульсом S1 и одним импульсом S2. Вставка: нормированная разница черного и синего спектров, показывающая два пика от распада аргона 37.

примесей, как обсуждалось выше.

На рисунке 3.2 можно заметить небольшое расхождение между спектром распада за 70 дней и суммарным спектром сигналов S1 и S2. Возможная причина данного расхождения может быть связана с нормировкой, которая в будущем будет устранена.

Поскольку эксперименты с низким фоном обычно проводятся глубоко под землей, в защите от космических лучей, активность ^{37}Ar обычно распадается ниже измеримых уровней в течение нескольких месяцев, хотя рентгеновский пик может использоваться в качестве низкоэнергетического калибровочного источника во время раннего сбора данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была проверена и подтверждена гипотеза о наличии в эксперименте Darkside-50 фоновых одноэлектронных событий, которые обусловлены наличием в рабочем веществе детектора примесных молекул O_2 , N_2 и прочих в период работы детектора с выключенным фильтрующим устройством. Данный фон особенно существенен в поиске частиц темной материи в области низких масс, который неосуществим с помощью стандартных методов анализа, вместо которых используется анализ низкоэнергетических событий только по сигналу S2.

Для сравнительного анализа данных изначально был выбран период работы детектора во время отключения фильтрующего устройства, при котором наблюдается увеличение доли одноэлектронных событий со временем. В работе проверялась гипотеза о зависимости количества одноэлектронных событий от величины энерговых выходов событий S1. Получен график, на котором представлена зависимость величины относительного числа запаздывающих одноэлектронных событий к числу предшествующих им сигналов S1 для различных диапазонов. Полученная зависимость имеет линейный характер. Угол наклона графика:

$$k = (1.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-4} \frac{1}{PE}$$

Было установлено, что событиям с большим энергетическим выходом S1 соответствует экстакция большего числа ионизационных электронов на поверхность газовой фазы.

В результате работы было оценено характерное время задержки электрона на примеси. Данная оценка позволяет выделять из анализа фоновые запаздывающие одноэлектронные события, обусловленные наличием примесей.

$$\tau_1 \in (7; 14)s$$

$$\tau_2 \in (50; 500)ms$$

Затем проводился анализ, аналогичный анализу ранов в период отключения геттера для двух SLAD-файлов, собранных в период работы

фильтрующего устройства: до блэкаута, соответствующий данным собранным в период до аварии и после блэкаута - данным, собранным после происшествия.

Были получены графики зависимости относительного числа одноэлектронных событий, фитируемые экспонентой, по которым оценено характерное время задержки электрона, предположительно на атоме примеси. Параметры фитирующей функции не совпадают с параметрами фита в период выключения фильтрующего устройства. А также построены графики зависимостей величины параметра частоты обнаружения одноэлектронных событий от величины соответствующих энергетических выходов сигналов S1. Было определено, что частота обнаружения одноэлектронных событий не зависит от величины предшествующего ему сигнала S1. По полученным результатам сделан вывод о наличии иных причин, обуславливающих основной фон в детекторе после происшествия.

Было выдвинуто предположение о том, наличие фона обусловлено наличием на поверхности тетрафинилбутадиена, которым покрывают стенки детектора, для смещения длины волны в область видимого спектра.

Обнаружение причины фона позволит повысить степень достоверности результатов различных видов анализа данных эксперимента Darkside-50.

Также в ходе работы исследовался спектр изотопа аргона-37, который образуется в рабочем веществе во время транспортировки под действием космических лучей. Изучение данного изотопа значимо, так как низкоэнергетические сигналы от аргона-37 позволяют проводить калибровку детектора, а исследования в области малых энергий это перспективное направление поиска вимпов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Faber S. M., Gallagher J. S.* Masses and Mass-To-Light Ratios of Galaxies // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 1979. — Vol. 17, no. 1. — P. 135–187.
2. *Bertone G., Hooper D., Silk J.* Particle dark matter: evidence, candidates and constraints // Physics Reports. — 2005. — Vol. 405, no. 5. — P. 279–390. — ISSN 0370-1573.
3. *Lin T., Yu H.-B., Zurek K. M.* Symmetric and asymmetric light dark matter // Phys. Rev. D. — 2012. — Vol. 85, issue 6. — P. 063503.
4. *Agnes P., Albuquerque I., T. Alexander e.* The electronics, trigger and data acquisition system for the liquid argon time projection chamber of the DarkSide-50 search for dark matter // Journal of Instrumentation. — 2017. — Vol. 12, no. 12. — P12011–P12011.
5. *Agnes P., Agostino L., Albuquerque e.* Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search // Phys. Rev. D. — 2016. — Vol. 93. — P. 081101.
6. *Agnes P.* [et al.]. DarkSide-50 532-day dark matter search with low-radioactivity argon // Physical Review D. — 2018. — Vol. 98, no. 10. — ISSN 2470-0029.
7. *Agnes P.* [et al.]. First results from the DarkSide-50 dark matter experiment at Laboratori Nazionali del Gran Sasso // Physics Letters B. — 2015. — Vol. 743. — P. 456–466. — ISSN 0370-2693.
8. *Agnes P.* [et al.]. Electroluminescence pulse shape and electron diffusion in liquid argon measured in a dual-phase TPC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2018. — Vol. 904. — P. 23–34. — ISSN 0168-9002.

9. *Agnes P.* [et al.]. Low-Mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment // Physical Review Letters. — 2018. — Vol. 121, no. 8. — ISSN 1079-7114.
10. *Saldanha R.* [et al.]. Cosmogenic production of Ar39 and Ar37 in argon // Physical Review C. — 2019. — Vol. 100, no. 2. — ISSN 2469-9993.
11. *Kirkwood D. H. W., Pontecorvo B., Hanna G. C.* Fluctuations of Ionization and Low Energy Beta-Spectra // Phys. Rev. — 1948. — Vol. 74, issue 4. — P. 497–498.