

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДК 539.12

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО ШУМА В  
ДЕТЕКТОРЕ DarkSide-50

Научный руководитель  
к.ф.-м.н., доц.

\_\_\_\_\_ А. В. Гробов

Выполнила

\_\_\_\_\_ В. В. Верзакова

Москва 2020

# Содержание

Содержание . . . . .	1
1 Введение . . . . .	2
2 Описание детектора Darkside-50 . . . . .	3
3 Одноэлектронные события . . . . .	5
3.1 Запаздывающие сигналы . . . . .	5
3.2 Анализ данных . . . . .	6
3.3 Критерий отбора . . . . .	7
4 Анализ данных с выключенным геттером . . . . .	9
5 Заключение . . . . .	12

# 1 Введение

В настоящее время в мире действуют около 15 детекторов на основе жидких благородных газов. Детекторы отличаются друг от друга геометрической формой, размерами, конструктивными особенностями и типом мишени (детектирующим веществом). В основном, детектирующее вещество – это жидкие инертные газы: жидкий неон (LNe), жидкий аргон (LAr) и жидкий ксенон (LXe). В эксперименте MIMAS в качестве мишени используется изотоп гелия  $^3\text{He}$ , тоже инертный газ, но в другом агрегатном состоянии. Мишени представляют собой особое детектирующее вещество – сцинтиллятор.

Газовые сцинтилляторы применяются главным образом для регистрации сильно ионизирующих короткопробежных частиц (осколков деления тяжелых ядер). В качестве газовых сцинтилляторов используются в основном чистые благородные газы (гелий, аргон, криптон, ксенон) и их смеси.

Время высвечивания сцинтилляторов  $\sim 10^{-8}$  с и зависит от давления газа. Длины волн излучаемого света лежат в области «жесткого» (дальнего) ультрафиолета. Поэтому световые вспышки, возникающие в газе при прохождении заряженной частицы, не могут быть непосредственно зарегистрированы при помощи обычных ФЭУ (имеется ввиду ФЭУ серийного производства). Так, например, окно для фотокатода ФЭУ изготавливают из фторида магния ( $\text{MgF}_2$ ), который пропускает диапазон длин волн  $112 \div 830$  нм.

Основными характеристиками сцинтилляторов являются конверсионная эффективность, спектр излучения и время высвечивания

Конверсионная эффективность – это отношение энергии световой вспышки, к энергии, оставленной заряженной частицей в сцинтилляторе. Конверсионная эффективность характеризует эффективность преобразования сцинтиллятором энергии заряженной частицы в световую. Количество света, испускаемое сцинтиллятором, характеризуется световым выходом. Световой выход – это отношение энергии среднего числа фотонов люминесценции к энергии, потерянной ионизирующей частицей в сцинтилляторе. Временем высвечивания сцинтиллятора называется величина, характеризующая длительность свечения, – это время, в течение которого интенсивность свечения одной возбужденной структурной единицы вещества сцинтиллятора падает в  $e$  раз [bib:luk].

## 2 Описание детектора Darkside-50

Детектор Darkside-50 представляет собой двухфазную аргоновую время-проекционную камеру, схематически представленную на рис. 1. В качестве рабочего вещества используется 50 кг  $^{40}\text{Ar}$  высокой степени очистки. [1] Жидкая фаза аргона кипятится, образуя слой газообразной фазы толщиной 1 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 [2] представляет собой тефлоновый отражатель. Внутренние поверхности тефлонового рефлектора покрыты тетрафенилбутадиеном, который смещает 128 нм аргонового сцинтилляционного света до 420 нм, позволяя обнаруживать ФЭУ [3].

При взаимодействии частицы с рабочим веществом в жидкой фазе, её энергия передается атомам и молекулам аргона путем возбуждения и ионизации. Фотоны регистрируются фотоумножителями и таким образом регистрируется сцинтилляционный сигнал (S1). Ионизационные электроны, выжившие после рекомбинации на месте событий, дрейфуют к границе раздела жидкой и газообразной фазы, где экстракционное поле впрыскивает их в газовую фазу, после чего в газовой фазе ускоряются за счет поля экстракции, возбуждая атомы аргона, которые также снимают возбуждение, испуская УФ фотоны. Так образуется ионизационный сигнал (S2) рис. 2.

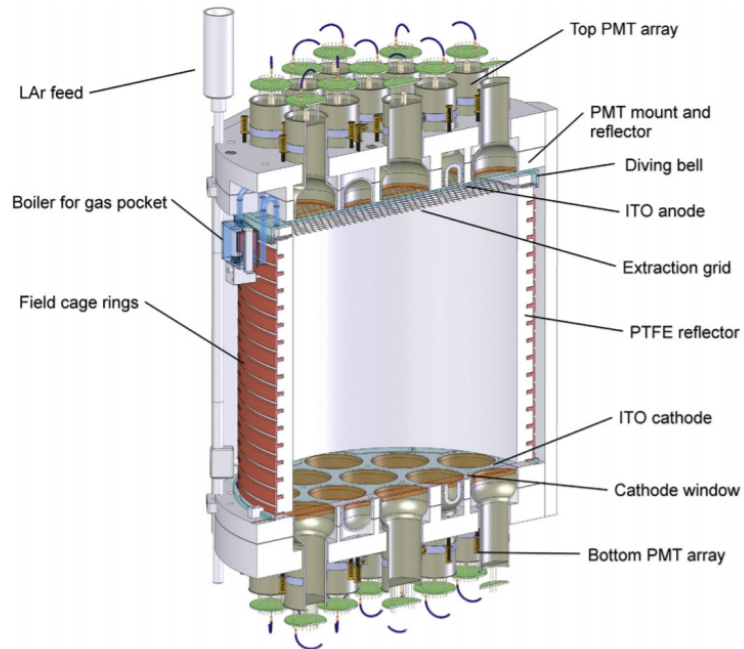


Рисунок 1 — Устройство детектора Darkside-50

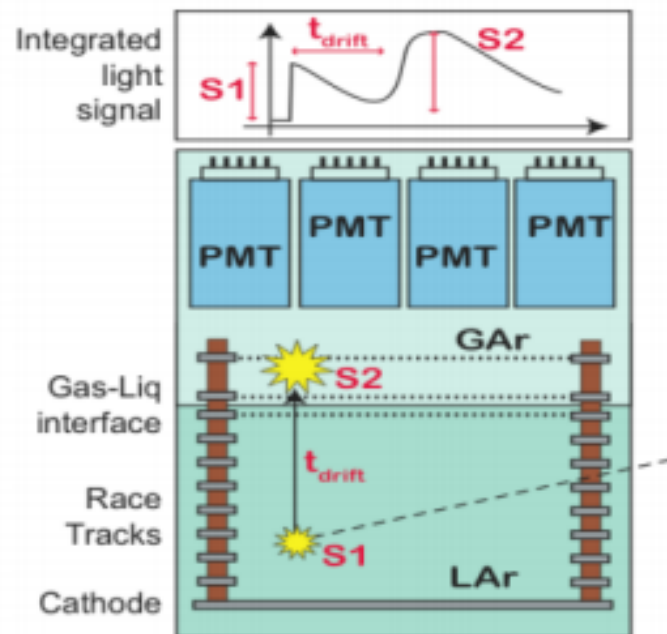


Рисунок 2 — Принцип работы времяпроекционной камеры детектора

### 3 Одноэлектронные события

#### 3.1 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 с рабочим веществом частиц с низкой энергией, 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. Проверяется гипотеза, подтверждающая 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 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. 3 [4].

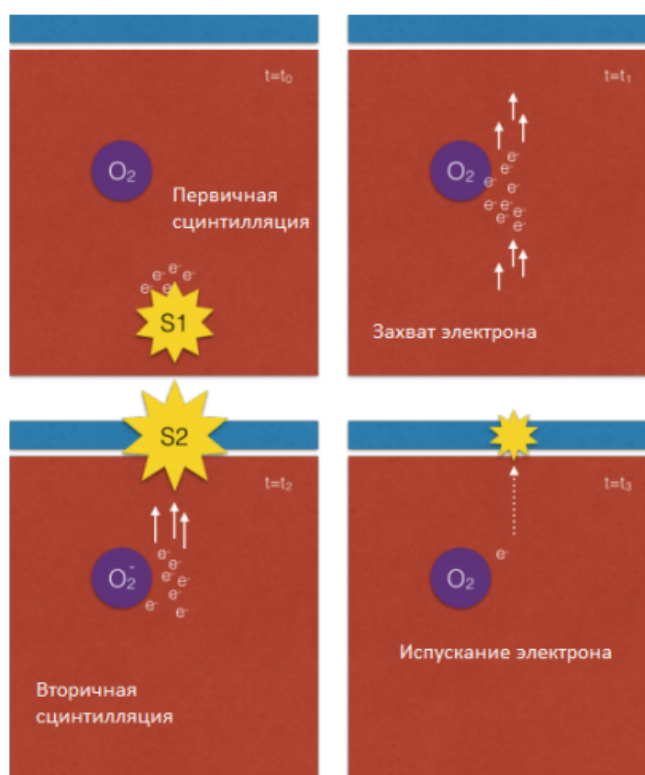


Рисунок 3 — Схематичное изображение механизма возникновения запаздывающего сигнала

## 3.2 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 работе рассматривался период работы детектора при выключенном фильтрующем устройстве (геттере). В период отключения геттера аргон циркулирует без прохождения фильтрации, поэтому со временем растет концентрация примесей. 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.

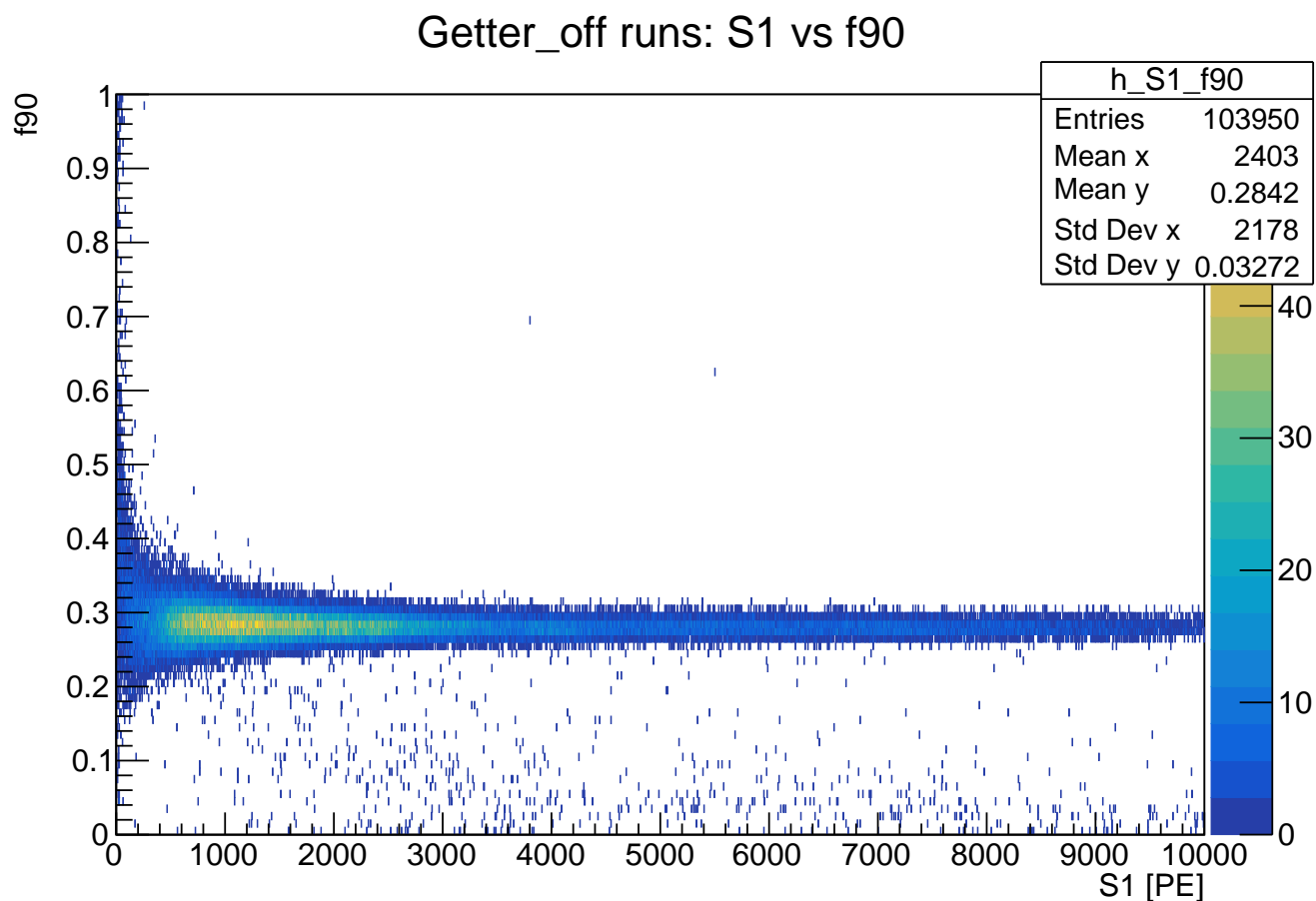


Рисунок 4 —  $f_{90}$  сигнала S1: одноэлектронным событиям соответствует область с  $f_{90} < 0.15$ .

Для отбора по форме сигнала используется параметр  $f_{90}$ , который равен отношению интегралу сигнала за первые 90 нс к интегралу сигнала за полное время события. (1)

$$f_{90} = \frac{\int_0^{90ns} s_1 dt}{\int_0^{7mcs} s_1 dt} \quad (1)$$

### 3.3 Критерий отбора

Для выделения одноэлектронных событий необходимо найти характерную величину сигнала  $S_2$ , приходящуюся на извлечение одного ионизационного электрона в газовую фазу. 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.

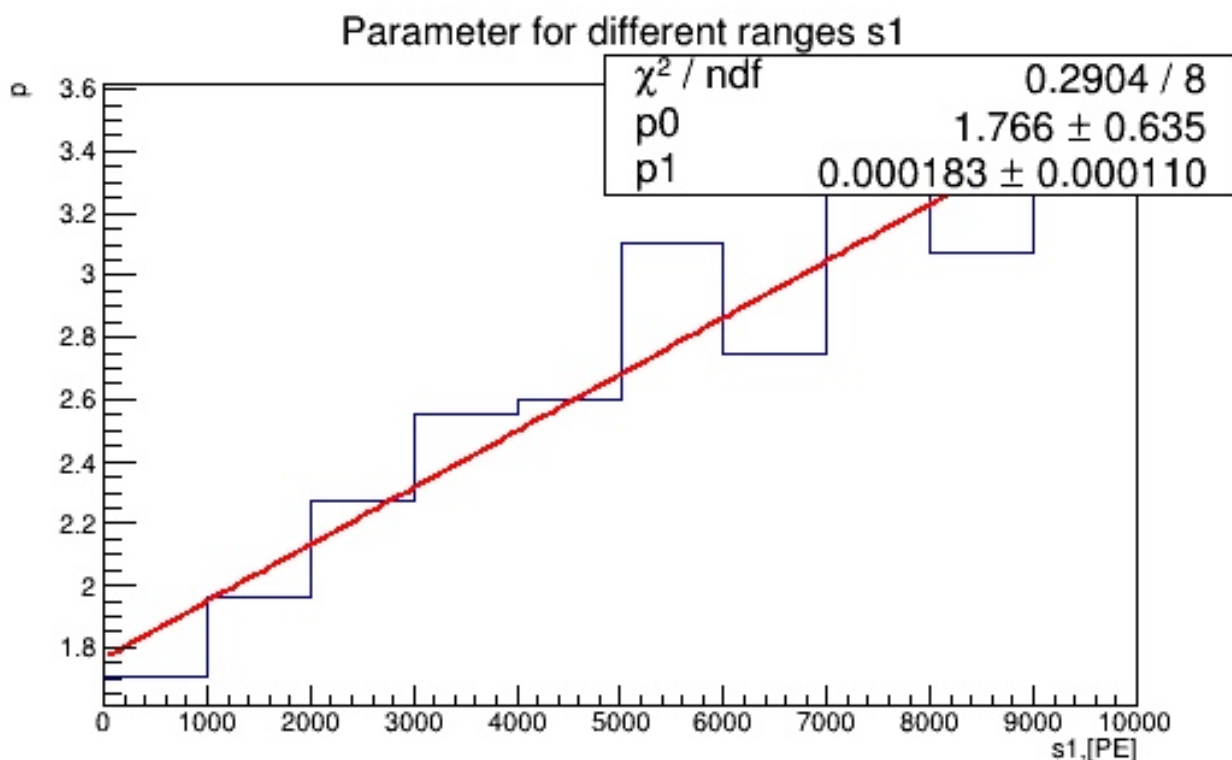


Рисунок 5 — График зависимости величины параметра от величины соответствующих энергетических выходов сигналов  $S_1$

В качестве критерия отбора использовалось значение энергетического выхо-



да сигналов S1 исходного события. Был определен параметр  $p$ , 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. Построен соответствующий график, представленный на рисунке 5.

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

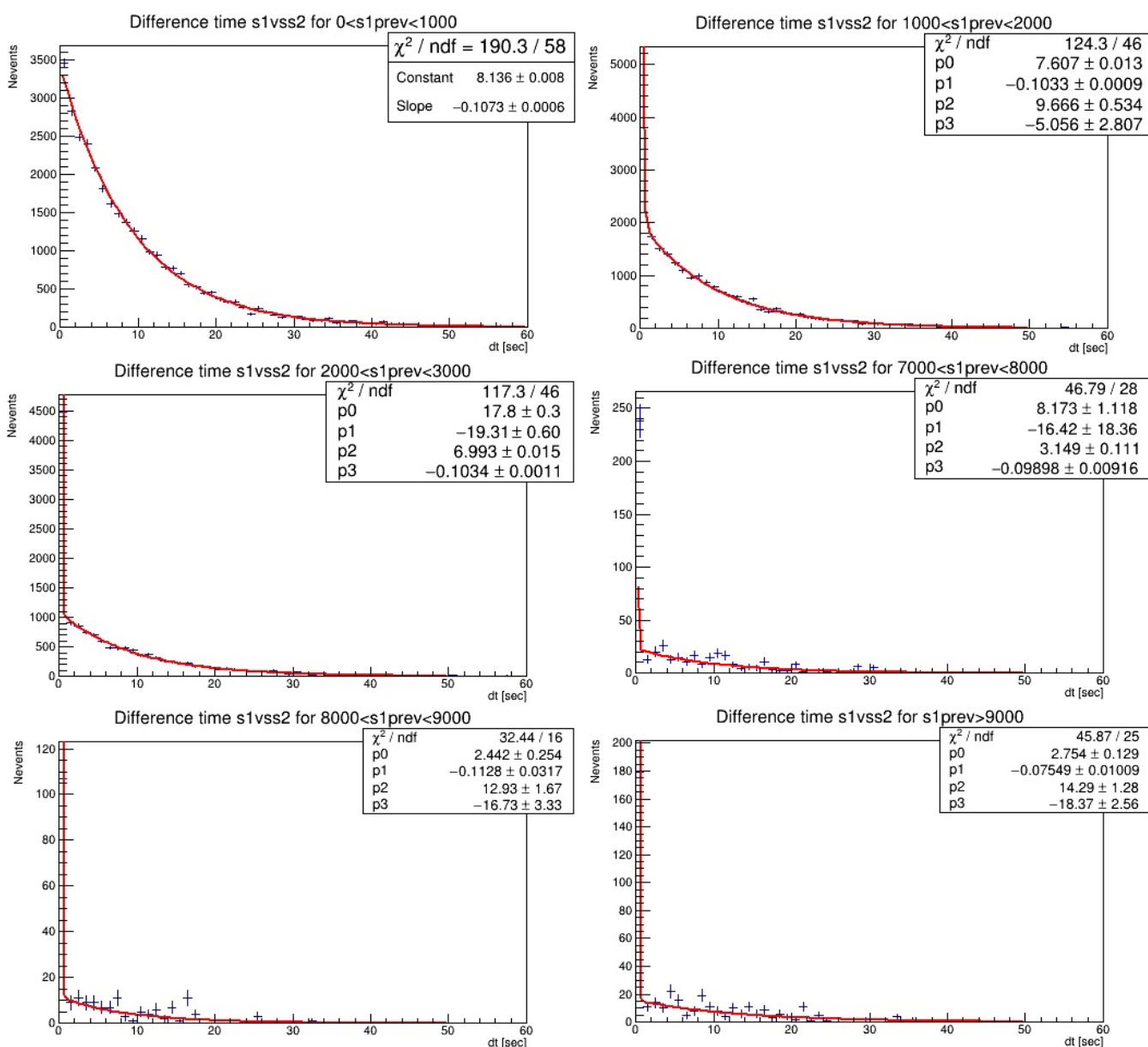


Рисунок 6 — Графики зависимости числа запаздывающих событий от времени, прошедшего после исходного события для различных диапазонов предшествующих сигналов S1. Красной кривой соответствует аппроксимация данных суммой двух затухающих экспонент

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 экспонент, поэтому на рисунке 6 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 оно варьируется в пределах 7-14 секунд, для второй - в районе 50-500 миллисекунд.

## 4 Анализ данных с выключенным геттером

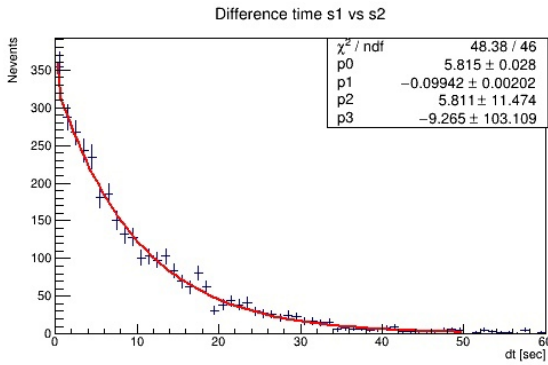
Проводился анализ для SLAD-файлов before blackout и after blackout, аналогичный анализу ранов в период отключения геттера. Были построены графики зависимости числа одноэлектронных событий от времени, прошедшего между одноэлектронным событием и предшествующем ему сигналом s1 для обоих файлов. Графики фитируются экспонентой, по параметру фита оценено характерное время задержки электрона на предполагаемом атоме примеси.

Также для двух файлов были получены подобные гистограммы для различных промежутков величины предшествующего сигнала s1. Для ранов, собранных до аварии (рис. (a)) характерное время задержки составило:  $\sim 110$ мс для одной экспоненты и (3; 12)с - для второй. Результат оказался схожим с тем, что был получен при отключенном геттере.

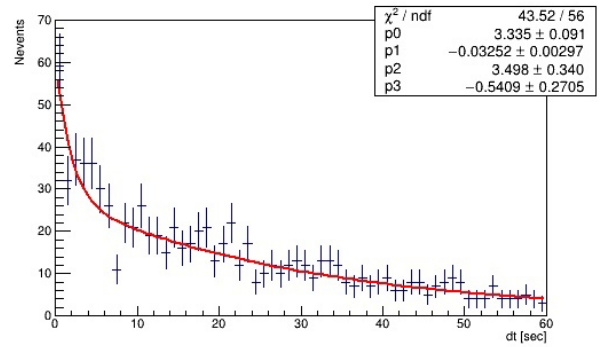
Однако параметры фита (рис. (b)) для ранов, собранных после аварии отличны от тех, что собраны при выключенном фильтрующем устройстве: для одной экспоненты - (20; 200)с, для второй - 400мс.

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.

В случае выключенного геттера зависимость носила линейный характер, так как большим сигналам S1 соответствует большее число одноэлектронных со-



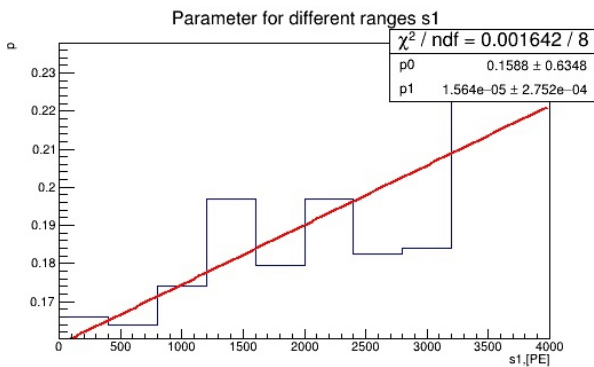
(a)



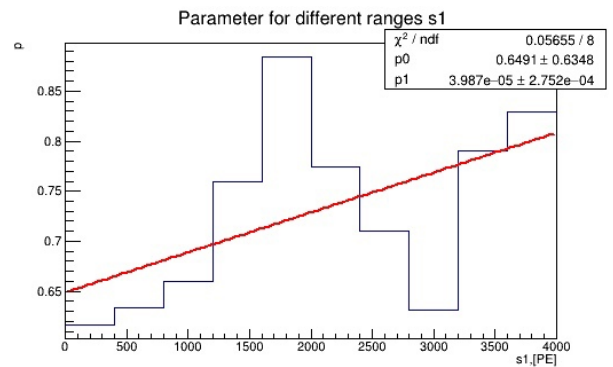
(b)

Рисунок 7 — 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: (a) соответствует before blackout, (b) - after blackout

бытий. Ожидалось, что с ростом энергии предшествующего сигнала S1, будет



(a)



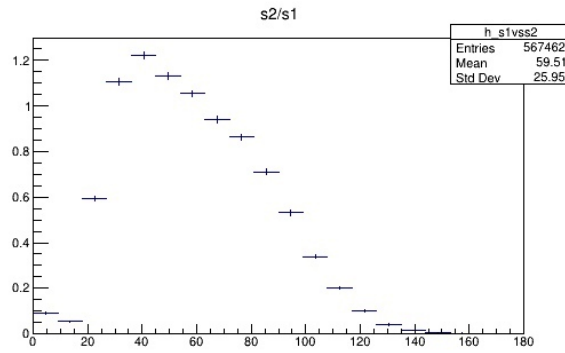
(b)

Рисунок 8 — Графики зависимости величины параметра частоты обнаружения одноэлектронных событий от величины соответствующих энергетических выходов сигналов S1: (b) соответствует before blackout, (a) - after blackout

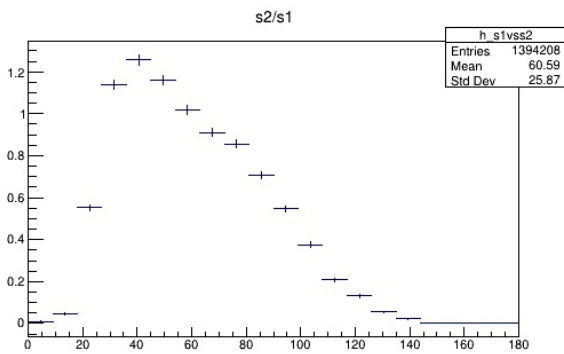
наблюдаться увеличение значения параметра. Однако можно заметить на графике, что для данных, собранных после аварии эта зависимость не носит линейный характер (рис. (a)).

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

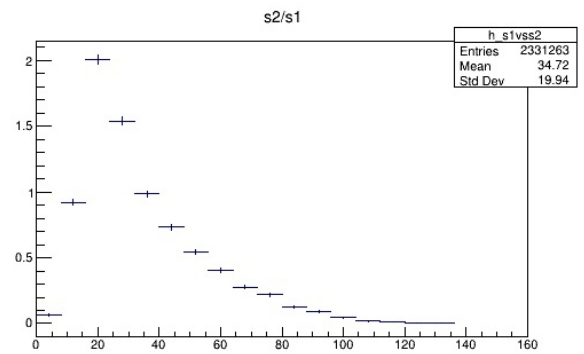
Были построены графики зависимости отношения величины сигнала S2 к величине сигнала S1. В связи с тем, что различным SLAD-файлам соответствует различное число событий, графики были нормированы по количеству событий.



(a)



(b)



(c)

Рисунок 9 — Графики зависимости отношения величины сигнала S2 к величине сигнала S1, номированные по количеству событий: (a) - для getter off, (b) - для before blackout, (c) - для after blackout.

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

Исходя из рисунка 9 можно сделать вывод о том, что сигналы S2 детектируются искаженно после аварии. Возможной причиной может являться предположительно наличие на поверхности рабочего вещества частиц тетрафинилбутадие-на (ТРВ), который используется для смещения длины волны в область видимого спектра.

## 5 Заключение

В ходе исследовательской работы проводился анализ данных, полученных с детектора Darkside-50. Проводился анализ, аналогичный анализу ранов в период отключения геттера для SLAD-файлов: before blackout, соответствующий данным собранным в период до аварии и after blackout - 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 фон в детекторе после аварии.

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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *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. — дек. — т. 12, № 12. — P12011—P12011.
2. *Agnes P., Agostino L., Albuquerque e.* Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search // Phys. Rev. D. — 2016. — т. 93. — с. 081101.
3. *DarkSide C. T.* DarkSide-50 532-day Dark Matter Search with Low-Radioactivity Argon // Physical Review D. — 2018. — P. 18.
4. *DarkSide C. T.* Low-Mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment // Physical Review Letters. — 2018. — P. 9.