

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.1

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ:
**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬФА-АКТИВНОСТИ В
ДЕТЕКТОРЕ DEAP-3600**

Научный руководитель
Доц., к.ф.-м.н.

_____ А. В. Гробов

Студент

_____ М. А. Семичева

Москва 2020

Аннотация

Данная работа содержит основные результаты исследования α -активности в детекторе DEAP-3600. Во второй главе представлено описание устройства детектора и ожидаемые фоновые события. Также представлено распределение экспериментальных данных α -распадов в рассматриваемой области и распределение, сгенерированное с помощью метода Монте-Карло в той же области событий. Применяемые критерии отбора для выделения интересующей области и количество событий, оставшихся после применения ограничений, представлены в конце второй главы. В третьей главе описан анализ экспериментальных данных, а именно результаты вычисления весов компонент, вносящих вклад в спектр ^{210}Po , и результаты вычисления величин, необходимых для расчета активности ^{210}Po . В результате данной работы была получена активность ^{210}Po в объеме и на поверхности детектора.

Annotation

This work contains the main results of the study of α -activity in the DEAP-3600 detector. The second chapter provides a description of the detector structure and expected background events. The distribution of experimental data in the control region and the distribution generated using the Monte Carlo method in the same region are also presented. The cuts applied to highlight the area of interest and the number of events remaining after application of the cuts are presented at the end of the second chapter. The third chapter describes the analysis of experimental data, namely, the results of calculating the weights of the components contributing to the ^{210}Po spectrum, and the results of calculating the values required to calculate the ^{210}Po activity. As a result of this work, the activity of ^{210}Po was obtained in the volume and on the surface of the detector.

Оглавление

1	Введение	3
2	Эксперимент DEAR-3600	5
2.1	Устройство детектора	5
2.2	Ожидаемые фоновые события	9
2.2.1	Общее количество ожидаемых фоновых событий	9
2.2.2	Фоновые события от α -распадов ядер	9
2.2.3	Фоновые события от α -распадов ^{210}Po	10
3	Анализ экспериментальных данных	16
3.1	Вычисление активности	16
3.2	Вычисление весов компонент	18
3.2.1	Корреляции между весами компонент	20
3.3	Вероятности срабатывания триггеров	23
3.4	Коррекция наложений	23
3.5	Вычисление живого времени сбора данных	24
3.6	Активность	25
4	Заключение	27
	Список использованных источников	27

Глава 1

Введение

Проблема скрытой массы (СМ) во Вселенной остается одной из наиболее важных нерешенных задач в астрофизике и космологии. Исходя из космологической модели «Лямбда-CDM» нерелятивистское вещество составляет $\approx 30\%$ от общей плотности вещества во Вселенной, из которых только 5% – барионная материя, остальная же часть – несветящаяся форма материи, не описанная Стандартной Моделью [1]. Свидетельствами наличия СМ являются: изучение кривых вращения галактик (зависимость скорости вращения галактических объектов от расстояния до центра галактики), пространственные флуктуации реликтового микроволнового фона, проблема формирования крупномасштабной структуры Вселенной, гравитационное линзирование и другие. Не смотря на большое количество свидетельств существования СМ, она все еще не была обнаружена в наземных экспериментах по ее прямому поиску.

Многие теоретические модели предсказывают существование частиц со свойствами, соответствующими свойствам СМ [2]. Одним из кандидатов на роль частиц СМ является слабо взаимодействующая массивная частица WIMP (weakly interacting massive particle). Согласно этой модели упругое рассеяние WIMP на ядрах детектора производит низкоэнергетические (100кэВ) ядра отдачи. Текущие результаты экспериментов по прямому обнаружению поставили ограничение на спин-независимое сечение рассеяния WIMP-ов на ядре: его значение ожидается $< 9.0 \times 10^{-47} \text{ см}^2$ при энергиях $100 \text{ ГэВ}/c^2$ (при доверительном уровне 90%) [3].

Одним из ведущих экспериментов по поиску темной материи является эксперимент DEAP-3600. Коллаборация DEAP – это группа из более чем 65 исследователей из 18 учре-

ждений Канады, Великобритании, Мексики, Германии, Испании и России, разработавших один из самых чувствительных детекторов для прямого обнаружения темной материи.

Малую вероятность обнаружения столь редких низкоэнергетических сигналов предполагается компенсировать большой массой мишени и низким уровнем фоновых сигналов (менее 1 события на тонну вещества в год). Предыдущие экспериментальные результаты продемонстрировали эффективность использования жидкого аргона (LAr) для достижения данных условий [4]. Простота очистки, высокая эффективность сцинтилляций и прозрачность для собственного сцинтилляционного света делают его подходящим материалом для работы в качестве WIMP-детектора с массой в несколько тонн. Низкий уровень фона достигается благодаря расположению эксперимента. Детектор DEAP находится в глубокой подземной лаборатории SNOLAB (Садбери, Онтарио, Канада), которая использует двухкилометровый (6 км в водном эквиваленте) слой горной породы для фильтрации мюонов космических лучей, препятствующих обнаружению частиц WIMP.

Большая редкость искомого события делает отделение сигнала от фона одной из важнейших задач эксперимента. События, подобные сигналу от частиц WIMP, могут быть получены от различных источников фона, включающих: β - и γ -излучение в LAr и акриле, индуцированные нейтронами ядра отдачи в LAr, а также α -распады с поверхностей, контактирующих с LAr.

Данная работа посвящена исследованию α -активности в различных частях детектора. Главными целями работы стали:

- Выделение региона событий с α -распадами ^{210}Po ;
- Определение вклада различных компонент в общую активность ^{210}Po ;
- Вычисление величин, необходимых для расчета активности ^{210}Po :
 - корреляций между весами компонент;
 - вероятностей срабатывания триггеров;
 - времени регистрации событий;
 - учет коррекции наложений;
- Вычисление активности ^{210}Po в объеме и на поверхности детектора.

Глава 2

Эксперимент DEAR-3600

2.1 Устройство детектора

Схема поперечного сечения детектора DEAR-3600 показана на рисунке 2.1. Полная конструкция детектора подробно описана в [5].

Детектор расположен внутри водного резервуара (на рисунке не показан). Основная составляющая установки – ультрачистый жидкий аргон LAr, содержащийся в акриловом сосуде (AV) толщиной 5 см с поглотителем ультрафиолета (UVA) внутреннего диаметра 1,7 м. Данный поглотитель выбран для подавления черенковского света, излучаемого в акриле. Верхние 30 см акрилового сосуда заполнены газообразным аргонном (GAr). Поверхность соприкосновения двух сред GAr/LAr расположена на 55 см выше экватора сосуда. Области газообразного и жидкого аргона просматриваются матрицей из 255 обращенных внутрь сферы фотомножителей (PMT) с низкой радиоактивностью Hamamatsu R5912 HQE диаметром 80 мкм. Характеристики этих PMT описаны в [6]. ФЭУ оптически связаны с акриловыми световодами (LGs) длиной 45 см, которые транспортируют видимые фотоны из акрилового сосуда к фотоумножителям. Объем между световодами заполнен чередующимися слоями полиэтилена высокой плотности и пенополистирола, которые обеспечивают пассивное экранирование нейтронов от компонентов детектора, таких как PMT.

Внутренняя поверхность акрилового сосуда покрыта слоем 1,1,4,4-тетрафенил-1,3-бутадиена (TPB) толщиной 3 мкм, который преобразует сцинтилляционный свет с длиной волны 128 нм, генерируемый LAr, в свет в видимом диапазоне с длиной волны, максимум которой достигается при 420 нм. После прохождения TPB свет достигает акрилового

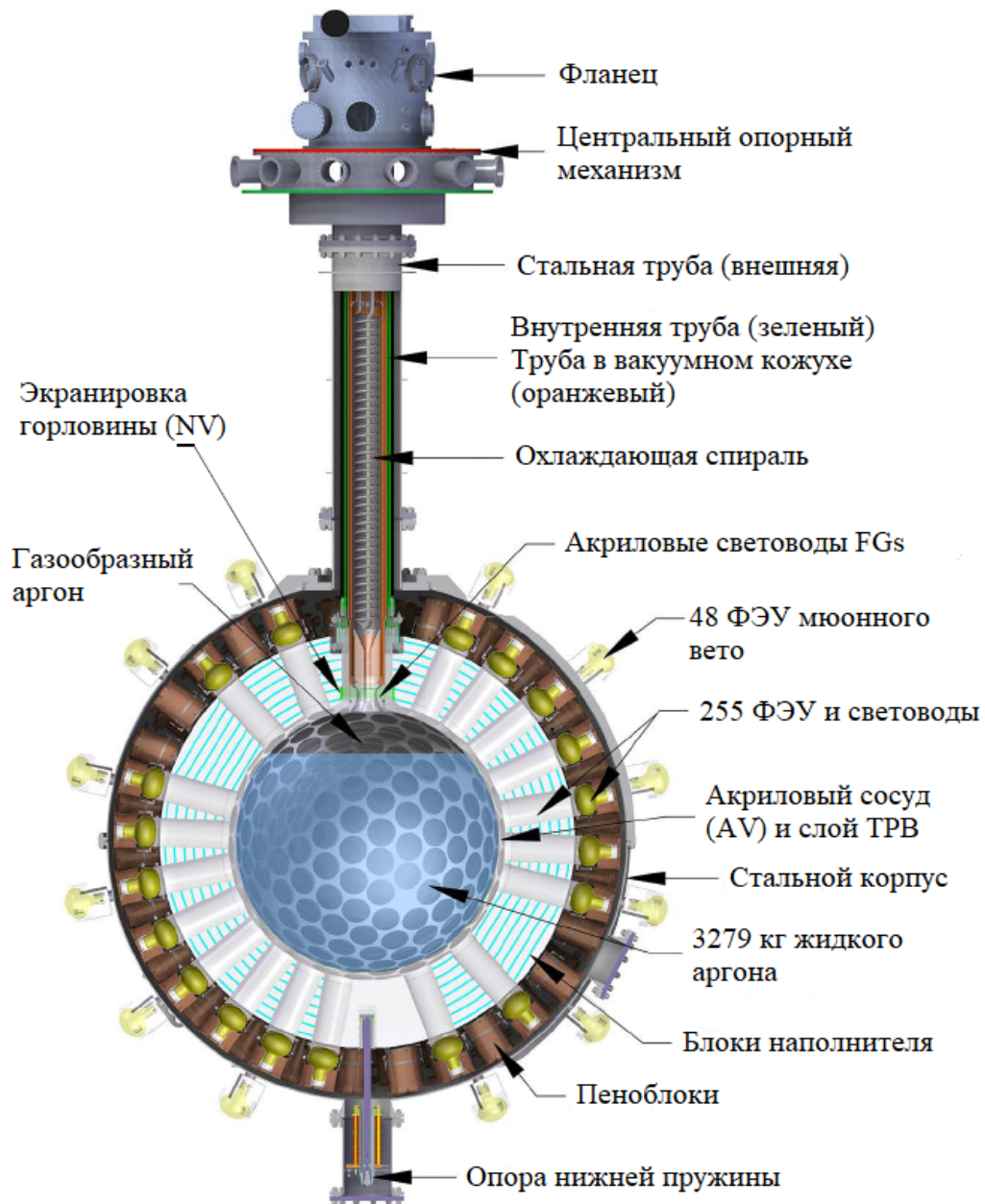


Рисунок 2.1 – Схема поперечного сечения детектора DEAP-3600

сосуда и световодов и далее попадает на поверхности ФЭУ. Эти соединенные со световодами ФЭУ обеспечивают 76% покрытия поверхности сосуда детектора. На поверхности резервуара имеется 11 различных «пятиугольных» областей с меньшим покрытием световодами: диаметр каждого меньше, чем диаметр LGs. За исключением этих пятиугольных областей, световоды равномерно покрывают внешнюю поверхность резервуара. Внешние поверхности между AV и LGs и между самими LGs соответственно покрыты диффузными отражателями Tyvek и Mylar для увеличения светосбора.

Сферическая симметрия объема детектора нарушается отверстием в верхней части AV, которое ведет к акриловой горловине и фланцу. Этот фланец соединен с более длинной горловиной с вакуумной рубашкой из нержавеющей стали, заканчивающейся в герметизированном боксе. Горловина содержит охлаждающую спираль из нержавеющей стали, заполненную жидким N_2 (LN_2), который конденсирует газообразный аргон во время наполнения и эксплуатации. Конденсированный жидкий аргон поступает в объем детектора, направляемый набором акриловых токопроводов (FGs), расположенных в отверстии горловины. Эти токопроводы направляют поток аргона к охлаждающей спирали и от нее во время работы детектора.

Два пучка непокрытых оптических волокон Kuraray Y11, сдвигающих длину волны, обернуты вокруг основания внешней поверхности горловины сосуда. Оба конца каждой связки соединяются с ФЭУ Hamamatsu R7600-300. Всего имеется 4 ФЭУ для экранировки горловины (NV). Они расположены над блоками наполнителя, окружающими горловину сосуда. Расстояние от центра сосуда до блоков такое же, как и до ФЭУ. Экранировка горловины используется для маркировки любого видимого света, генерируемого вблизи горловины, относительно нечувствительной к фотонам области детектора.

Вся сборка содержится в сфере из нержавеющей стали, которая продувается постоянным потоком очищенного от радона Rn газа N_2 . Эта сфера погружена в резервуар для воды, имеющий размеры 7,8 м в высоту и 7,8 м в диаметре, с 48 наружными ФЭУ Hamamatsu R1408, установленными на его внешней поверхности. Совместно эти ФЭУ и резервуар для воды составляют черенковское мюонное вето (MV), используемое для измерения космогенно-индуцированных фонов, в то время как защитная вода обеспечивает подавление нейтронного и гамма-фона от стен лаборатории.

Сверху мюонного вето вокруг сферы из нержавеющей стали размещена серия калиб-

ровочных трубок. Эти трубки позволяют устанавливать радиоактивные источники в MV вокруг детектора для его калибровки с помощью источников нейтронов и γ -излучения. Калибровочные источники могут быть размещены с набором детекторов, просматриваемых дополнительной парой калибровочных ФЭУ, позволяющих выделять события, совпадающие с радиоактивным распадом источника.

2.2 Ожидаемые фоновые события

2.2.1 Общее количество ожидаемых фоновых событий

Общее количество прогнозируемых фоновых событий в интересующей области поиска WIMP может быть выражено следующим образом:

$$N_{bkg} = N_{er} + N_{Cher} + N_{n,rdg} + N_{n,csг} + N_{\alpha,AV} + N_{\alpha,neck} , \quad (2.1)$$

где N_{er} – ожидаемое количество фоновых событий от электронов отдачи, N_{Cher} – ожидаемое количество фоновых событий, произведенных черенковским излучением в акриловой поверхности, $N_{n,rdg}$, $N_{n,csг}$ – количество событий от радиогенных и космогенных нейтронов, $N_{\alpha,AV}$, $N_{\alpha,neck}$ – число α -распадов в акриловом сосуде AV и в направляющей трубе.

В данной работе рассматриваются фоновые события, возникающие от α -распадов, а именно от α -распадов ^{210}Po .

2.2.2 Фоновые события от α -распадов ядер

α -активные ядра из уранового (^{238}U) и ториевого (^{232}Th) рядов, вносящие вклад в фоновые события в детекторе DEAP-3600, представлены в таблицах 2.1 и 2.2:

Таблица 2.1 – Урановый радиоактивный ряд

Родительские ядра	Дочерние ядра	Период полураспада	Энергия распада (МэВ)	Мода распада
^{222}Rn	^{218}Po	3,832 д	5,590	α
^{218}Po	^{214}Pb	3,10 мин	6,114	α
^{214}Pb	^{214}Bi	26,8 д	1,024	β
^{214}Bi	^{214}Po	19,9 мин	3,272	β
^{214}Po	^{210}Pb	164,3 мкс	7,833	α
^{210}Pb	^{210}Po	22,3 г	0,0635	β
^{210}Po	^{206}Pb	138,376 д	5,407	α

Таблица 2.2 – Ториевый радиоактивный ряд

Родительские ядра	Дочерние ядра	Период полураспада	Энергия распада (МэВ)	Мода распада
^{222}Ra	^{220}Rn	3,66 д	5,788	α
^{220}Rn	^{216}Po	55,6 с	6,404	α
^{216}Po	^{212}Pb	0,145 с	6,906	α
^{212}Pb	^{212}Bi	10,64 ч	0,573	β
^{212}Bi (35,94%)	^{212}Po	60,55 мин	6,207	α
^{212}Bi (64,06%)	^{208}Tl	60,55 мин	2,254	β, γ
^{212}Po	^{208}Pb	0,299 мкс	8,954	α
^{208}Tl	^{208}Pb	3,053 мин	5,001	β, γ

2.2.3 Фоновые события от α -распадов ^{210}Po

МС события

Выборку событий α -распадов ^{210}Po , сгенерированную с помощью метода Монте-Карло на graham кластере Compute Canada, можно увидеть на рисунке 2. Ряд пиков представляют собой распады, произошедшие в разных частях детектора (в зависимости от удаленности до центра резервуара r_{MC}):

- На поверхности акрилового сосуда AV ($r_{MC} = 851,000$ мм)
- В толще акрилового сосуда ($851,000 < r_{MC} < 851,050$ мм)
- В толще TPВ ($850,997 < r_{MC} < 851,000$ мм)
- На поверхности раздела LAr/TPВ ($r_{MC} = 850,997$ мм)

Из распределения видно, что распределение фотоэлектронов от α -распадов ^{222}Rn в объеме LAr частично перекрывается с распределением фотоэлектронов от α -распадов ^{210}Po .

α MC Populations

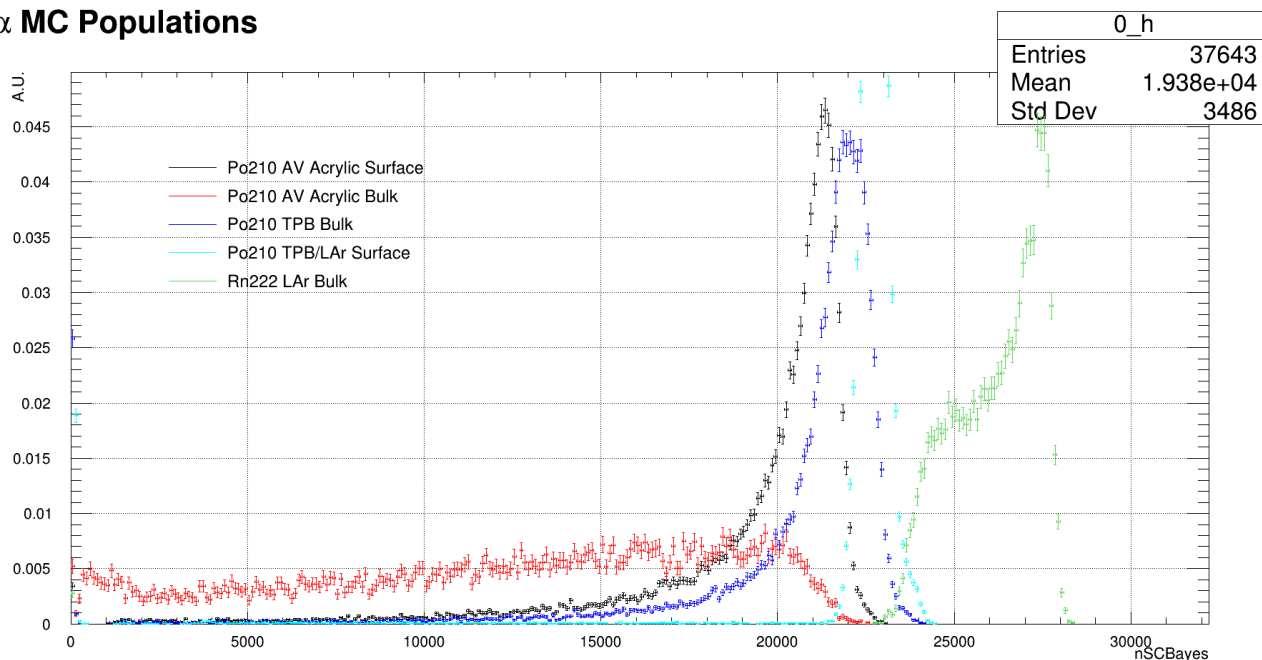


Рисунок 2.2 – Распределения фотоэлектронов от α -распадов ^{210}Po в разных частях детектора, а также близлежащее распределение фотоэлектронов от α -распадов ^{222}Rn в объеме LAr: черным обозначены события от ^{210}Po на поверхности AV, красным – события от ^{210}Po в объеме AV, синим – в объеме TPB, голубым – на поверхности раздела TPB/LAr, зеленым – события от ^{222}Rn в объеме LAr

Экспериментальные данные

Согласно данным совокупность α -распадов от ^{210}Po на акриловой поверхности AV, в объеме AV, а также в объеме TPB и на поверхности раздела TPB/LAr находится рядом с распределением α -распадов от ^{222}Rn .

Дискриминация формы импульса может быть использована для подавления электронов отдачи. Определим параметр дискриминации формы импульса F_{prompt} как долю фотоэлектронов, обнаруженных вблизи времени события. Максимальное разделение событий электронов отдачи (событий, вызванных β - и γ -излучением) и ядер отдачи было получено при использовании временного промежутка $[-28, 60]$ нс вокруг времени события.

На рисунке 2.3 представлено двумерное распределение α -распадов ^{210}Po . Из графика видно, что спектр ^{210}Po имеет широкое распределение по фотоэлектронам с хвостом, распространяющимся в область низких энергий, который возникает из-за насыщения ФЭУ и отсечения верхней части импульса цифровым преобразователем V1720. Оба эти эффекта

снижают общую восстановленную энергию РЕ. Степень, в которой РЕ ухудшается из-за насыщения и отсечения, в значительной степени зависит от положения. Зависимость этих эффектов от положения показана на рисунке 2.4.

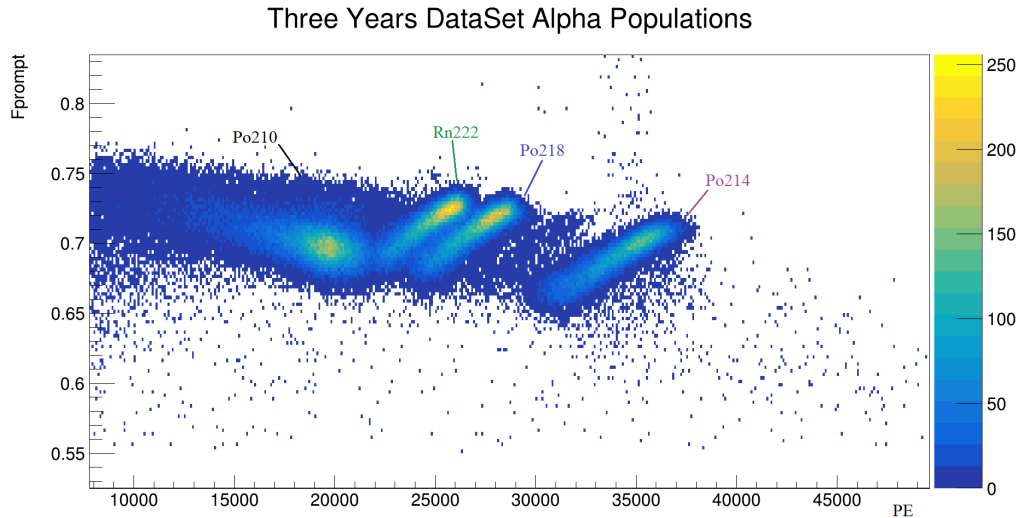


Рисунок 2.3 – Распределение экспериментальных данных в плоскости (F_{prompt} , PE), где PE – количество фотоэлектронов

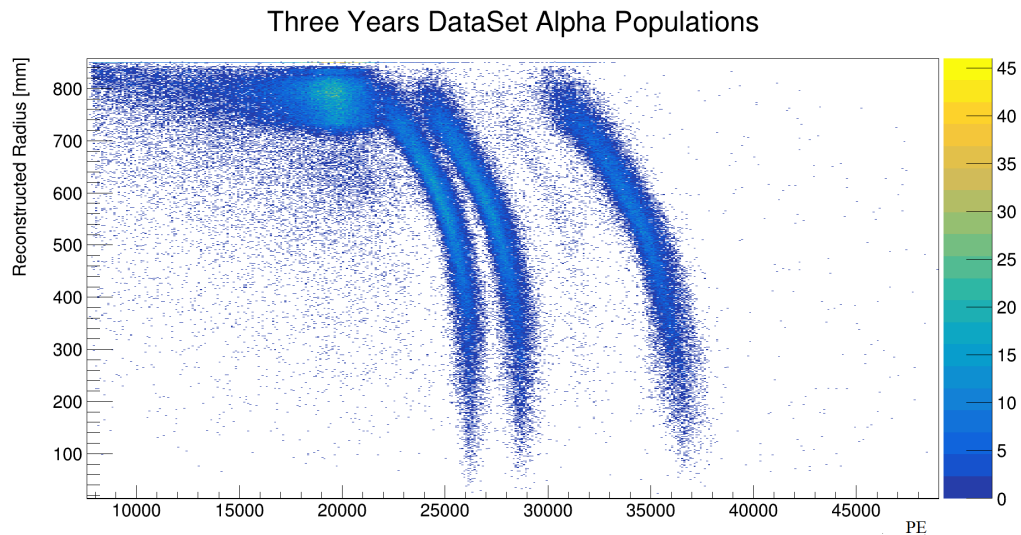


Рисунок 2.4 – Распределение экспериментальных данных в плоскости (Радиус, PE) при высоких значениях $f_{prompt} > 0.55$. Уменьшение объема данных при больших радиусах объясняется эффектами отсечения и насыщения в ФЭУ. Были применены только низкоуровневые критерии отбора ($(!(Calcut \& 0x31f8))$, $(!(dtmTrigSrc \& 0x82))$)

Для выделения региона событий с α -распадами ^{210}Po (а также для отделения его от близлежащих событий α -распадов ^{222}Rn) при анализе данных предлагается использовать следующие критерии отбора:

- $9000 < PE < 23000$: нижний предел 9000 выбран так, что с одной стороны он имеет достаточно низкое значение, чтобы хвост распределения был идентифицирован и включен в анализ, а с другой стороны это значение на ~ 5000 фотоэлектронов больше «граничной» точки α -распадов ^{210}Po в горловине. Под «граничной» точкой имеется в виду то число PE, начиная с которого в сигнал не дают вклад распады ^{210}Po из горловины сосуда, которые отражаются от нижней части детектора и дают отдельный низкоэнергетический фон. Это вызвано тем, что на верхней поверхности сосуда присутствует тонкая пленка LAg. Верхний предел в 23000 выбран с учетом включения событий α -распада ^{222}Rn в фит и исключения событий α -распадов ^{218}Po , которые начинаются в районе ~ 23500 PE;
- $F_{prompt} > 0,55$: это ограничение выбрано так, что события электронной отдачи при более низких значениях F_{prompt} исключаются;
- $(!(Calcut \& 0x31f8)), !(dtmTrigSrc \& 0x82)$: ограничения, гарантирующие, что наблюдаемый в контрольной области сигнал был инициирован, когда система сбора данных работала оптимально, то есть, что сигнал не является внутренним триггером, связанным с внешним триггером мюонного вето, а так же не является результатом случайного срабатывания триггера;
- $subeventN == 1$: удаление наложенных событий;
- $f_{maxpe} < 0,75$: ограничение, предназначенное для исключения черенковских событий.

В таблице 2.3 перечислены вышеизложенные критерии отбора, а также представлено количество событий α -распадов ^{210}Po , оставшихся после их применения.

Таблица 2.3 – Критерии отбора, используемые для выделения региона событий с α -распадами ^{210}Po

№	Критерий отбора	Используемые ограничения	Кол-во оставшихся событий	% событий от начального
1	<i>nSCBayes</i>	$9000 < PE < 23000$	-	-
2	<i>+fprompt</i>	> 0.55	37738	-
3	<i>+dtmTrigSrc</i>	$(!(dtmTrigSrc\&0x82))$	37712	0.07 ± 0.73
4	<i>+calcut</i>	$((!(Calcut\&0x31f8))$	37486	0.60 ± 0.72
5	<i>+fmaxpe</i>	< 0.75	37486	0.00 ± 0.73
6	<i>+mblikelihoodZ</i>	$< 500\text{mm}$	36783	1.88 ± 0.72
7	<i>+subeventN</i>	$== 1$	35248	4.17 ± 0.71
Итого:			35248	6.60 ± 0.69

После применения ограничений распределение событий в координатах (F_{prompt} , PE) приняло следующий вид:

Fprompt vs. nSCBayes Three Years Dataset

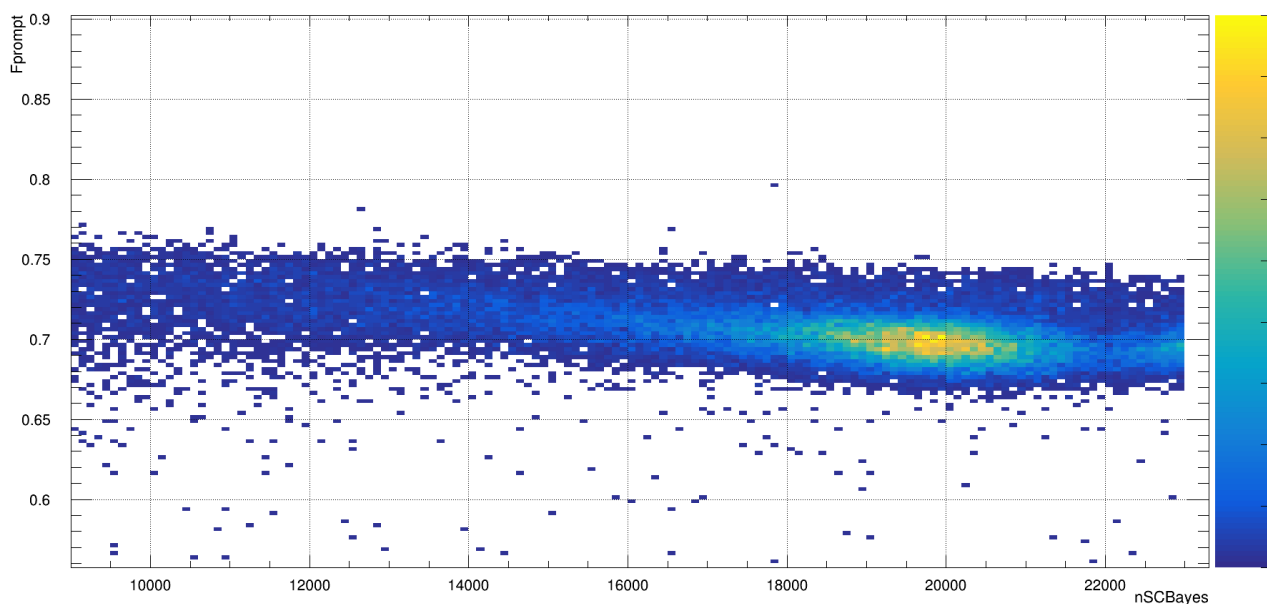


Рисунок 2.5 – Распределение оставшегося количества событий после применения ограничений для выделения интересующей области событий от α -распадов ^{210}Po

nSCBayes Three Years Dataset

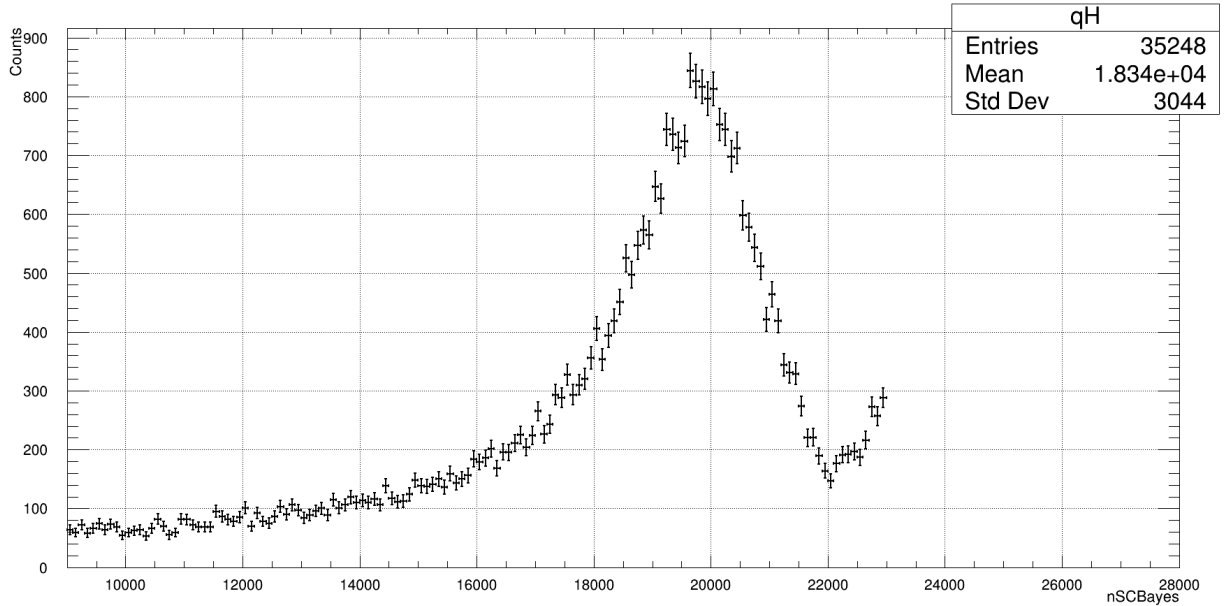


Рисунок 2.6 – Распределение оставшегося количества событий после применения ограничений для выделения интересующей области событий от α -распадов ^{210}Po (одномерное распределение)

Для вычисления активности источника α -распадов и фита разных компонент (вклад распадов с поверхности AV, объема AV, объема TPВ и поверхности раздела LAr/TPВ) был построен одномерный график, представляющий те же данные, что и на рисунке 2.5.

Глава 3

Анализ экспериментальных данных

3.1 Вычисление активности

Выражение, позволяющее определить вклад различных компонент в общую активность (здесь активность представлена как число срабатываний триггера детектора) имеет следующий вид:

$$N_{trig.} = \sum_u^{N_{comp}} (w^u f_{pileup} N_{trig}) = t_{live} \times \left(\sum_u^{N_{comp}} \mathcal{A}^u \epsilon^u A^u \right), \quad \sum_u^{N_{comp}} w^u = 1. \quad (3.1)$$

Здесь u – индекс компоненты, которая вносит вклад в спектры фотоэлектронов, показанные на рисунках 2.5, 2.6. Как обсуждалось ранее, для заданного здесь приближения рассматриваются пять компонент:

1. ^{210}Po на поверхности AV;
2. ^{210}Po в объеме AV;
3. ^{210}Po в объеме TPВ;
4. ^{210}Po на границе раздела LAr/TPВ;
5. ^{222}Rn в объеме LAr.

Переменные, представленные в уравнении (3.1), имеют следующие значения:

- N_{trig} – количество срабатываний триггера: полное число распадов, произошедших в детекторе, которые вызвали срабатывание триггера;

- w^u – веса компонент: вклад каждого источника (сумма вкладов всех источников = 1);
- f_{pileup} – коррекция наложений: учет триггеров, не учтенных при выборе ограничения $subeventN == 1$;
- \mathcal{A}^u – активность: полное число распадов в единицу времени на единицу площади (или объема), которые произошли в детекторе, не зависимо от того, вызвали они срабатывание триггера или нет;
- ϵ^u – вероятность срабатывания триггера: вероятность того, что данный распад вызовет срабатывание триггера детектора после учета всех наложенных ограничений из таблицы 2.3;
- A^u – площадь поверхности (или объем) и масса: в зависимости от источника событий это либо площадь поверхности (распады ^{210}Po на акриловой поверхности AV, в TPВ (аппроксимируем как поверхность) или на поверхности раздела TPВ/LAr), либо объемом (распады ^{210}Po в объеме AV или распады ^{222}Rn в объеме LAr), где происходили распады;
- t_{live} – время набора данных: время, в течение которого проводились наблюдения.

Используя приведенные выше определения, получаем выражение для активности данного источника:

$$\mathcal{A}^u A^u = \frac{w^u f_{pileup} N_{trig}}{\epsilon^u t_{live}} [Bq] . \quad (3.2)$$

Также для дальнейших расчетов требуется вычислить ожидаемое количество срабатываний триггера от данного компонента N^u , которое учитывает вес компонента w^u и поправочный коэффициент наложений f_{pileup} :

$$N_{trig}^u = w^u f_{pileup} N_{trig} . \quad (3.3)$$

Основная цель последующего анализа состоит в том, чтобы вычислить оценку активности \mathcal{A}_w^u для каждого из четырех компонент источника ^{210}Po и их неопределенностей, используя ограничение на вклад от ^{222}Rn . Данный анализ важен, поскольку он требуется для подсчета ожидаемого количества событий, просочившихся в низкоэнергетичную область PE, где ожидается наличие сигнала от WIMP.

3.2 Вычисление весов компонент

Чтобы определить значения весов компонент w^u , выполняется фитирование каждой из компонент (2.2) и одномерного спектра, полученного при анализе данных (рисунок 2.6). Фит состоит из двух наборов «размазывающих» параметров $(\sigma; \mu)_{TPB}$, $(\sigma; \mu)_{LAr}$ и пяти весовых коэффициентов w^u для каждого источника распадов. Параметры размытия $(\sigma; \mu)_{TPB}$ используются для определения гауссовой модели шероховатости поверхности слоя TPB. При Монте-Карло моделировании слой TPB реализован в виде идеального слоя толщиной 3 мкм, который параллелен как поверхности акрила со стороны AV, так и границе раздела с областью жидкого аргона на другой стороне. В действительности эта поверхность не идеально ровная, она имеет возвышения и впадины, которые образуют шероховатость поверхности слоя TPB. Это означает, что распределение энергии, выделяемой в жидком аргоне от распадов ^{210}Po с поверхности AV, является более широким, чем предсказывает моделирование Монте-Карло. Кроме того, фактическая толщина TPB в среднем может быть немного больше или меньше 3 мкм, что приводит к сдвигу числа зарегистрированных фотоэлектронов, поскольку количество энергии, потерянной в TPB, может быть меньше или больше предсказанного моделированием. Аналогично второй набор параметров размытия используется для учета не идеальной сферичности объема LAr. Эти параметры используются только для вклада распадов ^{222}Rn в объем LAr. Список параметров, используемых для подсчета активности ^{210}Po представлены в таблице 3.1

Вес компоненты w^4 от распадов ^{222}Rn был рассчитан следующим образом: были профитированы с помощью функции Гаусса пик от распадов ^{210}Po на поверхности AV, в объеме AV, на поверхности TPB и на поверхности раздела TPB/LAr и пик от распадов ^{222}Rn . Далее был найден вклад от пика ^{222}Rn : 4.65%. Далее данное значение было решено положить фиксированным и не варьировать в процессе подсчета вклада других компонент. Полученные значения параметров представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Параметры компонент, вносящие вклад в спектр ^{210}Po

Параметр	Описание параметра	Начальное значение	Диапазон
σ_{TPB}	Размытие ширины пика для распадов ^{210}Po	1.0	[0.9, 1.1]
μ_{TPB}	Размытие среднего для распадов ^{210}Po	0.0	[0, 0.1]
σ_{LAr}	Размытие ширины пика для распадов ^{222}Rn в LAr	1.0	[0.9, 1.0]
μ_{LAr}	Размытие среднего для распадов ^{222}Rn в LAr	0.0	[0, 0.1]
w^0	Вес компоненты для ^{210}Po на поверхности AV	0.70	[0.01, 1.0]
w^1	Вес компоненты для ^{210}Po в объеме AV	0.20	[0.01, 1.0]
w^2	Вес компоненты для ^{210}Po на поверхности TPB	10^{-5}	[0.0, 3.0]
w^3	Вес компоненты для ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr	10^{-5}	[0.0, 3.0]
w^4	Вес компоненты для ^{222}Rn в объеме LAr	0.0465	[0.0465; 0.0465]

Таблица 3.2 – Полученные значения весов компонент

Параметр	Значение параметра
σ_{TPB}	0.045
μ_{TPB}	0.95
σ_{LAr}	0
μ_{LAr}	1
w^0	$75.8002 \pm 0.6762\%$
w^1	$17.7809 \pm 0.4210\%$
w^2	$0.00 \pm 0.2\%$
w^3	$3.8887 \pm 0.3006\%$
w^4	$4.65 \pm 0.00\%$

При фитировании был получен следующий график:

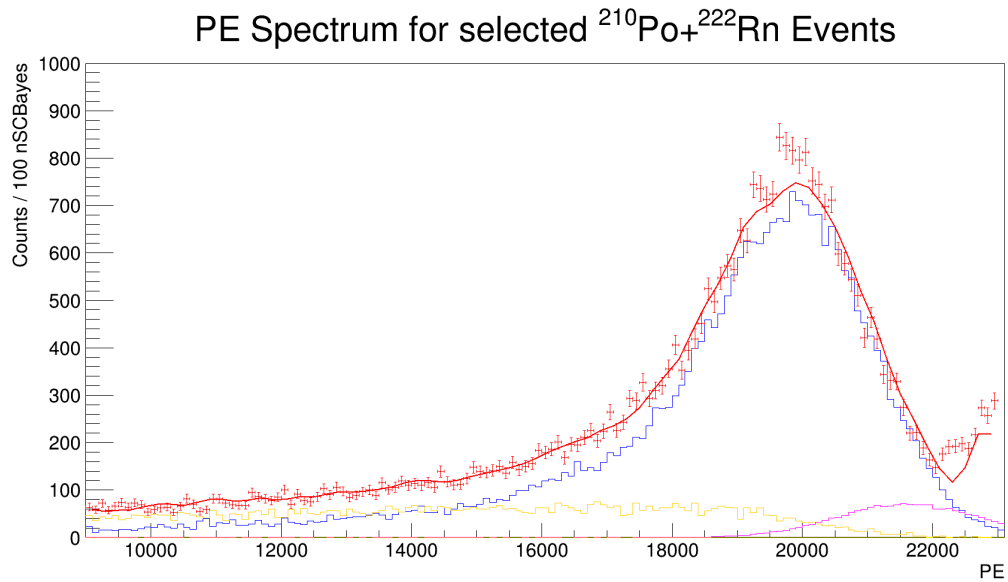


Рисунок 3.1 – Фитирование спектра ^{210}Po в диапазоне $9000 \div 23000$ PE ($\chi^2_{min} = 2.861$)

3.2.1 Корреляции между весами компонент

Значения корреляции между каждым из весовых компонентов показаны в таблице (весовая компонента ^{222}Rn в объеме LAr положена фиксированной):

Таблица 3.3 – Значения корреляций между весами компонент

w_{ij}	w_0	w_1	w_2	w_3
w_0	1	-0.53511	-0.0019398	-0.48198
w_1	-0.53511	1	0.00028411	0.22023
w_2	-0.0019398	0.00028411	1	-0.0021698
w_3	-0.48198	0.22023	-0.0021698	1

На рисунках 3.2, 3.3 и 3.4 показаны корреляционные контуры между каждым из весовых компонент w_i по отношению к значению χ^2/ndf .

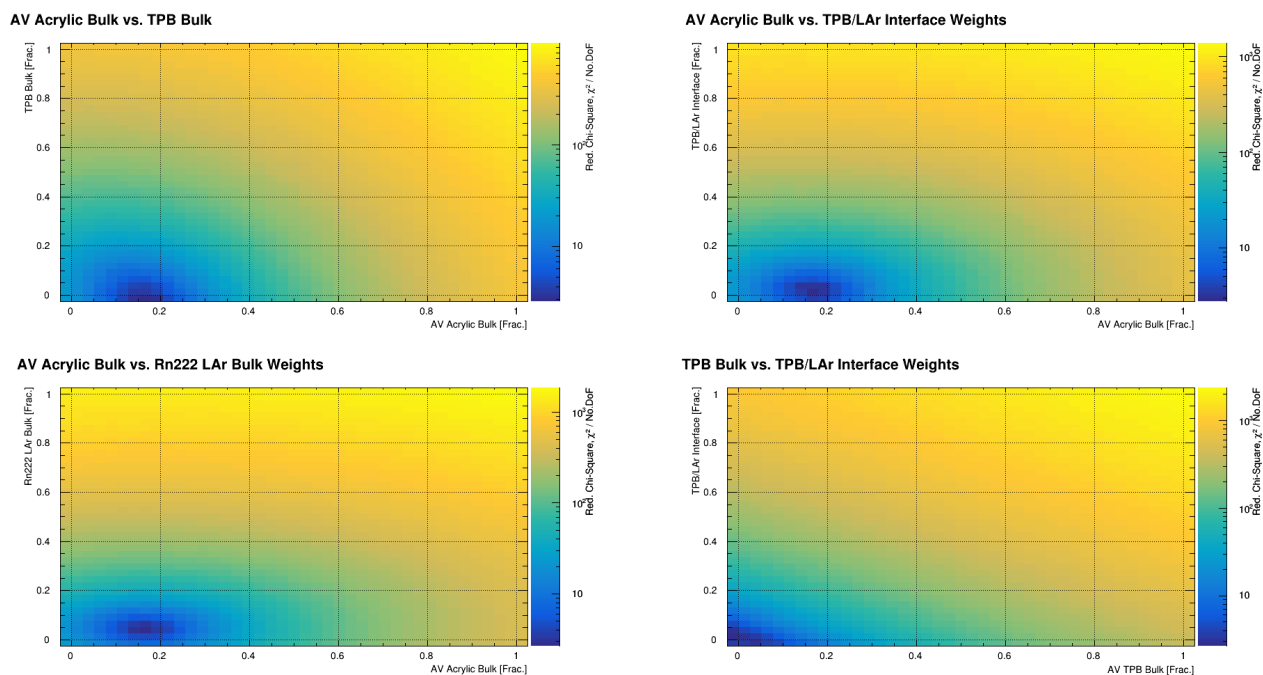
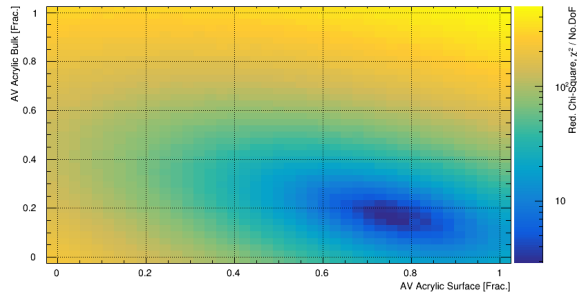
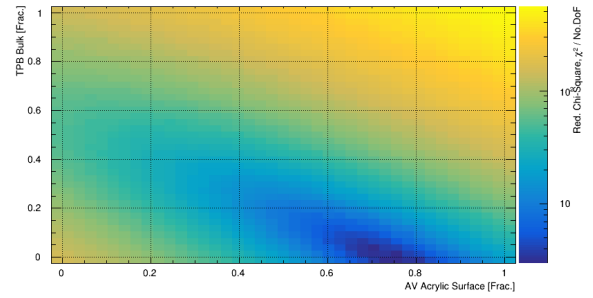


Рисунок 3.2 – Вверху слева: корреляция между ^{210}Po в объеме AV и ^{210}Po на поверхности AV. Вверху справа: корреляция между ^{210}Po в объеме TPB и ^{210}Po на поверхности AV. Внизу слева: ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr и ^{210}Po на поверхности AV. Внизу справа: ^{222}Rn в LAr и ^{210}Po на поверхности AV

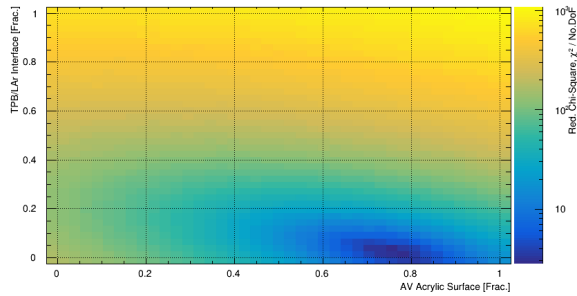
AV Acrylic Surface vs. AV Acrylic Bulk Weights



AV Acrylic Surface vs. TPB Bulk



AV Acrylic Surface vs. TPB/LAr Interface Weights



AV Acrylic Surface vs. Rn222 LAr Bulk Weights

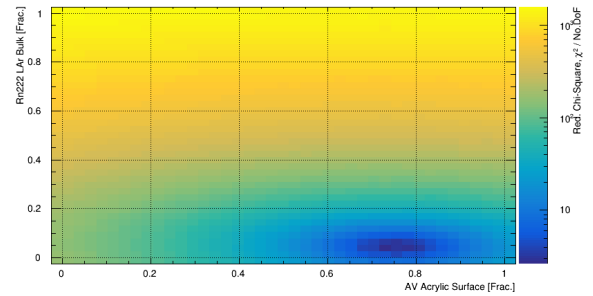
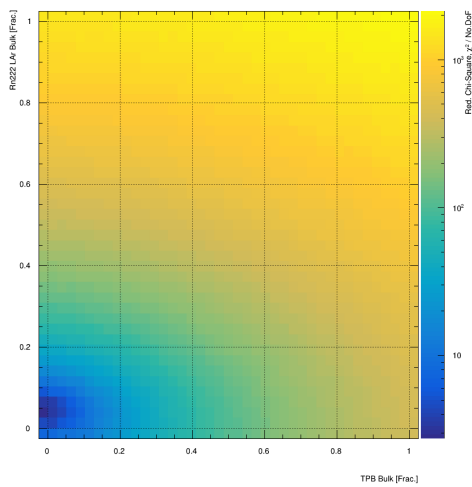


Рисунок 3.3 – Вверху слева: корреляция между ^{210}Po в объеме TPB и ^{210}Po в объеме AV. Вверху справа: корреляция между ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr и ^{210}Po в объеме AV. Внизу слева: ^{222}Rn в LAr и ^{210}Po в акриловой массе AV. Внизу справа: корреляция между ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr и в объеме TPB

Rn222 LAr Bulk vs. TPB Bulk



Rn222 LAr Bulk vs. TPB/LAr Interface

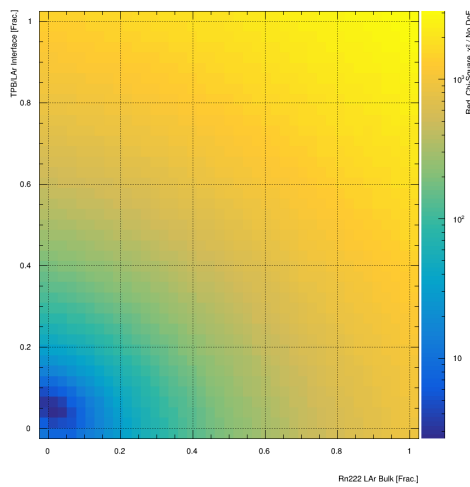


Рисунок 3.4 – Корреляция между ^{222}Rn в LAr и ^{210}Po в объеме TPB (слева) и на границе раздела TPB/LAr (справа)

3.3 Вероятности срабатывания триггеров

Чтобы определить количество сработавших триггеров $N_{trig.}$, нужно учитывать вероятность срабатывания ϵ^u , которая была получена из моделирования МС:

Таблица 3.4 – Вероятности срабатывания триггеров

Компонента	Вероятность срабатывания триггера, %	Доля от начального значения, %
^{210}Po на поверхности AV	43.24 ± 0.28	20.83 ± 0.10
^{210}Po в объеме AV	10.59 ± 0.12	91.57 ± 1.03
^{210}Po на поверхности TPB	45.95 ± 0.29	63.68 ± 0.39
^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr	47.68 ± 0.27	54.02 ± 0.30
^{222}Rn в объеме LAr	4.11 ± 0.15	96.03 ± 3.40

3.4 Коррекция наложений

В случае идентификации наложений (применения ограничения $subeventN == 1$) доля событий от начального значения (4.17%) примерно согласуется с прогнозируемой скоростью наложения событий в пределах исследуемого диапазона PE, совпадающим с ^{39}Ar ($4.18 \pm 0.15\%$). Эта вероятность рассчитывается исходя из того, что масса LAr равна 3279 ± 96 кг с удельной активностью 0.951 ± 0.036 Бк кг^{-1} для окна совпадений $13,5 \mu\text{с}$. Удалив наложение, мы гарантируем, что спектральная форма оставшегося распределения PE отражает только отдельные события. Однако эти потери в распадах ^{210}Po и ^{222}Rn необходимо учитывать при подсчете общего количества сработавших триггеров для вычисления активности. Поэтому делается следующее предположение: все события, удаленные с помощью ограничения $subeventN == 1$ – это события ^{210}Po или ^{222}Rn , совпавшие с ^{39}Ar . Наложения носят случайный характер и не зависят ни от какой компоненты, рассматриваемой при вычислении активности. Энергии наложенных с ^{39}Ar событий недостаточно, чтобы событие от распада ^{210}Po и ^{222}Rn вышло за пределы исследуемого интервала значений F_{prompt} .

Исходя из этого предположения, мы должны увеличить количество событий от распадов ^{210}Po и ^{222}Rn в контрольной области (после применения всех ограничений из таблицы 2.3) на коэффициент f_{pileup} , определяемый следующим образом:

$$f_{pileup} = \frac{1}{1 - 0.0417} = 1.044. \quad (3.4)$$

3.5 Вычисление живого времени сбора данных

Живое время сбора данных, рассчитанное для обсуждаемой здесь активности ^{210}Po , отличается от времени, в течение которого проводится поиск частиц скрытой массы WIMP. При низких значениях PE (~ 150) любые конкурирующие события могут вытолкнуть событие из области поиска WIMP, и, следовательно, поправка времени регистрации для поиска событий WIMP будет влиять на вероятность наложения событий от ^{39}Ar ($\sim 4\%$). Однако в случае событий с $PE > 9000$ применение той же поправки не так очевидно.

Рассмотрим, например, событие с $9000 PE$ и $F_{prompt} = 0,70$. Такое событие находится на нижней границе PE исследуемой выборки и поэтому наиболее чувствительно к изменениям значений PE и F_{prompt} из-за наложения событий. В случае, если такое событие от ^{210}Po , имеющее энергию $\sim 9000 PE$, совпадает с событием ^{39}Ar (предполагая, что среднее значение PE составляет $1450 PE$, что рассчитано из образца MC для ^{39}Ar). Вклад от такого событий составит $\sim 0.7 \times 9000 = 6300 PE$, и полный вклад $9000 + 1450 = 10450 PE$. Следовательно, влияние наложения отразится на сдвиге $F_{prompt} 0.70 \rightarrow 0.60$. Таким образом, событие останется в выборке, поскольку мы применяем ограничение $F_{prompt} > 0.55$.

Основываясь на приведенном выше аргументе, единственное объяснение для утечки событий от ^{210}Po из исследуемой области – это случайное совпадение с событиями, на которые сработали ограничения `dtmTrigSrc&0x82` или `calcut&0x31f8`. Из таблицы 2.3 становится ясным, что количество событий, удаленных из выбранной области, составило $37738 - 37486 = 252$. Следовательно, было удалено $252 \times 13.5\text{мкс} = 3.402\text{мс}$ (где $13,5\text{мкс}$ – временное окно регистрации одного события) от общего времени сбора данных. Окончательное живое время сбора данных тогда:

$$t_{live} = 33557691.61 - 3.402 \times 10^{-3} = 33557691.61 \pm 1.00s. \quad (3.5)$$

Ошибка вычисления в этом случае предполагается 1 с. Такое предположение разумно, учитывая, что время регистрации событий является небольшим источником ошибок

при вычислении активности.

3.6 АКТИВНОСТЬ

Используя величины, рассчитанные в разделах 3.2, 3.3 и 3.5, можно рассчитать активности отдельных компонент, используя уравнение (3.2). Полученные значения представлены ниже в таблице 3.5. Активность ^{222}Rn в LAr не является предметом внимания данного анализа и используется только в качестве ограничения.

Таблица 3.5 – Оценка активности для компонент

Компонента	$N_{trig.}$	Активность
^{210}Po на поверхности AV	24898.1	0.156 ± 0.002 мБк/м ²
^{210}Po в объеме AV	6451.59	5.718 ± 0.154 мБк/кг ⁻¹ 2.916 ± 0.049 мБк
^{210}Po на поверхности TPВ	<1	<0.01 мБк/м ²
^{210}Po на поверхности раздела TPВ/LAr	1327.34	0.013 ± 0.001 мБк/м ²
^{222}Rn объеме LAr	1679.27	0.379 ± 0.018 мкБк/кг ⁻¹

Суммируем все поверхностные компоненты (^{210}Po на поверхности AV, ^{210}Po на поверхности TPВ, ^{210}Po на поверхности раздела TPВ/LAr) и учтем корреляции в ошибках следующим образом:

$$\sigma_{surf} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + a_{02}\sigma_0\sigma_2 + a_{03}\sigma_0\sigma_3 + a_{23}\sigma_2\sigma_3}, \quad (3.6)$$

где σ_i – погрешности весов поверхностных компонентов, определяемые во время фитирования, a_{ij} – коэффициент корреляции между компонентами i и j , указанные в таблице 3.3. Таким образом, общая активность ^{210}Po в детекторе включает две компоненты – поверхностную и объемную активность:

$$\begin{aligned} ^{210}\text{Po} \text{ на поверхности} &= 0.152 \pm 0.027 \text{ мБк/м}^2 \\ ^{210}\text{Po} \text{ в объеме} &= 2.875 \pm 0.062 \text{ мБк} \end{aligned}$$

Погрешность поверхностной активности ^{210}Po составляет $(0.031/0.152) \sim 20\%$ и обусловлена неопределенностью объемной составляющей распадов ^{210}Po в ТРВ.

Глава 4

Заключение

В данной работе проводилось исследование α -активности одного из компонент, вносящих вклад в фоновые события эксперимента DEAP-3600, – ^{210}Po . Основными результатами работы стали:

- Выделение региона событий с α -распадами ^{210}Po ;
- Определение вклада различных компонент, вносящих вклад в общую активность ^{210}Po ;
- Вычисление ряда величин, необходимых для расчета активности ^{210}Po , а именно: корреляций между весами компонент, вероятностей срабатывания триггеров, времени регистрации событий. Также была учтена коррекция наложений;
- Вычисление активности ^{210}Po в объеме и на поверхности детектора.

После расчета активности ^{210}Po в разных частях детектора предполагается использовать вышеизложенную модель для прогнозирования количества событий от ^{210}Po , вносящих вклад в область поиска WIMP.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. Изд. 3-е, сущ. перераб. и значит. доп. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 616 с.; цв. вкл. (стр.84)
- [2] G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk, *Phys. Rep.* 405, 279 (2005).
- [3] E. Aprile et al. (XENON Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 121, 111302 (2018).
- [4] P.-A. Amaudruz et al. (DEAP-3600 Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 121, 071801 (2018).
- [5] P.-A. Amaudruz et al. (DEAP-3600 Collaboration), *Astropart. Phys.* 108, 1 (2019).
- [6] P.-A. Amaudruz et al. (DEAP-3600 Collaboration), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 922, 373 (2019)