

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 ПРЕДДИПЛОМНОЙ ПРАКТИКЕ НА ТЕМУ:
**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬФА-АКТИВНОСТИ В
ДЕТЕКТОРЕ DEAP-3600**

Научный руководитель
Доц., к.ф.-м.н.

_____ А. В. Гробов

Студент

_____ М. А. Семичева

Москва 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Эксперимент DEAP-3600	7
1.1 Устройство детектора	7
1.2 Ожидаемые фоновые события	10
1.2.1 Общее количество ожидаемых фоновых событий	10
1.2.2 Фоновые события от альфа-распадов ядер	11
1.2.3 Фоновые события от альфа-распадов ^{210}Po	12
2 Анализ экспериментальных данных	18
2.1 Вычисление активности	18
2.2 Вычисление весов компонент	20
2.2.1 Корреляции между весами компонент	23
2.3 Вероятности срабатывания триггеров	28
2.4 Коррекция наложений	30
2.5 Вычисление живого времени сбора данных	31
2.6 Активность	32
2.7 Вклад в область поиска WIMP	33
3 Заключение	39

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 [Gorbunov; 2016]. 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 [Bertone; 2005]. 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 ГэВ/ c^2 (при доверительном уровне 90%) [Aprile; 2018]. На Рисунке 1 представлены верхние пределы сечения рассеяния WIMP-ов на ядре в зависимости от массы WIMP для некоторых действующих экспериментов.

Одним из ведущих экспериментов по поиску темной материи является эксперимент DEAP-3600. Коллаборация DEAP – это группа из более чем 65 исследователей из 18 учреждений Канады, Великобритании, Мексики, Германии, Испании и России, разработавших один из самых чувствительных детекторов для прямого обнаружения темной материи.

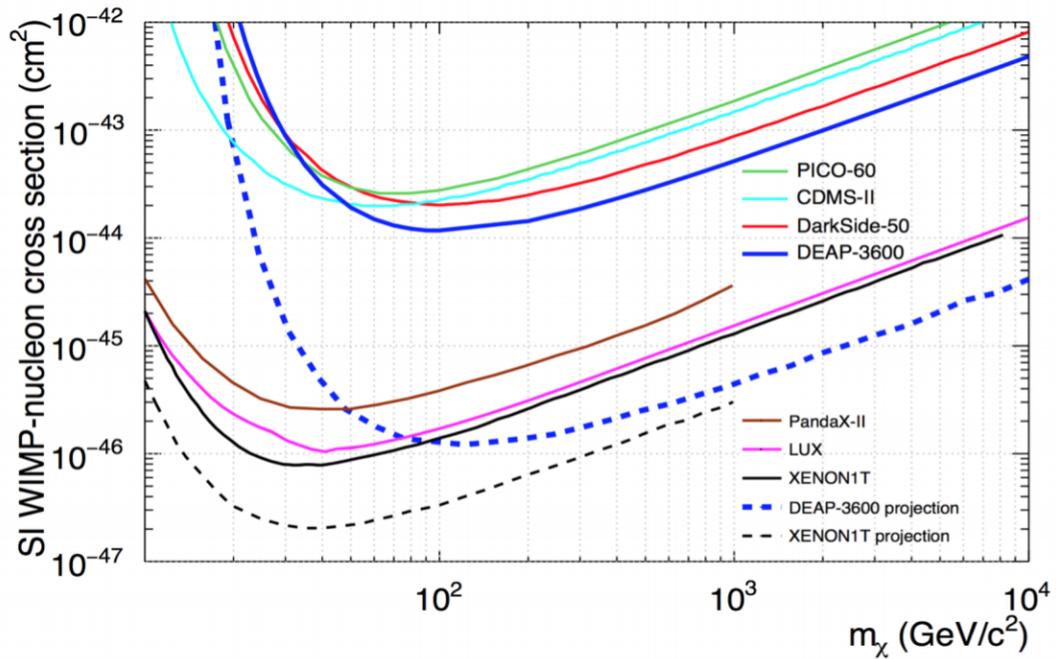


Рисунок 1 — Верхние пределы сечения рассеяния WIMP-ов на ядре в зависимости от массы WIMP для эксперимента DEAP-3600 (сплошная синяя линия) и для других экспериментов (сплошные линии). Также показаны прогнозы для DEAP-3600 и Xenon1T (пунктирные линии).

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 [Amaudruz; 2018]. 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;
- Вычисление вклада от α -распадов ^{210}Po с поверхности детектора в область поиска WIMP: расчет вероятности утечки.

1 глава работы содержит описание устройства детектора DEAP-3600 и основных источников фона, а именно рассматривается общее количество ожидаемых фоновых событий и фоновые события от альфа-распадов ^{210}Po . Образцы альфа-распадов ^{210}Po были сгенерированы с помощью метода Монте-Карло на кластере *graham* Compute Canada с использованием библиотеки RAT v5.9.5. Физические данные, полученные за 3 года сбора данных, были обработаны с использованием той же версии RAT. Помимо распределения всех экспериментальных данных, в главе также представлены краткое описание критериев отбора, которые были использованы для выделения региона событий с альфа-распадами ^{210}Po , и распределение оставшегося количества событий после применения ряда ограничений.

2 глава отчета содержит описание анализа экспериментальных данных. Прежде всего представлено выражение, позволяющее определить вклад различных компонент в общую активность ^{210}Po – Уравнение 2.1. Далее следует описание методик и результатов вычисления ряда величин, необходимых для расчета активности ^{210}Po . Во-первых, в пункте 2.2 представлены результаты фитирования пика в спектре ^{210}Po , итоговые значения весов компонент и корреляции между ними. Во-вторых, пункт 2.3 содержит расчет вероятностей срабатывания триггеров для каждой из рассматриваемых компонент. В-третьих, в пункте 2.4 представлено вычисление коэффициента, необходимого для учета коррекции наложений. В-четвертых, пункт 2.5 включает расчет живого време-

ни сбора данных. В итоге, в пункте 2.6 была получена оценка активности ^{210}Po в разных частях детектора. Заключительный 2.7 пункт второй главы содержит рассуждения, позволяющие дать прогноз количества поверхностных событий от альфа-распадов ^{210}Po в области поиска WIMP (ROI).

В 3 главе представлено заключение, содержащее краткое описание результатов работы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ DEAR-3600

1.1. УСТРОЙСТВО ДЕТЕКТОРА

Схема поперечного сечения детектора DEAR-3600 показана на Рисунке 1.1. Полная конструкция детектора подробно описана в [Amaudruz; 2019].

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 8 дюймов (20,32 см). Характеристики этих PMT описаны в [Amaudruz2; 2019]. 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 (TRB) 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 TRB свет достигает акрилового 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

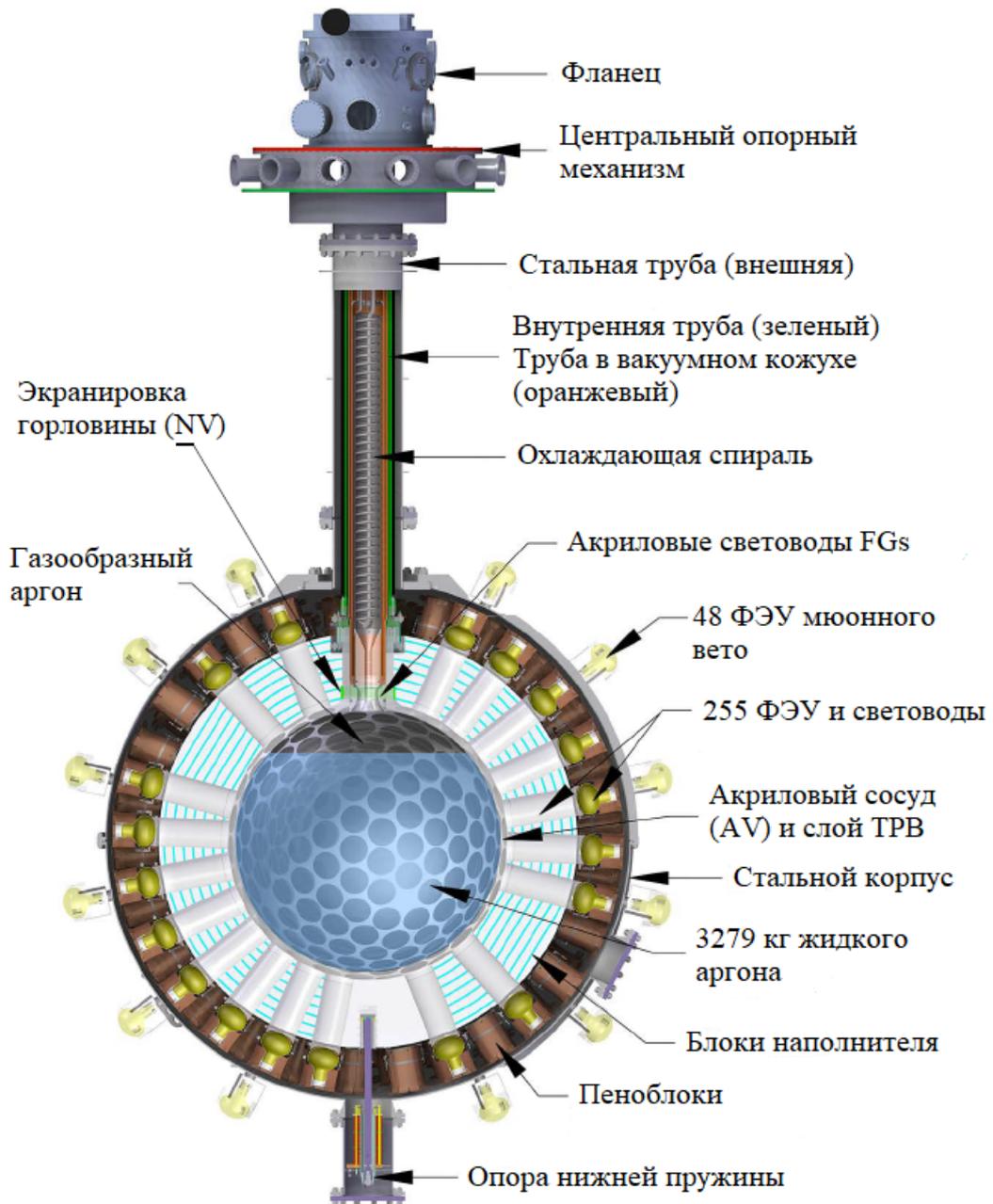


Рисунок 1.1 — Схема поперечного сечения детектора DEAR-3600

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), ко-

торый 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 мечения 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 калибровочных 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.

1.2. ОЖИДАЕМЫЕ ФОНОВЫЕ СОБЫТИЯ

1.2.1. ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ОЖИДАЕМЫХ ФОНОВЫХ СОБЫТИЙ

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

$$N_{bkg} = N_{er} + N_{Cher} + N_{n,rdg} + N_{n,csq} + N_{\alpha,AV} + N_{\alpha,neck} , \quad (1.1)$$

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

На Рисунке 1.2 выделены различные популяции фоновых событий: при высоких значениях F_{prompt} (параметр дискриминации формы импульса – доля фотоэлектронов, обнаруженных вблизи времени события) альфа-распады радона и его дочерних элементов наблюдаются в объеме LAr и на поверхности AV при высоких энергиях. Регион поиска событий от частиц CM (ROI WIMP) находится в этой полосе при низких энергиях. При низких значениях F_{prompt} наблюдаются взаимодействия электронов отдачи от внутренних бета-распадов в LAr и внешних гамма-источников. В полосе электронов отдачи преобладают распады ^{39}Ar внутри LAr (до 4500 PE) [Lehnert; 2018].

Таким образом, основными источниками фона в ROI WIMP являются: (1) утечка альфа-распадов с высокой энергией в сторону низких энергий из-за частичного выделения энергии в LAr или потери сцинтилляционного света в области горловины сосуда; (2) утечка ^{39}Ar и других взаимодействий электронов отдачи из области с низкими значениями F_{prompt} в области с высокими значениями F_{prompt} , или (3) упругие столкновения нейтронов с ядрами ^{40}Ar , которые взаимодействуют таким же образом, что и WIMP.

На Рисунке 1.2 выделены полосы ядер и электронов отдачи, а также их наиболее характерные особенности. ROI для WIMP составляет около 93–200 PE при низких энергиях.

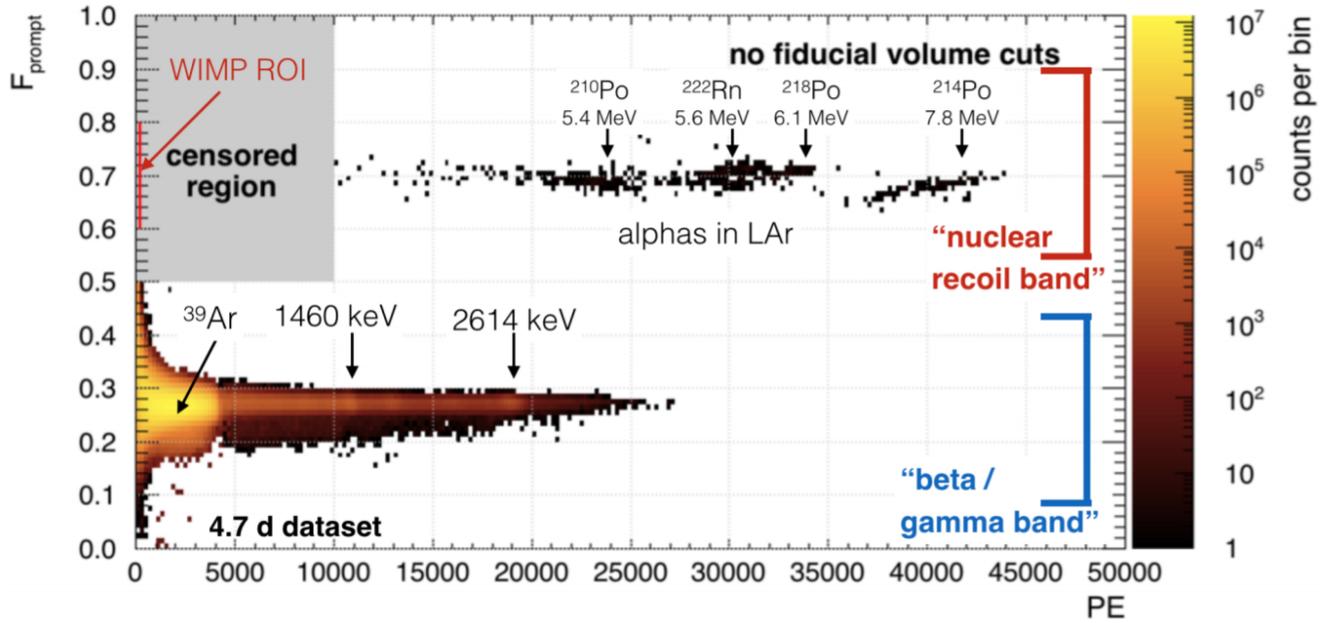


Рисунок 1.2 — График зависимости параметра дискриминации формы импульса (PSD) F_{prompt} от количества зарегистрированных фотоэлектронов PE для данных, набранных за 4,7 д.

1.2.2. ФОНОВЫЕ СОБЫТИЯ ОТ АЛЬФА-РАСПАДОВ ЯДЕР

Преобладающее количество альфа-распадов в детекторе DEAP-3600 происходят от ^{222}Rn , ^{220}Rn и их дочерних элементов, исходящих из объемных материалов в трубопроводе и попадающих в LAr. Еще один вклад в альфа-распады дает ^{210}Pb (дочерний элемент ^{222}Rn с $T_{1/2} = 22.2$ г) на внутренней поверхности AV, который распадается на ^{210}Po , который, в свою очередь, испытывает альфа-распад с $E_{\alpha} = 5304$ кэВ.

Альфа-распады с энергиями > 5 МэВ могут быть восстановлены в ROI WIMP, если (1) распад происходит на поверхностях, и только часть его энергии поглощается в сцинтилляционном материале, или (2) детектируется только часть сцинтилляционного света. В DEAP-3600 случай (1) может возникать на поверхности раздела ТРВ/LAr, в объеме ТРВ, на поверхности раздела ТРВ/AV или в объеме AV, находящемся в нескольких микронах от поверхности.

Альфа-распады в объеме LAr наблюдаются от ядер ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Po и ^{220}Rn . В объеме LAr регистрируется полная энергия события; однако при высоких энергиях ФЭУ имеют свойство насыщаться, и наблюдается радиальная зависимость светового выхода.

Альфа-активные ядра из уранового (^{238}U) и ториевого (^{232}Th) рядов, вно-

сящие вклад в фоновые события в детекторе DEAP-3600, представлены в таблицах 1.1 и 1.2:

Таблица 1.1 — 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 1.2 — 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

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

1.2.3. ФОНОВЫЕ СОБЫТИЯ ОТ АЛЬФА-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

1.3. Ряд пиков представляют собой распады, произошедшие в разных частях детектора (в зависимости от удаленности от 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 TPB ($850,997 < r_{MC} < 851,000$ мм)
- На поверхности раздела LAr/TPB ($r_{MC} = 850,997$ мм)

α MC Populations

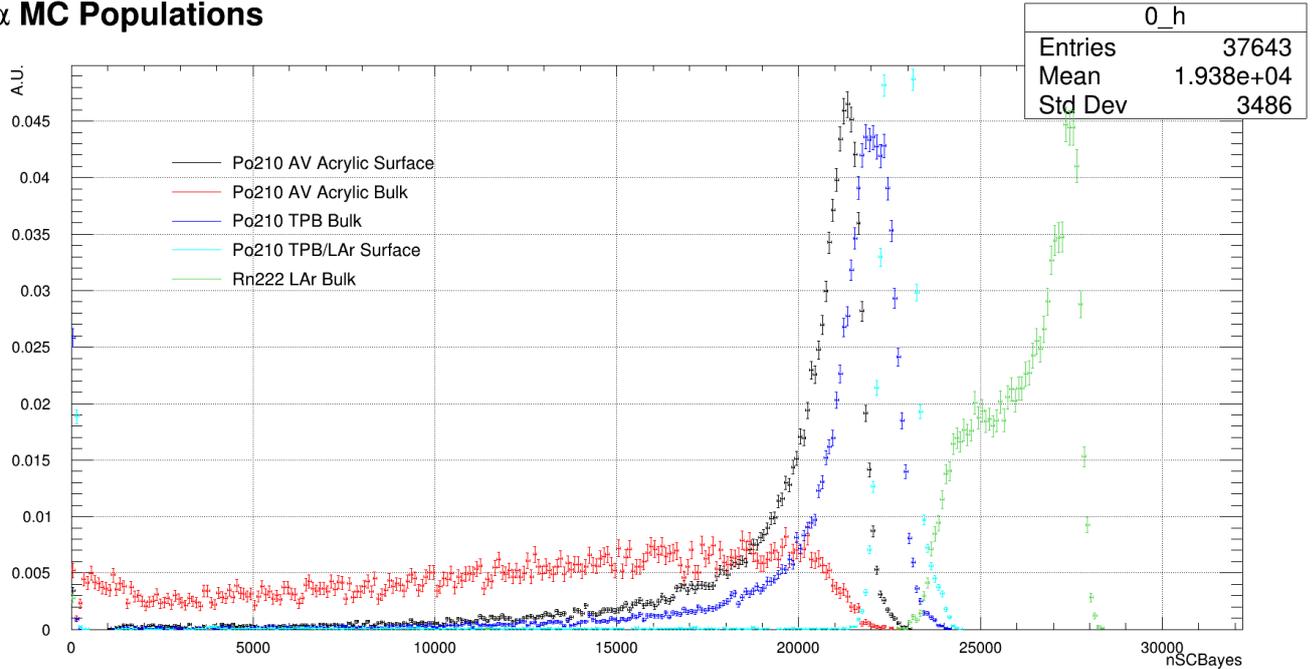


Рисунок 1.3 — Распределения фотоэлектронов от α -распадов ^{210}Po в разных частях детектора, а также близлежащее распределение фотоэлектронов от α -распадов ^{222}Rn в объеме LAr: черным обозначены события от ^{210}Po на поверхности AV, красным – события от ^{210}Po в объеме AV, синим – в объеме TPB, голубым – на поверхности раздела TPB/LAr, зеленым – события от ^{222}Rn в объеме LAr

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

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 подавле-

ния 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 1.4 представлено двумерное распределение α -распадов ^{210}Po .

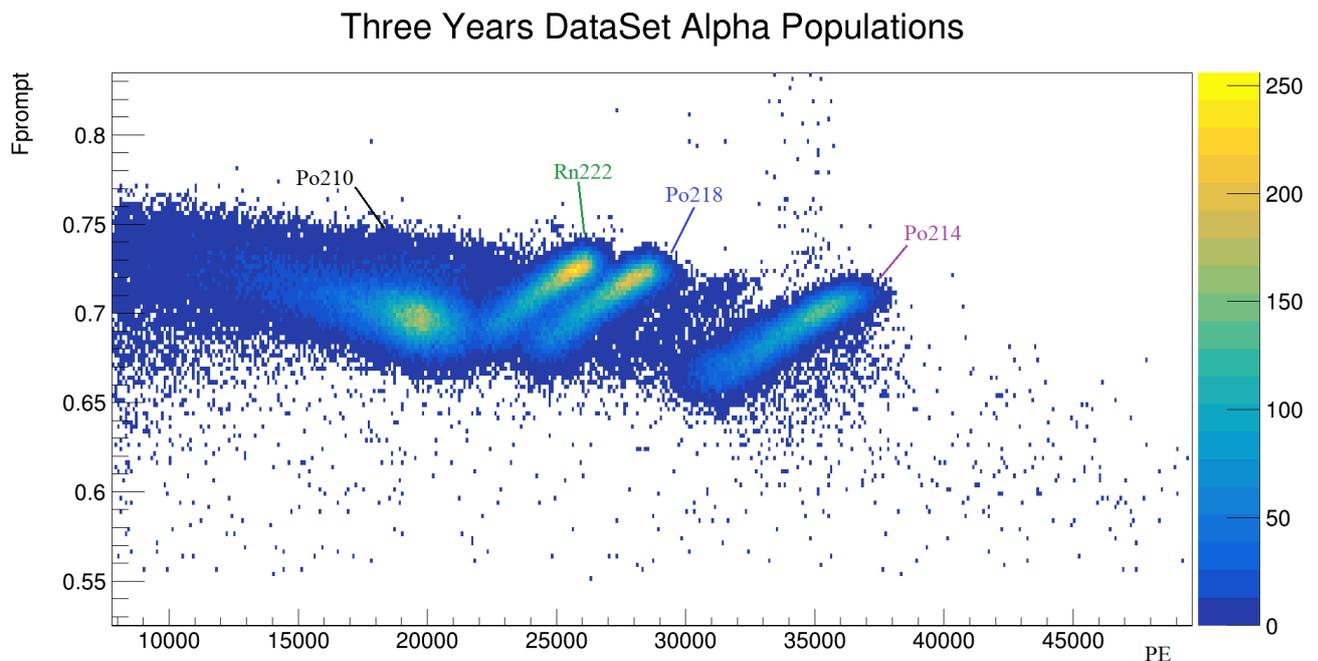


Рисунок 1.4 — Распределение экспериментальных данных в плоскости (F_{prompt}, PE) , где PE — количество фотоэлектронов

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 PE . Степень, в которой восстановление ухудшается из-за насыщения и отсечения, в значительной степени зависит от положения. Зависимость этих эффектов от положения показана на рисунке 1.5.

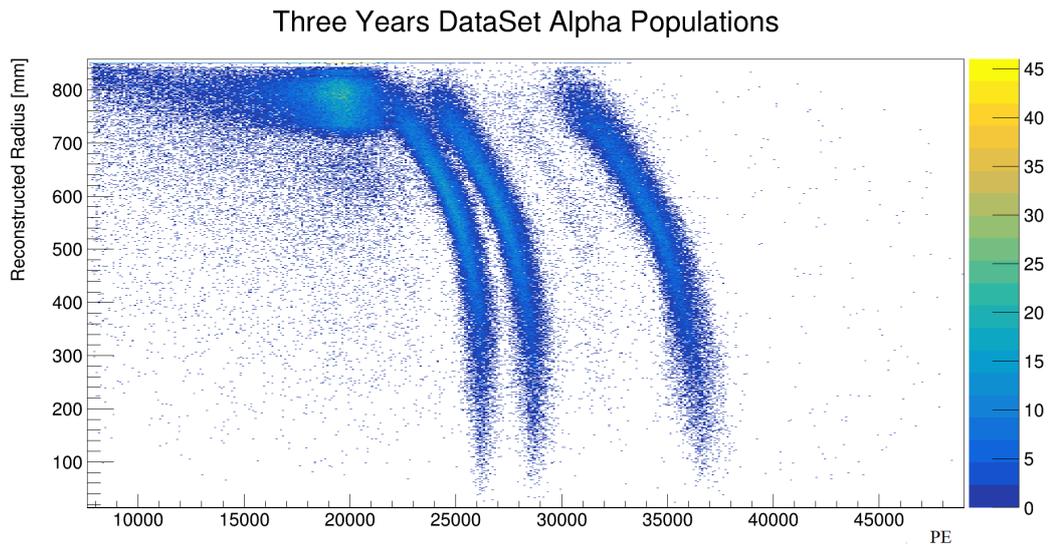


Рисунок 1.5 — Распределение экспериментальных данных в плоскости (Радиус, PE) при высоких значениях $f_{prompt} > 0.55$. Уменьшение объема данных при больших радиусах объясняется эффектами отсечения и насыщения в ФЭУ. Были применены только низкоуровневые критерии отбора ($(!(Calcut&0x31f8))$), $(!(dtmTrigSrc&0x82))$

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 LAr. 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;
- $fmaxpe < 0,75$: ограничение, предназначенное для исключения черенковских событий.

В таблице 1.3 перечислены все критерии отбора, а также представлено количество событий α -распадов ^{210}Po , оставшихся после их применения.

Таблица 1.3 — Критерии отбора, используемые для выделения региона событий с α -распадами ^{210}Po

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

После применения ограничений распределение событий в координатах ($Fprompt$, PE) приняло вид, представленный на Рисунке 1.6.

Для вычисления активности источника α -распадов и фита разных компонент (вклад распадов с поверхности AV, объема AV, объема ТРВ и поверхности раздела LAr/ТРВ) был построен одномерный график, представленный на Рисунке 1.7, демонстрирующий те же данные, что и Рисунок 1.6.

Fprompt vs. nSCBayes Three Years Dataset

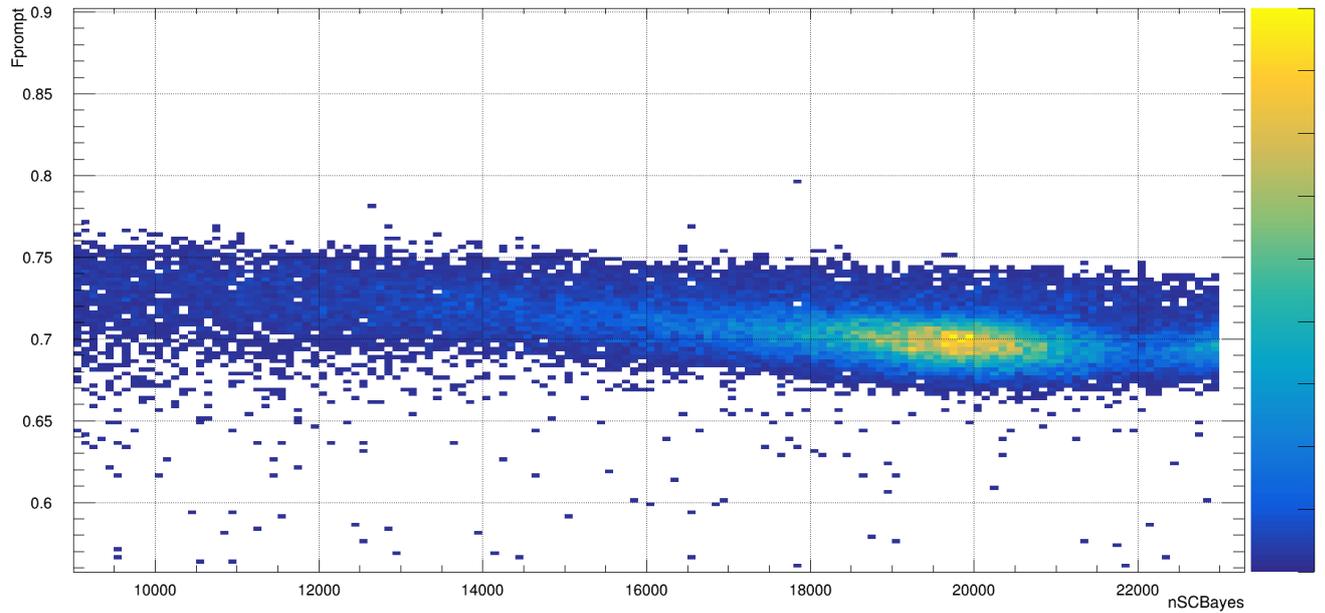


Рисунок 1.6 — Распределение оставшегося количества событий после применения ограничений для выделения интересующей области событий от α -распадов ^{210}Po

nSCBayes Three Years Dataset

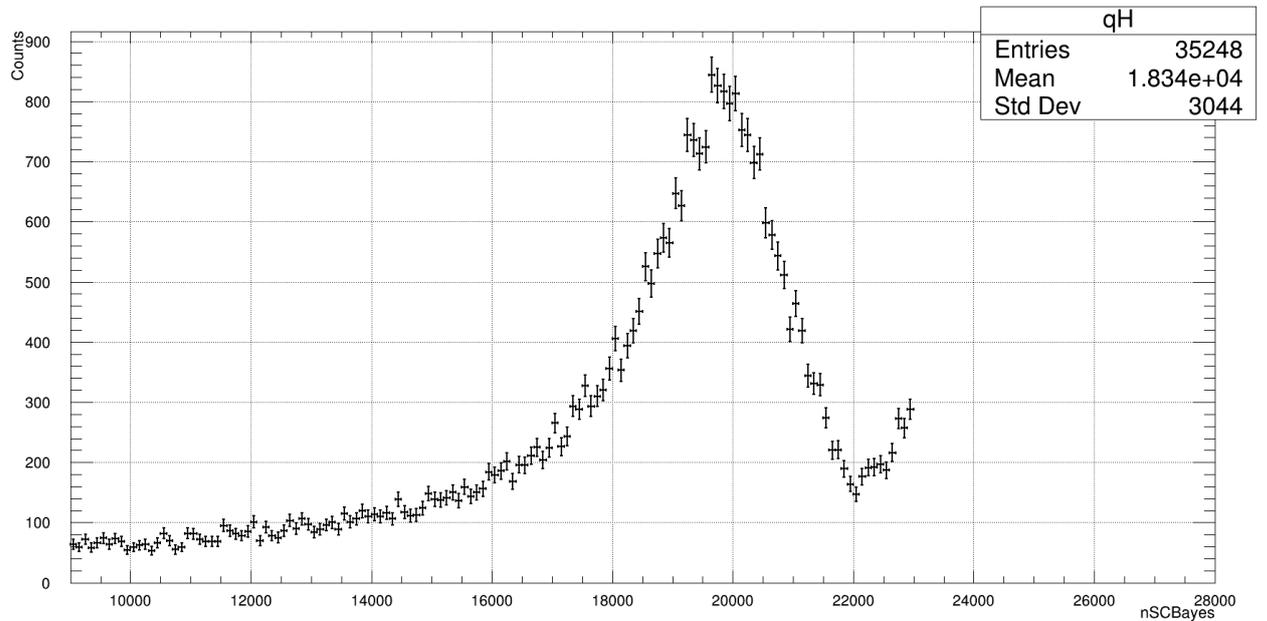


Рисунок 1.7 — Распределение оставшегося количества событий после применения ограничений для выделения интересующей области событий от α -распадов ^{210}Po (одномерное распределение)

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1. ВЫЧИСЛЕНИЕ АКТИВНОСТИ

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

$$N_{trig.} = \sum_u^{N_{comp}} (w^u f_{pileup} N_{trig}) = t_{live} \times \left(\sum_u^{N_{comp}} \mathcal{A}^u \epsilon^u A^u \right), \quad \sum_u^{N_{comp}} w^u = 1. \quad (2.1)$$

Здесь u – индекс компоненты, которая вносит вклад в спектры фотоэлектронов, показанные на рисунках 1.6, 1.7. 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 (2.1), 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 1.3;
- 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 TPB (аппроксимируем как поверхность) или на поверхности раздела TPB/LAr), либо объем (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:

$$\mathcal{A}^u A^u = \frac{w^u f_{pileup} N_{trig.}}{\epsilon^u t_{live}} [Bq] . \quad (2.2)$$

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} :

$$N_{trig.}^u = w^u f_{pileup} N_{trig.} . \quad (2.3)$$

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 области PE, где ожидается наличие сигнала от WIMP.

2.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕСОВ КОМПОНЕНТ

Чтобы определить значения весов компонент w^u , выполняется фитирование каждой из компонент (1.3) и одномерного спектра, полученного при анализе данных (Рисунок 1.7). 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 2.1

Таблица 2.1 — 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]

Продолжение Таблицы 2.1 – Параметры компонент, вносящие вклад в спектр ^{210}Po

Параметр	Описание параметра	Начальное значение	Диапазон
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	[0.0; 0.1]

Из сравнения графиков на Рисунках 1.3 и 1.7 становится ясно, что в зависимости от верхнего значения ФЭ, используемого для выполнения фитирования, будут получены разные результаты фита. Это можно объяснить тем, что для любого диапазона (бина) ФЭ вклад от различных компонент будет разным. Чтобы проиллюстрировать это, фитирование было выполнено несколько раз с использованием разных верхних значений ФЭ. Нижняя граница в 9000 ФЭ оставалась фиксированной. На Рисунках 2.1 показаны три примера, в которых верхняя граница ФЭ была установлена равной 22000, 23000 и 24000 соответственно.

При дальнейшем увеличении диапазона ФЭ вклад акриловой поверхности AV в фит остается устойчивым к изменениям верхней границы ФЭ. Наибольшие изменения можно увидеть для компоненты поверхности раздела TPB/LAr в результате вклада от распадов ^{222}Rn .

В итоге весовые компоненты, используемые в дальнейшем, это те, которые были получены с верхним пределом в 23000 ФЭ ($\chi^2/ndf = 2.27$). Такой диапазон позволяет при фитировании наложить ограничения на вклад от ^{222}Rn в хвост распределения распадов ^{210}Po . При 24000 ФЭ это тоже верно, но качество соответствия хуже ($\chi^2/ndf = 7.19$), так как при 24000 ФЭ вклад в спектр также вносит ^{218}Po . Полученные значения параметров фитирования представлены в таблице 2.2.

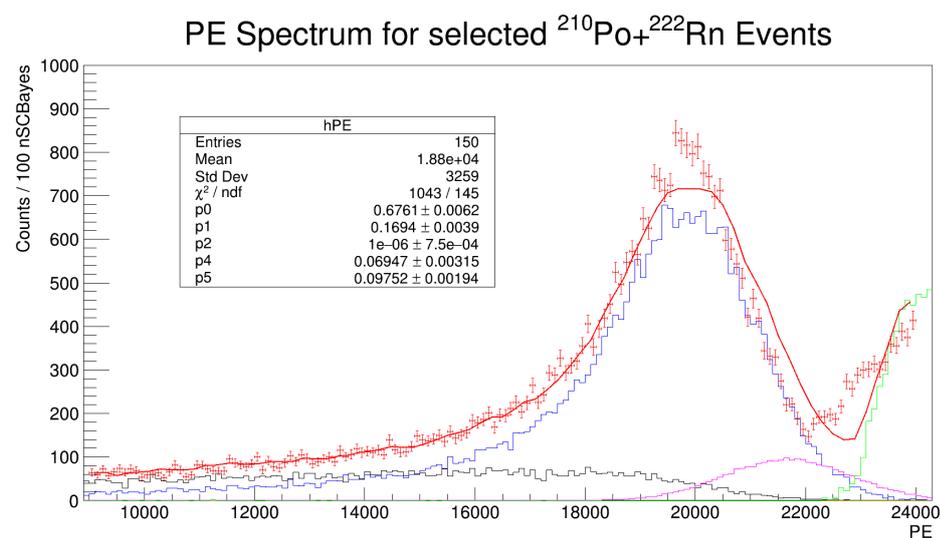
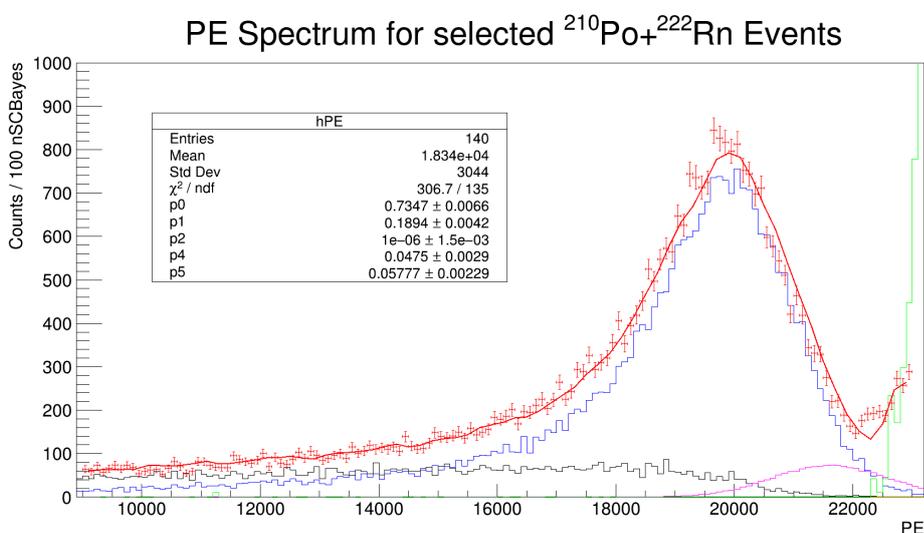
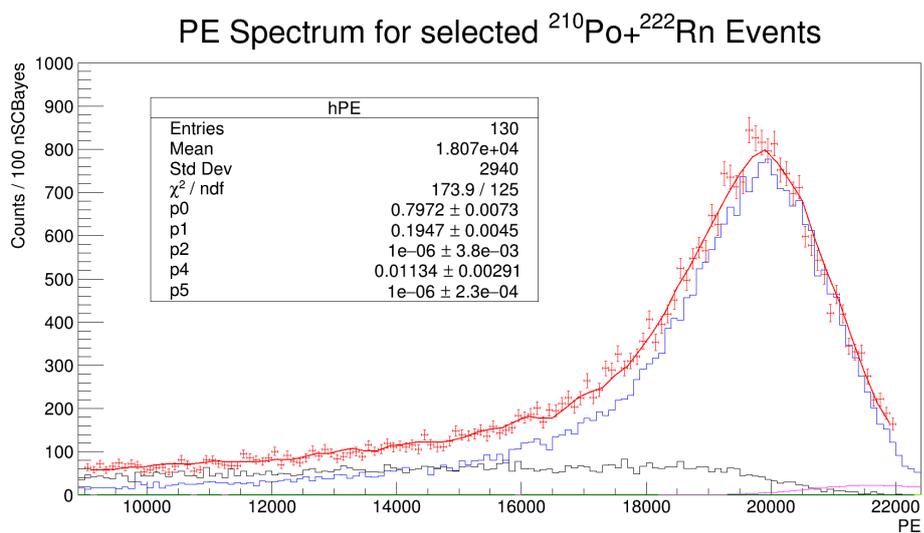


Рисунок 2.1 — Фитирование пика ^{210}Po (экспериментальные данные) с разными значениями верхней границы для количества ФЭ, сверху вниз: 22000, 23000, 24000 ФЭ.

Таблица 2.2 — Полученные значения весов компонент

Параметр	Значение параметра
σ_{TPB}	0.045
μ_{TPB}	0.95
σ_{LAr}	0.00
μ_{LAr}	1.00
w^0	$73.5 \pm 0.7\%$
w^1	$18.9 \pm 0.4\%$
w^2	$0.00 \pm 0.15\%$
w^3	$4.8 \pm 0.3\%$
w^4	$5.8 \pm 0.2\%$

2.2.1. КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ВЕСАМИ КОМПОНЕНТ

Значения корреляции между каждым из весовых компонент показаны в таблице:

Таблица 2.3 — Значения корреляций между весами компонент

w_{ij}	w_0	w_1	w_2	w_3	w_4
w_0	1	-0.53316	-0.0014738	-0.44075	0.12738
w_1	-0.53316	1	0.00021494	0.2056	-0.061231
w_2	-0.0014738	0.00021494	1	-0.0017904	0.00022763
w_3	-0.44075	0.2056	-0.0017904	1	-0.34849
w_4	0.12738	-0.061231	0.00022763	-0.34849	1

На рисунках 2.2, 2.3 и 2.4 показаны корреляционные контуры между каждым из весовых компонент w_i по отношению к значению χ^2/ndf .

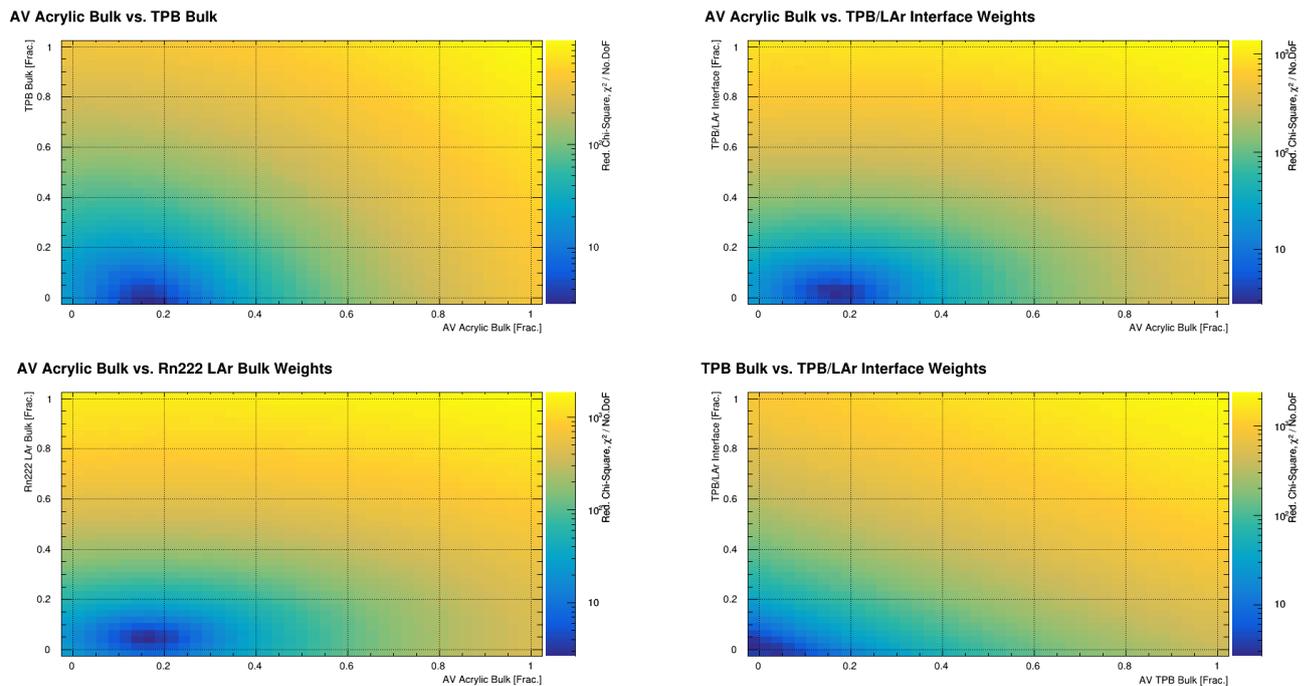


Рисунок 2.2 — Вверху слева: корреляция между ^{210}Po в объеме AV и ^{210}Po на поверхности AV. Вверху справа: корреляция между ^{210}Po в объеме TPB и ^{210}Po на поверхности AV. Внизу слева: ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr и ^{210}Po на поверхности AV. Внизу справа: ^{222}Rn в LAr и ^{210}Po на поверхности AV

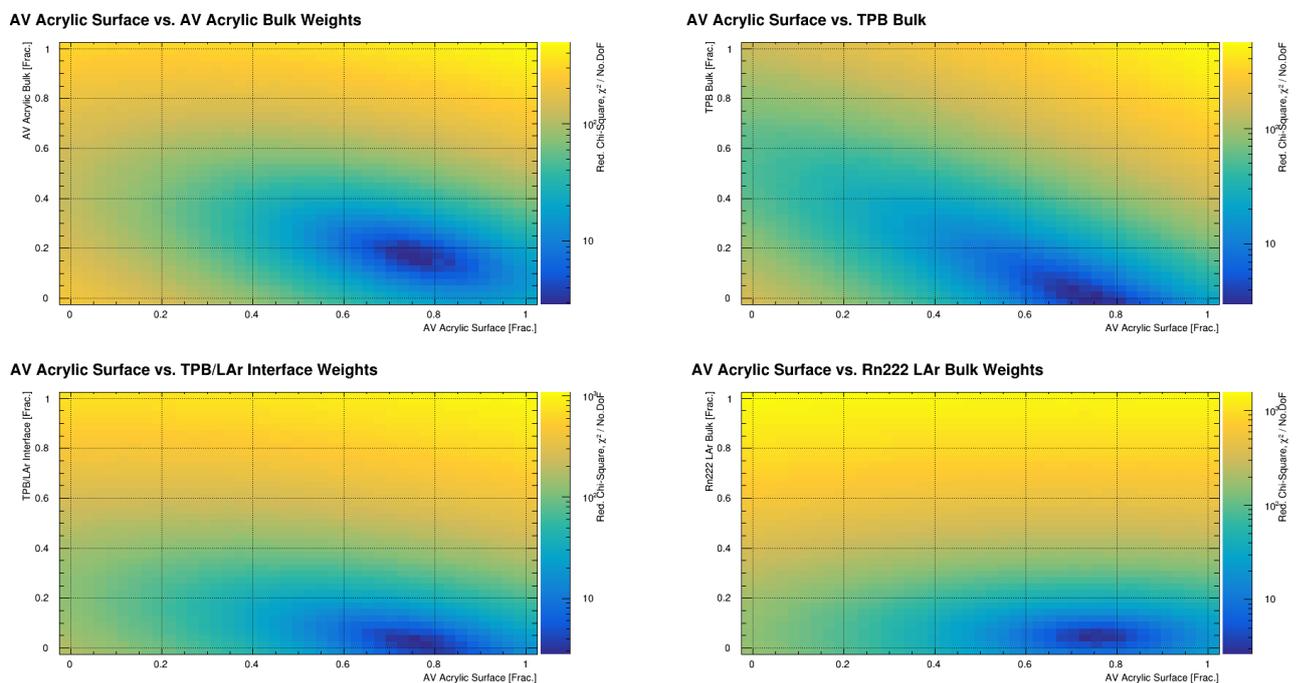


Рисунок 2.3 — Вверху слева: корреляция между ^{210}Po в объеме TPB и ^{210}Po в объеме AV. Вверху справа: корреляция между ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr и ^{210}Po в объеме AV. Внизу слева: ^{222}Rn в LAr и ^{210}Po в акриловой массе AV. Внизу справа: корреляция между ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr и в объеме TPB

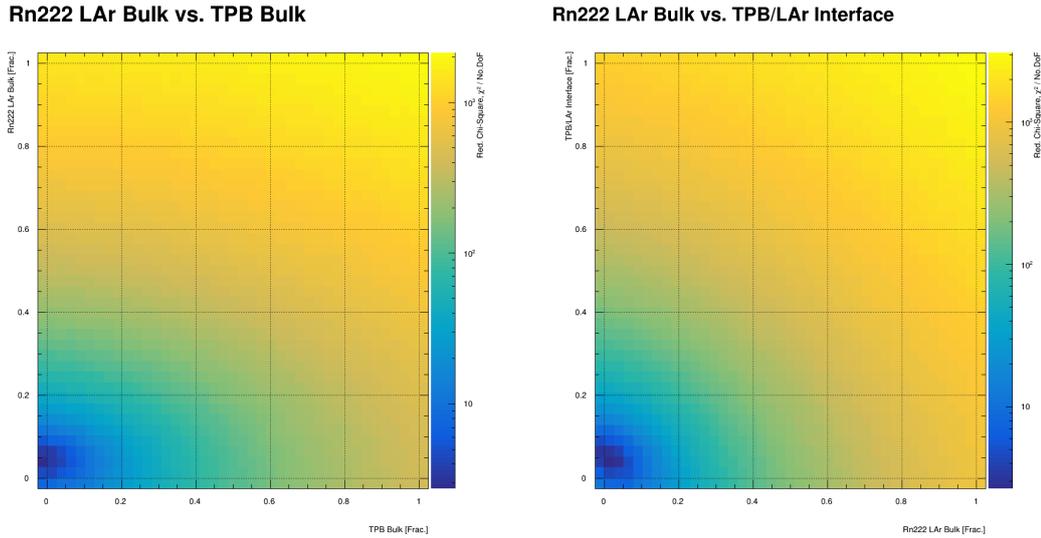


Рисунок 2.4 — Корреляция между ^{222}Rn в LAr и ^{210}Po в объеме TPB (слева) и на границе раздела TPB/LAr (справа)

При больших значениях количества PE явно имеет место некоторое вырождение (перекрывание) между компонентами ^{210}Po в объеме TPB и на границе раздела TPB/LAr с ^{222}Rn в объеме LAr. Чтобы проверить это, фитирование было выполнено три раза, при этом каждый раз одна из этих трех компонент была фиксирована нулевым значением. Результат показан на Рисунке 2.5. В случае, когда компонента ^{222}Rn была опущена (верхний график), соответствие плохое, $\chi^2/ndf = 8.016$. В случае, когда компонента ^{210}Po в объеме TPB опущена (нижний график), мы получаем результат, схожий с номинальным фитом ($\chi^2/ndf = 2.26$) с аналогичными значениями весовых компонент. Наконец, в случае, когда компонента поверхности раздела LAr/TPB опущена (средний график), объемная компонент TPB перекрывает фит при высоких значениях PE, уменьшая также значение поверхностной компоненты AV. При этом $\chi^2/ndf = 2.27$. Однако следует отметить, что все поверхностные компоненты (^{210}Po на поверхности AV, в объеме TPB и на поверхности раздела LAr/TPB) имеют веса компонент $w_0 + w_2 + w_3$ ($p_0 + p_2 + p_4$ — на графиках), которые в сумме составляют 79.5% (опущен Rn), 79.8% (опущен TPB/lar), 78.2% (опущен TPB). Номинальная сумма, таким образом, составляет $78.2^{+1.6}_{-0.0}\%$.

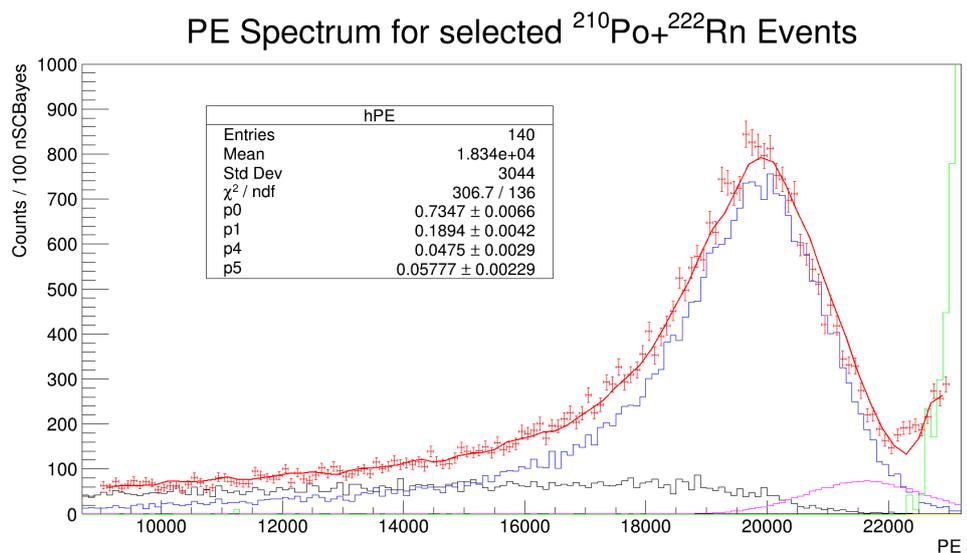
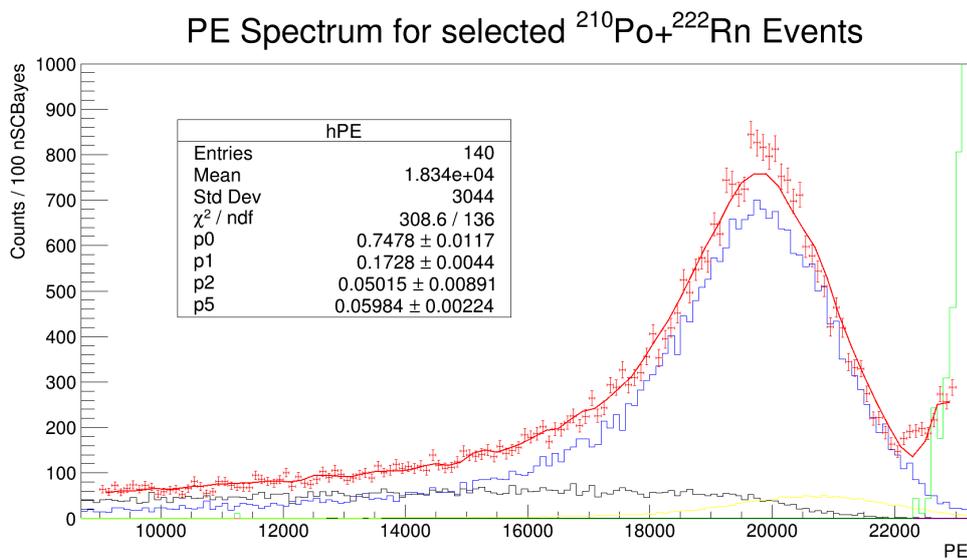
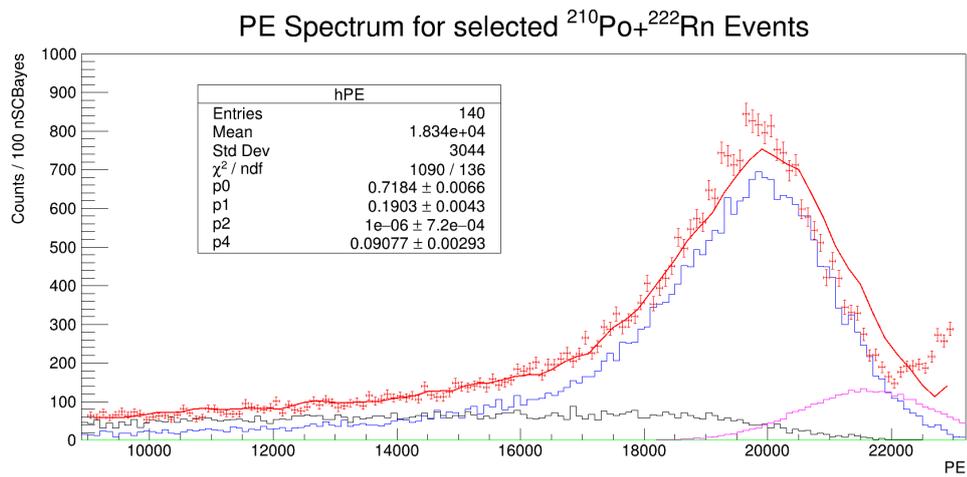


Рисунок 2.5 — Фитирование пика ^{210}Po с верхней границей в 23000 PE с различными опущенными компонентами: ^{222}Rn (сверху), ^{210}Po на поверхности раздела LAr/TPB (в центре) и ^{210}Po в объеме TPB (внизу)

В качестве финальной проверки можно использовать фиксированное значение ^{222}Rn , ожидаемое в диапазоне 9000-23000 ФЭ. 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 ТРВ и на поверхности раздела ТРВ/LAr и пик от распадов ^{222}Rn . Далее был найден вклад от пика ^{222}Rn : 4.65%. При фитировании спектра с фиксированным значением компоненты w^4 общая поверхностная составляющая принимает значение 79.5%, что все еще согласуется с другими результатами фитирования, обсуждавшимися ранее для верхнего предела 23000 ФЭ.

При фитировании был получен график, представленный на Рисунке 2.6.

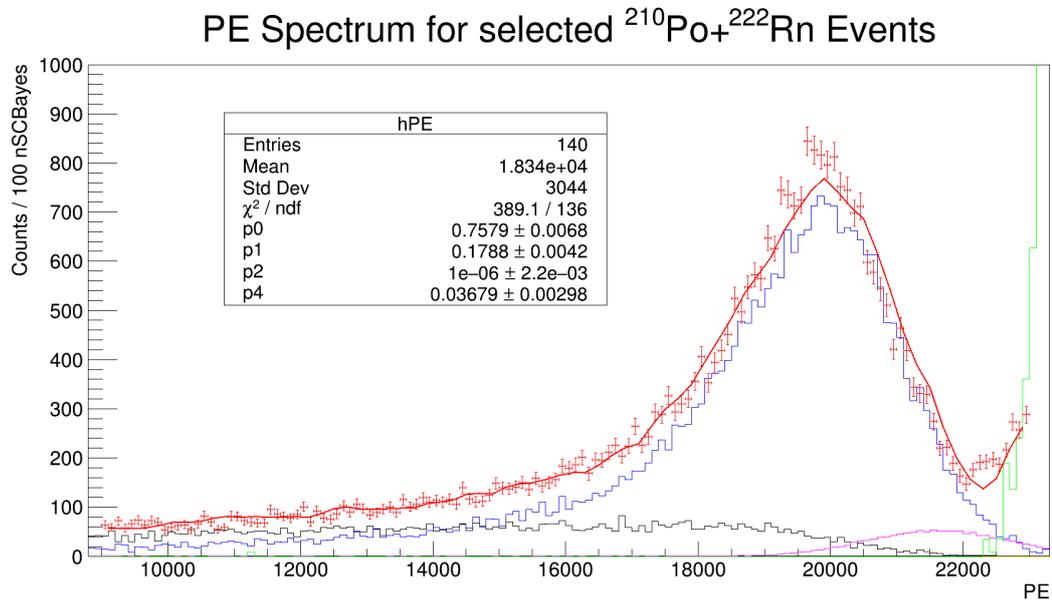


Рисунок 2.6 — Фитирование спектра ^{210}Po в диапазоне 9000 ÷ 23000 PE с фиксированной компонентой ^{222}Rn ($\chi_{min}^2 = 2.861$)

Итоговые значения весов компонент, используемые для дальнейшего анализа, представлены в Таблице 2.4.

Таблица 2.4 — Итоговые значения весов компонент

Параметр	Значение параметра
w^0	$75.8 \pm 0.7\%$
w^1	$17.9 \pm 0.4\%$
w^2	$0.0 \pm 0.2\%$
w^3	$3.7 \pm 0.3\%$
w^4	$4.5 \pm 0.0\%$

2.3. ВЕРОЯТНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ ТРИГГЕРОВ

Чтобы определить количество сработавших триггеров $N_{trig.}$, нужно учитывать вероятность срабатывания ϵ^u триггеров, которая была получена из МС-образцов, в которых необходимо скорректировать эффективность определенных ограничений, а именно тех, которые указаны в Таблице 1.3. Полученные

Таблица 2.5 — Вероятности срабатывания триггеров для компоненты ^{210}Po в объеме AV

Критерий отбора	Применение в МС	Используемое ограничение	Вероятность срабатывания триггера, %	Доля от начального значения, %
+DAQ Trigger		PE>0	17.71 ± 0.16	82.29 ± 0.75
+nSCBayes	да	9000<PE<23000	10.59 ± 0.12	40.19 ± 0.55
+fprompt	да	>0.55	10.59 ± 0.12	−0.0
+dtmTrigSrc	нет	(!(dtmTrigSrc&0x82))	10.59 ± 0.12	−0.0
+calcut	нет	(!(calcut&0x31f8))	10.59 ± 0.12	−0.0
+fmaxpe	да	<0.75	10.59 ± 0.12	−0.0
+mblikelihoodZ	да	<500.0 mm	10.59 ± 0.12	−0.0
+subeventN	да	==1	10.59 ± 0.12	0.01 ± 0.00
Итого			10.59 ± 0.12	91.57 ± 1.03

Таблица 2.6 — Вероятности срабатывания триггеров для компоненты ^{210}Po на поверхности AV

Критерий отбора	Применение в МС	Используемое ограничение	Вероятность срабатывания триггера, %	Доля от начального значения, %
+DAQ Trigger		PE>0	51.35 ± 0.31	48.65 ± 0.29
+nSCBayes	да	9000<PE<23000	43.24 ± 0.28	15.78 ± 0.11
+fprompt	да	>0.55	43.24 ± 0.28	−0.0
+dtmTrigSrc	нет	(!(dtmTrigSrc&0x82))	43.24 ± 0.28	−0.0
+calcut	нет	(!(calcut&0x31f8))	43.24 ± 0.28	−0.0
+fmaxpe	да	<0.75	43.24 ± 0.28	−0.0
+mblikelihoodZ	да	<500.0 mm	43.24 ± 0.28	−0.0
+subeventN	да	==1	43.24 ± 0.28	0.01 ± 0.00
Итого			43.24 ± 0.28	65.77 ± 0.41

Таблица 2.7 — Вероятности срабатывания триггеров для компоненты ^{210}Po в объеме TPВ

Критерий отбора	Применение в МС	Используемое ограничение	Вероятность срабатывания триггера, %	Доля от начального значения, %
+DAQ Trigger		$PE > 0$	76.92 ± 0.42	23.08 ± 0.13
+nSCBayes	да	$9000 < PE < 23000$	45.96 ± 0.29	40.25 ± 0.27
+fprompt	да	> 0.55	45.96 ± 0.29	-0.0
+dtmTrigSrc	нет	$(!(dtmTrigSrc \& 0x82))$	45.96 ± 0.29	-0.0
+calcut	нет	$(!(calcut \& 0x31f8))$	45.96 ± 0.29	-0.0
+fmaxpe	да	< 0.75	45.96 ± 0.29	-0.0
+mblikelihoodZ	да	$< 500.0 \text{ mm}$	45.96 ± 0.29	-0.0
+subeventN	да	$== 1$	45.95 ± 0.29	0.02 ± 0.00
Итого			45.95 ± 0.29	63.68 ± 0.39

Таблица 2.8 — Вероятности срабатывания триггеров для компоненты ^{210}Po на поверхности раздела TPВ/LAr

Критерий отбора	Применение в МС	Используемое ограничение	Вероятность срабатывания триггера, %	Доля от начального значения, %
+DAQ Trigger		$PE > 0$	99.96 ± 0.45	0.04 ± 0.00
+nSCBayes	да	$9000 < PE < 23000$	47.69 ± 0.27	52.29 ± 0.29
+fprompt	да	> 0.55	47.69 ± 0.27	-0.0
+dtmTrigSrc	нет	$(!(dtmTrigSrc \& 0x82))$	47.69 ± 0.27	-0.0
+calcut	нет	$(!(calcut \& 0x31f8))$	47.69 ± 0.27	-0.0
+fmaxpe	да	< 0.75	47.69 ± 0.27	-0.0
+mblikelihoodZ	да	$< 500.0 \text{ mm}$	47.69 ± 0.27	-0.0
+subeventN	да	$== 1$	47.68 ± 0.27	0.02 ± 0.00
Итого			47.68 ± 0.27	54.02 ± 0.30

Таблица 2.9 — Вероятности срабатывания триггеров для компоненты ^{222}Rn в объеме AV

Критерий отбора	Применение в МС	Используемое ограничение	Вероятность срабатывания триггера, %	Доля от начального значения, %
+DAQ Trigger		$PE > 0$	99.95 ± 1.00	0.05 ± 0.00
+nSCBayes	да	$9000 < PE < 23000$	4.12 ± 0.15	95.88 ± 3.40
+fprompt	да	> 0.55	4.12 ± 0.15	-0.0
+dtmTrigSrc	нет	$(!(dtmTrigSrc \& 0x82))$	4.12 ± 0.15	-0.0

Продолжение таблицы 2.8 – Вероятности срабатывания триггеров для компоненты ^{222}Rn в объеме AV

Критерий отбора	Применение в МС	Используемое ограничение	Вероятность срабатывания триггера, %	Доля от начального значения, %
+calcut	нет	$(!(\text{calcut}\&0\text{x}31\text{f}8))$	4.12 ± 0.15	-0.0
+fmaxpe	да	<0.75	4.12 ± 0.15	-0.0
+mblikelihoodZ	да	$<500.0 \text{ mm}$	4.12 ± 0.15	-0.0
+subeventN	да	$==1$	4.11 ± 0.15	0.12 ± 0.01
Итог			4.11 ± 0.15	96.03 ± 3.40

2.4. КОРРЕКЦИЯ НАЛОЖЕНИЙ

В случае идентификации наложений (срабатывания критерия отбора наложенных событий $subeventN == 1$) 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 $3279 \pm 96 \text{ кг}$ с удельной активностью $0.951 \pm 0.036 \text{ Бк кг}^{-1}$ для окна совпадений $13,5 \text{ }\mu\text{s}$. 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 1.3) на коэффициент f_{pileup} , определяемый следующим образом:

$$f_{pileup} = \frac{1}{1 - 0.0417} = 1.044. \quad (2.4)$$

2.5. 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 $dtmTrigSrc$ или $calcut$. Из таблицы 1.4 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:

$$t_{live} = 33557691.61 - 3.402 \times 10^{-3} = 33557691.61 \pm 1.00s . \quad (2.5)$$

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

2.6. АКТИВНОСТЬ

Используя величины, рассчитанные в разделах 2.2, 2.3 и 2.4, можно рассчитать активности отдельных компонент, используя уравнение (2.2). Полученные значения представлены ниже в таблице 2.10. Активность ^{222}Rn в LAr не является предметом внимания данного анализа и используется только в качестве ограничения.

Таблица 2.10 — Оценка активности для компонент

Компонента	$N_{trig.}$	Активность
^{210}Po на поверхности AV	27893.6	0.269 ± 0.003 мБк/м ²
^{210}Po в объеме AV	6587.01	5.76 ± 0.15 мБк/кг ⁻¹ 2.94 ± 0.05 мБк
^{210}Po на поверхности TPВ	<1	<0.01 мБк/м ²
^{210}Po на поверхности раздела TPВ/LAr	1361.56	0.012 ± 0.001 мБк/м ²
^{222}Rn объеме LAr	1655.95	0.37 ± 0.02 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:

$$\sigma_{surf} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + a_{02}\sigma_0\sigma_2 + a_{03}\sigma_0\sigma_3 + a_{23}\sigma_2\sigma_3}, \quad (2.6)$$

где σ_i – погрешности весов поверхностных компонентов, определяемые во время фитирования, a_{ij} – коэффициент корреляции между компонентами i и j , указанные в таблице 2.3. Таким образом, общая активность ^{210}Po в детекторе включает две компоненты – поверхностную и объемную активность:

$$\begin{aligned} ^{210}\text{Po} \text{ на поверхности} &= 0.281 \pm 0.007 \text{ мБк/м}^2 \\ ^{210}\text{Po} \text{ в объеме} &= 2.94 \pm 0.05 \text{ мБк} \end{aligned}$$

Погрешность поверхностной активности ^{210}Po составляет $(0.007/0.281) \sim 2\%$ и обусловлена неопределенностью составляющей распадов ^{210}Po в объеме TPВ.

2.7. ВКЛАД В ОБЛАСТЬ ПОИСКА WIMP

После расчета активностей различных компонент ^{210}Po на разных поверхностях акрилового сосуда, данная модель может быть использована для прогнозирования количества поверхностных событий в области поиска WIMP (ROI). Для этого следует быть консервативными в отношении истинного количества ожидаемых событий в ROI. В ранее описанном диапазоне (9000–23000 PE) две популяции близки к вырождению (перекрытию) друг с другом: ^{210}Po в объемном слое TPB и ^{210}Po на поверхности раздела LAr/TPB. При больших значениях PE эти популяции выглядят одинаково, однако при более низких PE доля событий, которые попадают в диапазон PE поиска WIMP [93,200], отличается, как показано на Рисунке 2.7.

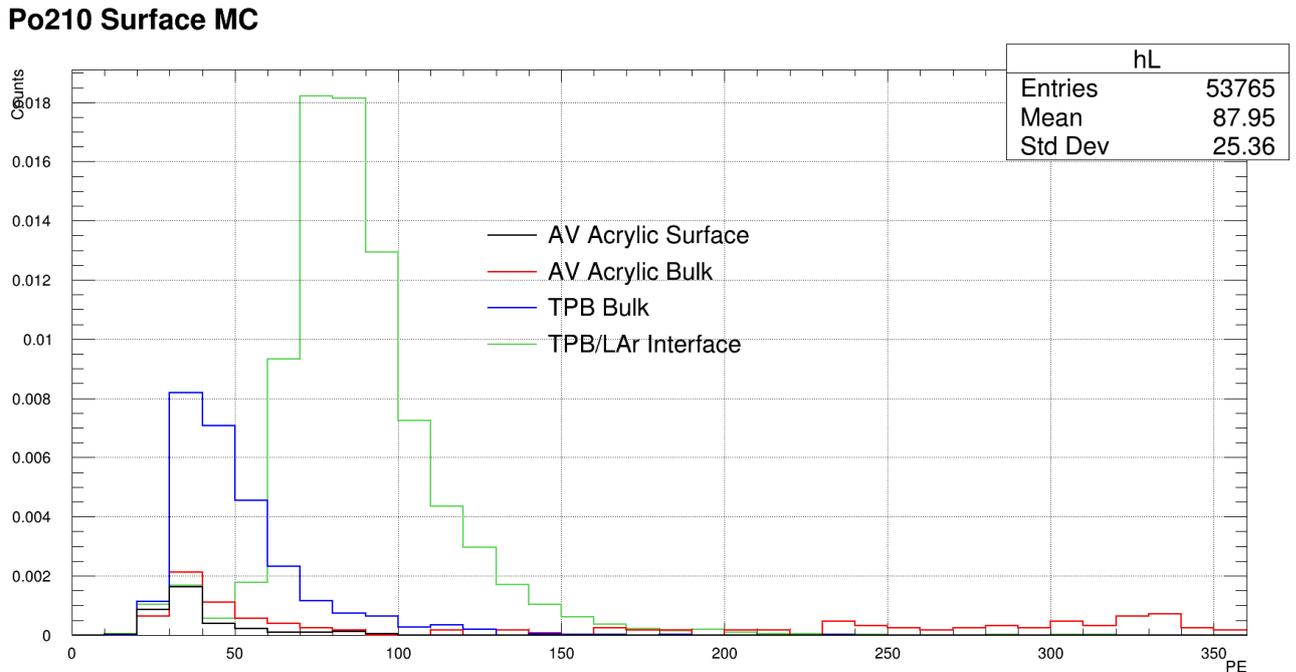


Рисунок 2.7 — Относительное количество триггеров от каждого компонента ^{210}Po , распад которых находится близко к диапазону поиска WIMP (ROI) - 93-200 PE.

Наибольший вклад вносят события с поверхности раздела TPB/LAr, вторым после него является вклад от объемной компоненты TPB.

В разделе 2.2 номинальный фит вернул значение веса компоненты для распадов ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr $w_3 = (3.7 \pm 0.3)\%$. При изучении этого фита с различными опущенными компонентами выяснилось, что наибольшее значение весов компонент ^{210}Po в объеме TPB и на поверхности раз-

дела ТРВ/LAr было получено тогда, когда была опущена компонента ^{210}Po на поверхности раздела ТРВ/LAr (Рисунок 2.5), $w_2 = (5.0 \pm 0.9)\%$. Фит с опущенной компонентой ^{222}Rn имеет плохое соответствие ($\chi^2/ndf = 8$). В реальности компоненты ^{210}Po в объеме ТРВ и на поверхности раздела ТРВ/LAr сложно разделить, так как слой ТРВ в реальности имеет шероховатость. В нашем анализе требуется узнать, каков максимально возможный вклад поверхностной компоненты, допустимый при фитировании. И с учетом этого, какая компонента производит наибольшее количество событий при низком количестве ФЭ. В качестве разрешения этого вопроса примем за верхнюю границу значения компоненты ^{210}Po в объеме ТРВ (w_2) значение веса компоненты ^{210}Po на поверхности раздела ТРВ/LAr (w_3): $w_2 \rightarrow w_3$. Теперь можно преобразовать значение верхнего предела w_3 в соответствующее число срабатываний триггеров, используя формулу 2.3. Тогда верхний предел числа срабатываний триггеров для компоненты w_3 :

$$w_2 * f_{pileup} * N_{trig} = 0.05 * 1.044 * 35248 = 1840. \quad (2.7)$$

Используя те же весовые компоненты из фита, где компонента ^{210}Po на поверхности раздела ТРВ/LAr опущена, можно получить количество событий для поверхностной компоненты ^{210}Po :

$$w_0 \times f_{pileup} \times N_{trig} = 0.74 \times 1.044 \times 35248 = 27231, \quad (2.8)$$

и для компоненты ^{210}Po в объеме AV:

$$w_1 \times f_{pileup} \times N_{trig} = 0.17 \times 1.044 \times 35248 = 6256. \quad (2.9)$$

На Рисунке 2.8 представлены шесть вариантов вариации количества сработавших триггеров в диапазоне ФЭ от 93 до 200, в которых использовались разные значения среднего выхода сцинтилляции ТРВ (μ) и шероховатости поверхности (σ): (1.0,0.01), (1.0,1.0), (0.5,0.01), (0.5,1.0), (2.0,0.01), (2.0,1.0). Используя их поочередно, можно исследовать диапазон световых выходов и поверхностные эффекты. Общее количество событий от всех компонент ^{210}Po в диапазоне PE [93;200] указано в заголовке каждого графика.

Использование разных комбинаций $\mu \in (0.5, 2.0)$ и $\sigma \in (0.01, 1.00)$ дает

центральное значение $(1.0, 0.01)$ – номинальные значения) в 2461 событий в диапазоне $[1328, 3264]$ (Рисунок 2.9). Полное число поверхностных событий в регионе PE $[93, 200]$ (без применения ката на F_{prompt}) следовательно 2461^{+811}_{-1125} . Используя это значение как центральное с $+\sigma = 811$, мы можем определить верхний предел 90% достоверности для поверхностных событий следующим образом:

$$\alpha_{AV,90\%} = 2461 + (1.28 \times 811) = 3499.08, \quad (2.10)$$

где значение ‘1.28’ соответствует требуемому z-показателю, т. е. $\mu + 1.28$ одностороннего интервала для нормального распределения с доверительной вероятностью 90%. Округляя это значение до двух значащих цифр, получаем: $\alpha_{AV,90\%} = 3500$.

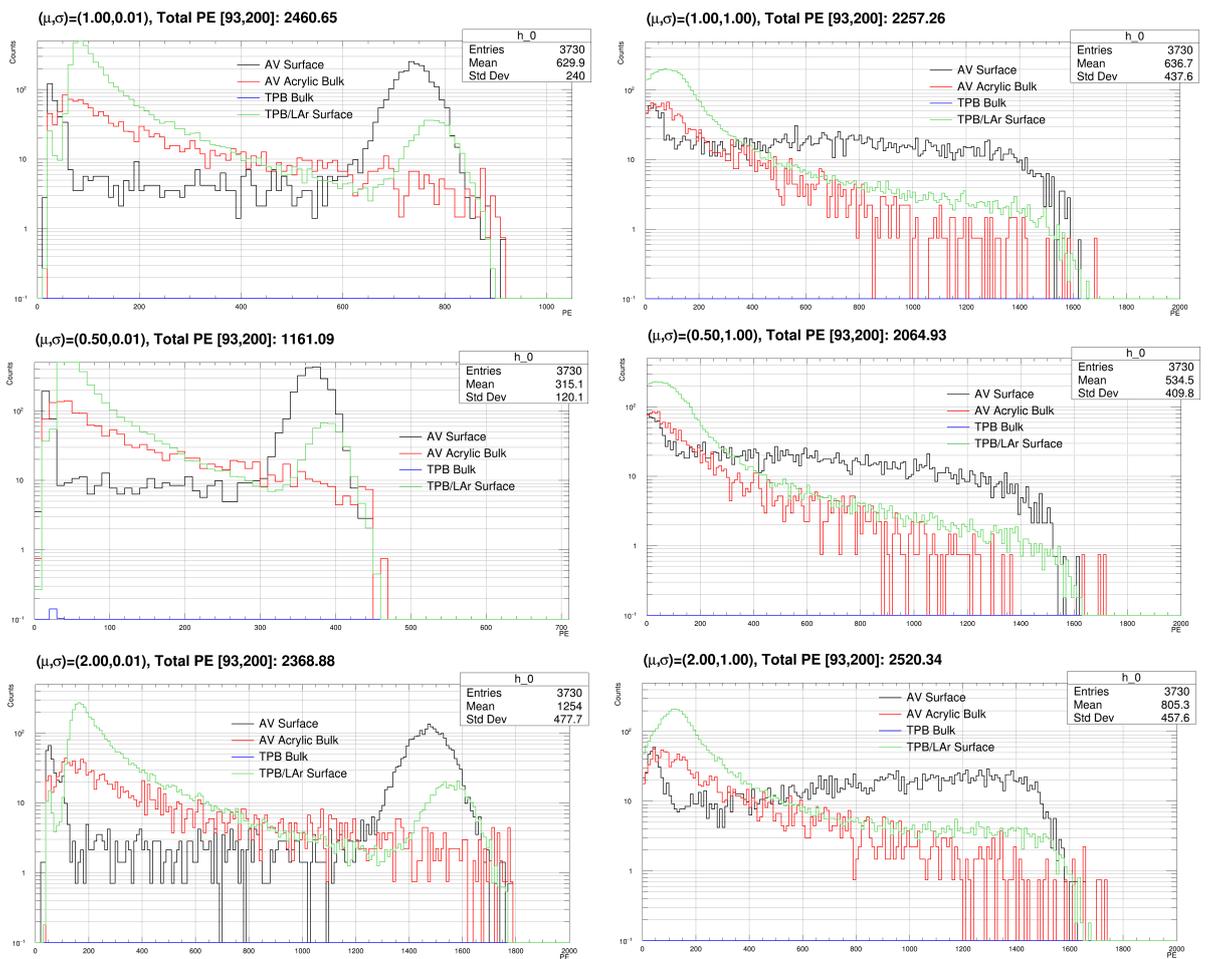


Рисунок 2.8 — Вариации количества сработавших триггеров в диапазоне PE от 93 до 200 для различных комбинаций сцинтиляционного выхода ТРВ и шероховатости поверхности. При этом предполагается, что ката не применяются, в том числе и кат на F_{prompt} .

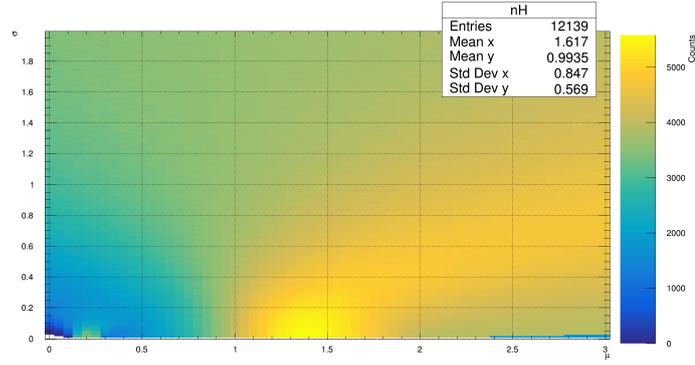


Рисунок 2.9 — 2D-проекция количества событий в ROI, ожидаемых от поверхностных событий ^{210}Po , с учетом различных значений среднего выхода сцинтиляции ТРВ (μ) и шероховатости поверхности (σ).

Можно аналогичным образом вычислить то же самое после применения катов нижнего уровня, что для MC-образцов просто включает кат $fmaxpe < 0,4$. Другие каты характерны только для данных. Таким образом, после применения ката $fmaxpe < 0,4$ полное количество событий 1668^{+778}_{-1007} , следовательно, верхний предел 90% достоверности:

$$\alpha_{AV,90\%} = 1668 + (1.28 \times 778) = 2663.84 \approx 2700. \quad (2.11)$$

Кроме того, поиск поверхностных событий, близких к ROI WIMP, можно проводить с помощью изучения данных. Для этого рассмотрим отношение N_{Hit}/PE . На основе этого отношения идентифицируются черенковские популяции. Здесь N_{Hit} — количество PMT, регистрирующих свет в событии; это соотношение показывает, насколько высока степень рассеянности света. Для события с заданным значением PE отношение N_{Hit}/PE чувствительно к топологии исходного события.

На Рисунке 2.10 (слева) показано моделирование MC-распадов от ^{210}Po на поверхности раздела ТРВ/LAr. Можно заметить, что оно дает лучшее распределение N_{Hit}/PE по сравнению с PE. На правом графике показаны 1% и 96% доверительные контуры MC-событий для каждого бина PE после применения следующих катов:

- $WIMP\ PE$ и $FPromptROI$
- $(!(calcut \& 0x31f8))$
- $(!(dtmTrigSrc \& 0x82))$
- $subeventN == 1$

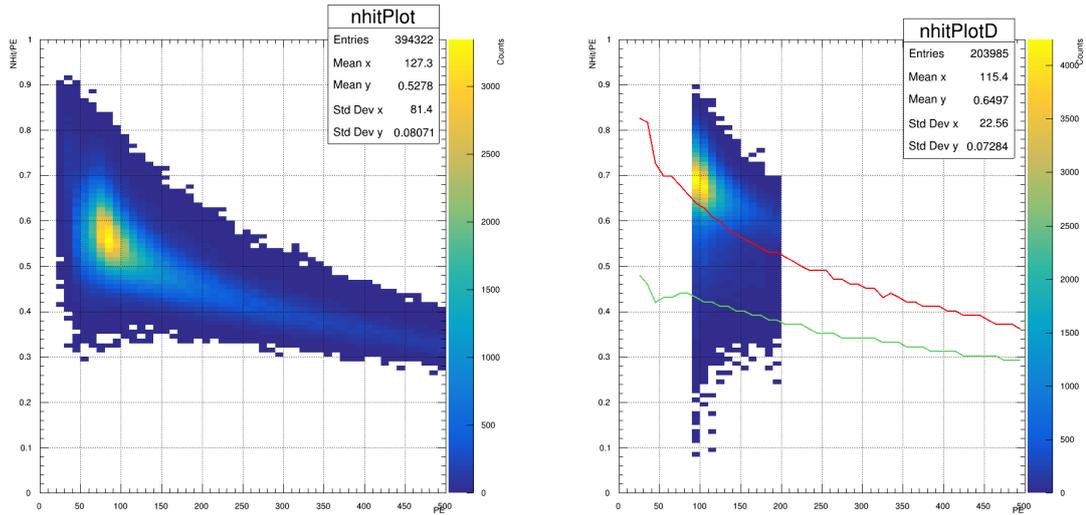


Рисунок 2.10 — Справа: распределение данных N_{Hit}/PE (двухмерная гистограмма) с 1% поверхностных событий под зеленой кривой и 96% поверхностных событий под красной кривой. Слева: MC-распады от ^{210}Po на поверхности раздела TPB/LAr. 1957 событий насчитано между этими двумя контурными линиями в данных.

- $eventTime$ [2300; 2650] нс
- $f_{maxpe} < 0.4$

Число событий, подсчитанных между двумя контурными линиями в пределах ROI WIMP после вышеуказанных катов, составляет 1957_{-1072}^{+784} . Радиальное распределение этих событий показано черным цветом на Рисунке 2.11 вместе с распределением, полученным для MC событий из того же диапазона PE 93-200, отмеченными красным цветом. В предположении, что в диапазоне PE, охватывающий ROI WIMP (93-200 PE), присутствует утечка местоположения событий от α -распадов ^{210}Po с поверхности раздела LAr/TPB, можно рассчитать вероятность попадания поверхностных событий в ROI WIMP – долю утечки (leakage fraction). График утечки представлен на Рисунке 2.12. Ошибка номинального значения определялась из суммы статистических ошибок таких параметров как послесвечение, показатель преломления, световыход и длина рассеяния TBR.

При реперных значениях радиусов 630 мм (эквивалентная масса LAr – 1918 кг) и 720 мм (эквивалентная масса LAr – 1248 кг) для оценки вероятности утечки не хватает статистики, как видно из графика. Для получения искомого значения требуется увеличить количество статистических данных при малых радиусах.

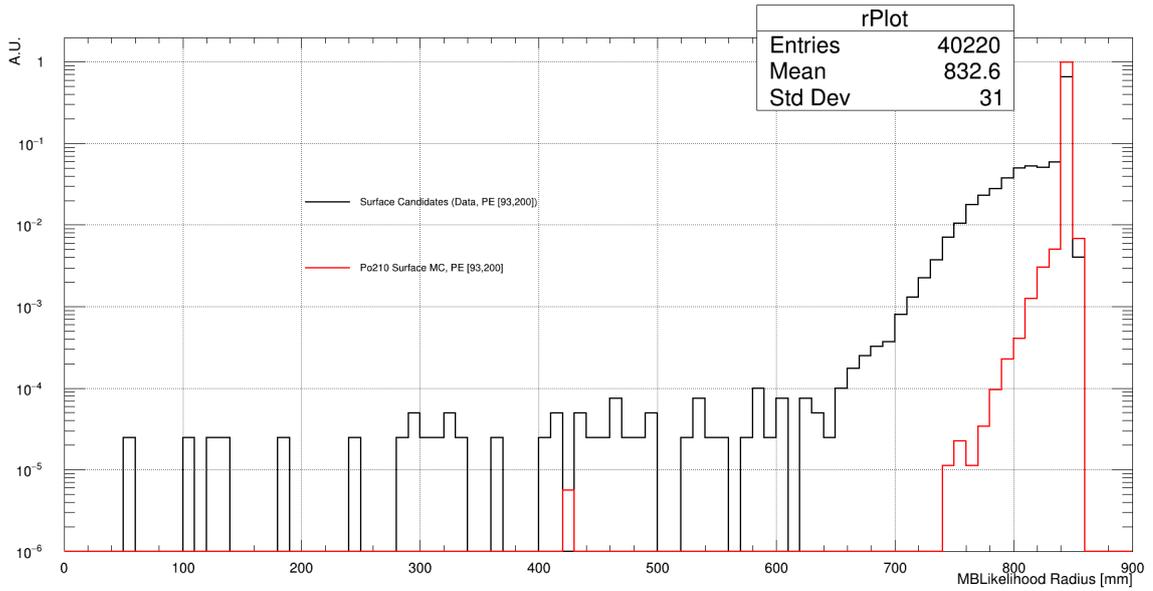


Рисунок 2.11 — Реконструированное радиальное распределение 1957 событий-кандидатов внутри рассматриваемой области после применения катов, перечисленных выше (черный). Для сравнения красным цветом показано распределение, созданное МС-событиями.

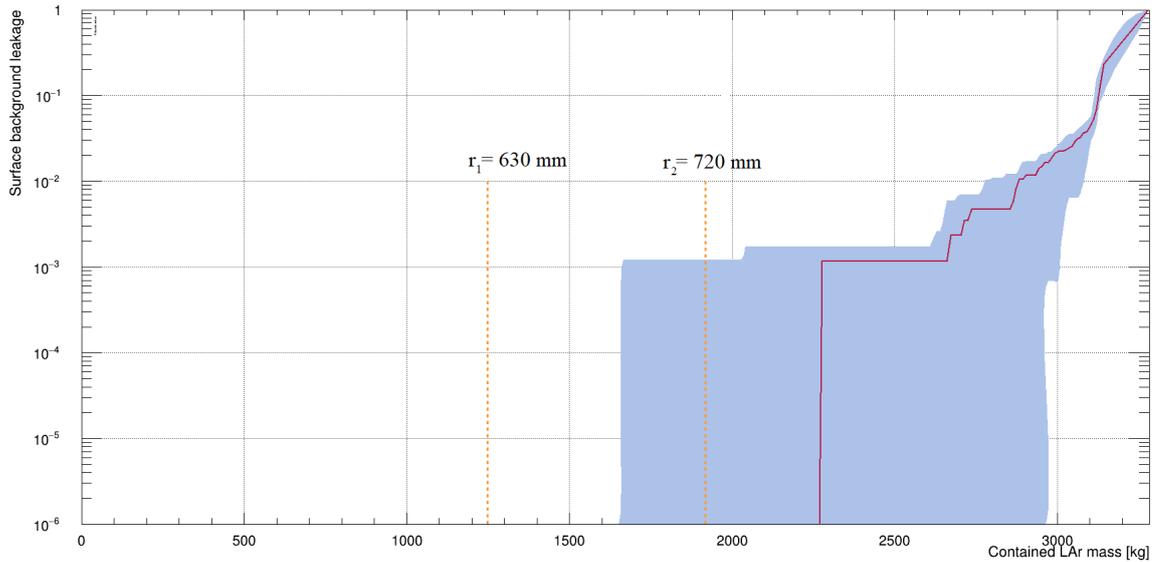


Рисунок 2.12 — Зависимость вероятности утечки поверхностных событий в область поиска WIMP от содержащейся в детекторе массы LAr. Красной линией показана оценка утечки для номинального количества событий; синим — оценка погрешности количества событий

На данный момент можно поставить ограничение на вероятность утечки:

$$F_{LF} < 10^{-3}. \quad (2.12)$$

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа содержит основные результаты исследования α -активности ^{210}Po в разных частях детектора.

В главе 1 было рассмотрено устройство детектора DEAP-3600 и основных его составляющих. В пункте 1.2 представлено общее количество ожидаемых фоновых событий в ROI WIMP, а также ожидаемые фоновые события от α -распадов ядер. Далее основным объектом исследования являются α -распады ^{210}Po в разных частях детектора. Пункт 1.2.3 содержит выборку событий α -распадов ^{210}Po , сгенерированную с помощью метода Монте-Карло на *graham* кластере Compute Canada. Ряд пиков представляют собой вклады от различных компонент ^{210}Po (в разных частях детектора), а также вклад от соседствующего спектра α -распадов ^{222}Rn . Далее представлено распределение экспериментальных данных, собранных за три года работы детектора, а также распределение экспериментальных данных, полученное после применения критериев отбора, используемых для выделения области с α -распадами ^{210}Po .

В главе 2 представлены основные результаты анализа экспериментальных данных. Во-первых, представлены результаты фитирования пика в спектре ^{210}Po с разными значениями верхней границы количества фотоэлектронов и обосновано использование диапазона в [9000; 23000] ФЭ для итогового фитирования. Далее представлены полученные значения весов компонент, вносящих вклад в общий спектр ^{210}Po , и корреляции между ними. Затем чтобы учесть некоторое вырождение (перекрывание) между двумя поверхностными компонентами, было выполнено фитирование с поочередно опущенными компонентами. В результате была получена номинальная сумма весов всех поверхностных компонент – $78.2_{-0.0}^{+1.6}\%$. В качестве финальной проверки было использовано фиксированное значение весовой компоненты ^{222}Rn ($w^4 = 4.65\%$), частично перекрывающей спектр ^{210}Po . Вследствие чего, были получены итоговые значения весов компонент (Таблица 2.4) и график (Рисунок 2.6), содержащий фит спектра ^{210}Po в диапазоне [9000; 23000] ФЭ с фиксированной компонентой ^{222}Rn .

Кроме того, в пунктах 2.3 – 2.5 представлены результаты расчета ряда

величин, необходимых для оценки активности компонент, вносящих вклад в общую активность ^{210}Po , а именно были вычислены: вероятности срабатывания триггеров, коэффициент, необходимый для учета коррекции наложений и живое время сбора данных. В итоге была получена оценка активности ^{210}Po на поверхности и в объеме детектора:

$$\begin{aligned} ^{210}\text{Po} \text{ на поверхности} &= 0.281 \pm 0.007 \text{ мБк/м}^2 \\ ^{210}\text{Po} \text{ в объеме} &= 2.94 \pm 0.05 \text{ мБк} \end{aligned}$$

Заключительный пункт 2.7 содержит рассуждения, позволяющие дать прогноз количества поверхностных событий от α -распадов ^{210}Po в области поиска WIMP (ROI). Прежде всего было получено распределение относительного количества срабатываний триггеров от каждого компонента ^{210}Po , распад которых находится близко к диапазону поиска WIMP (ROI) – [93; 200] ФЭ. После чего значение верхнего предела весовых компонент было преобразовано в соответствующее число срабатываний триггеров. Кроме того, были получены вариации количества сработавших триггеров в диапазоне ФЭ от 93 до 200 для различных комбинаций сцинтилляционного выхода ТРВ и шероховатости поверхности, представленные на Рисунке 2.8. Изучение отношения NHit/PE для данных, где NHit – количество фотоумножителей, регистрирующих свет в событии, позволило подсчитать количество поверхностных событий в пределах ROI WIMP. Число событий составило 1957_{-1072}^{+784} .

В предположении, что в диапазоне ФЭ, охватывающем ROI WIMP (93-200 ФЭ), присутствует утечка местоположения событий от α -распадов ^{210}Po с поверхности раздела LAr/ТРВ, можно рассчитать вероятность попадания поверхностных событий в ROI WIMP – долю утечки (leakage fraction). График утечки представлен на Рисунке 2.12. Из графика видно, что при малых значениях радиуса для расчета вероятности утечки не хватает статистических данных. В дальнейшем предполагается увеличить статистику, что даст возможность получить искомое значение. На данный момент было получено ограничение для вероятности утечки:

$$F_{LF} < 10^{-3}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. Изд. 3-е, суц. перераб. и значит. доп. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 616 с.; (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).
- [7] B. Lehnert for the DEAP-3600 Collaboration, *Backgrounds in the DEAP-3600 Dark Matter Experiment* (2018).