

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

(НИЯУ «МИФИ»)

Институт ядерной физики и технологий
Кафедра физики элементарных частиц (№40)

УДК 539.12.01

Отчет о научно-исследовательской работе

Анализ мюонного фона в эксперименте DEAP-3600

Научный руководитель

Мачулин И.Н.

Студент

Токарева П.С.

Москва 2023

Содержание

1	Введение	2
2	Детектор DEAP-3600	2
2.1	Конструкция детектора	2
2.2	Состав фона в эксперименте	4
2.3	Нейтронный фон	5
2.4	Космогенные нейтроны и мюонное вето	5
3	Методы расчёта потока мюонов, долетающего до подземной лаборатории	5
4	Вычисление мюонного потока на основе данных, полученных из мюонного вето	7
4.1	Параметры событий, использованные для отбора данных	7
4.2	Низкоуровневые ограничения на параметры	7
4.3	Высокоуровневые ограничения	8
4.4	Проверка правильности выбора ограничений на параметры	12
4.5	Расчёт потока мюонов после применения высокоуровневых ограничений на параметры	14
5	Заключение	15

1 Введение

В настоящее время существует множество исследований, указывающих на то, что тёмная материя составляет около 27% от всей массы-энергии Вселенной. Для сравнения, барионная материя составляет всего лишь около 5% от этой энергии. В то же время несмотря на такое огромное содержание, тёмная материя до сих пор не была напрямую зафиксирована в наземных экспериментах. Множество теоретических моделей предсказывают существование частиц с подходящими свойствами. Одной из таких является WIMP (Weakly Interacting Massive Particle). Согласно теоретическим моделям, неупругое взаимодействие WIMP-ов с ядрами вызывает слабоэнергетическую (≤ 100 кэВ) ядерную отдачу. Эксперименты по поиску таких частиц направлены в основном на наблюдение данного явления, что очень сложно сделать, вследствие ограничений на сечение взаимодействия, которое составляет менее чем 9.0×10^{-47} см² на 100 ГэВ/с² при 90% уровне согласия [3].

Для определения столь редких низкоэнергетических сигналов нужна мишень с высокой массой и крайне низким уровнем шумов. Как показывают предшествующие эксперименты, на такую роль очень хорошо подходит жидкий аргон (LAr), который и используется в эксперименте DEAP-3600.

2 Детектор DEAP-3600

Детектор DEAP-3600 находится на глубине 2 километра (6 километров в водном эквиваленте) в подземной лаборатории SNOLAB (Садбери, Канада).

2.1 Конструкция детектора

Схема поперечного разреза установки изображен на рис.1.

Главной составляющей детектора является сверхчистый жидкий аргон LAr, содержащийся в поглощающем ультрафиолет(UVA) акриловом сосуде(AV) с внутренним диаметром примерно 1.7 м. Верхние 30 см данного сосуда заполнены газообразным аргоном GAr. Область соприкосновения двух сред GAr/LAr расположена примерно на 55 см выше экватора сосуда.

Сосуд окружен 255 направленными внутрь фотоумножителями (PMT) с низкой радиоактивностью Hamamatsu R5912 HQE диаметром 8 дюймов(20,32 см). Данные фотоумножители оптически связаны с поглощающими ультрафиолет акриловыми световодами (LGs) длиной 45 см, которые транспортируют фотоны видимого света из акрилового сосуда к фотоумножителям. Пространство между световодами заполнено слоями полиэтилена высокой плотности и блоками пенопласта, которые выполняют 2 задачи: во-первых, служат пассивной преградой между нейтронами и компонентами детектора; во-вторых, обеспечивают температурную изоляцию так, чтобы фотоумножители функционировали в диапазоне температур 240-290 К.

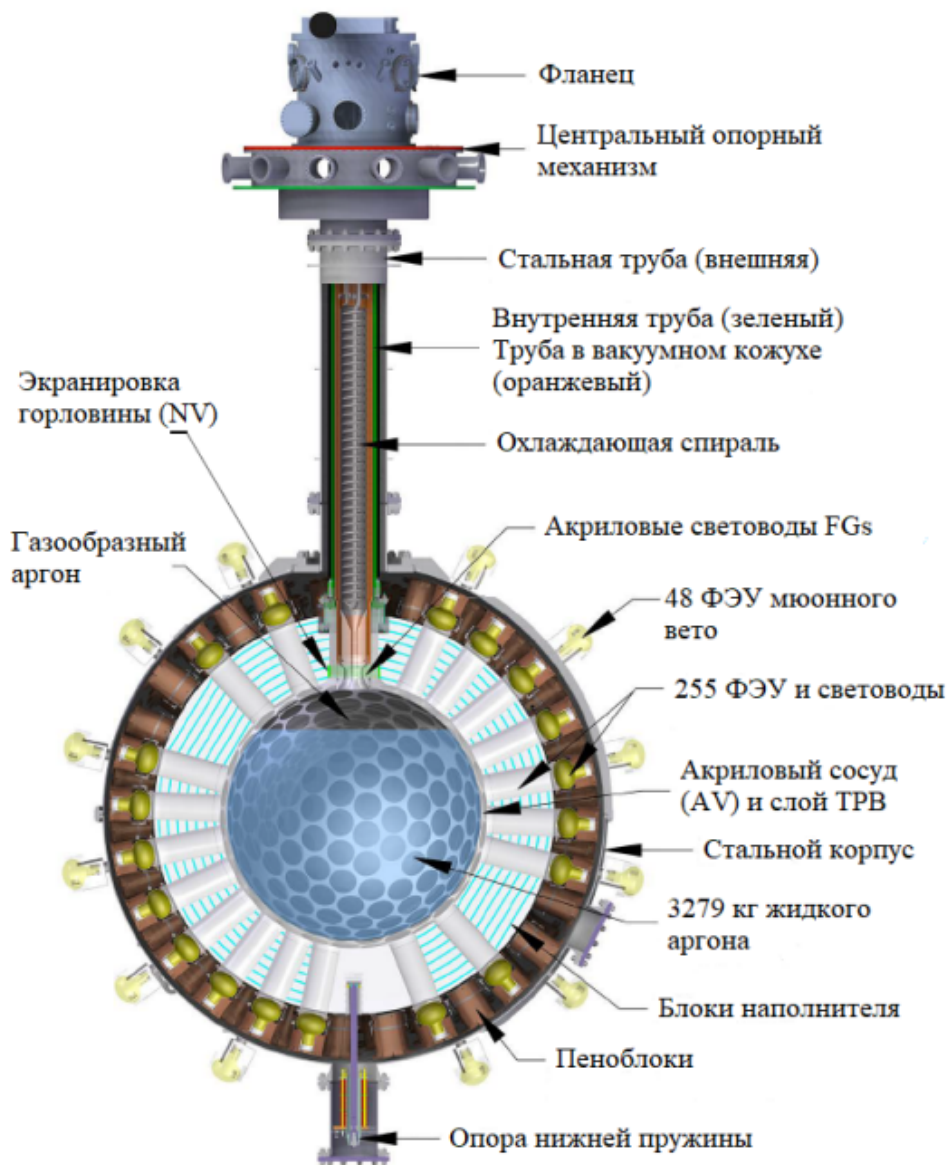


Рис. 1: Поперечное сечение компонентов детектора DEAP-3600

Внутренняя поверхность резервуара покрыта слоем тетрафенилбутадиена (ТРВ) толщиной 3 мкм, который преобразует 128 нм излучение от сцинтилляций в LAr в излучение видимого спектра, максимальная длина которого достигает 420 нм. После прохождения ТРВ свет достигает светодиодов и далее попадает на поверхность ФЭУ, которые обеспечивают 76% покрытия поверхности сосуда детектора. Внешняя поверхность между AV и LG покрыта диффузными светоотражателями Tyvek и Мулаг для увеличения светосбора.

В верхней части сосуда имеется отверстие, которое соединено с горловиной и фланцем. Фланец в свою очередь соединён с более длинной горловиной из нержавеющей стали, заканчивающейся в герметизированном боксе. Вдоль этой горловины располагается заполненная жидким азотом (LN_2) охлаждающая спираль из нержавеющей стали, которая способствует конденсации газообразного аргона при попадании в данный объем. Далее конденсированный аргон по акриловым токопроводам возвращается в сосуд.

Также верхняя часть резервуара окружена оптоволоконном, которое соединенно с 4-мя фотоумножителями Hamamatsu R7600-300, которые используются для отслеживания любого видимого света, генерируемого вблизи горловины.

Вся вышперечисленная конструкция детектора содержится в сфере из нержавеющей стали, которая продувается постоянным потоком очищенного от радона газа N_2 . Сама сфера погружена в водный резервуар 7.8 м в высоту и 7.8 м в диаметре, на внешней поверхности которого расположены 48 фотоумножителей Hamamatsu R1408. Совместно с резервуаром данные фотоумножители составляют мюонное вето (MV), которое создано для отслеживания фона космогенного происхождения.[2]

Над мюонным вето сфера окружена серией калибровочных трубок, которые позволяют устанавливать радиоактивные источники в мюонное вето для его калибровки. Калибровочные источники могут быть размещены с набором детекторов и парой калибровочных ФЭУ.

2.2 Состав фона в эксперименте

Источниками для событий, похожих своим сигналом на прохождение WIMP-а, в детекторе может быть целый ряд фонов. В данном эксперименте общий фон складывается из следующих событий:

1. события от электронов отдачи;
2. события от черенковского свечения, вызванного в акриле;
3. события связанные с радиогенными нейтронами;
4. события связанные с нейтронами, полученными в ходе взаимодействия мюонов из атмосферы с детектором и его окружением;
5. альфа-распады на границе резервуара;

б. альфа-распады в других частях конструкции детектора.

В данной работе подробно рассматривается вклад в фон космогенных нейтронов.

2.3 Нейтронный фон

Нейтроны могут рассеиваться на ядрах аргона и создавать точно такую же ядерную отдачу, какая ожидается от WIMP-ов, которая тем не менее отличается по, например, своей пространственной распространённости. Это и другие различия позволяют достаточно точно предсказать порядок фона и исключить по возможности нейтроны из рассмотрения.

Как уже было сказано ранее нейтроны, долетающие до детектора, имеют 2 причины возникновения: радиогенную и космогенную. О второй подробнее далее.

2.4 Космогенные нейтроны и мюонное вето

Космогенные нейтроны рождаются при взаимодействии высокоэнергетичных мюонов из атмосферы с элементами детектора и его окружения в ходе реакции мюонного захвата на протоне



В нашем случае подземное расположение лаборатории сильно уменьшает поток мюонов, достигающих детектора. Те же мюоны, что долетают до него, отслеживаются либо при непосредственном прохождении через мюонное вето, либо при прохождении через мюонное вето продуктов электромагнитного ливня, вызванного прохождением мюонов. Полный поток мюонов, посчитанный таким образом составляет $(3-4) \times 10^{-10}$ мюон/см²/с, что не противоречит потоку, измеренному в SNO, который равен $(3.31 \pm 0.10) \times 10^{-10}$ мюон/см²/с[1].

3 Методы расчёта потока мюонов, долетающего до подземной лаборатории

Первым методом для расчёта потока мюонов является экстраполяция ранних экспериментальных данных.

Данный метод был уже частично затронут в предыдущем параграфе и состоит в использовании экспериментальных данных, полученных в 2009 году в соседней лаборатории другой размера и их дальнейшей экстраполяции на лабораторию с DEAP-3600. В результате было использовано значение потока $(3.31 \pm 0.10) \times 10^{-10}$ мюон/см²/с.

Ещё одним методом описания потока мюонов является использование Depth-Intensity-Relation [4], которое описывает зависимость дифференциальной интенсив-

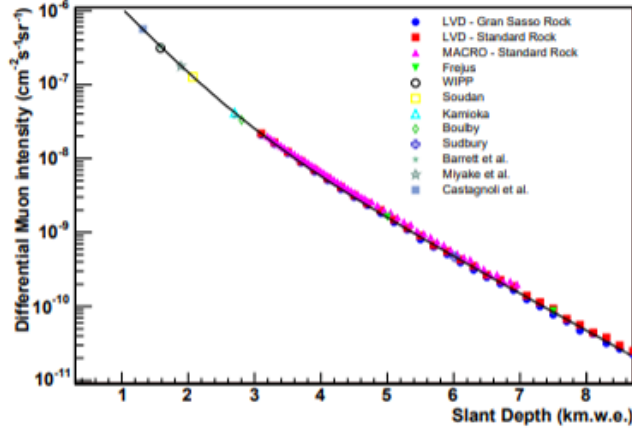


Рис. 2: Измерения дифференциального потока мюонов как функция от высоты уклона.

ности мюонов $I(h)$ от высоты уклона h и выглядит следующим образом:

$$I(h) = (I_1 e^{-h/\lambda_1} + I_2 e^{-h/\lambda_2}) \quad (2)$$

Параметры I_1 , λ_1, I_2 и λ_2 представлены в таблице 1 и были определены путём фитирования экспериментальных данных с различных лабораторий, находящихся на разной глубине (графически представлено на рис. 2)

Параметр	Значение
I_1	$(8.60 \pm 0.53) * 10^{-6} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$
λ_1	(0.46 ± 0.01) км(высота над уровнем моря)
I_2	$(0.44 \pm 0.06) * 10^{-6} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$
λ_2	(0.87 ± 0.02) км(высота над уровнем моря)

Таблица 1: Значения параметров для выражения 2

С помощью данной формулы с учётом размеров эффективной области была получена следующая величина полного потока: $(3.58 \pm 1.09) \times 10^{-10}$.

Ещё одним методом расчёта потока мюонов, которые долетают до подземной лаборатории, является программный пакет на python под названием MUTE. Работа этого программного пакета обеспечивается подключением двух программ: для расчёта потока мюонов, проходящего через атмосферу используется MCEq, а для симуляции прохождения через камень и воду используется PROPOSAL.

В результате было получено следующее значение потока: $(4.18_{-0.02}^{+0.08}) \times 10^{-10} \mu/\text{см}^2/\text{с}$.

И самым вероятно очевидным методом расчёта потока мюонов является использование экспериментальных данных, полученных из мюонного вето, о чем подробнее в части 4.

4 Вычисление мюонного потока на основе данных, полученных из мюонного вето

Процесс обработки данных для получения состоит из следующих этапов:

1. выбор пробегов;
2. выбор и применение низкоуровневых ограничений на параметры;
3. выбор и применение высокоуровневых ограничений на параметры;
4. расчет мюонного потока с учетом отобранных данных.

4.1 Параметры событий, использованные для отбора данных

Для отбора событий и избавления от фона используется ряд параметров:

1. $vetoqPE$ - число фотоэлектронов, зарегистрированных в ФЭУ за одно событие;
2. $vetofmaxPE$ - доля суммарного заряда, собранного со всех ФЭУ, от максимально возможного значения суммарного заряда;
3. $vetoOverShoot$ - проинтегрированное количество заряда ($AЦП * nс$) для суммированного со всех ФЭУ сигнала, который находится выше базовой линии. Сигналы в вето должны быть отрицательными, а отклонение в положительную сторону не должно быть большим;
4. $nHitVeto$ - число ФЭУ использованных в формировании сигнала события;
5. $(vetofmaxpe * vetoqPE / nHitVeto)$ - наибольшее значение собранного заряда, усреднённое по количеству ФЭУ.

4.2 Низкоуровневые ограничения на параметры

На первом этапе работы были выбраны следующие ограничения на параметры:

1. $vetoqPE > 6$ - для отбрасывания низкоэнергетичных событий, которые в значительной степени могут являться шумом;
2. $vetoOverShoot < 2000$;
3. $foundVetoEvent == True$ - флаг, который устанавливается процессором Veto-AnalysisProc.

Флаг "foundVetoEvent" основывается на анализе проводимом VetoAnalysisProc. Данный процессор анализирует суммарный сигнал, а также его первую производную.

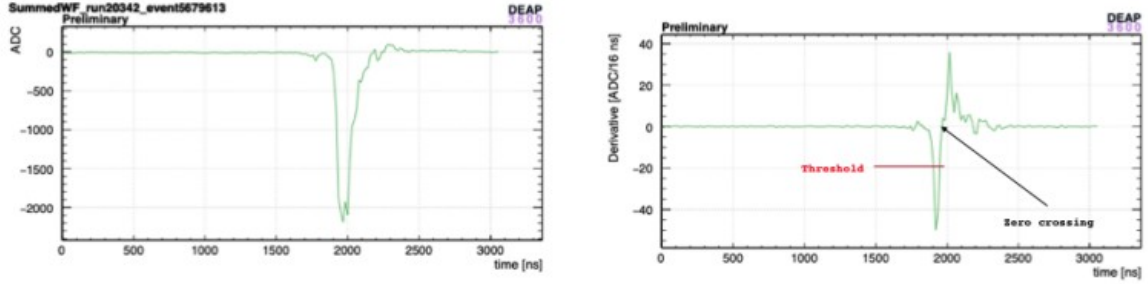


Рис. 3: Суммированный сигнал со всех ФЭУ(слева) и его первая производная(справа).

Важным будет отметить, что при анализе первой производной сигнала было обнаружено, что для событий, связанных с шумом, её значение никогда не спускается ниже значения ~ -20 АЦП/16 нс (пример сигнала, приведён на рис. 3). Также VetoAnalysisProc проводит анализ ещё ряда параметров, которые нельзя проанализировать с помощью Monte Carlo.

На рис.4 представлены распределения анализируемых величин (описания которых представлены в пункте 4.1) после применения низкоуровневых ограничений.

4.3 Высокоуровневые ограничения

Для того чтобы отследить, какие сигналы могут быть вызваны непосредственно мюонами, интересно взглянуть на распределения основных величин, полученные с помощью Monte Carlo согласно модели Mei&Hime[5]. Для данной задачи брались только данные от событий, связанных с прохождением мюонов через водный резервуар. Также для симуляции соответствовали 3-м конкретным пробегам, в который был различный набор рабочих ФЭУ:

1. в пробеге 18721 выключены ФЭУ с id 1012, 1013, 1034 ;
2. в пробеге 25199 выключены ФЭУ с id 1012, 1013, 1034, 1010, 1014, 1038;
3. в пробеге 27125 выключены ФЭУ с id 1000, 1002, 1010, 1014, 1024, 1027, 1028.

В ходе каждой Monte Carlo симуляции было сгенерировано 25×10^3 событий, связанных с мюонами для каждого из трех пробегов. На рисунке 5 представлены распределения, полученные с помощью Monte Carlo.

Все полученные зависимости сравнивались с экспериментальными данными и на основании этого были выбраны следующие высокоуровневые ограничения на параметры:

1. $(veto_{maxpe} veto_{qPE} / nHitVeto) < (0.01 veto_{qPE} + 1.4)$;
2. $veto_{maxpe} > 0.08$;

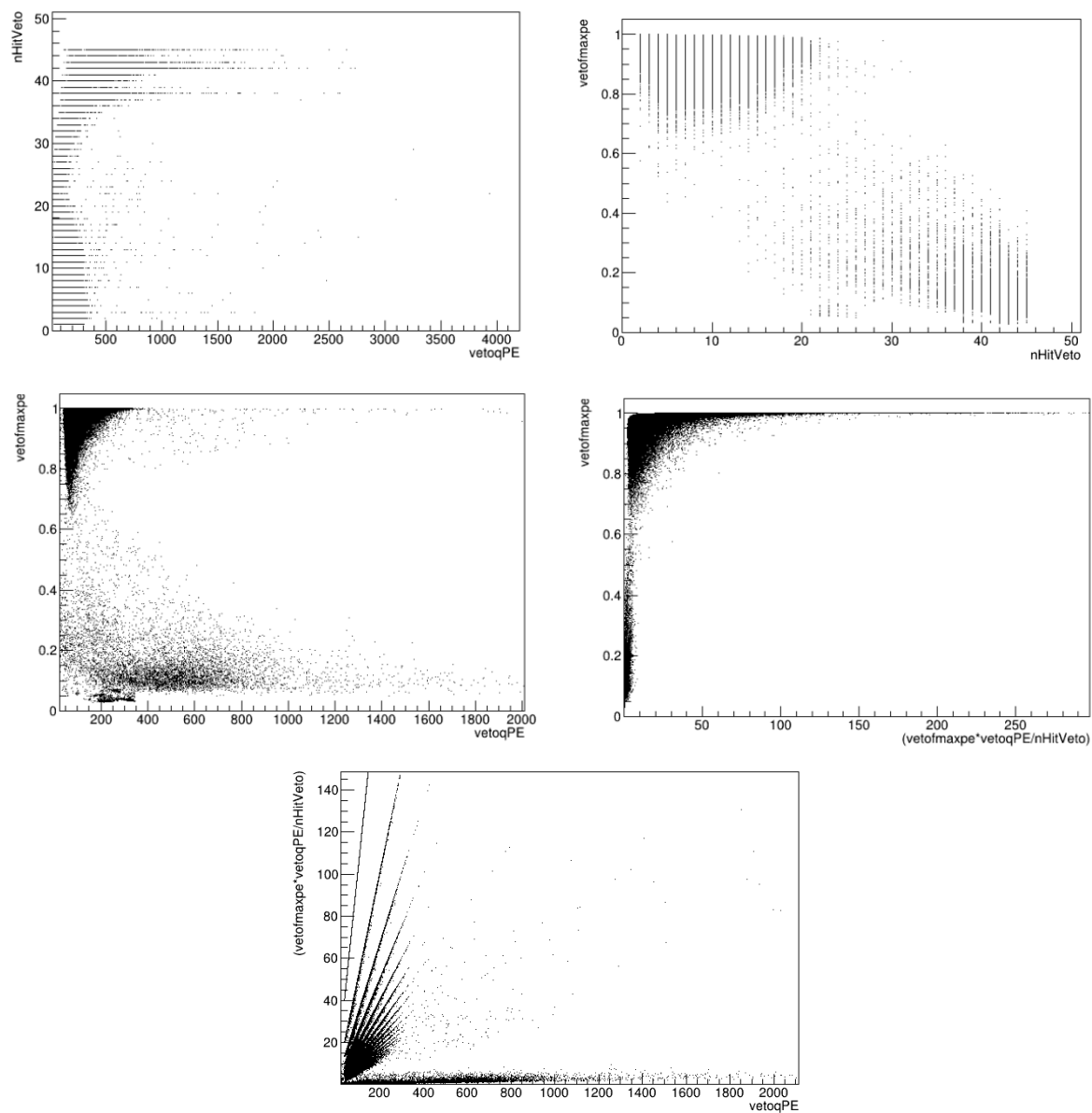


Рис. 4: Распределения, наблюдаемые в данных после применения низкоуровневых ограничений

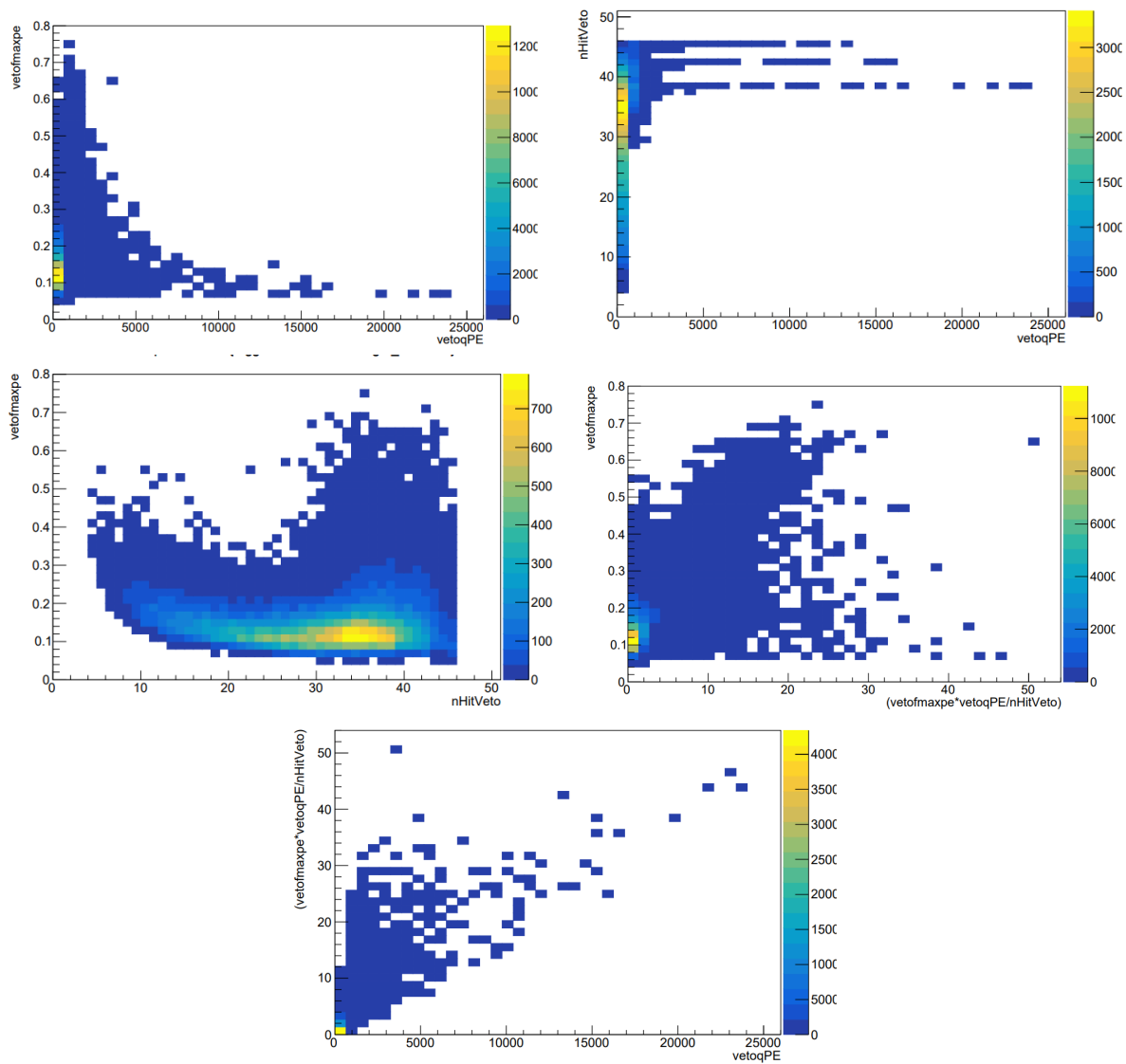


Рис. 5: Распределения, полученные с помощью Monte Carlo.

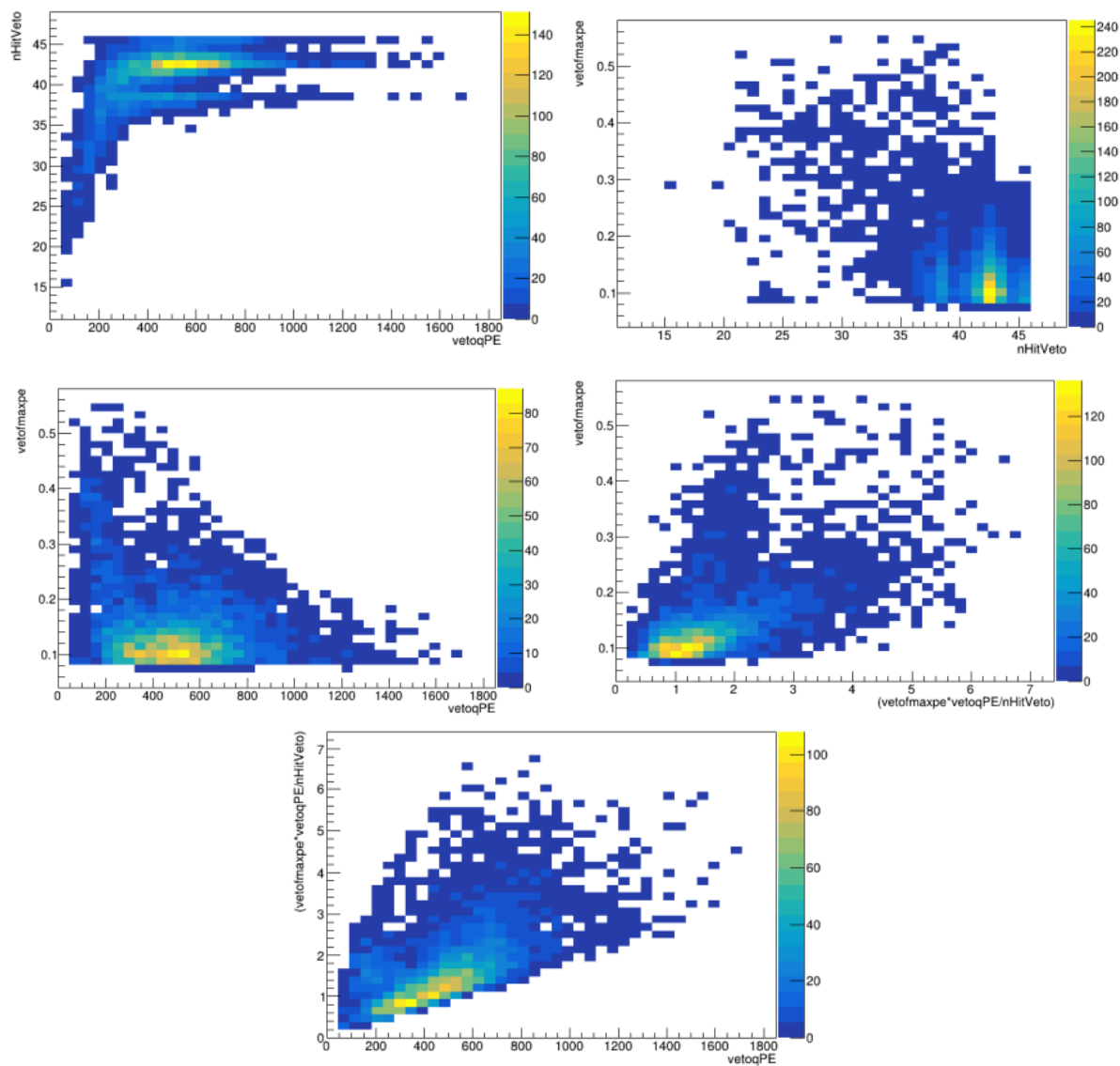


Рис. 6: Распределения, наблюдаемые в данных после применения высокоуровневых ограничений

3. $vetoqPE > 50$;
4. $vetoOvershoot < 1000$;
5. $isInstrumental == 0$, специально введённая переменная для описания событий, когда в ФЭУ попадает более 1000 фотоэлектронов.

На рисунке 6 представлены распределения анализируемых величин (описания которых представлены в пункте 4.1) после применения высокоуровневых ограничений.

Rate rebinned by 2 weeks

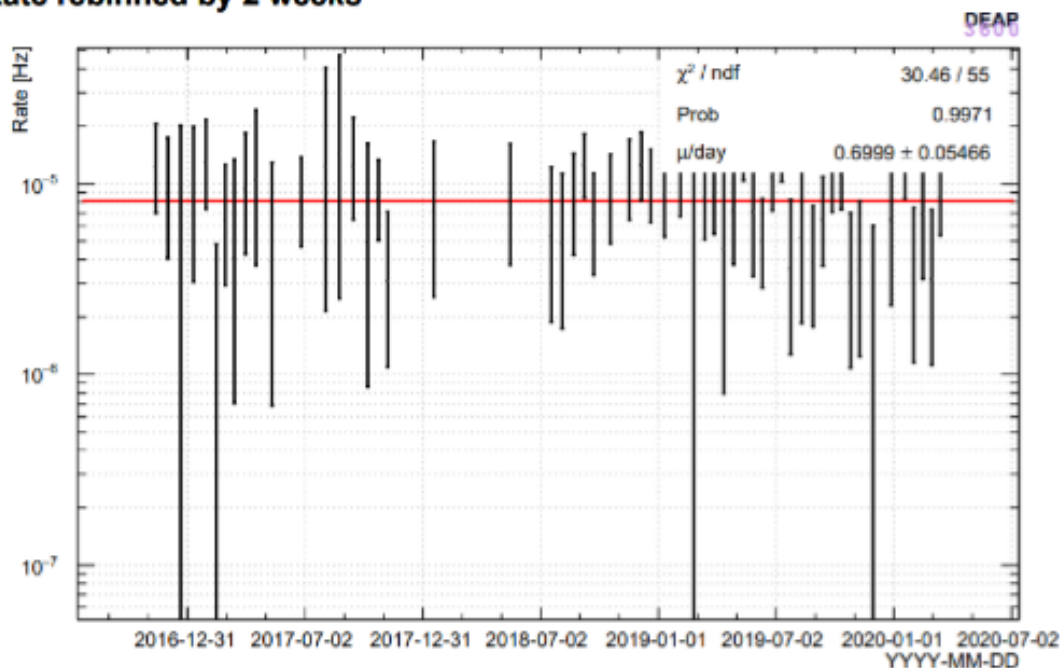


Рис. 7: Частота совпадений между мюонным вето и резервуаром с жидким аргонном

4.4 Проверка правильности выбора ограничений на параметры

Высокоэнергетичные мюоны могут быть с одинаковой эффективностью детектированы в мюонном вето и в жидком аргоне, что может быть использовано для проверки выбранных ограничений. Для этого проверяется число совпадений между мюонным вето и резервуаром с жидким азотом с применением противоположных ограничений. Иными словами мы смотрим число совпадений используя все ограничения, описанные в пункте 4.3, при этом одну из них инвертируя. Таким образом мы рассматриваем события, которые предположительно относятся к шуму, и не могут быть зарегистрированы в жидком аргоне, следовательно, число совпадений должно резко упасть.

Сравнивать число совпадений мы будем со случаем, когда все ограничения применены, что изображено на рисунке 7. Значения частоты на данном графике здесь и далее были ребиннированы с интервалом в 2 недели для уменьшения статистических флуктуаций.

Результаты последовательного инвертирования представлены на рисунке 8. Также частота совпадений для каждого случая инвертирования ограничения представлена в таблице 2. Сильный спад этого значения указывает на то, что ограничения выбраны правильно.

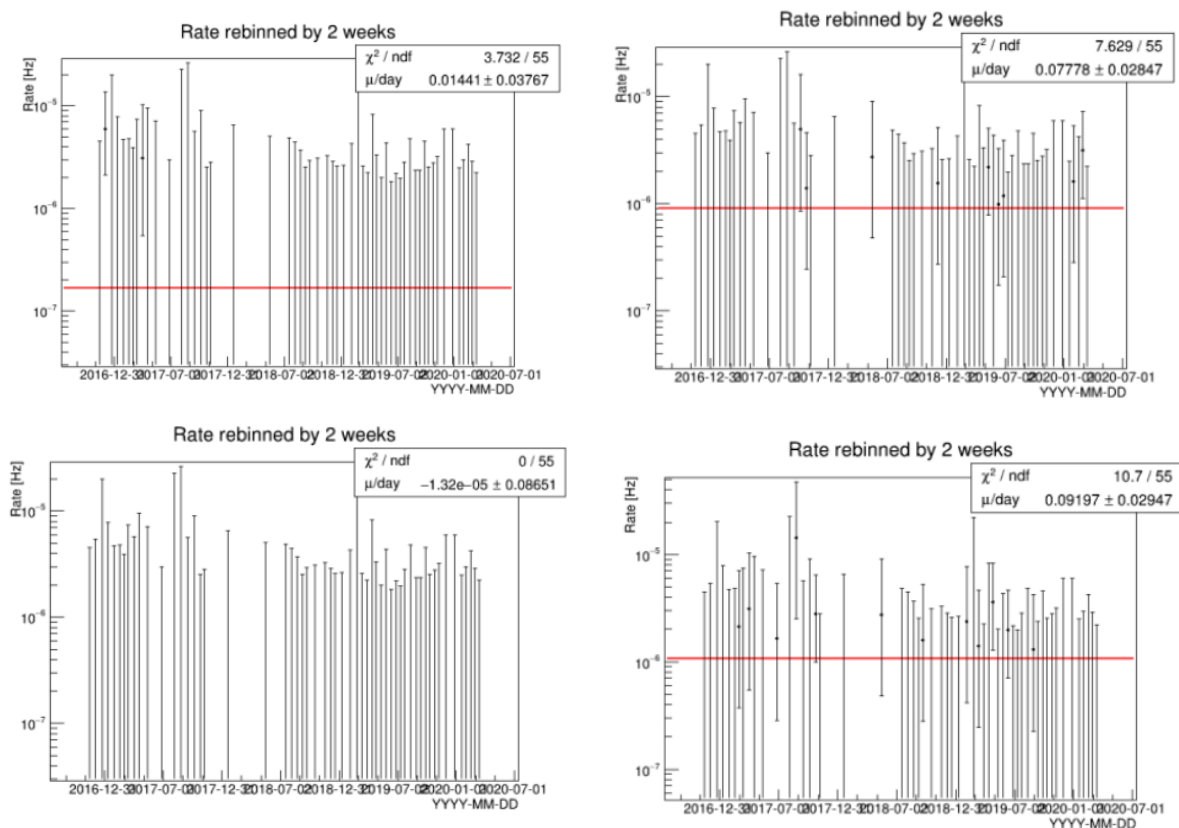


Рис. 8: Частота совпадений между мюонным вето и резервуаром с жидким аргоном при инвертировании каждого из ограничений.

	$\mu/\text{день}$
Все ограничения	0.69 ± 0.05
Инвертированное ограничение 1	0.09 ± 0.03
Инвертированное ограничение 2	$(1.32 \pm 0.08) \cdot 10^{-5}$
Инвертированное ограничение 3	0.08 ± 0.03
Инвертированное ограничение 4	0.14 ± 0.37

Таблица 2: Частота совпадений для каждого случая инвертирования ограничения.

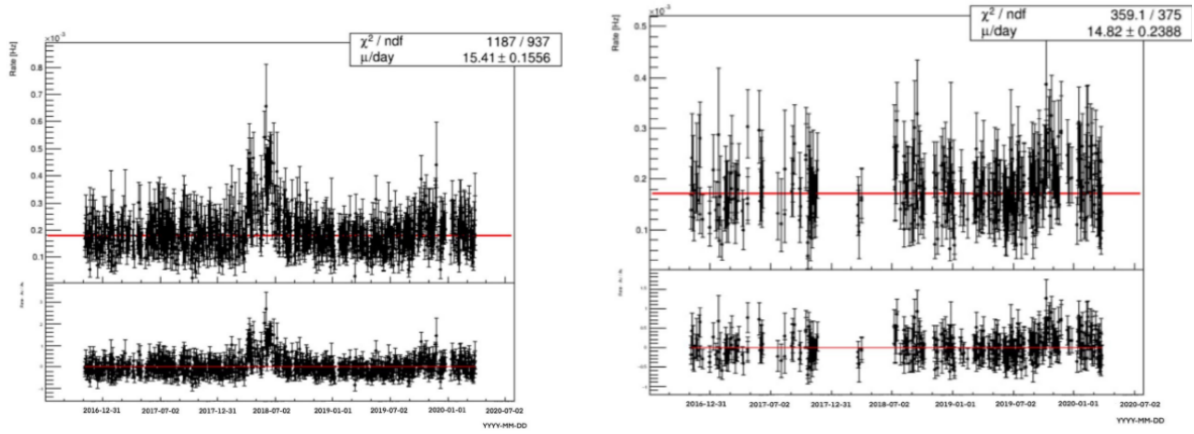


Рис. 9: Частота попадания мюонов в вето до применения ограничений (слева) и после (справа).

4.5 Расчёт потока мюонов после применения высокоуровневых ограничений на параметры

После окончательного выбора ограничений был построен график зависимости частоты попадания мюонов в вето, который представлен на рисунке. Для сравнения также был построен аналогичный график, но без применения ограничений. После этого было рассчитано значение потока по формуле:

$$\Phi = \frac{R_{obs}}{A_{eff}} \quad (3)$$

где R_{obs} — число попадающих каждый день в вето мюонов, A_{eff} - эффективная площадь поперечного сечения равная $(64 \pm 2) \text{ м}^2$. Это значение составило $2.6 \pm 0.2 \times 10^{-10} \mu/\text{см}^2/\text{с}$.

Данное значение совпадает с полученными ранее только по порядку величины и не является окончательным. В данном методе вместе с фоном обрезаются некоторое количество низкоэнергетических мюонов.

5 Заключение

В ходе работы были достигнуты следующие результаты:

- Был проведен анализ данных, полученных из мюонного вето;
- Были установлены ограничения на параметры для данных, полученных из мюонного вето;
- Было определено промежуточное значение потока мюонов, которое составило $(2.6 \pm 0.2) \times 10^{-10} \mu/\text{см}^2/\text{с}$, которое совпадает с полученными другими способами потоками по порядку величины.

Список литературы

- [1] В. Aharmim и др. «Measurement of the cosmic ray and neutrino-induced muon flux at the Sudbury neutrino observatory». В: *Phys. Rev. D* 80 (1 июль 2009), с. 012001. DOI: 10.1103/PhysRevD.80.012001. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.80.012001>.
- [2] P.-A. Amaudruz и др. «Design and construction of the DEAP-3600 dark matter detector». В: *Astroparticle Physics* 108 (2019), с. 1–23. ISSN: 0927-6505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.09.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650518300914>.
- [3] E. Aprile и др. «Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T». В: *Phys. Rev. Lett.* 121 (11 сент. 2018), с. 111302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.111302. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.111302>.
- [4] G. L. Cassiday, J. W. Keuffel и J. A. Thompson. «Calculation of the Stopping-Muon Rate Underground». В: *Phys. Rev. D* 7 (7 апр. 1973), с. 2022–2031. DOI: 10.1103/PhysRevD.7.2022. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.7.2022>.
- [5] D.-M. Mei и A. Hime. «Muon-induced background study for underground laboratories». В: *Phys. Rev. D* 73 (5 март 2006), с. 053004. DOI: 10.1103/PhysRevD.73.053004. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.73.053004>.