

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
Исследование источников фона космогенного происхождения в детекторе
Darkside-20k

Студент _____ Д. С. Голубков

Научный руководитель,
с.н.с. ОФН, НИЦ "Курчатов-
ский институт" _____ И. Н. Мачулин

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1	Детекторы на основе жидких благородных газов	4
2	Эксперимент Darkside-20k	5
3	Космический фон	7
4	Сравнение результатов моделирования	8
5	Моделирование мюонов средней энергии в жидком аргоне	10
6	Моделирование космогенных мюонов в жидком аргоне	12
7	Заключение	14
	Список использованных источников	15

ВВЕДЕНИЕ

Изучение природы Тёмной материи является одной из основных задач современной физики. Астрономические наблюдения последних десятилетий определенно свидетельствуют в пользу того, что, помимо наблюдаемой, во Вселенной имеется значительное ($\sim 85\%$) количество материи, которая не наблюдается иначе, как через гравитационное взаимодействие, и именуется Тёмной материей. Это одна из самых интригующих проблем фундаментального естествознания конца XX столетия, и от результата ее решения в значительной степени будет зависеть научная картина мира в предстоящем будущем.

Присутствие Тёмной материи наблюдается по создаваемым ею гравитационным эффектам. Наиболее убедительными экспериментальными фактами существования Тёмной материи, полученными из космических наблюдений, являются: обнаружение гравитационного линзирования далеких галактик скоплениями галактик, расположенными перед ними и результаты измерения скоростей слоёв гало, для звезд в спиральных галактиках. В зависимости от класса предполагаемых частиц Тёмной материи, можно ожидать, что гравитационное взаимодействие будет для этих частиц не единственным.

Поскольку отсутствует чёткое понимание свойств Тёмной материи, ввиду множества интерпретаций, во всех исследовательских работах, как правило, заранее оговаривается рассматриваемый класс частиц служащий кандидатом на роль Тёмной материи. Самые распространённые кандидаты на роль частиц Тёмной материи: аксионы (масса $\sim 10^{-6} - 10^{-2}$ эВ), легчайшие суперсимметричные частицы - нейтралино ($10 - 1000$ ГэВ), реликтовые чёрные дыры, частицы Калуцы-Клейна.

Наиболее активно рассматриваемой в настоящее время гипотезой является представление большей части небарионной Тёмной материи в виде массивных частиц с массой в диапазоне 1 ГэВ – 1 ТэВ, слабо взаимодействующих с обычной материей, так называемые частицы WIMP (Weakly

Interacting Massive Particles, дословно: слабовзаимодействующие массивные частицы) [1].

Частицы WIMP особенно привлекательны в качестве кандидатов на Тёмную материю ввиду ряда очевидных достоинств. Во-первых, появление WIMПов в теоретической физике частиц мотивировано проблемой нарушения электрослабой симметрии. Во-вторых, согласно стандартным космологическим предположениям, их тепловая реликтовая распространённость естественным образом совпадает с той, которая требуется для Тёмной материи. Слабое взаимодействие с материей может быть достаточным для того, чтобы они могли быть обнаружены в прямых экспериментах [2].

В экспериментах по прямой регистрации WIMP измеряют энергию, выделившуюся в процессе их рассеяния на ядрах мишени. Для регистрации ядра отдачи и измерения его энергии могут быть использованы ионизационные, сцинтилляционные и калориметрические детекторы или их комбинации [2].

1. ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

В настоящее время в мире для поиска частиц Тёмной материи действуют около 15 детекторов на основе жидких благородных газов [3]. Детекторы отличаются друг от друга размерами, формой, конструктивными особенностями и типом мишени (детектирующим веществом). В основном, в качестве мишени используются жидкие инертные газы: жидкий ксенон (LXe), жидкий аргон (LAr) и жидкий неон (LNe). Мишени представляют собой детектирующее вещество – сцинтиллятор. Время высвечивания сцинтилляторов на основе жидких благородных газов $\sim 10^{-8}$ с. Длины волн излучаемого света лежат в области дальнего ультрафиолета. Поэтому световые вспышки, возникающие в жидкости при прохождении заряженной частицы, не могут быть непосредственно зарегистрированы при помощи обычных ФЭУ (имеется ввиду ФЭУ серийного производства). Для решения этой проблемы используют переизлучатели ультрафиолетового света в видимый диапазон, например ТРВ (TetraPhenylButadiene). Или, в частности, окно для фотокатода ФЭУ изготавливают из фторида магния (MgF₂), который пропускает диапазон длин волн 112 – 830 нм. Основными характеристиками сцинтилляторов являются световой выход, спектр излучения и время высвечивания (См. таблицу 1.1) [4].

Таблица 1.1 – Сцинтилляционные свойства жидких благородных газов

Сцинтиллятор	LHe	LAr	LXe
Плотность	0.147 g/cm ³	1.395 g/cm ³	2,942 g/cm ³
Длина волны излучения	80 nm	128 nm	176 nm
Время высвечивания	10 ns/13 s	6 ns/1600 ns	4.3 ns/27 ns
Световой выход	20000 ph/MeV	40000 ph/MeV	63000 ph/MeV
Коэффициент преломления	1.028	1.45	1.55

2. ЭКСПЕРИМЕНТ DARKSIDE-20K

Одним из проектов по поиску частиц Тёмной материи является эксперимент Darkside-20k, который является модернизацией уже существующего эксперимента Darkside-50 в недрах горы Gran Sasso в Италии.



Рисунок 2.1 — Конструкция детектора

Детектор представляет собой двухфазную временную проекционную камеру (TRC) с активной массой жидкого аргона 50 тонн. В качестве мишени используется подземный аргон, в котором отсутствует изотоп ^{39}Ar , для значительного снижения радиоактивного фона. Внутренний детектор содержит активный объем LAr , который просматривается массивами кремниевых фотоумножителей (ФЭУ) сверху и снизу. Внутренние поверхности активного объема покрыты напыленной в вакууме тонкой пленкой из тетрафенилбутадиена (TPB), сдвигающего длину волны (WLS), который смещает первичную УФ-сцинтилляцию (S1) 128 нм в свет, видимый ФЭУ.

Для обнаружения ионизации DarkSide использует двухфазную конфигурацию TRC, которая содержит небольшую область газообразного аргона над большей областью жидкого аргона. Равномерное электрическое поле создается «полевой сеткой», состоящей из катодной плоскости, формирующих поле колец и вытяжной сетки. Это однородное поле перемещает ионизационные электроны вверх к поверхности жидкости. Там коллинеар-

ное электрическое поле извлекает электроны в газовую фазу, где они производят вторичные сцинтилляционные фотоны (S_2) с помощью процесса, называемого «электролюминесценцией» (EL). Результирующие вторичные фотоны регистрируются кремниевыми ФЭУ как задержанное совпадение относительно первичного сцинтилляционного сигнала.

Подавление фона достигается за счет полного использования богатого информационного содержания объединенных сигналов ионизации и сцинтилляции, доступных от двухфазных ТРС.

LAr ТРС позволяет точно локализовать события в трех координатах. Поскольку диффузия во время длительного дрейфа в плотных благородных жидкостях незначительна, время задержки (дрейфа) между сигналами S_1 и S_2 точно определяет вертикальное положение каждого события с точностью до миллиметра. Распределение света по матрице верхнего фотодетектора дает горизонтальное положение с точностью до сантиметра.

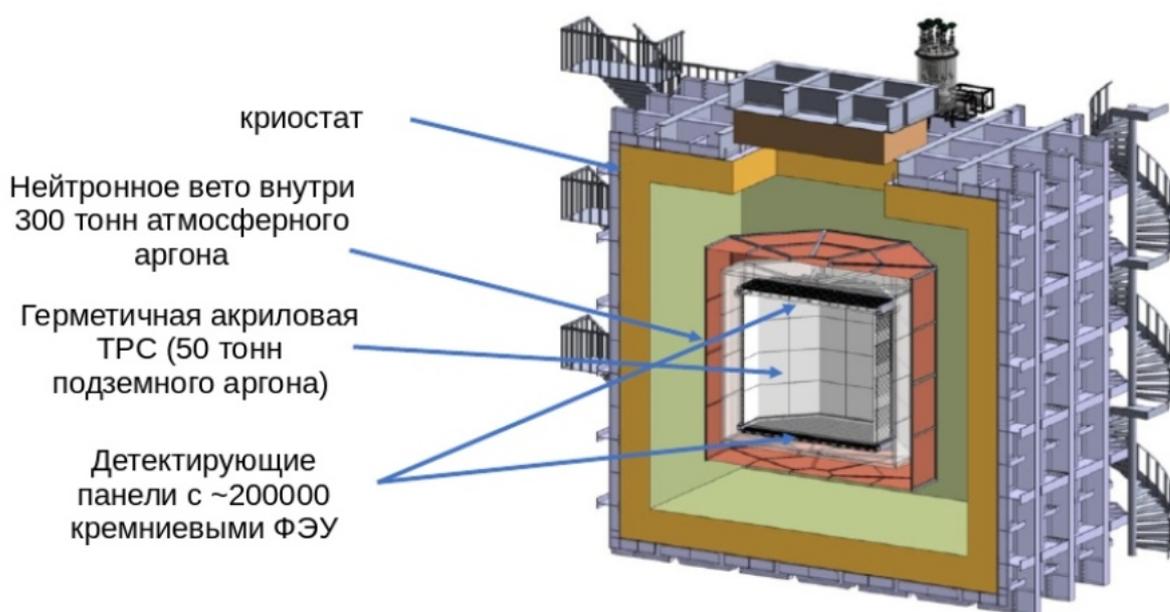


Рисунок 2.2 — Конструкция эксперимента Darkside-20k

ТРС расположена внутри криостата из нержавеющей стали, заполненного атмосферным аргоном и окружена нейтронным вето для уменьшения уровня нейтронно-индуцированного фона.

3. КОСМИЧЕСКИЙ ФОН

В италии в регионе Абруцци находится Национальная лаборатория Гран-Сассо на глубине 3800 метров водного эквивалента, где в холле С находится эксперимент Bogexino, рядом с которым планируется поместить Darkside-20k.

Представлены результаты расчётов информации о космических мюонах, пролетающих сквозь гору Гран-Сассо (см. рис3.1, рис3.2):

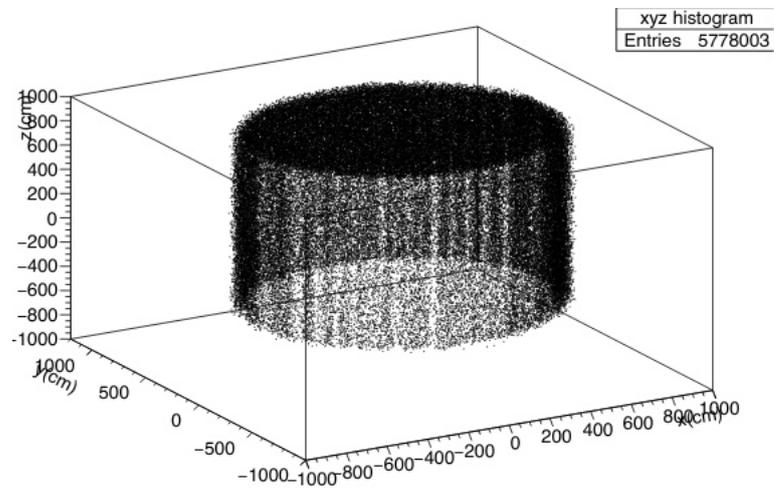


Рисунок 3.1 — Расположения мюонов на поверхности цилиндра радиуса 7 и высотой 14 метров в лаборатории Гран-Сассо

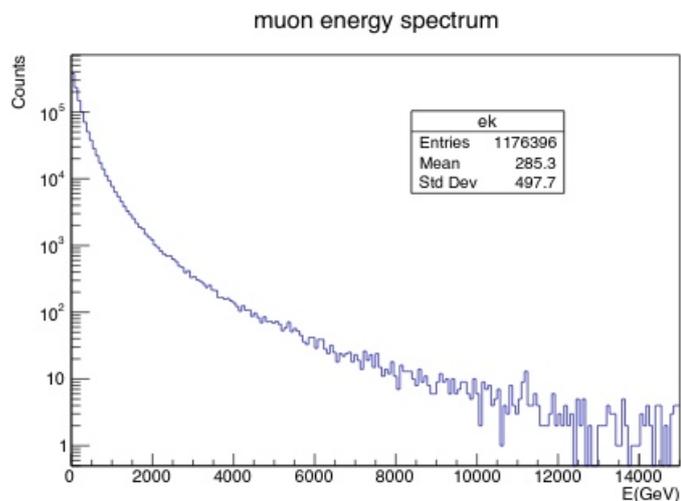


Рисунок 3.2 — Спектр энергий мюонов

Плотность потока космических мюонов равна $3.4 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} \cdot \text{M}^{-2}$

4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Нейтроны, образующиеся в результате взаимодействия космических мюонов, играют большую роль в создании фона для подземных детекторов при поиске редких событий. Такие нейтроны могут доминировать на фоне, так как от них особенно трудно защититься и обнаружить. Поскольку фактические данные немногочисленны и плохо документированы, необходимо использовать имитационные исследования для проектирования экранов и прогнозирования фоновых коэффициентов. Таким образом, проверка любого кода моделирования необходима для обеспечения надежных результатов.

В ходе работы была написана программа в пакете Geant4 по моделированию фона от космических мюонов, пролетающих сквозь мишень детектора. Для проверки точности работы кода были проведены измерения выхода ряда космогенных радиоизотопов в эксперименте с солнечными нейтрино Bogerino, результаты которых сравнивались с существующими прогнозами моделирования и данными эксперимента (таблица 4.1).

Таблица 4.1 — Моделирование 10^6 мюонов энергией 285 ГэВ для сцинтиллятора Borexino

	Данные от Borexino	Geant4 предыдущая модель (HP_Bertini_LEP_QGS)	Geant4 новая модель (QGSP_BIC_HP)
Мишень	C^9H^{12}		
Изотопы	Выход [$10^{-7} \cdot (\mu\text{on} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)^{-1}$]		
^6He	38 ± 15	8.9 ± 0.4	6.3 ± 0.5
$^8\text{He} (\beta+n)$	< 1.5	0.18 ± 0.05	0.26 ± 0.11
^8Li	7 ± 7	7.8 ± 0.4	4.6 ± 0.4
$^9\text{Li} (\beta+n)$	2.9 ± 0.3	1.68 ± 0.16	1.3 ± 0.2
^8B	14 ± 6	1.44 ± 0.15	0.47 ± 0.14
^{12}B	56 ± 3	29.7 ± 0.7	4.4 ± 0.4
^{11}Be	< 7.0	0.45 ± 0.09	0.17 ± 0.09
^9C	< 16	0.99 ± 0.13	0.60 ± 0.16
^{10}C	18 ± 5	41.1 ± 0.8	8.2 ± 0.6
^{11}C	886 ± 115	415 ± 3	105 ± 2
^{12}N	< 1.1	3.0 ± 0.2	3.1 ± 0.4

Общее согласие между данными и моделированием космогенного фона наблюдается за некоторыми исключениями, наиболее ярким случаем является выход ^{11}C , для которого оба кода возвращают сильно заниженные значения. Моделируемые выходы $\beta+n$ изотопов в целом согласуются с данными.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЮОНОВ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ В ЖИДКОМ АРГОНЕ

Была написана программа для моделирования фона радиоизотопов от космических мюонов в жидком аргоне из подземного источника.

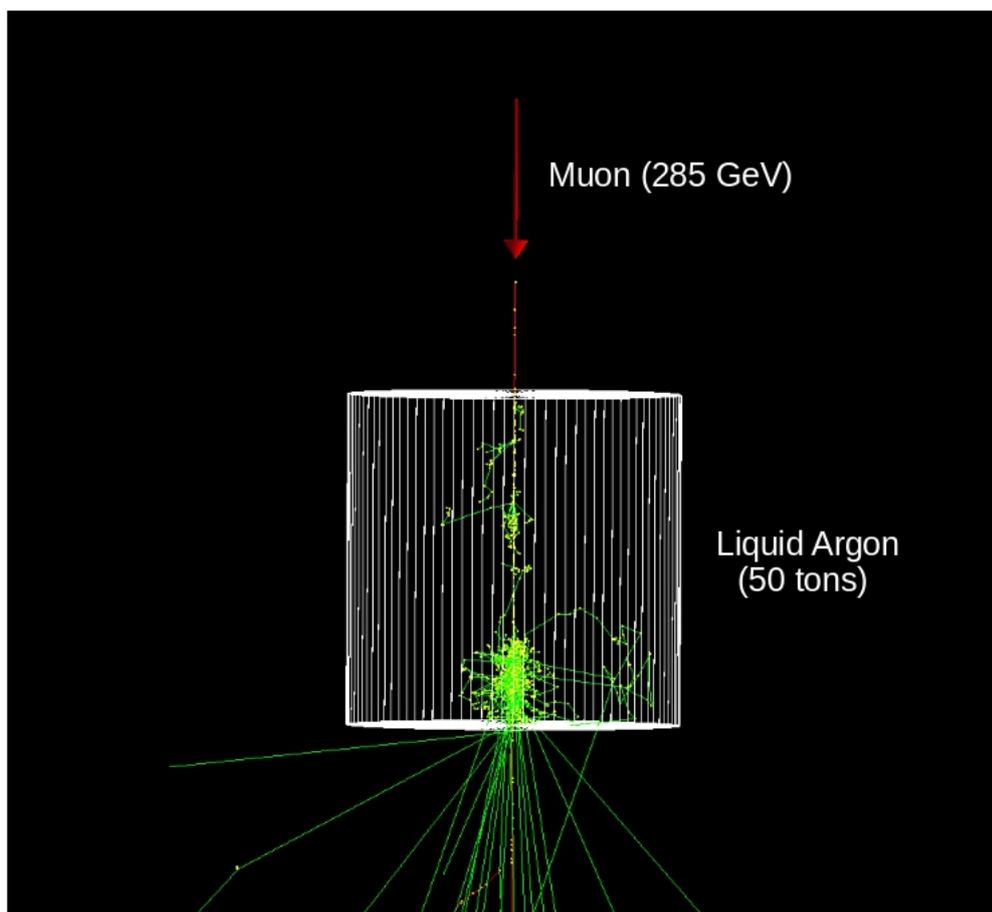


Рисунок 5.1 — Геометрия модели активной мишени Darkside-20k для мюонов энергией 285 ГэВ

В результате моделирования 10^6 высокоэнергетичных мюонов 285 ГэВ, разыгранных в направлении по оси цилиндра, получены выходы радиоизотопов β и $\beta+n$ распадов (таблица 5.1).

Таблица 5.1 — Моделирование 10^6 мюонов энергией 285 ГэВ для 50 тонн жидкого аргона

Geant4 (QGSP_BIC_HP)			
Изотопы β	Выход [$10^{-7} \cdot (\text{muon} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)^{-1}$]	Изотопы $\beta+n$	Выход [$10^{-7} \cdot (\text{muon} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)^{-1}$]
^{41}Ar	63.7 ± 1.1	^8He	0.04 ± 0.03
^{40}Cl	36.5 ± 0.9	^9Li	0.28 ± 0.07
^{39}Cl	244 ± 2	^{11}Li	<0.02
^{39}Ar	1916 ± 6	^{11}Be	0.12 ± 0.05
^{38}Cl	250 ± 2	^{13}B	0.12 ± 0.05
^{37}S	48.2 ± 0.9	^{17}N	0.14 ± 0.05
^{37}Cl	387 ± 3	^{22}F	0.24 ± 0.07
^{35}S	161.5 ± 1.8	^{24}F	0.12 ± 0.05
^{34}P	31.9 ± 0.8	^{27}Na	0.12 ± 0.05
^{33}P	53.9 ± 1.0	^{31}Al	0.58 ± 0.11
^{32}P	73.9 ± 1.2	^{32}Al	0.16 ± 0.06
^{31}Si	23.8 ± 0.7		
^{28}Al	24.6 ± 0.5		
^{10}Be	0.81 ± 0.13		
^3H	127.2 ± 1.6		

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСМОГЕННЫХ МЮОНОВ В ЖИДКОМ АРГОНЕ

Также были разыграны космические мюоны с учётом распределения по энергиям, расположениям и направлениям движения в горе Гран-Сассо.

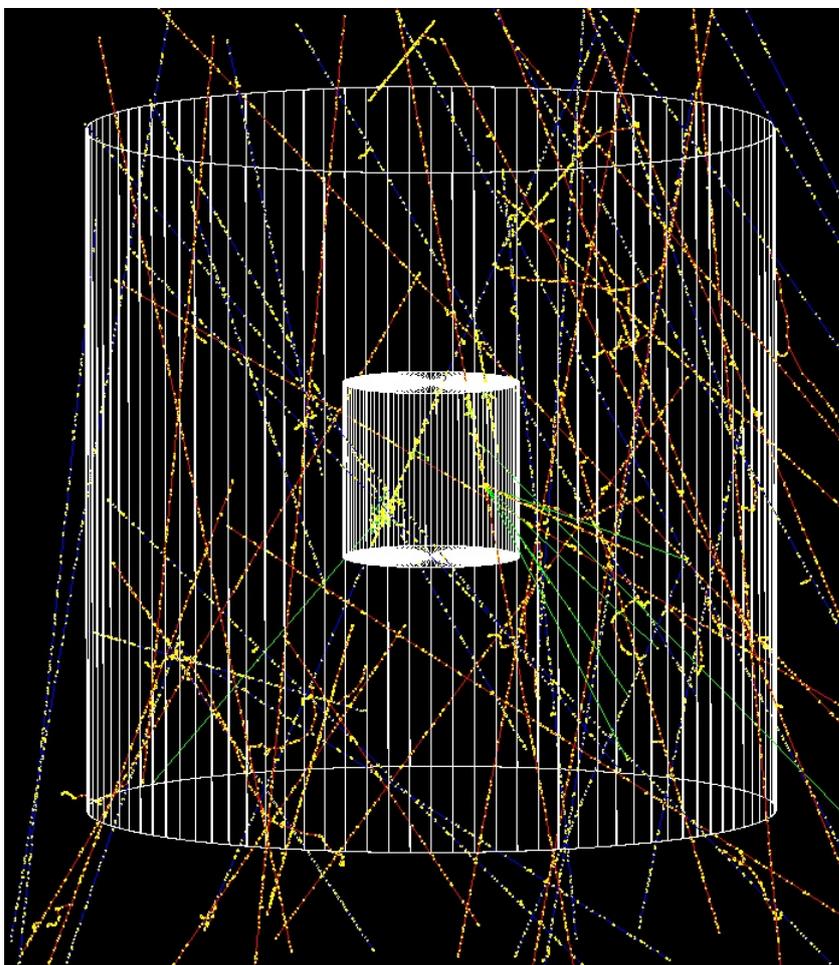


Рисунок 6.1 — Визуализация моделирования космических мюонов в Гран-Сассо на мишени Darkside-20k

В результате моделирования космических мюонов из данных Bogehino получены выходы радиоизотопов β и $\beta+n$ распадов (таблица 6.1).

Таблица 6.1 — Моделирование космических мюонов для 50 тонн жидкого аргона

		Geant4 (QGSP_BIC_HP)	
Изотопы β	Выход [$10^{-7} \cdot (\mu\text{on} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)^{-1}$]	Изотопы $\beta+n$	Выход [$10^{-7} \cdot (\mu\text{on} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)^{-1}$]
^{41}Ar	33.3 ± 2.5	^8He	<0.2
^{40}Cl	22.1 ± 2.5	^9Li	0.2 ± 0.2
^{39}Cl	172 ± 6	^{11}Li	<0.2
^{39}Ar	1371 ± 17	^{11}Be	0.39 ± 0.28
^{38}Cl	184 ± 6	^{13}B	<0.2
^{37}S	37.9 ± 2.7	^{17}N	<0.2
^{37}Cl	284 ± 8	^{22}F	<0.2
^{35}S	112 ± 5	^{24}F	<0.2
^{34}P	27 ± 2	^{27}Na	<0.2
^{33}P	33 ± 3	^{31}Al	0.39 ± 0.28
^{32}P	50 ± 3	^{32}Al	<0.2
^{31}Si	16.9 ± 1.8		
^{28}Al	12.1 ± 1.5		
^{10}Be	1.5 ± 0.6		
^3H	106 ± 5		

Всего было разыграно - 2357106 мюонов, количество мюонов попавших в объём аргона - 154231, средняя длина их пути в объёме - 237.4 см, средняя энергия мюонов - 285.3 ГэВ.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был смоделирован радиоактивный фон от космических мюонов для эксперимента Darkside-20k. Полученные результаты будут использоваться на конференциях группы анализа фонов детектора. В будущем планируется провести моделирование полного объёма детектора, провести оптимизацию программы и разыграть новые частицы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Akimov D.* Experimental methods for detecting corpuscular dark matter (review). Instrumentation and experimental technique. — 2001.
2. *V.A. Ryabov V.A. Tsarev A. T.* Search for dark matter particles. Advances in the physical sciences (reviews of current problems). — 2008.
3. *Akimov. D.* Overview of WIMP Search Experiments // INRseminar2011. —.
4. A Global Analysis of Light and Charge Yields in Liquid Xenon / B. Lenardo [и др.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 2015. — т. 62, № 6. — с. 3387—3396. — arXiv: [1412.4417](https://arxiv.org/abs/1412.4417) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1412.4417)].