

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 2022

# СОДЕРЖАНИЕ

1 Эксперимент Darkside-20k	4
2 Космический фон	6
3 Моделирование выработки $\beta$ -n изотопов в детекторе	7
4 Фоновые распады $\beta$ -n изотопов	9
5 Моделирование нейтронов от $\beta$ -n распадов, имитирующих регистрацию WIMP в детекторе Darkside-20k	12
6 Заключение	15
Список использованных источников	16

# ВВЕДЕНИЕ

Изучение природы Скрытой массы 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 Скрытой массой. 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 Скрытой массы наблюдается по создаваемым ею гравитационным эффектам. Наиболее убедительными экспериментальными фактами существования Скрытой массы 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 Скрытой массы, можно ожидать, что гравитационное взаимодействие будет для этих частиц не единственным.

Поскольку отсутствует чёткое понимание свойств Скрытой массы, ввиду множества интерпретаций, во всех исследовательских работах, как правило, заранее оговаривается рассматриваемый класс частиц служащий кандидатом на роль Скрытой массы. Самые распространённые кандидаты на роль частиц Скрытой массы: 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 Скрытой массы 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 Скрытую массу 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 распространенность естественным образом совпадает с той, которая требуется для Скрытой массы. 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. ЭКСПЕРИМЕНТ DARKSIDE-20K

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

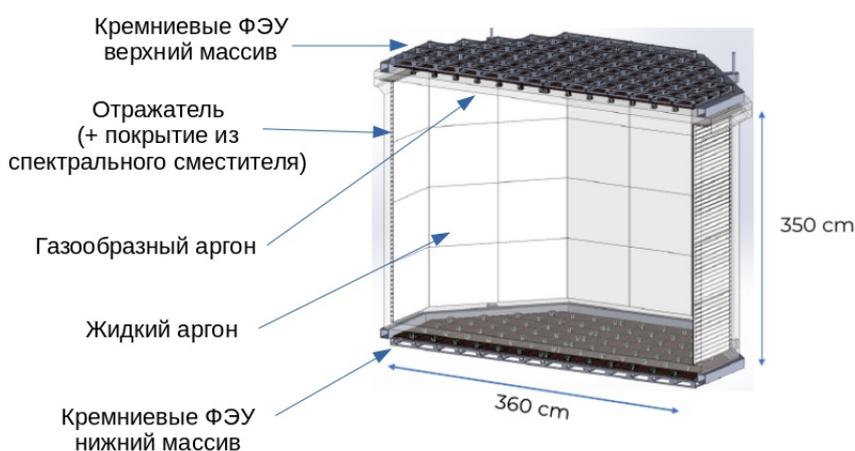


Рисунок 1.1 — Конструкция детектора

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  $^{39}\text{Ar}$ , для значительного снижения радиоактивного фона. Внутренний детектор содержит активный объем  $\text{LAr}$ , 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.

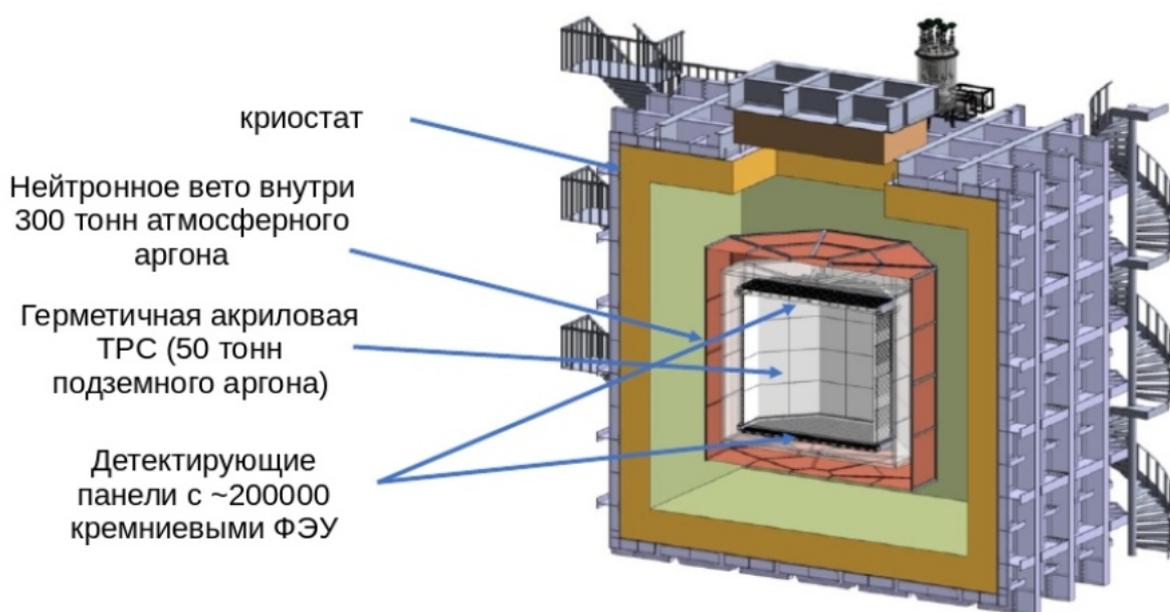


Рисунок 1.2 — Конструкция эксперимента Darkside-20k

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

## 2. 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 расчетов коллаборации Darkside в пакете Монте-Карло Fluka для потоков мюонов и вторичных частиц на внешней поверхности криостата детектора Darkside-20k (см. рис3.1, рис3.2).

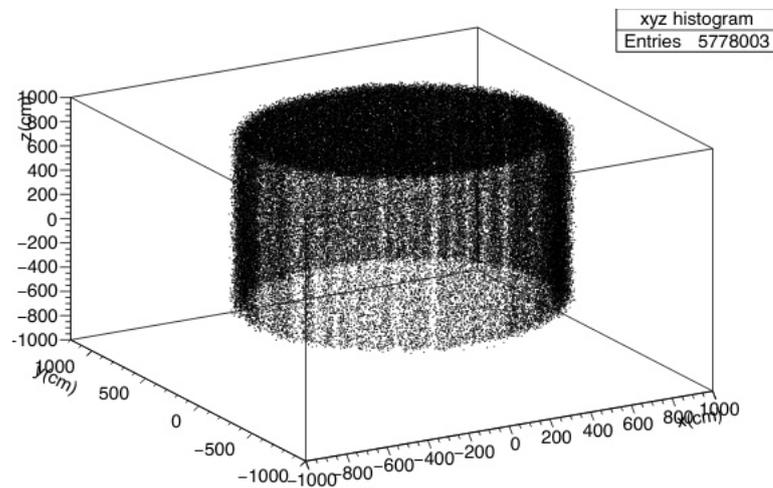


Рисунок 2.1 — Расположения мюонов на поверхности цилиндра радиуса 7 и высотой 14 метров в лаборатории Гран-Сассо

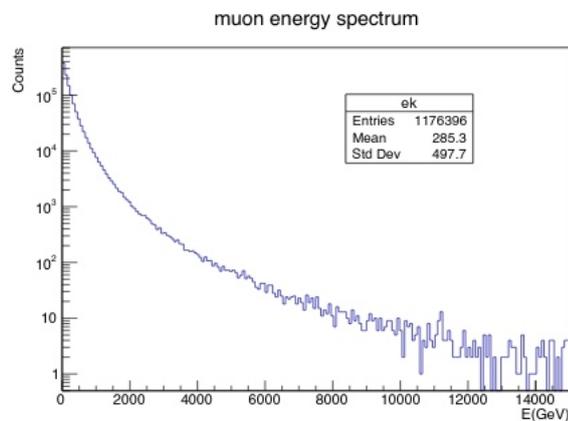


Рисунок 2.2 — Спектр энергий мюонов

Плотность потока космических мюонов равна  $3.4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  [3]

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫРАБОТКИ $\beta$ -N ИЗОТОПОВ В ДЕТЕКТОРЕ

Нейтроны, образующиеся в результате взаимодействия космических мюонов, играют большую роль в создании фона для подземных детекторов при поиске редких событий. Такие нейтроны могут вносить значительный вклад в фон установки, так как от них особенно трудно защититься и обнаружить. Поскольку фактические данные немногочисленны и плохо документированы, необходимо использовать имитационные исследования для проектирования защиты экранов и прогнозирования уровней фона в установке.

В результате взаимодействия мюонов с веществом детектора могут нарабатываться радиоактивные изотопы, вносящие вклад в негативный фон. Самыми опасными являются  $\beta$ -n изотопы, при распаде которых происходит эмиссия нейтронов. Эти нейтроны упруго рассеиваются на ядрах мишени детектора, тем самым имитируя частицы WIMP.

В ходе работы была написана программа в пакете Geant4 по моделированию фона от космических мюонов, пролетающих сквозь детектор. Геометрия модели представлена на рис.3.1:

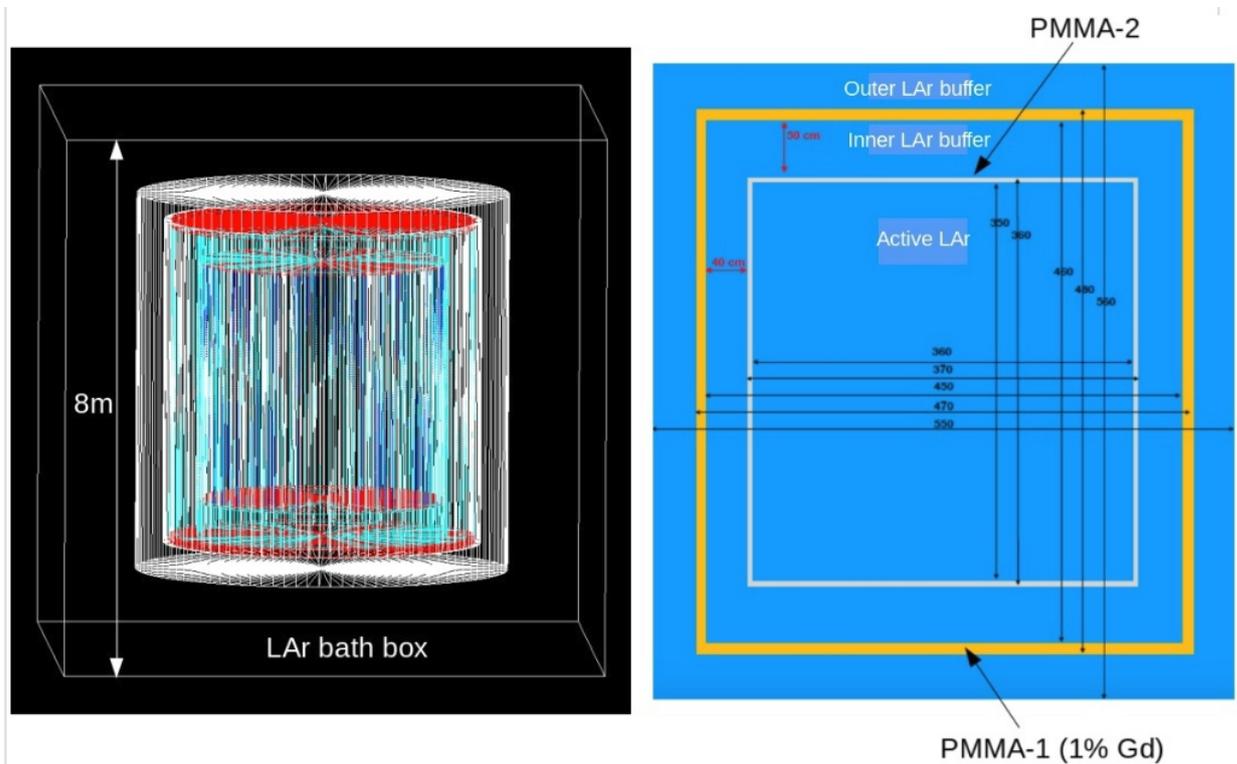


Рисунок 3.1 — Геометрия модели детектора Darkside-20k

В результате моделирования выработки  $\beta$ -n изотопов в активной мишени за 10 лет были получены выходы имитирующих нейтронов и выделены наиболее неблагоприятные из них:

Таблица 3.1 — Выход  $\beta$ -n изотопов за 10 лет

Изотоп	Выход в детекторе	T1/2, с	Выход нейтронов (ВЕТО-запрет 5 с)
N17	147	4,173	60,86
O22	12	2,25	0,03
F22	231	4,23	8,60
F23	50	2,23	0,52

## 4. ФОНОВЫЕ РАСПАДЫ $\beta$ -N ИЗОТОПОВ

Были посчитаны схемы  $\beta$ -n распадов образованных изотопов с наиболее неблагоприятными выходами имитирующих нейтронов и написаны генераторы в пакете Geant4, моделирующие их излучение. Полученные генераторы были интегрированы в программу коллаборации Darkside, где моделируется полная геометрия детектора Darkside-20k.

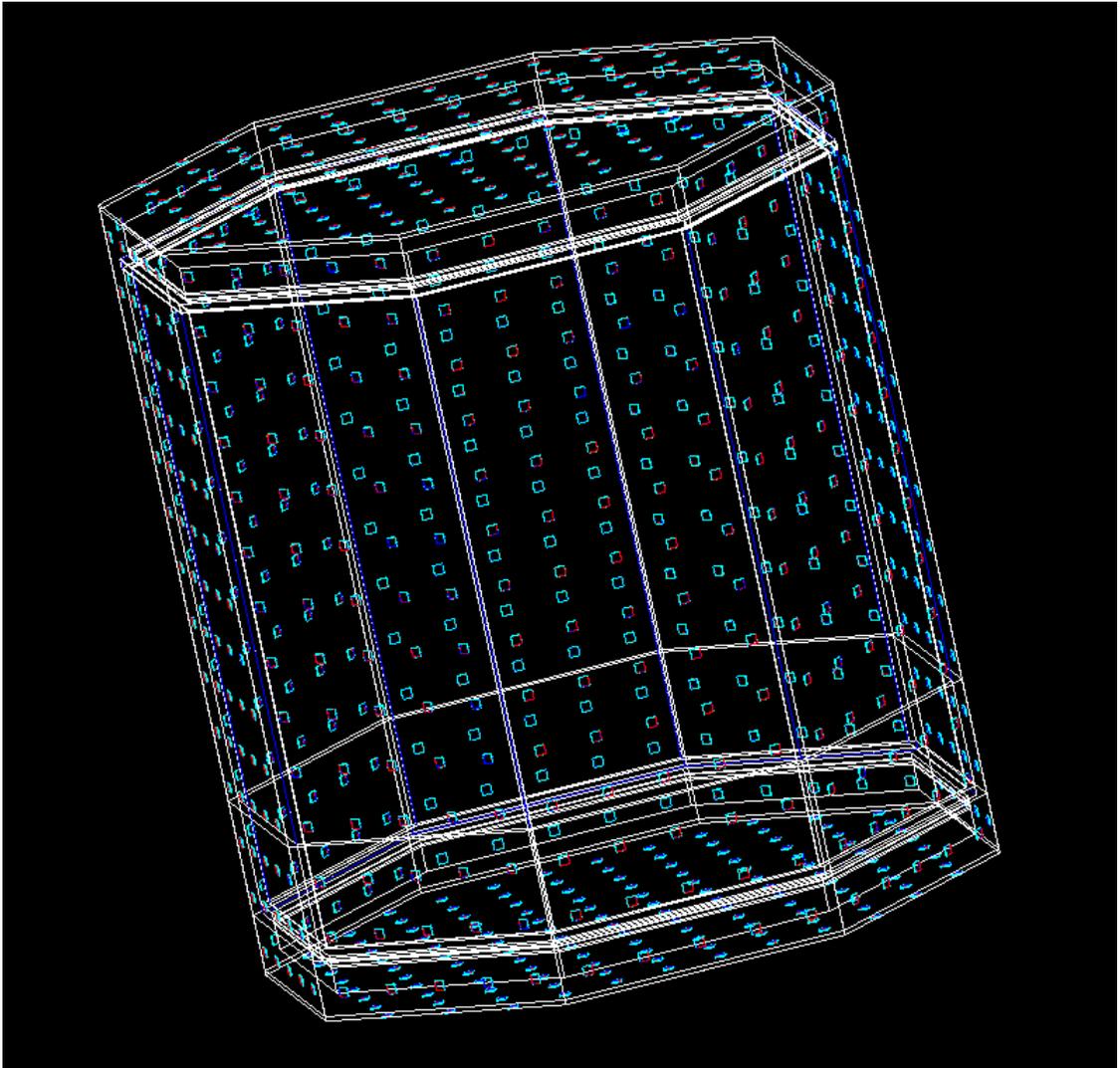


Рисунок 4.1 — Изображение модели TPC в Geant4

Пример схемы распада  $\beta$ -n активного изотопа приведена на рис 4.2:

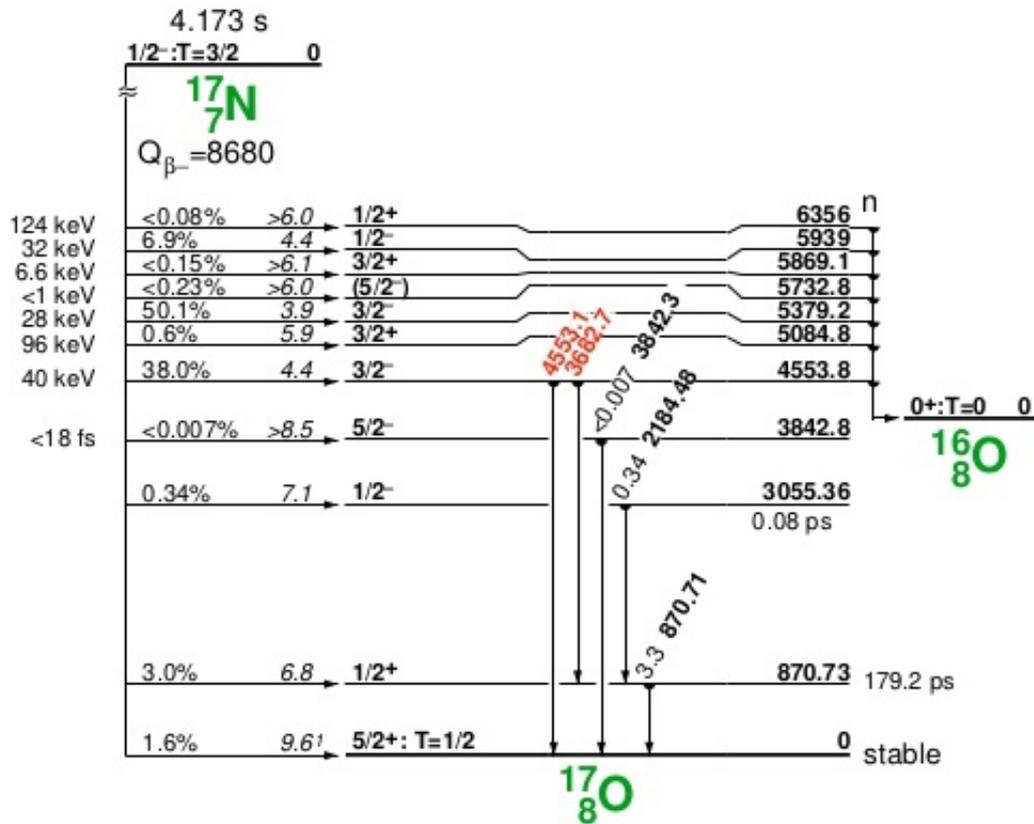


Рисунок 4.2 — Схема распада  $^{17}\text{N}$

Для изотопов O22, F22 и F23 нет достоверных экспериментальных данных по  $\beta$ -n переходам, поэтому были посчитаны наиболее пагубные в отношении шумов переходы с излучением эмиссионных нейтронов. При расчёте переходов учитывались энергии необходимые для отделения нейтрона от промежуточного ядра  $S_n$  и возможный энергетический уровень промежуточного ядра с наибольшей энергией излучаемого нейтрона  $E$ , основываясь на базе данных IAEA [4].

возможный  $\beta$ -n переход O22 изображён на рис 4.3, где  $S_n = 5230$  кэВ,  $E = 5750$  кэВ, энергия эмиссионного нейтрона  $E_n = 520$  кэВ

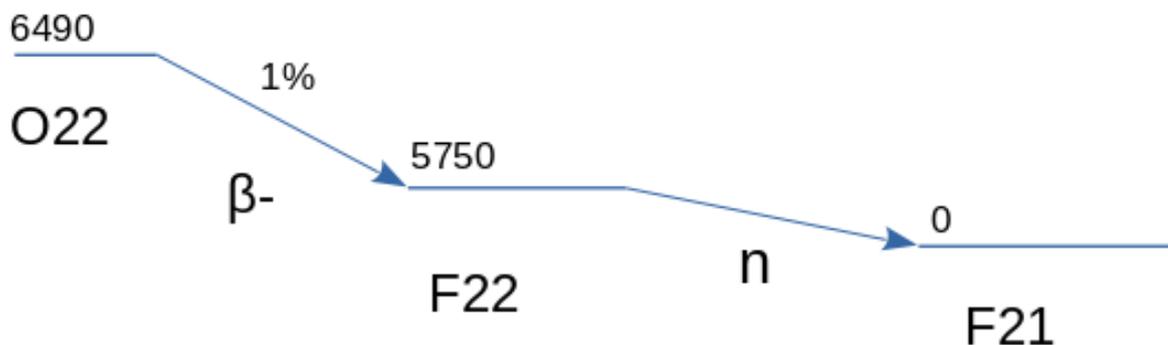


Рисунок 4.3 —  $\beta$ -n переход O22

возможный  $\beta$ -n переход F22 изображён на рис 4.4, где  $S_n = 10364$  кэВ,  $E = 10749$  кэВ, энергия эмиссионного нейтрона  $E_n = 385$  кэВ

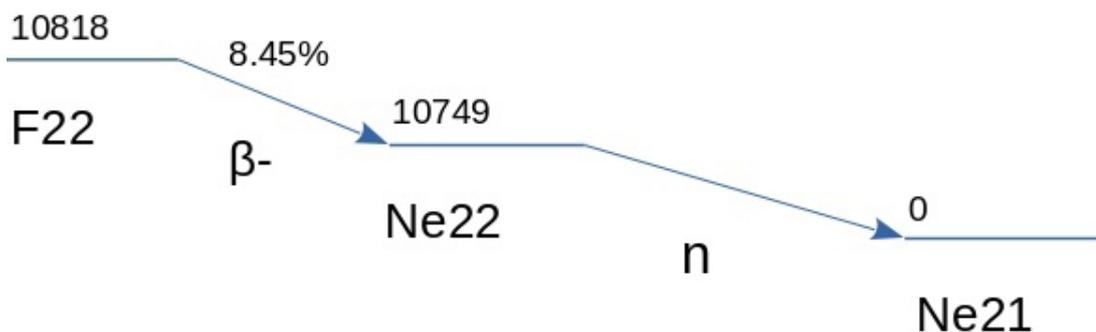


Рисунок 4.4 —  $\beta$ -n переход F22

возможный  $\beta$ -n переход F23 изображён на рис 4.5, где  $S_n = 5201$  кэВ,  $E = 6445$  кэВ, энергия эмиссионного нейтрона  $E_n = 1244$  кэВ

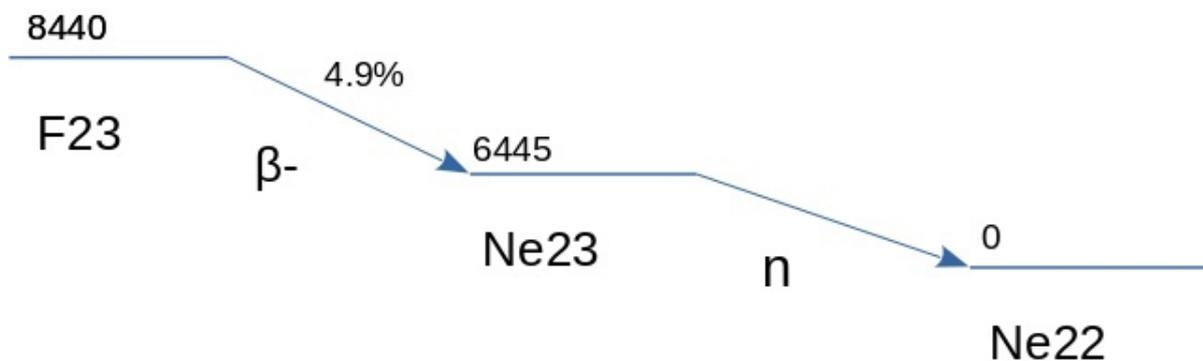


Рисунок 4.5 —  $\beta$ -n переход F23

# 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОНОВ ОТ $\beta$ -N РАСПАДОВ, ИМИТИРУЮЩИХ РЕГИСТРАЦИЮ WIMP В ДЕТЕКТОРЕ DARKSIDE-20K

Отбор нейтронов имитирующих WIMP в программе коллаборации Darkside осуществляется использованием следующих критериев:

- $nclusNR = 1$   
(количество образованных кластеров ядерной отдачи равно единице)
- $isFV30 = 1$   
(область образования кластера ограничено центральным цилиндрическим объёмом массой 30 тонн)
- $abs(cl\_z) < 100$   
(координата кластера по Z меньше 100 см по модулю)
- $7.5 < cl\_ene < 50$   
(интересующая энергетическая область поиска WIMP от 7.5 кэВ до 50 кэВ)
- $cl\_elec < cl\_nucl$   
(энергия электронных рассеяний меньше энергии ядерных)
- $energyER < 50$   
(сумма энергии, выделяемой кластерами после захвата нейтрона, ниже порога 50 кэВ в TPC)
- $late\_eneVeto\_Ar < 200$   
(сумма энергии, выделяемой кластерами после захвата нейтрона, ниже порога 200 кэВ в нейтронном вето)

Было смоделировано 100000  $\beta$ -n распадов изотопов O22, F22, F23 и N17, распределённых равномерно в активном аргоне и в центре для N17, и произведён отбор по выше описанным критериям событий, которые имитируют WIMP (см. табл.5.1, табл.5.2).

Таблица 5.1 — Отбор нейтронов по критериям

100000 событий $\beta$ ,n	O22	F22	F23	N17	N17 центр TPC
nclusNR == 1	13129	9676	6527	7455	1241
IsFV30 == 1	38335	40932	33569	37189	55898
abs(cl_z) < 100	50697	51419	49205	50215	63966
7.5 < cl_ene < 50	14654	7206	30959	20224	12954
cl_elec < cl_nucl	95158	78864	89798	84772	94977
energyER < 50 && late_eneVeto_Ar < 200	11604	10741	794	742	39

Таблица 5.2 — Отбор нейтронов по комбинированным критериям

100000 событий $\beta$ ,n	O22	F22	F23	N17	N17 центр TPC
nclusNR == 1 && IsFV30 == 1	3221	2655	1064	1642	923
&& abs(cl_z) < 100	1853	1459	597	905	831
&& 7.5 < cl_ene < 50	631	224	352	279	116
&& cl_elec < cl_nucl	631	209	351	278	113
&& energyER < 50 && late_eneVeto_Ar < 200	104	28	4	2	0

Совмещая результаты отбора с результатами выхода нейтронов после отсечки задержанным сигналом с вето на 5 секунд, получаем итоговое количество фоновых нейтронов в детекторе Darkside-20k с экспозицией 200 тонн·год для изотопов N17, O22, F22 и F23:

Таблица 5.3 — Итоговое количество нейтронов

Изотопы	T1/2, с	Выход изотопов в активном Ag за 10 лет	Выход n в активном Ag за 10 лет	Кол-во n после отсечки вето 5 с	Итоговое кол-во n после отбора
N17	4,173	15	139,65	6,21	1,24E-04
O22	2,25	1	0,12	2,14E-03	2,23E-06
F22	4,23	20	19,52	0,74	2,09E-04
F23	2,23	3	2,45	0,03	1,24E-06

Суммарное количество нейтронов для данных изотопов равно  $N = 3,36 \cdot 10^{-4}$ , которое может являться грубой оценкой значения уровня фона имитирующих нейтронов в чувствительном объеме детектора за 10 лет эксплуатации, поскольку рассматривались наиболее фоновые изотопы.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был смоделирован радиоактивный фон от космических лучей в полной геометрии детектора Darkside-20k. Получены результаты отбора нейтронов имитирующих WIMP от фоновых изотопов. Полученные результаты будут использоваться для анализа фонов детектора. В будущем планируется провести расчёты полного выхода имитирующих нейтронов с учётом всех изотопов, образованных в чувствительной области детектора.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Akimov D. Y.* Experimental Methods for Particle Dark Matter Detection (Review) // Instruments and Experimental Techniques. — 2001. — Т. 44. — С. 575—617.
2. *Ryabov V. A., Tsarev V. A., Tskhovrebov A. M.* The search for dark matter particles // Physics-Uspekhi. — 2008. — Т. 51. — С. 1091—1121.
3. A Fluka study of underground cosmogenic neutron production / A. Empl [и др.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2014. — Т. 2014, № 08. — С. 064—064.
4. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.