

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»

На правах рукописи

ГОЛУБКОВ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ФОНА КОСМОГЕННОГО
ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ДЕТЕКТОРЕ DARKSIDE-20K**

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Диссертация на соискание степени магистра

Научный руководитель,
д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Д. Скорохватов

Научный консультант,
с.н.с. ОФН, НИЦ "Курчатов-
ский институт"

_____ И. Н. Мачулин

Москва 2022

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ФОНА КОСМОГЕННОГО
ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ДЕТЕКТОРЕ DARKSIDE-20K**

Студент	_____ Д. С. Голубков
Научный руководитель, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов
Научный консультант, с.н.с. ОФН, НИЦ "Курчатов- ский институт"	_____ И. Н. Мачулин
Рецензент, в.н.с. ОФН, НИЦ "Курчатов- ский институт"	_____ В. И. Селиванов
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов
Рук. учеб. прог., д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Описание современных экспериментов по поиску WIMP	7
2 Эксперимент Darkside-20k	9
2.1 Установка	9
2.2 Космический фон	11
3 Моделирование наработки $\beta - n$ изотопов в детекторе Darkside-20k мюонами космического происхождения	13
4 Моделирование распадов $\beta - n$ изотопов в установке Darkside-20k	16
5 Моделирование подавления фона нейтронов от $\beta - n$ распадов, имитирующих регистрацию WIMP в детекторе Darkside-20k	22
5.1 Отбор по критериям	23
5.2 Результирующий фон $\beta - n$ распадов	26
Заключение	29
Список литературы	30
Приложение	32

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. Известно, что только 5% массы Вселенной составляет обычная барионная материя, описываемая текущей стандартной моделью. Большая часть содержимого Вселенной находится в форме энергии вакуума, называемой Скрытой энергией, ответственной за ускорение расширения Вселенной, и в форме невидимой материи, называемой 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.

Исследования формирования крупномасштабных структур подтвержда-

ют точку зрения, согласно которой преобладающей частью скрытой массы является холодная скрытая масса (CDM - Cold Dark Matter) [1].

Наиболее перспективными кандидатами на роль холодной скрытой массы являются так называемые слабовзаимодействующие массивные частицы (WIMP - Weakly Interacting Massive Particles): их массы должны находиться в диапазоне от 1 ГэВ до нескольких ТэВ [2]. Такие частицы взаимодействуют с обычным веществом через слабое взаимодействие и гравитацию.

Частицы WIMP особенно привлекательны в качестве кандидатов на Скрытую массу ввиду ряда очевидных достоинств. Во-первых, появление WIMP-ов в теоретической физике частиц мотивировано проблемой нарушения электро-слабой 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 [3].

Согласно наблюдению кривых вращения галактик, WIMP должны существовать и в нашей галактике. Следовательно, должна быть возможность обнаружить их «напрямую» с помощью наземных детекторов, если Земля пролетает через ореол скрытой массы в нашей галактике. Относительная скорость наземного детектора приблизительно равна:

$$v_D(t) = V_S + V_E \cos \psi \cos[\omega(t - t_0)], \quad (1)$$

где скорость Солнца вокруг галактики $V_S = 230$ км/с, орбита Земли в Солнечной системе $V_E = 30$ км/с, ω - угловая скорость Земли, ψ - наклон земной орбиты относительно движения в ореоле, где момент времени наибольшей относительной скорости Земли к ореолу обозначается t_0 . Модуляция v_D приводит к ежегодной модуляции ожидаемой скорости рассеяния около 3% [4; 5].

WIMP чрезвычайно трудно обнаружить, поскольку они взаимодействуют только через слабые ядерные силы и гравитацию. Однако эти нейтральные частицы могут быть обнаружены через вторичные продукты упругого рассеяния на ядре, приводящего к ядерной отдаче.

Во время столкновения между WIMP и ядром-мишенью выделяемая энергия может передаваться посредством трех типов возбуждений: фононов (выделяющих тепло), ионизирующих (генерирующих заряд) и сцинтилляционных

(генерирующих свет). В зависимости от материалов детектора, некоторые эксперименты измеряют один или даже два из этих процессов одновременно, особенно для того, чтобы отличить отдачу ядер от отдачи электронов. Первым методом, использованным для прямого поиска скрытой массы и для установления первых ограничений, были полупроводниковые детекторы ионизации, использующие Ge и Si высокой чистоты [6]. Ge и Si также используются для создания болометров, позволяющих одновременно измерять сигнал ионизации и фононный сигнал. В настоящее время наиболее распространённым методом регистрации является техника детектирования, основанная на использовании жидких благородных газов, таких как ксенон, аргон и неон. Существуют различные методы прямого обнаружения, которые можно классифицировать следующим образом:

- Тепловой: использование болометров для обнаружения фононов, калориметрический подход.
- Тепловой и ионизационный: измерение одновременно сигнала ионизации и фононного сигнала.
- Тепловой и сцинтилляционный: измерение одновременно сцинтилляции и фононного сигнала.
- Ионизационный: регистрация ионизаций с самым низким порогом шума.
- Сцинтилляционный: регистрация сцинтилляций.
- Сцинтилляционный и ионизационный: в ходе нескольких экспериментов были разработаны детекторы с двухфазной проекционной камерой (TPC), улавливающие заряд и свет с помощью сжиженного благородного газа.

1 ОПИСАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОИСКУ WIMP

Предпочтительным кандидатом на роль скрытой массы является реликтовая популяция слабодействующих массивных частиц (WIMP), произошедшая в результате Большого взрыва. В принципе, они могут быть обнаружены по их столкновениям с обычными ядрами в мишени, оснащенной измерительными приборами, что приводит к отдаче ядер с низкой энергией (< 100 кэВ) [7]. Для таких частиц ожидаются очень низкая частота взаимодействия, исходя из модели их образования и существующих ограничений. Для обнаружения WIMP могут потребоваться мишени массой 0,1-100 тонн, а сверхнизкий фон должен быть достигнут за счет комбинации мер подавления. К ним относятся подавление космических лучей путем размещения экспериментов глубоко под землей, выбор материалов с низким уровнем радиоактивности и оборудование, которое может отклонять остаточный радиоактивный фон в пользу желаемых событий ядерной отдачи.

На сегодняшний день результатом прямых поисков Скрытой массы является ограничение пространства параметров массы и сечения спин-независимого взаимодействия WIMP. Так, например, результаты, опубликованные коллаборацией DarkSide-50, дают самое сильное ограничение на частицы WIMP в области малых масс ~ 2 ГэВ/ c^2 [8]. В области высоких энергий отдачи ядер мишени (больших масс WIMP) наилучшие достигнутые результаты принадлежат коллаборации XENON [9]. Эксперименты DAMA/LIBRA [10], CRESST [11] и CoGeNT [12–15] демонстрируют противоречивые данные о возможном наличии сигнала от частиц Скрытой массы при анализе годовых модуляций в области малых энерговыделений (малых масс WIMP). Это подтверждает, что для уверенного и убедительного открытия частиц Скрытой массы нужны совместные результаты многих экспериментов с применением разных типов мишеней и методик регистрации WIMP. В области масс частиц Скрытой массы

~ 100 ГэВ/ c^2 ограничения приближаются к так называемому “нейтринному полу”, когда становится практически невозможно отличить рассеяние WIMP от когерентного рассеяния нейтрино на ядрах мишени.

Четыре ведущих в мире проекта по Скрытой массе с аргонем (ArDM в LSC, DarkSide-50 в LNGS, DEAP-3600 в SNOlab и MiniCLEAN в SNOlab) договорились об объединении усилий для выполнения единой программы по прямому исследованию скрытой массы в жидком аргоне в рамках проекта DarkSide-20k.

2 ЭКСПЕРИМЕНТ DARKSIDE-20K

2.1 УСТАНОВКА

Одним из проектов по поиску частиц Скрытой массы является эксперимент Darkside-20k [16], который является модернизацией уже существующего эксперимента Darkside-50 в недрах горы Gran Sasso в Италии.

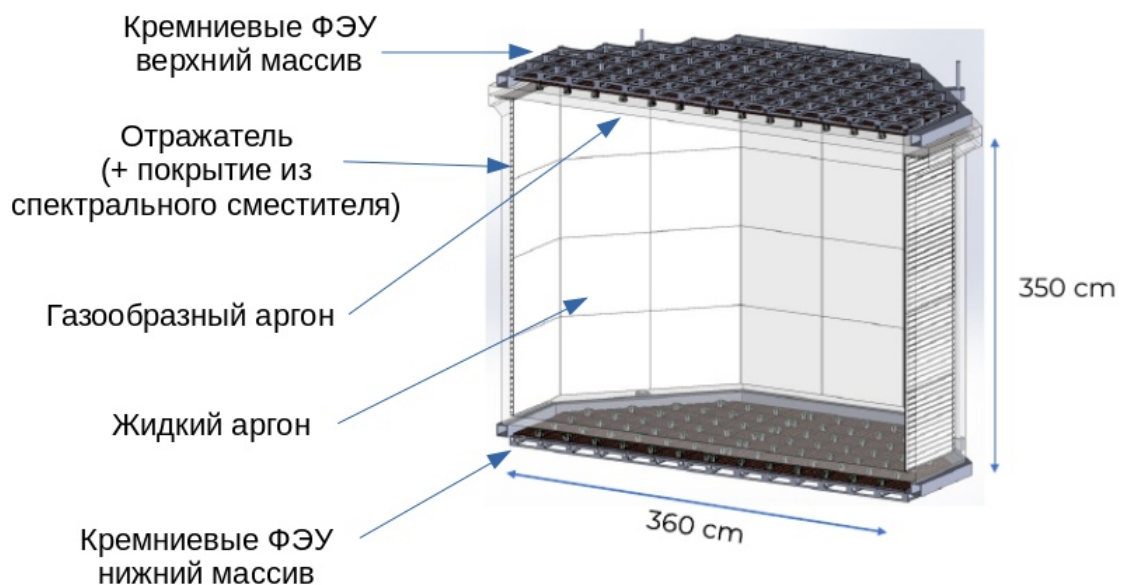


Рисунок 2.1 — Конструкция детектора

Детектор представляет собой двухфазную временную проекционную камеру (TRPC) 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 фотомножителей (ФЭУ) сверху и снизу. Внутренние поверхности активного объема покрыты напыленной в вакууме тонкой пленкой из тетрафенилбутадиена

(TPV), сдвигающего длину волны (WLS), который смещает первичную УФ-сцинтилляцию (S1) 128 нм в свет, видимый ФЭУ.

Для обнаружения ионизации DarkSide использует двухфазную конфигурацию ТРС, 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 коллинеарное электрическое поле извлекает электроны в газовую фазу, где они производят вторичные сцинтилляционные фотоны (S2) 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 объединенных сигналов ионизации и сцинтилляции, доступных в 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 S1 и S2 точно определяет вертикальное положение каждого события с точностью до миллиметра. Распределение света по матрице верхнего фотодетектора дает горизонтальное положение с точностью до сантиметра.

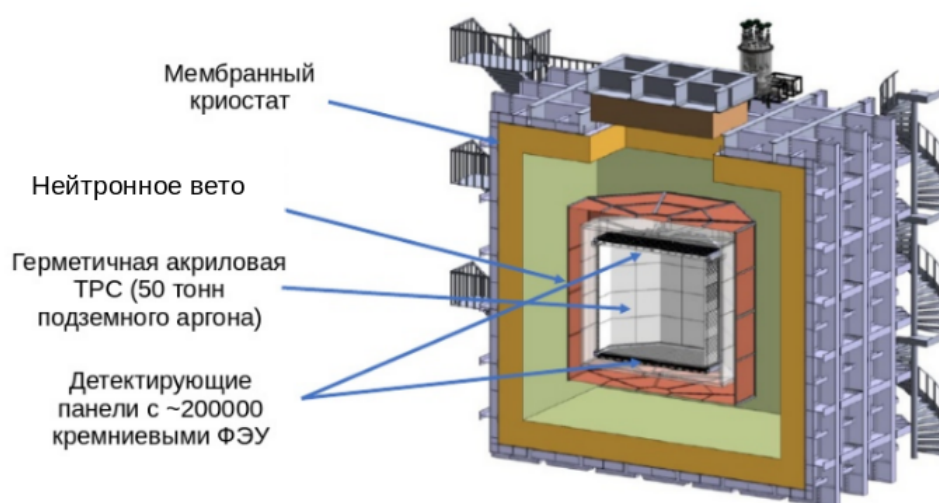


Рисунок 2.2 — Конструкция эксперимента Darkside-20k

ТРС расположена внутри криостата из нержавеющей стали, заполненного

атмосферным аргоном и окружена нейтронным вето для уменьшения уровня нейтронно-индуцированного фона.

2.2 КОСМИЧЕСКИЙ ФОН

В Италии в регионе Абруцци находится Национальная лаборатория Гран-Сассо на глубине 3800 метров водного эквивалента, где планируется поместить Darkside-20k.

Обычно эксперименты по поиску редких событий проводятся в глубоких подземных установках, где до детекторов могут добраться только космические нейтрино и мюоны высоких энергий. Мюоны индуцируют фон, создавая потоки вторичных частиц в локальных взаимодействиях в детекторе или рядом с ним. Поскольку в глубину экспериментальных залов проникают только мюоны высоких энергий, общий поток мюонов уменьшается по мере удаления из спектра более интенсивных мюонов с меньшей энергией. Следовательно, средняя энергия остаточных мюонов увеличивается с глубиной.

Представлены результаты расчетов коллаборации Darkside в пакете Монте-Карло Fluka потоков мюонов и вторичных частиц на внешней поверхности криостата детектора Darkside-20k (рис 2.3, рис 2.4).

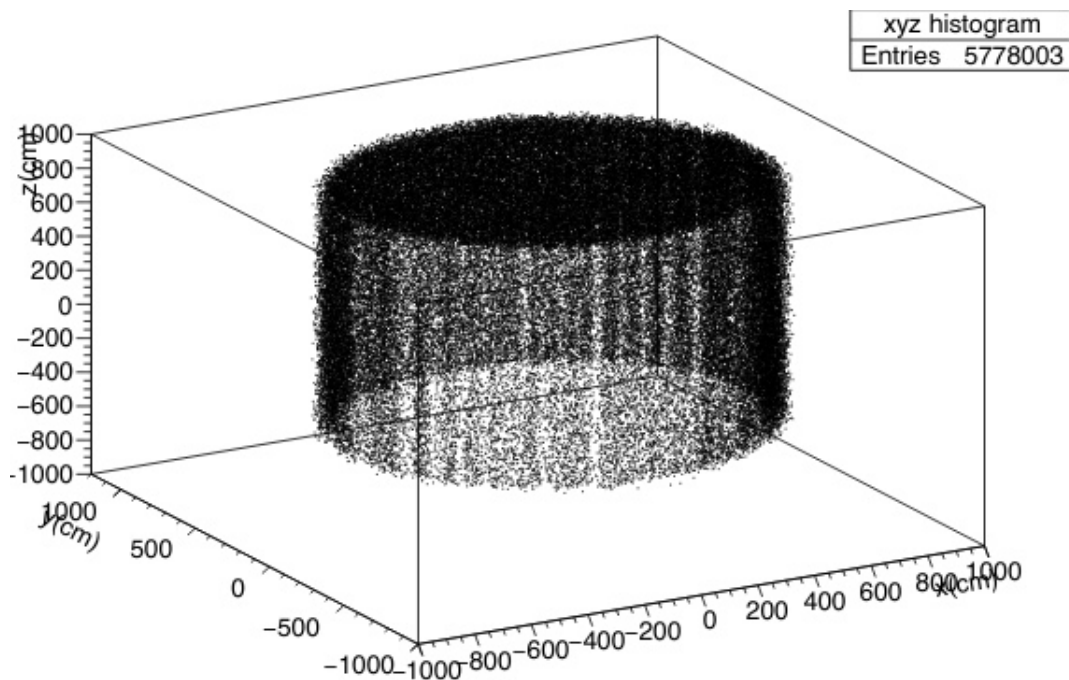


Рисунок 2.3 — Расположения мюонов на поверхности цилиндра радиуса 7 и высотой 14 метров в лаборатории Гран-Сассо

muon energy spectrum

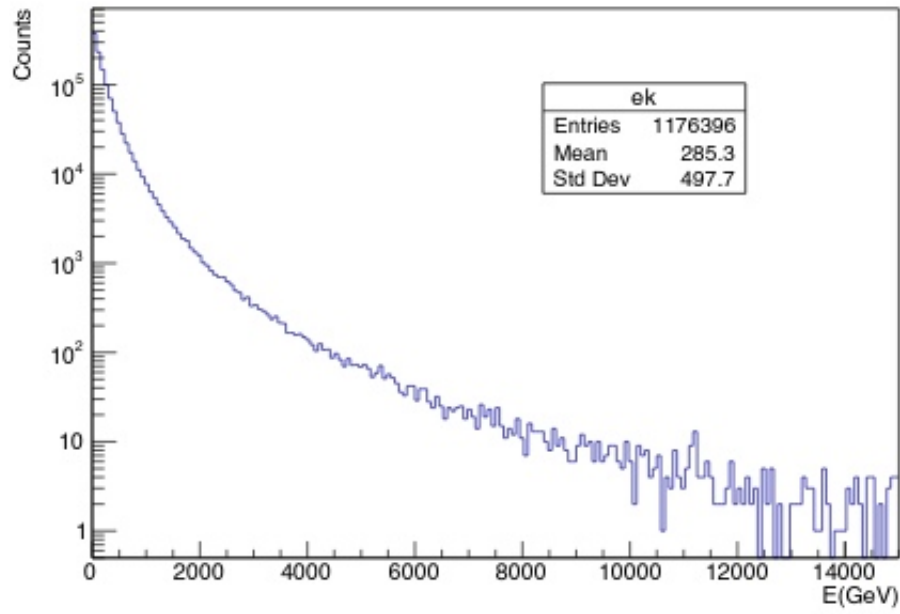


Рисунок 2.4 — Спектр энергий мюонов

Плотность потока космических мюонов равна $3.4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ [17]

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ НАРАБОТКИ $\beta - N$ ИЗОТОПОВ В ДЕТЕКТОРЕ DARKSIDE-20К МЮОНАМИ КОСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Космические мюоны, взаимодействуя с ядрами аргона, создают различные радиоактивные изотопы посредством процессов расщепления ядер. Нейтроны, образующиеся в результате $\beta - n$ распада изотопов, вносят вклад в фон подземных детекторов при поиске редких событий.

Поскольку отдельные упругие рассеяния нейтронов практически неотличимы от упругих рассеяний WIMP-ов, наиболее важными являются распады $\beta - n$ активных изотопов, так как они могут имитировать сигнал за счёт упругого рассеяния нейтронов на ядрах мишени. Учитывая, что фактические данные по наработке изотопов немногочисленны, необходимо использовать имитационные исследования формирования β -запаздывающих нейтронов для проектирования защиты и прогнозирования уровней фона в установке.

В ходе работы была написана программа в пакете Geant4 по моделированию фона от космических мюонов, пролетающих сквозь детектор. Изображение геометрии модели с расположением основных объёмов приведена на рис 3.1.

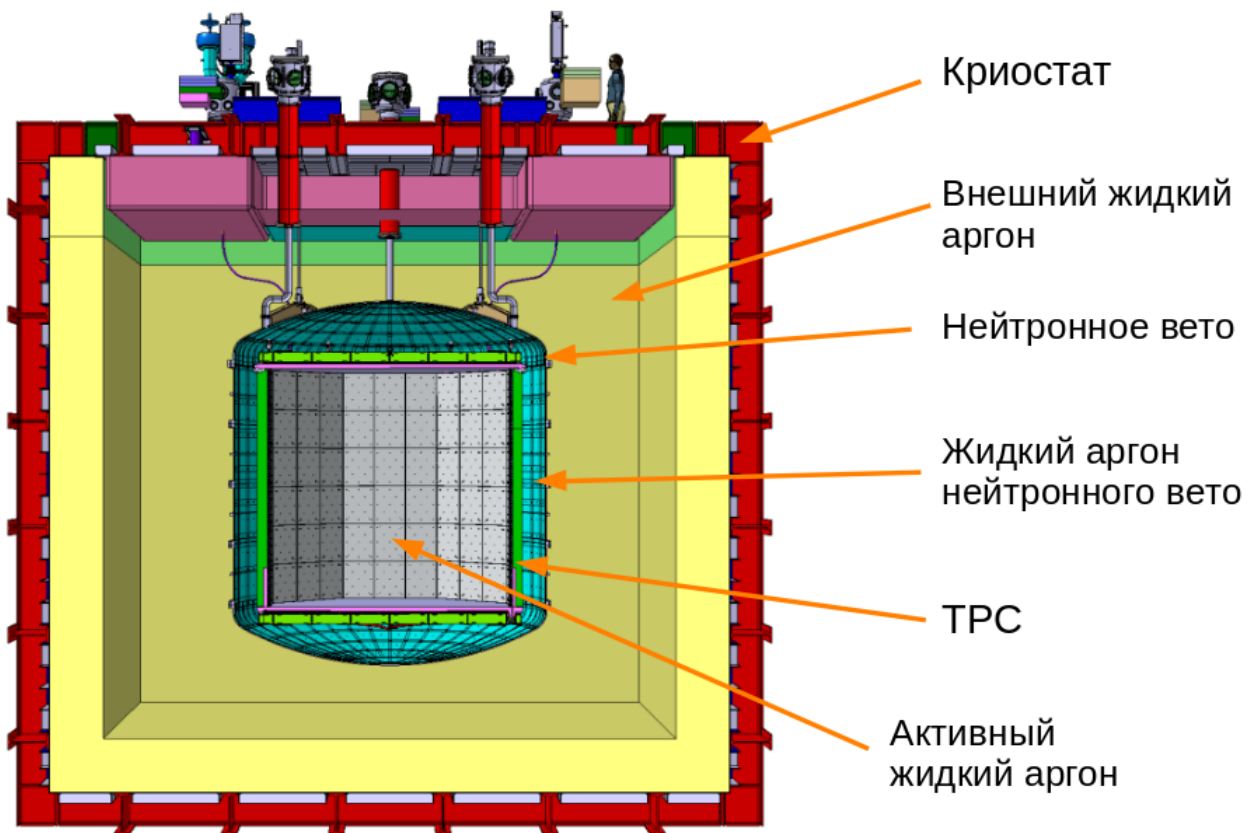


Рисунок 3.1 — Геометрия модели детектора Darkside-20k

Используя результаты расчётов коллаборации Darkside в пакете Fluka [17] для потоков мюонов и вторичных частиц на внешней поверхности криостата детектора Darkside-20k были смоделированы космические частицы с учётом их типа, распределения по энергиям, расположениям и направлениям движения в горе Гран-Сассо. Визуализация расположения разыгрываемых частиц относительно внутреннего криостата Darkside-20k приведена на рис 3.2.

В результате моделирования взаимодействия космического излучения с веществом детектора была получена выработка $\beta - n$ изотопов и выходы имитирующих нейтронов за 10 лет эксплуатации (см. Приложение). Наиболее активные и долгоживущие радиоизотопы приведены в табл. 3.1.

Расчёты показали, что активацией конструкционных материалов в установке Darkside-20k можно пренебречь. Основным источником $\beta - n$ изотопов является аргонная мишень детектора, поскольку её масса значительно превосходит массу конструкционных материалов.

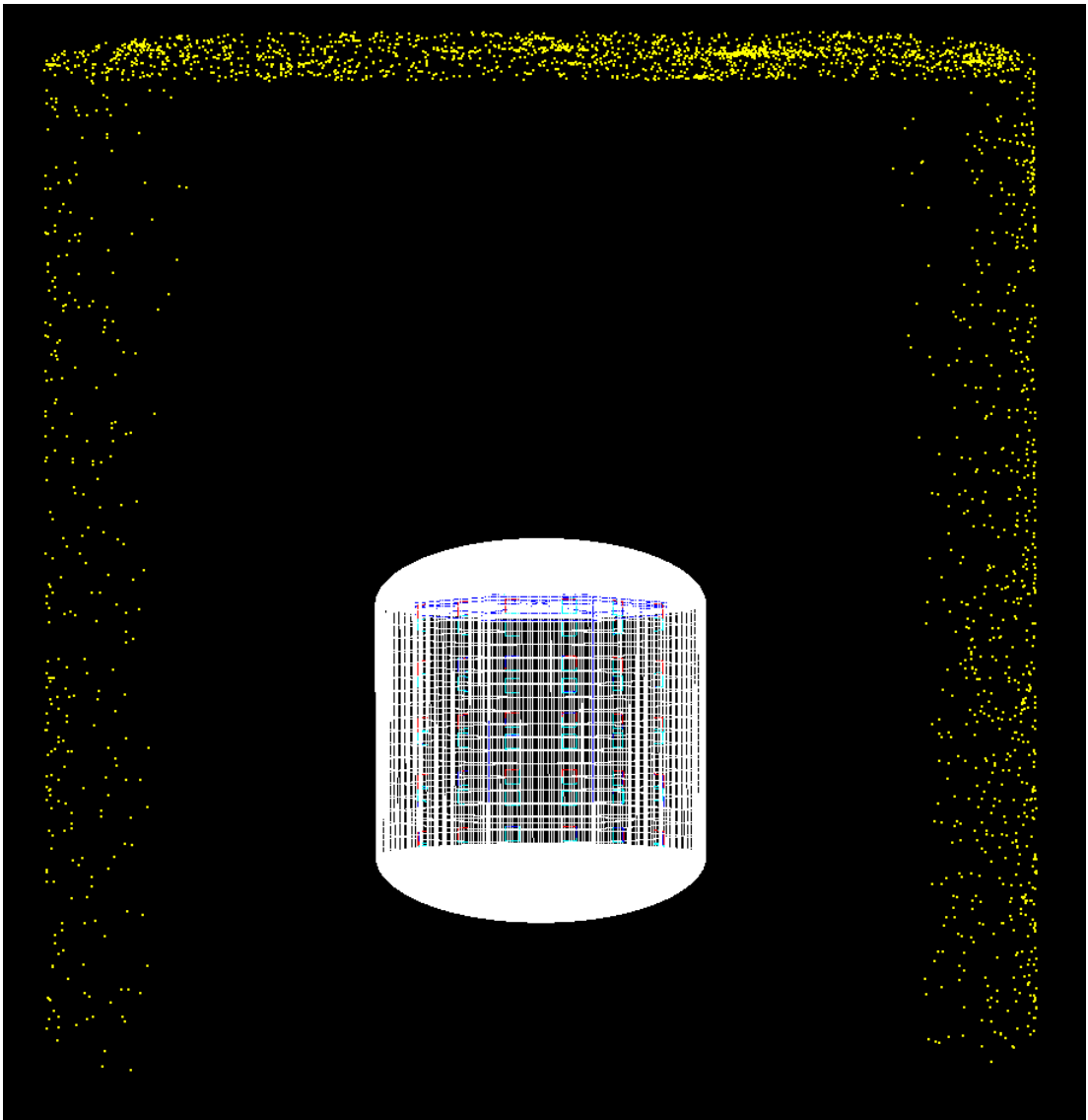


Рисунок 3.2 — Моделирование космических частиц в пакете Geant4 (жёлтые точки - начальное расположение частиц, белым обозначено нейтронное вето)

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

Изотоп	Выход в детекторе	T1/2, с	Выход нейтронов
C16	24,15	0,747	23,909
N17	274	4,173	260,3
O22	23,2	2,25	0,232
F22	423	4,23	35,7435
F23	104	2,23	5,096
Al31	1405	0,644	22,48
Si36	146	0,45	14,6
P38	428	0,640	51,36

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДОВ $\beta - N$ ИЗОТОПОВ В УСТАНОВКЕ DARKSIDE-20K

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.

Эмиссия нейтронов обычно происходит из ядер, находящихся в возбуждённом состоянии, образующихся при бета-распаде. Процесс испускания нейтронов контролируется ядерными силами и поэтому происходит чрезвычайно быстро, иногда его называют «почти мгновенным» (порядка нескольких пикосекунд). Этот процесс позволяет нестабильным атомам становиться более стабильными. Выброс нейтрона может быть продуктом движения многих нуклонов, но в конечном счёте он опосредован отталкивающим действием ядерных сил, существующих на чрезвычайно малых расстояниях между нуклонами.

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.

Для большинства фоновых изотопов нет достоверных экспериментальных данных по $\beta - n$ переходам, поэтому были посчитаны наиболее пагубные в отношении шумов переходы с излучением эмиссионных нейтронов. Основываясь на базе ядерных данных МАГАТЭ (IAEA) [18], при расчёте переходов учитывались энергии необходимые для отделения нейтрона от промежуточного ядра S_n и возможный энергетический уровень промежуточного ядра E с наибольшей энергией излучаемого нейтрона E_n .

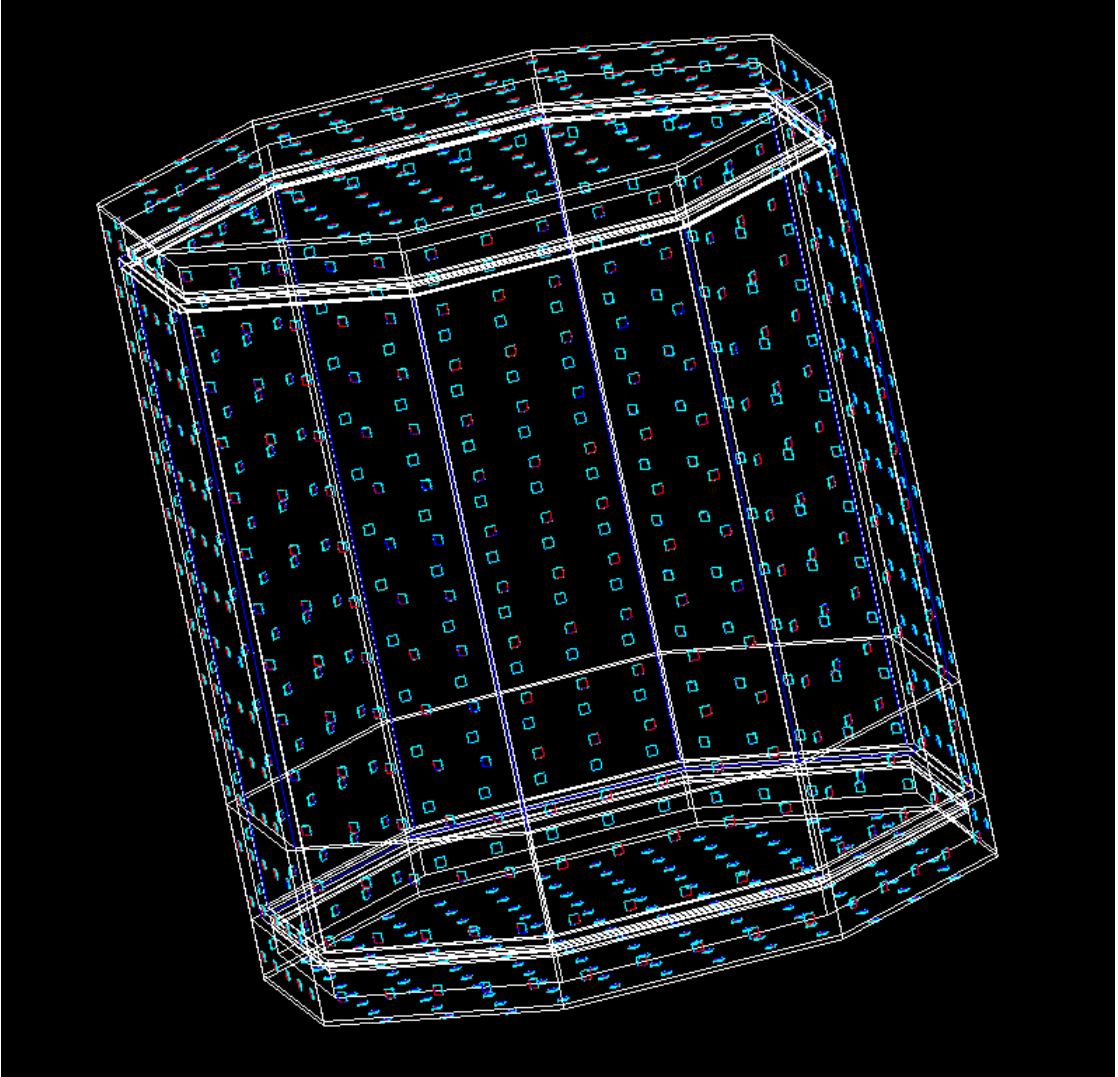


Рисунок 4.1 — Изображение модели TPC в Geant4

Схема распада наиболее активного и долгоживущего $\beta - n$ изотопа ^{17}N приведена на рис 4.2.

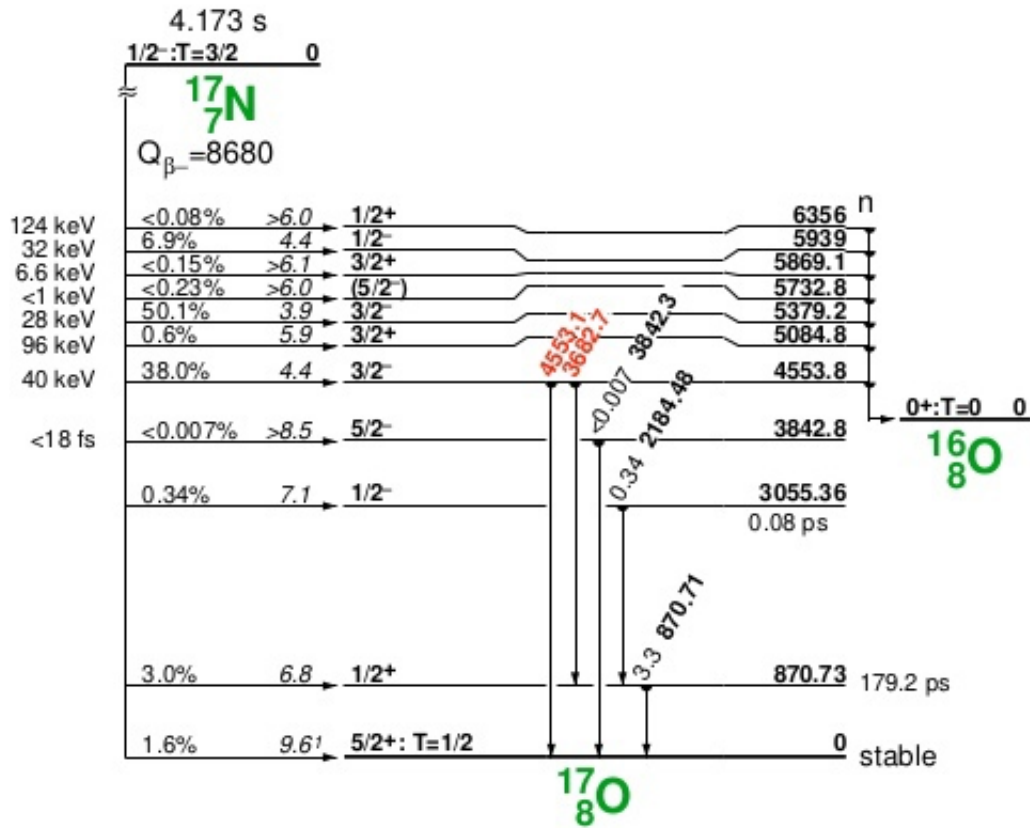


Рисунок 4.2 — Схема распада ^{17}N

Схема $\beta - n$ переходов для изотопа ^{16}C приведена на рис 4.3. [19]

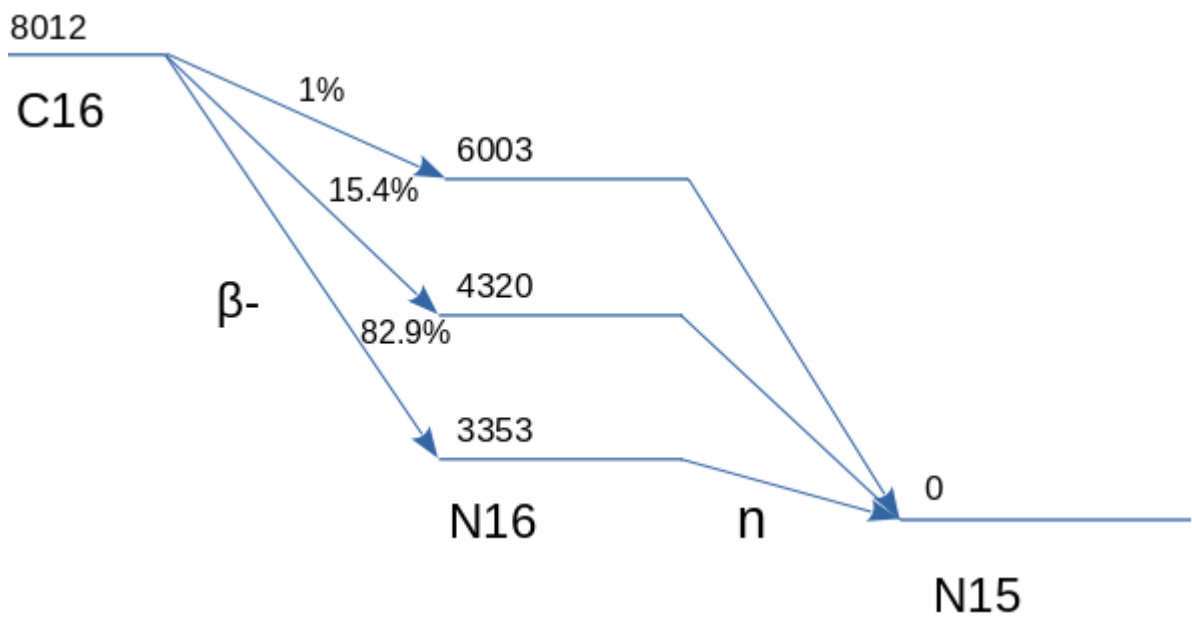


Рисунок 4.3 — $\beta - n$ переходы ^{16}C

Нейтрон с энергией $E_n = 3294.5$ кэВ испускается с энергетического уровня $E = 6003$ кэВ; нейтрон $E_n = 1716.7$ кэВ испускается с уровня $E = 4320$ кэВ; нейтрон $E_n = 810.1$ кэВ испускается с уровня $E = 3353$ кэВ.

возможный $\beta - n$ переход ^{22}O изображён на рис 4.4, где $S_n = 5230$ кэВ, уровень $E = 5750$ кэВ, энергия эмиссионного нейтрона $E_n = 520$ кэВ

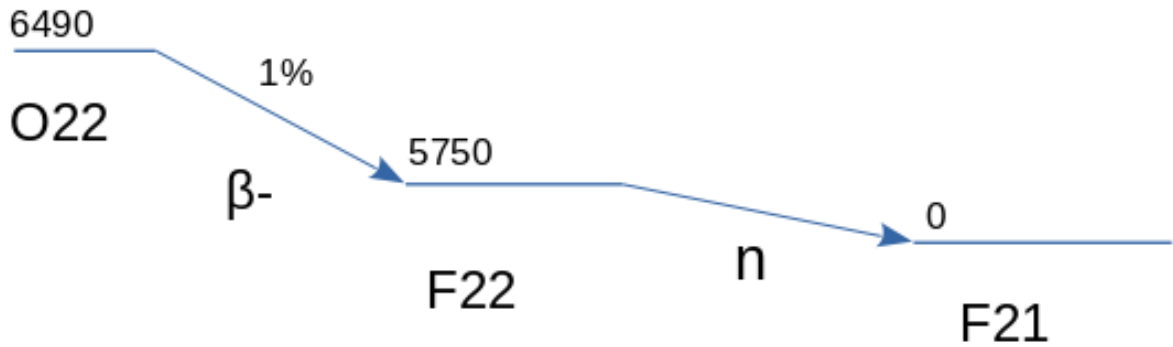


Рисунок 4.4 — $\beta - n$ переход ^{22}O

возможный $\beta - n$ переход ^{22}F изображён на рис 4.5, где $S_n = 10364$ кэВ, уровень $E = 10749$ кэВ, энергия эмиссионного нейтрона $E_n = 385$ кэВ

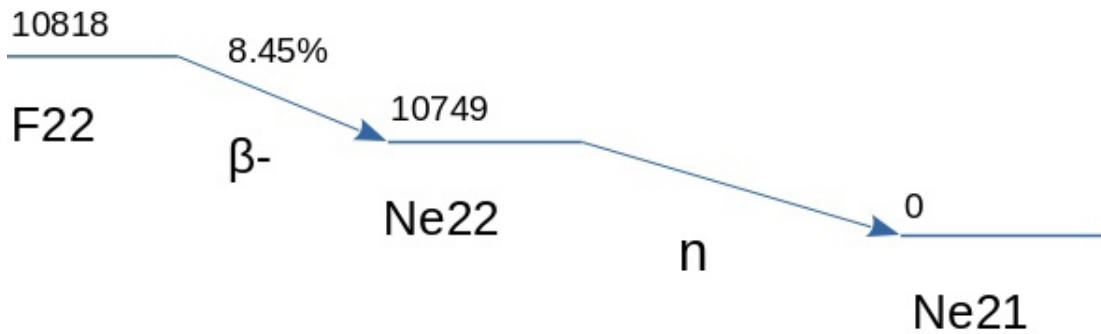


Рисунок 4.5 — $\beta - n$ переход ^{22}F

возможный $\beta - n$ переход ^{23}F изображён на рис 4.6, где $S_n = 5201$ кэВ, уровень $E = 6445$ кэВ, энергия эмиссионного нейтрона $E_n = 1244$ кэВ

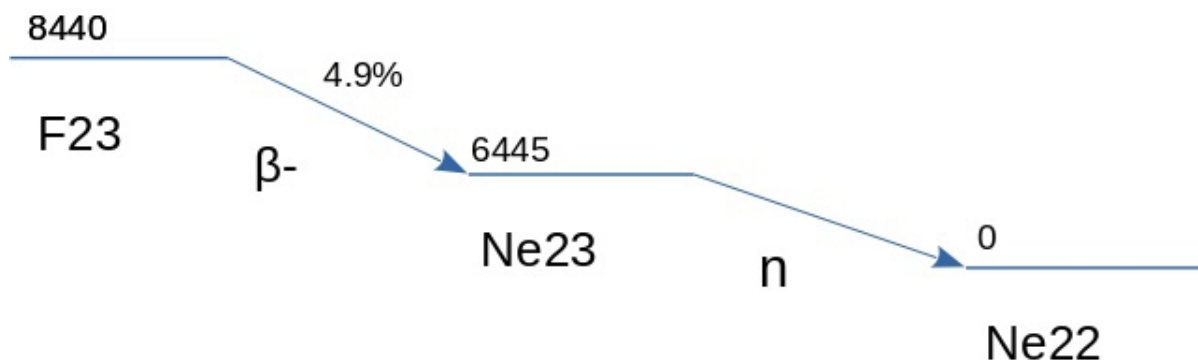


Рисунок 4.6 — $\beta - n$ переход ^{23}F

возможный $\beta - n$ переход ^{31}Al изображён на рис 4.7, где $S_n = 6587$ кэВ, уровень $E = 7944$ кэВ, энергия эмиссионного нейтрона $E_n = 1357$ кэВ

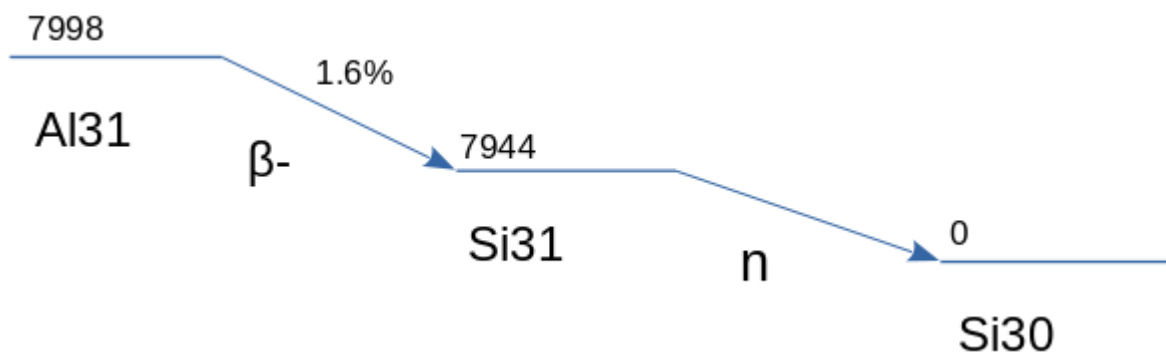


Рисунок 4.7 — $\beta - n$ переход ^{31}Al

возможный $\beta - n$ переход ^{36}Si изображён на рис 4.8, где $S_n = 3465$ кэВ, уровень $E = 3630$ кэВ, энергия эмиссионного нейтрона $E_n = 165$ кэВ

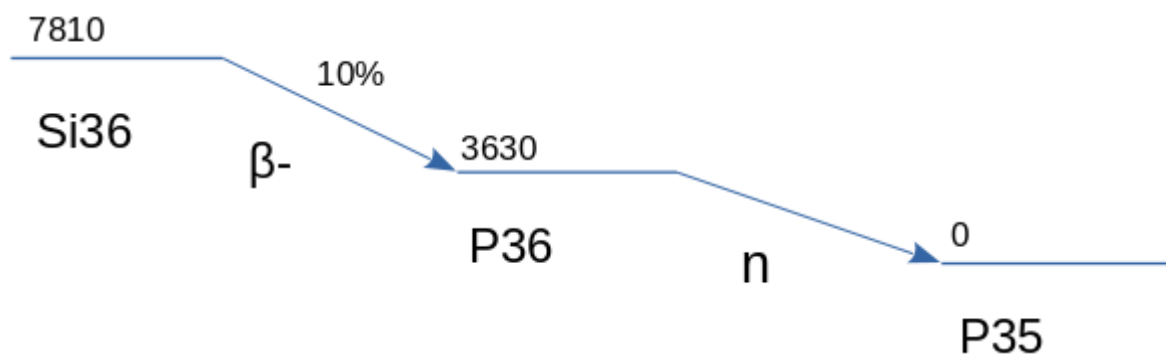


Рисунок 4.8 — $\beta - n$ переход ^{36}Si

возможный $\beta - n$ переход ^{38}P изображён на рис 4.9, где $S_n = 8036$ кэВ, уровень $E = 12100$ кэВ, энергия эмиссионного нейтрона $E_n = 4064$ кэВ

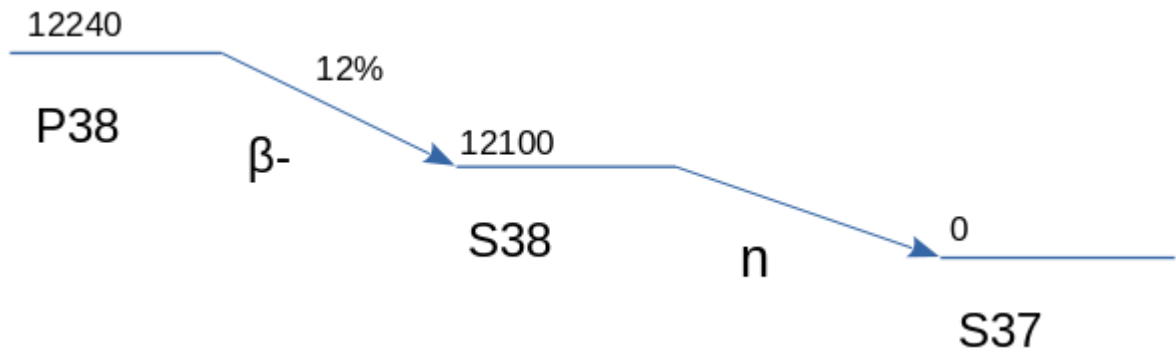


Рисунок 4.9 — $\beta - n$ переход ^{38}P

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

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

- $nclusNR = 1$
(количество образованных кластеров ядерной отдачи равно единице)
- $isFV20 = 1$
(область образования кластера ограничено центральным цилиндрическим объёмом массой 20 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)

5.1 ОТБОР ПО КРИТЕРИЯМ

В программе Geant4 было смоделировано 100000 $\beta - n$ распадов изотопов C16, N17, O22, F22, F23, Al31, Si36, и P38, распределённых равномерно в жидком аргоне и произведён отбор по выше описанным критериям событий, которые имитируют WIMP (см. табл. 5.1, табл. 5.2, табл. 5.3, табл. 5.4).

Таблица 5.1 — Отбор нейтронных событий, имитирующих WIMP, по критериям в Active Ar

100000 событий β, n в Active Ar	C16	O22	F22	F23	N17	N17 центр TPC	Al31	Si36	P38
(nclusNR == 1)	9105	13129	9676	6527	7455	1241	5049	24819	5587
(IsFV20 == 1)	37911	38335	40932	33569	37189	55898	33669	49136	34690
(abs(cl_z) < 100)	50464	50697	51419	49205	50215	63966	49590	53777	50109
(7.5 < cl_ene) && (cl_ene < 50)	20310	14654	7206	30959	20224	12954	36755	275	29878
(cl_elec < cl_nucl)	77682	95158	78864	89798	84772	94977	92409	60188	90660
(energyER < 50) && (late_eneVeto_Ar < 200)	692	11604	10741	794	742	39	14390	417	2114

Таблица 5.2 — Отбор нейтронных событий, имитирующих WIMP, по комбинированным критериям в Active Ar

100000 событий β, n в Active Ar	C16	O22	F22	F23	N17	N17 центр TPC	Al31	Si36	P38
(nclusNR == 1) && (IsFV20 == 1)	2509	3221	2655	1064	1642	923	534	13339	918
&& (abs(cl_z) < 100)	1468	1853	1459	597	905	831	294	9059	533
&& (7.5 < cl_ene) && (cl_ene < 50)	429	631	224	352	279	116	191	2	280
&& cl_elec < cl_nucl	424	631	209	351	278	113	184	<1	264
&& (energyER < 50) && (late_eneVeto_Ar < 200)	3	104	28	4	2	<1	29	<1	2

Отбор нейтронов от фоновых изотопов, которые были образованы во внешнем аргоне представлены в табл. 5.5. Для каждого изотопа было смоделировано около 4.5 миллиона распадов.

Так как для всех короткоживущих изотопов, образовавшихся во внешнем аргоне, не производилось отдельное моделирование их распадов, для оценки коэффициента подавления критериями были смоделированы выходы нейтронов разных энергий из возможного диапазона энергий их излучения от всех образованных $\beta - n$ изотопов.

Усредненный коэффициент подавления по различным энергиям нейтронов составил $k \approx 1,83 \cdot 10^{-6}$, который описывает подавление нейтронов от всех короткоживущих изотопов во внешнем аргоне.

Таблица 5.3 — Отбор нейтронных событий, имитирующих WIMP, по критериям в среднем UAr

100000 событий β, n в среднем UAr	C16	O22	F22	F23	N17	Al31	Si36	P38
(nclusNR == 1)	1392	1130	875	1749	1162	1770	484	1785
(IsFV20 == 1)	11707	10083	9823	11951	55758	11858	7753	10104
(abs(cl_z) < 100)	44860	44755	45655	44753	64196	44160	45016	43809
(7.5 < cl_ene) && (cl_ene < 50)	13074	10905	10440	14149	12719	14739	11305	16732
(cl_elec < cl_nucl)	14746	8533	5819	18578	94890	19207	1892	19077
(energyER < 50) && (late_eneVeto_Ar < 200)	49383	48626	48111	48302	35	48283	50205	46459

Таблица 5.4 — Отбор нейтронных событий, имитирующих WIMP, по комбинированным критериям в среднем UAr

100000 событий β, n в среднем UAr	C16	O22	F22	F23	N17	Al31	Si36	P38
(nclusNR == 1) && (IsFV20 == 1)	353	329	279	366	806	389	193	371
&& (abs(cl_z) < 100)	222	212	177	226	712	238	117	241
&& (7.5 < cl_ene) && (cl_ene < 50)	17	5	2	15	104	17	<1	16
&& cl_elec < cl_nucl	17	5	2	15	102	17	<1	16
&& (energyER < 50) && (late_eneVeto_Ar < 200)	2	<1	<1	2	<1	2	<1	2

Таблица 5.5 — Отбор нейтронных событий, имитирующих WIMP, по комбинированным критериям во внешнем Ar от наиболее неблагоприятных изотопов

β, n распады во внешнем Ar	C16	N17	O22	F22	F23	Al31	Si36	P38
Доля отобранных нейтронов	2,23E-6	9,05E-7	2,16E-7	2,13E-7	3,58E-6	3,13E-6	<2,13E-7	3,87E-6

5.2 РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЙ ФОН $\beta - N$ РАСПАДОВ

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 C16, N17, O22, F22, F23, Al31, Si36 и P38:

Таблица 5.6 — Итоговое количество нейтронов от Active Ar

Изотопы	T1/2, с	Выход изотопов в Active Ar за 10 лет	Выход n в Active Ar за 10 лет	Количество n после отсечки вето 5 с	Итоговое количество n после отбора
C16	0,747	1,15	1,139	1,10E-02	3,30E-07
N17	4,173	20	19	8,28	1,66E-04
O22	2,25	2	0,02	4,29E-03	4,46E-06
F22	4,23	33	2,789	1,23	3,44E-04
F23	2,23	6	0,294	6,21E-02	2,49E-06
Al31	0,644	93	1,488	6,85E-03	1,99E-06
Si36	0,450	12	1,2	5,43E-04	<5,43E-09
P38	0,640	29	3,48	1,55E-02	3,10E-07
Всего		196,15	29,409	9,61	5,19E-04

Суммарное количество фоновых нейтронов от данных изотопов равно $N \approx 6,82 \cdot 10^{-4}$, которое может являться грубой оценкой значения уровня фона имитирующих событий в чувствительном объёме детектора с нейтронным вето за 10 лет эксплуатации (при вето-запрете в 5 секунд), поскольку рассматривались наиболее фоновые изотопы.

Таблица 5.7 — Итоговое количество нейтронов от среднего UAr

Изотопы	T1/2, с	Выход изотопов в среднем UAr за 10 лет	Выход n в среднем UAr за 10 лет	Количество n после отсечки вето 5 с	Итоговое количество n после отбора
C16	0,747	2	1,98	1,91E-02	3,83E-07
N17	4,173	34	32,3	14,08	<1,41E-04
O22	2,25	3,2	0,032	6,86E-03	<6,86E-08
F22	4,23	50	4,225	1,86	<1,86E-05
F23	2,23	12	0,588	1,24E-01	2,49E-06
Al31	0,644	159	2,544	1,17E-02	2,34E-07
Si36	0,450	19	1,9	8,59E-04	<8,59E-09
P38	0,640	56	6,72	2,98E-02	5,98E-07
Всего		335,2	50,289	16,13	1,63E-04

Нейтроны от распадов $\beta-n$ активных изотопов, образовавшихся во внешнем объёме аргона не могут быть отсечены с помощью вето, ввиду высокого порога регистрации сигналов β, n совпадений с внешней стороны внутреннего криостата. Поэтому подавление имитирующих событий осуществляется только с помощью критериев отбора.

Таблица 5.8 — Итоговое количество нейтронов от внешнего Ar

Изотопы	T1/2, с	Выход изотопов во внешнем Ar за 10 лет	Выход n во внешнем Ar за 10 лет	Итоговое количество n после отбора
C16	0,747	21	20,79	4,64E-05
N17	4,173	220	209	1,89E-04
O22	2,25	18	0,18	3,88E-08
F22	4,23	340	28,73	6,11E-06
F23	2,23	86	4,214	1,51E-05
Al31	0,644	1153	18,448	5,78E-05
Si36	0,450	115	11,5	<2,45E-06
P38	0,640	343	41,16	1,59E-04
Долгоживущие изотопы		2296	334,022	4,76E-04
Остальные изотопы		1670,79	276,394	5,05E-04
Всего		3966,79	610,416	9,81E-04

Таким образом, общее итоговое количество WIMP-подобных событий во всём объёме детектора от $\beta - n$ распадов с экспозицией 200 тонн·год составляет $\approx 1,66 \cdot 10^{-3}$ (при времени нейтронного вето 5 секунд), которое является наименьшей компонентой в общий вклад всего фона эксперимента Darkside-20k (см. рис 5.1).

Если применять 2-секундное время вето-запрета общее число событий составит $\approx 2,19 \cdot 10^{-3}$.

Тип фона	Фоновые события в ROI [200 тонн·год] ⁻¹
(α, n) нейтроны от ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th	9.5×10^{-2}
Мгновенные нейтроны от деления ^{238}U	$< 2.3 \times 10^{-3}$
Нейтроны от ^{222}Rn	$< 1.4 \times 10^{-2}$
Космогенные нейтроны	$< 6.0 \times 10^{-1}$
Нейтроны из горных пород	1.5×10^{-2}
Поверхностный α -распад + S2 совпадения	$< 5.0 \times 10^{-2}$
Коррелированные S1 + Черенков совпадения	$< 1.8 \times 10^{-2}$
Некоррелированные S1 + Черенков совпадения	$< 3.0 \times 10^{-2}$
^{39}Ar , космогенная активация и γ радиоактивность	$< 1.0 \times 10^{-1}$

Рисунок 5.1 — Компоненты фона установки Darkside-20k

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной работе был изучен фон установки Darkside-20k, возникающий в результате образования космогенных изотопов.

Была разработана программа в пакете Geant4, моделирующая прохождение мюонов и вторичных частиц космогенного происхождения через установку Darkside-20k, получен выход $\beta - n$ изотопов в детекторе за 10 лет эксплуатации.

Было проведено моделирование $\beta - n$ распадов космогенного происхождения в установке Darkside-20k.

Впервые получены результаты оценки фона от событий, имитирующих WIMP, возникших в результате взаимодействия запаздывающих нейтронов от $\beta - n$ изотопов, которая составила $\approx 1,66 \cdot 10^{-3}$ событий в детекторе с экспозицией 200 тонн·год. Фон от наработки космогенных изотопов является наименьшим из всех известных компонент ожидаемого фона эксперимента Darkside-20k. Полученные результаты будут использоваться в коллаборации Darkside для анализа общего фона детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dodelson S., Gates E. I., Turner M. S.* Cold Dark Matter // *Science*. — 1996. — Т. 274, № 5284. — С. 69—75. — ISSN 1095-9203.
2. *Akimov D. Y.* Experimental Methods for Particle Dark Matter Detection (Review) // *Instruments and Experimental Techniques*. — 2001. — Т. 44. — С. 575—617.
3. *Ryabov V. A., Tsarev V. A., Tskhovrebov A. M.* The search for dark matter particles // *Physics-Uspekhi*. — 2008. — Т. 51. — С. 1091—1121.
4. Direct detection of exothermic dark matter with light mediator / C.-Q. Geng [и др.] // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2016. — Т. 2016, № 08. — С. 009—009.
5. *Spergel.* Motion of the Earth and the detection of weakly interacting massive particles. // *Physical review. D, Particles and fields*. — 1988. — Т. 37 6. — С. 1353—1355.
6. Limits on cold dark matter candidates from an ultralow background germanium spectrometer / S. Ahlen [и др.] // *Physics Letters B*. — 1987. — Т. 195, № 4. — С. 603—608. — ISSN 0370-2693.
7. *Faber S. M., Gallagher J. S.* Masses and Mass-To-Light Ratios of Galaxies // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1979. — Т. 17, № 1. — С. 135—187. — eprint: <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.17.090179.001031>.
8. Low-Mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment / P. Agnes [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2018. — Т. 121, № 8.
9. First Dark Matter Search Results from the XENON1T Experiment / E. Aprile [и др.]. — 2017.

10. First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI / R. Bernabei [и др.] // The European Physical Journal C. — 2008. — Т. 56, № 3. — С. 333—355.
11. Results from 730 kg days of the CRESST-II Dark Matter search / G. Angloher [и др.] // The European Physical Journal C. — 2012. — Т. 72, № 4.
12. Dark Matter Search Results from the PICO-60 CF₃I Bubble Chamber / C. Amole [и др.]. — 2015.
13. Results from a Search for Light-Mass Dark Matter with a *p*-Type Point Contact Germanium Detector / C. E. Aalseth [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2011. — Т. 106, вып. 13. — С. 131301.
14. CoGeNT: A search for low-mass dark matter using *p*-type point contact germanium detectors / C. E. Aalseth [и др.] // Phys. Rev. D. — 2013. — Т. 88, вып. 1. — С. 012002.
15. Search for An Annual Modulation in Three Years of CoGeNT Dark Matter Detector Data / C. E. Aalseth [и др.]. — 2014.
16. DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS / C. E. Aalseth [и др.] // The European Physical Journal Plus. — 2018. — Т. 133, № 3.
17. 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.
18. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
19. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/NdsEnsd/ShowEnsdData.html#NUCID=16C&LEVEL=0&DECTYPE=6>.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ниже приведена таблица β - n изотопов и выходов нейтронов, произведенных космогенными мюонами за 10 лет в объёмах жидкого аргона DarkSide-20k.

Isotope	Active UAr	Neutron Veto UAr	Outer UAr	All Ar	(β -, n)	(β -, 2n)	(β -, 3n)	Total number of neutrons	Half-life T1/2	Rejection (5 sec)	Rejection in ActiveLAr (5 sec)	Rejection in MiddleUAr (5 sec)	Rejection (2 sec)	Rejection in ActiveLAr (2 sec)	Rejection in MiddleUAr (2 sec)
P39	0,15	1,00	2,00	3,15	0,27			0,84	282 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
P38	29,00	56,00	343,00	428,00	0,12			51,36	640 ms	0,23	0,02	0,03	5,89	0,40	0,77
Si37	3,00	3,00	21,00	27,00	0,17			4,59	90 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Si36	12,00	19,00	115,00	146,00	0,10			14,60	450 ms	0,01	0,00	0,00	0,67	0,06	0,09
Al36	0,10	0,32	2,00	2,42	0,31			0,75	90 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Al35	1,00	6,00	15,00	22,00	0,38			8,36	37,2 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al34	4,00	3,00	28,00	35,00	0,26			9,10	56,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al33	6,00	12,00	72,00	90,00	0,09			7,65	41,7 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al32	23,00	43,00	256,00	322,00	0,01			2,25	33 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al31	93,00	159,00	1153,00	1405,00	0,02			22,48	644 ms	0,10	0,01	0,01	2,61	0,17	0,30
Mg34	1,00	0,64	3,00	4,64	0,27			1,26	20 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg33	1,00	1,00	8,00	10,00	0,14			1,40	95 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg32	2,00	1,00	13,00	16,00	0,06			0,88	86 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg31	1,00	1,00	26,00	28,00	0,06			1,74	326 ms	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Mg30	8,00	17,00	91,00	116,00	0,00			0,07	313 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na33	0,05	0,16	1,00	1,21	0,47	0,13		0,88	8 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na32	0,05	0,16	1,00	1,21	0,24	0,08		0,48	12,9 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na31	0,05	0,16	1,00	1,21	0,37	0,01	0,00	0,47	17,35 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na30	0,05	0,16	1,00	1,21	0,30	0,01		0,39	48,4 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na29	1,00	1,00	7,00	9,00	0,26			2,33	44,1 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na28	3,00	4,00	36,00	43,00	0,01			0,25	30,5 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na27	13,00	30,00	188,00	231,00	0,00			0,30	301 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne29	0,05	0,16	1,00	1,21	0,28	0,04		0,44	15 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne28	0,05	0,16	1,00	1,21	0,12	0,04		0,23	20 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne27	0,05	0,32	2,00	2,37	0,02			0,05	31,5 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ne26	0,50	2,00	15,00	17,50	0,00			0,02	197 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F25	0,10	0,32	2,00	2,42	0,23			0,56	80 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F24	2,00	5,00	19,00	26,00	0,06			1,53	384 ms	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01
F23	6,00	12,00	86,00	104,00	0,05			5,10	2,23 s	1,08	0,06	0,12	2,74	0,16	0,32
F22	33,00	50,00	340,00	423,00	0,08			35,74	4,23 s	15,75	1,23	1,86	25,76	2,01	3,04
O24	0,05	0,16	1,00	1,21	0,58			0,70	65 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
O23	0,35	1,00	6,00	7,35	0,07			0,51	97 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O22	2,00	3,20	18,00	23,20	0,01			0,23	2,25 s	0,05	0,00	0,01	0,13	0,01	0,02
N20	0,30	1,00	5,00	6,30	0,43			2,70	136 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N19	0,50	2,00	8,00	10,50	0,55			5,73	271 ms	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01
N18	5,00	6,00	72,00	83,00	0,07			5,81	619,2 ms	0,02	0,00	0,00	0,62	0,04	0,04
N17	20,00	34,00	220,00	274,00	0,95			260,30	4,173 s	113,45	8,28	14,08	186,72	13,63	23,17
C20	0,05	1,00	0,79	1,84	0,65	0,19		1,88	16,2 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C19	0,05	0,16	1,00	1,21	0,47	0,07		0,74	46,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
C18	0,10	0,32	2,00	2,42	0,32			0,76	92 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C17	0,25	0,80	5,00	6,05	0,28			1,72	193 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C16	1,15	2,00	21,00	24,15	0,99			23,91	747 ms	0,23	0,01	0,02	3,74	0,18	0,31
B15	1,00	2,00	9,00	12,00	0,94	0,00		11,33	9,93 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B14	9,00	9,00	53,00	71,00	0,06			4,29	12,5 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B13	26,00	25,00	176,00	227,00	0,00			0,64	17,33 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Be14	0,10	1,00	1,00	2,10	0,98	0,01		2,09	4,35 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Be12	4,00	3,00	41,00	48,00	0,01			0,24	21,50 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Li11	1,00	3,00	6,00	10,00	0,86	0,04	0,02	10,02	8,75 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Li9	25,00	50,00	371,00	446,00	0,51			226,57	178,3 ms	0,00	0,00	0,00	0,10	0,01	0,01
He8	8,00	18,00	101,00	127,00	0,16			20,45	119,1 ms	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Выход β - n изотопов за 10 лет в Darkside-20k