

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Физический факультет

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине: «Ядерная физика»

на тему:

«Внешний детектор детектора DarkSide-20k»

Выполнил:

студент курса 2, группы 207

Комлев Даниил Александрович

Научный руководитель:

Чепурнов Александр Сергеевич

Москва 2020

Содержание

Введение

1. Темная материя
 - 1.1. Космологические подтверждения
 - 1.2. Кандидаты в частицы темной материи
2. Регистрация темной материи
3. Вето детектора DarkSide

Заключение

Список литературы

Введение

Темная материя играет важную роль в современной космологии, так как с помощью нее описываются явления, которые не могут быть объяснены кроме как дополнительным гравитационным взаимодействием со стороны неизвестных нам частиц. С целью их обнаружения проектируются и производятся установки по их регистрации.

1. Темная материя

Астрофизические и космологические измерения показали, что на долю обычной барионной материи (межгалактический газ, звезды и прочие известные нам космические объекты) приходится менее 5%, на темную энергию 68.5%, на нейтрино около 0.5%, а на темную материю, оставшиеся 26.5%, то есть после исключения барионной материи оставшиеся 95% массы остаются для нас загадкой. В настоящее время ученые со всего мира предпринимают попытки обнаружить темную материю путем регистрации различными детекторами.

1.1 Космологические подтверждения

Первые предположения о существовании темной материи были высказаны в XX веке на основании того, что кластер Цвики имел необычное распределение скоростей звезд и газа на отдалении от центра галактики, так как по закону Кеплера мы должны были бы наблюдать зависимость скоростей звезд и газа от расстояния между центром галактики и точкой наблюдения:

$$v^2(r) = \frac{G_N M(r)}{r},$$

откуда мы можем заметить, что $v(r) \sim r^{-1/2}$. Вместо этого, наблюдения показали, что скорость звезд и газа оставалась примерно постоянной на удалении от центра. Это говорит о том, что в галактике явно присутствует сильное гравитационное поле. Впоследствии и в других галактиках начали находить такого рода феномены. Темную материю во вселенной можно заметить только по ее гравитационному действию на составляющие вселенной. Из-за этого гравитационного действия изображения звезд регистрируются искаженными.

Но, стоит отметить, что существование частиц темной материи — это гипотеза, так как возможно, что данные явления вызваны нарушениями известных законов сохранения.

1.2 Кандидаты в частицы темной материи

Кандидаты в частицы темной материи должны удовлетворять минимальному набору требований: они должны быть электрически нейтральны, слабо взаимодействовать с обычной материей, и они должны быть стабильны, в масштабе жизни Вселенной. В стандартной модели (СМ) подходящим кандидатом является нейтрино.

Нейтрино: является частицей СМ с подобными характеристиками. Однако, существование одних только нейтрино не решает эту проблему, поскольку космологическое моделирование показало, что Вселенная, в которой доминируют нейтрино, будет находиться в противоречии с образованием скоплений галактик. Расширение стандартной модели, которое может объяснить малость массы нейтрино, приводит к появлению «массивных нейтрино». Массы тяжелых нейтрино лежат в интервале: $45 \text{ ГэВ} \leq m_{\nu H} \leq 1 \text{ ТэВ}$ [4].

Помимо нейтрино, в стандартной модели предполагается что могут существовать «стерильные нейтрино», основное их свойство заключается в том, что они не участвуют в слабых взаимодействиях, но из-за наличия массы могут быть смешаны с обычными нейтрино. Причем их масса должна удовлетворять условию: $m_{ster} \geq 14 \text{ кэВ}$ [4].

Самая распространенная модель, которая описывает кандидатов в частицы темной материи говорит о том, что за пределами СМ существуют частицы, с такими массами и сечениями взаимодействия, при которых они могли выйти из равновесия на ранних этапах формирования Вселенной, причем с плотностью, которая соответствует плотности темной материи. Эта гипотетическая стабильная и нейтральная частица, ее масса лежит в диапазоне от $\text{ГэВ}/(c^2)$ до нескольких $\text{ТэВ}/(c^2)$ [2]. Эти

частицы – WIMP-частицы (Weakly Interacting Massive Particles, то есть слабовзаимодействующие массивные частицы), хорошо укладываются в современные реалии, так как при взаимодействии таких частиц результирующая плотность как раз совпадает с плотностью темной материи. Темная материя регистрируется различными способами, такими как поиск частиц на коллайдерах или с помощью гамма-телескопов.

2. Регистрация темной материи

Обнаружение частиц темной материи может осуществляться тремя различными способами: рождение частиц на коллайдерах, косвенное и прямое обнаружение частиц темной материи.

На коллайдерах поиски темной материи происходят путем р-р взаимодействия и рождения WIMP-частиц. Ожидается, что WIMP-частицы могут быть зарегистрированы при энергиях больших 2000ГэВ.

Косвенный метод поиска заключается в регистрации продуктов аннигиляции WIMP-частиц, такие как нейтрино, фотоны, позитроны, антипротоны и некоторые другие частицы. В гамма-телескопах реализуется косвенный метод регистрации, а именно они регистрируют прилетающие из космоса фотоны, энергия которых может говорить о первоначальной области аннигиляции. В последнее время гамма-телескопы начали регистрировать фотоны, энергия которых порядка ТэВ, причем природа источника неизвестна. Это может говорить о том, что фотоны с такой энергией были получены путем аннигиляции частиц темной материи [4].

Метод прямого детектирования частиц темной материи состоит в том, что при движении Земли планета пролетает через распределенные в космическом пространстве частицы темной материи. При рассеивании WIMP-частиц на ядрах барионной материи, то есть на «мишени», появляются фотоны с низкой энергией, в следствии сцинтилляции, поэтому важно сделать детектор с как можно более низким порогом регистрации. В этом методе используют благородные жидкие газы (аргон, криптон, ксенон), так как при взаимодействии «мишени» и ядра сцинтиллятора вылетает фотон.

С целью прямой регистрации WIMP были созданы различные проекты, а именно DarkSide, Xenon, WARP и некоторые другие.

Одной из установок для прямой регистрации является Xenon1000 – время-проекционная камера. В детекторе независимо

измеряется сцинтилляционный свет в жидкой фазе и ионизация, пропорциональная сцинтилляционному свету, в газовой фазе. По величине отношения этих двух сигналов могут быть выделены события с ядрами отдачи с энергиями, меньшими 4,5 кэВ. Время проекционная камера заключена в тефлоновый цилиндр, который используется как отражатель света и электрический изолятор. Масса ксеноновой мишени составляет 15 кг. Четыре стальных сетчатых электрода при подаче на них напряжения создают электрическое поле, необходимое для дрейфа электронов ионизации в жидкости. Затем электроны выталкиваются с поверхности жидкости и ускоряются в газонаполненной промежутке. Нижняя плоскость из 41 компактного фото электронного умножителя (ФЭУ) регистрирует в жидкой фазе прямой сцинтилляционный свет, верхняя из 48 ФЭУ – пропорциональный световой отклик в газовой фазе. Снаружи активного объема находится прослойка, содержащая 10 кг жидкого ксенона. [4].

WARP (Wimp ARgon Programme) – жидкоаргоновая дрейфовая камера. В жидкоаргоновой камере с высокой точностью определяются импульсы как релятивистских, так и нерелятивистских частиц. Как и в камере с жидким ксеноном, в жидкоаргоновой камере для поиска WIMP-частиц необходимо определять отношение сигналов "свет/заряд". Коллаборация WARP использовала двухфазную аргоновую дрейфовую камеру объемом 2,3 л. В газовой фазе, находящейся поверх жидкого аргона, расположен массив из 7 ФЭУ. Поверхность жидкого аргона покрыта слоем специальной добавки, смещающей спектр ультрафиолетовых фотонов, излучаемых при сцинтилляциях в жидком аргоне, к области спектра, к которой чувствительны фотокатоды ФЭУ. [4].

Основными компонентами установок DarkSide являются вето, криостат, жидкий аргон и временная проекционная камера (TRC). В

детекторах DarkSide используют сцинтиллятор, а именно аргон, который добыт из-под земли и из атмосферы:

1) Аргон, полученный из атмосферы, имеет большую активность, чем аргон, который был получен из-под земли, так как из-за ядерных взрывов и космического излучения он загрязнен.

2) Аргон, полученный из-под земли, резко снижает уровень фонового излучения, он гораздо чище атмосферного, так как не подвержен ни воздействию космического излучения, ни воздействию ядерных взрывов.

Данный эксперимент проводится в лаборатории в горах в Италии. Это сделано для того, чтобы уменьшить интенсивность космического излучения, так как горный массив над лабораторией значительно уменьшает количество регистрируемых мюонов. Проект DarkSide состоит из трех фаз, таких как DarkSide-10, DarkSide-50, DarkSide-20k.

В детекторе DarkSide-50 используется только аргон. Для защиты от внешних фонов сверхчистую воду, которая задерживает излучения, так как космические частицы теряют больше энергии при столкновении с легкими ядрами воды.

На данный момент перспективным детектором является детектор DarkSide-20k, который конструктивно похож по принципам построения на DarkSide-50, но имеет гораздо больший объем обедненного аргона.

Основной частью детектора DarkSide-20K является двухфазная время-проекционная камера, заполненная жидким аргоном, масса которого составляет 20 тонн. DarkSide-20K может обеспечить поиск редких событий без фона благодаря следующим его свойствам: накладывать вето на время регистрации мюонов космического излучения и нейтронов, на излучения, которые испускаются материалами, из которых сделана установка.

3. Вето детектора DarkSide

Внешний детектор в детекторе DarkSide-20k используется для поглощения естественной радиоактивности земли вокруг детектора и космического излучения. Регистрировать эти излучения нужно чтобы исключить их из выборки зарегистрированных событий, и в таком случае в наборе зарегистрированных частиц останутся только WIMP-частицы.

Вето состоит из 2 объемов, разделенных оболочкой из акрилика:

- 1) Внутренний объем (Inner Argon Buffer, IAB) содержащий жидкий аргон атмосферный Аргон, который окружает ТРС.
- 2) Внешний активный объем (Outer Argon Buffer, OAB) [3].

Детектор DarkSide-50 имеет «луковичную» структуру. В центре расположена ТРС с жидким аргоном, вокруг ТРС (Time Projection Chamber) расположен жидкосцинтиляционный детектор, а вокруг жидкосцинтиляционного детектора находится Черенковский детектор. Для регистрации событий используются жидкосцинтиляционное вето (ЖСВ) и водное Черенковское вето (ВЧВ), в частности, ЖСВ детектирует радиогенные и космогенные нейтроны, гамма-излучение и космические мюоны. ВЧВ защищает от космических мюонов и детектирует их. Сцинтилляцию во всех вето и в ТРС регистрируют ФЭУ.

ВЧВ является баком цилиндрической формы с ультранизкофоновой водой из детектора Borexino, который защищает от внешней радиоактивности, внешних космогенных нейтронов и является черенковским вето, то есть детектором мюонов на основе эффекта Черенкова.

Регистрация события в ВЧВ сообщает о том, что через детектор пролетел мюон. Это значит, что могли образоваться космогенные нейтроны, которые могут быть приняты за WIMPy. Поэтому на время, за которое эти нейтроны должны поглотиться и распасться, мы должны прекратить сбора данных – «наложить вето». Это делается путем подачи

сигналов от электроники ВЧВ и ЖСВ в систему сбора данных основного детектора.

Внутри ВВЧ находится ЖСВ, которое имеет форму сферы, диаметром 4м, она состоит из нержавеющей стали. ЖСВ выполняет роль нейтронного вето, детектора и поглотителя нейтронов за счет использования сцинтиллятора, насыщенного бором. Это вето поглощает космогенные нейтроны и нейтроны от α -n реакций (реакций, когда альфа-частица от естественной радиоактивности выбивает нейтрон из рядом находящегося ядра).

Космогенные мюоны могут производить высокоэнергетические нейтроны, которые могут проникать через несколько метров экранирования. Чтобы избежать фонов от этих высокоэнергетических нейтронов, ЖСВ действует как вето для обнаружения мюонов, которые могут их производить [2].

В DarkSide-20k конструкция похожа на DarkSide-50, то есть детектор имеет «луковичную» структуру, но во внешнем слое находится не очищенная вода, а жидкий атмосферный аргон. Внутренний объем сделан из пластика, допированного гадолинием. ТРС и ОАВ разделены на вертикальные секторы с помощью тонких панелей из акрилика. Каждая сторона ТРС и ОАВ будет разделена на 5 вертикальных секторов, стенки которых, и внешняя стена ТРС, будут покрыты веществом, проходя через которое изменяется длина волны прилетающего света. Это сделано для того, чтобы детекторы смогли зарегистрировать прилетающий пучок, так как у детекторов имеется ограничение по регистрируемой длине волны. Смещенный по длине волны сцинтилляционный свет, который был получен в результате взаимодействия WIMP-частицы с «мишенью», регистрируется с помощью датчиков, размещенных в ОАВ. Используются таких 3000 датчиков, установленных с обеих сторон вертикальной стены, а также сверху и снизу IAB.

Гадолиний используется для захвата нейтронов, так как при захвате происходит испускание высокоэнергичных фотонов. Фотоны взаимодействуют в ТРС и ОАВ, производя сцинтилляционный свет, который обнаруживается световыми датчиками. Комбинированный сигнал ТРС и ОАВ используется для выбора интервала времени, в который не будет производиться регистрация частиц.

Для каждого из двух детекторов ВЧВ и ЖСВ установлен верхний и нижний порог регистрируемой энергии обнаружения 800 кэВ и 100 кэВ.

Основным путем для регистрирования является использование интегрированной электроники. Для считывания создан вето фото детекторный модуль (ВФДТ), эти модули установлены на акриликe. В детекторе также присутствует модуль управлением вето (МУВ), и он имеет возможность направлять питание и напряжение на ВФДТ, позволяя включать и выключать их по отдельности с помощью управляющих сигналов. Причем один МУВ одновременно регулирует работу от 15 до 30 ВФДТ [3].

Детектор конструируется с такой точностью, что за 10 лет его работы ожидается 1 зарегистрированный нейтрон, на который не будет наложено вето.

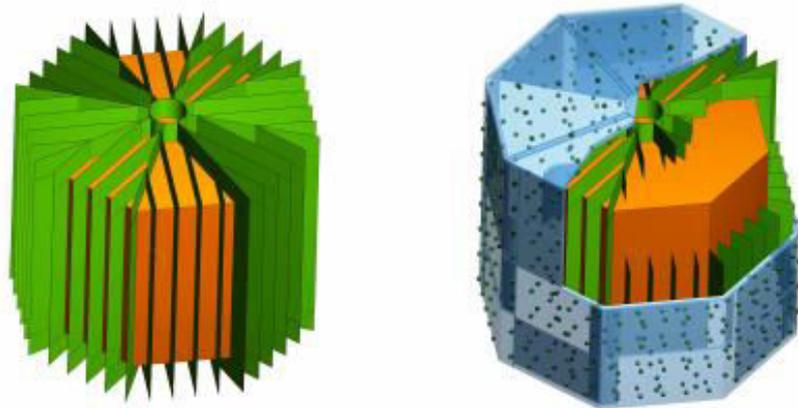


Рисунок 1

На рисунке 1 изображены в оранжевом цвете наружные стены ТПК, в зеленом - панели из акрилика ТРС. Левое изображение показывает только ТРС и панели, в то время как правый разрез показывает еще и IAB.

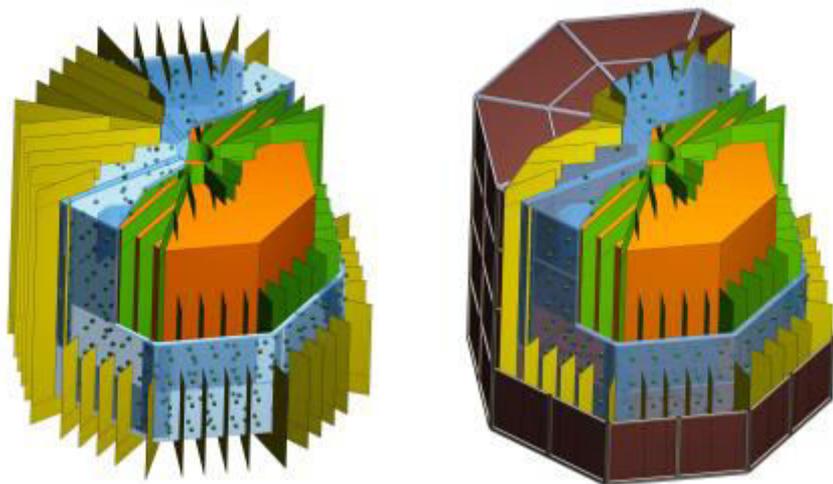


Рисунок 2

На рисунке 2 изображены в оранжевом цвете наружные стены ТРС, в зеленом- панели из акрилика ТРС, в желтом-панели OAB. Левый разрез показывает ТРС, панели из акрилика, IAB и OAB, в то время как правый разрез показывает еще и клетку Фарадея.

Заключение

Внешний детектор является важной составляющей детектора DarkSide-20k, так как с его помощью происходит поглощение естественной радиоактивности как вокруг детектора, так и радиоактивности самого рабочего вещества с большой вероятностью, что позволяет довольно точно проводить эксперимент не взирая на большое количество регистрируемых нейтронов. Эта конструкция позволяет достичь полного отсутствия фоновых помех и дает возможность регистрировать частицы темной материи в данном детекторе.

Список литературы

- [1] Aalseth C.E., Acerbi F., Agnes P. и др., DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS, 2018
- [2] Prof. M. Pallavicini, Direct dark matter detection with the DarkSide-50 experiment, 2017
- [3] Veto Design, Veto and Monte Carlo and Science working groups, 2019
- [4] В.А. Рябов, В.А. Царев, А.М. Цховребов, Поиски частиц темной материи, 2008
- [5] http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino_astr/na4.htm