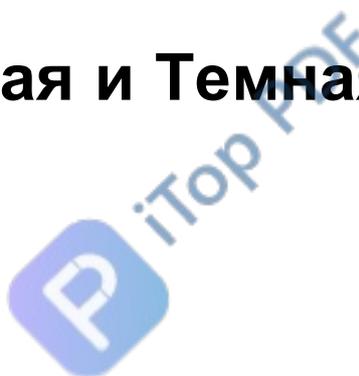


Колледж промышленных, информационных технологий и права

Вселенная и Темная материя



Проект по физике:

группы МВ-921

Панфилов Никита Борисович

Научный руководитель:

учитель Котукова Ольга Альбертовна

Кемерово 2023

Содержание



1 Введение

В начале прошлого столетия астрономы начали замечать, что некоторые звезды и галактики ведут себя иначе чем предсказывала теория, а именно, вращение более отдаленных частей галактик не поддавалось законам небесной механики. Складывалось ощущение что масса галактик больше той, что наблюдалась непосредственно. Это положило начало поискам новой, скрытой массы, которую в последствии называли *темной материей (dark matter)*.

Впервые термин "темная материя" был употреблен немецким астрономом Фрицом Цвикки, который в своей работе по измерению радиальной скорости восьми галактик в скоплении Кома из созвездия Волосы Вероники, опубликованной в 1937 году, показал, что для удержания галактик от разлета полная масса должна превышать видимую более чем в 500 раз.

В конце 60-х годов, астроном Вера Рубин из Института Карнеги, установила, что большинство звезд в спиральных галактиках движутся по орбитам примерно с одинаковой угловой скоростью, что свидетельствовало о наличии темной материи. Впоследствии было опубликовано еще несколько независимых работ, которые полностью подтверждали факт существования скрытой массы.

Стоит отметить что позже, в математическую модель Вселенной был введен еще один вид материи (энергии) – *темная энергия (dark energy)*, для объяснение ускоряющегося расширения Вселенной. В нашей работе мы не будем говорить о темной энергии и ограничимся лишь темной материей.

Согласно нынешним астрофизическим представлениям, на долю обычной барионной материи (межгалактический газ, звезды и прочее) приходится менее 5%, на темную энергию ~ 68.5%, на нейтрино около 0.5%, а на темную материю, оставшиеся 26.5%. Таким образом, почти 95% массы-энергии нашей Вселенной состоит из неизвестной нам массы, изучение которой имеет фундаментальное значение для космологии, физики элементарных частиц и астрофизики.

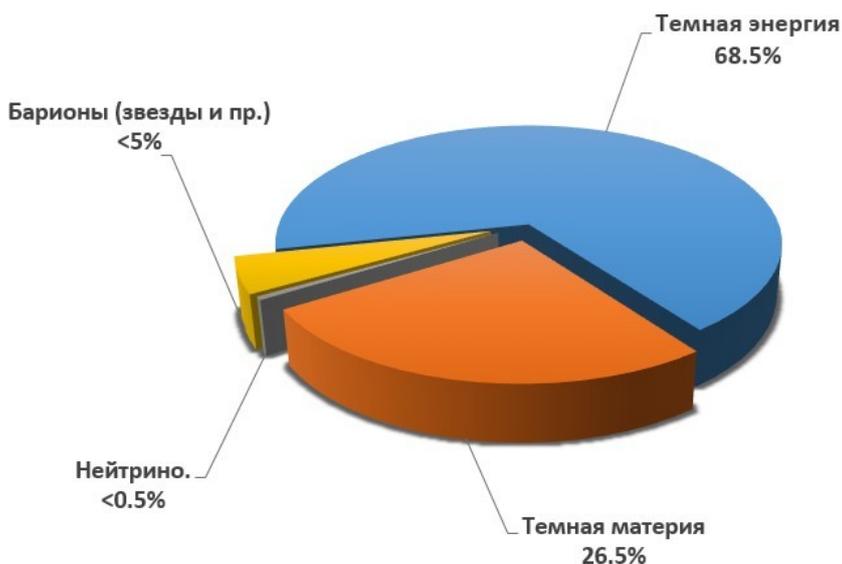


Рис. 1: Распределение материи во Вселенной

2 Классификация темной материи

Попытаемся понять на какие категории делится ТМ и по каким свойствам. На сегодняшний день существует несколько способов по тому, на что именно следует разделять темную материю, каждый из которых имеет свои недостатки и преимущества. Наиболее общепризнанная классификация — это разделение ТМ по скоростям частиц-переносчиков на горячую, теплую и холодную. Давайте вкратце объясним, что из себя представляет каждая из них.

- **Горячая темная материя.**

Под горячей ТМ понимается легкие частицы, которые на раннем периоде эволюции Вселенной были в полном соприкосновении с фотонами, электронами, позитронами, и в момент выхода из равновесия, когда взаимодействие прекратилось, они разлетелись со скоростями близким к скорости света. Как показывают расчеты, масса таких частиц должна быть в 5000 раз легче электрона. Подходящим кандидатом на эту роль являются нейтрино.

На сегодняшний день горячая ТМ практически исключена, ввиду того, что она противоречит крупномасштабной структуре Вселенной.

- **Холодная темная материя.**

К холодной ТМ относятся частицы, которые в раннюю стадию Вселенной отцепились от плазмы с нерелятивистскими скоростями. В отличие от горячей, холодная модель с хорошей точностью описывает крупномасштабную структуру Вселенной с точки зрения космологии. Хотя, в некоторых деталях она также не соответствует астрономическим наблюдениям.

Переносчиками данного вида материи обычно выступают сверхмассивные частицы, с массами от десятков ГэВ до нескольких ТэВ. Основным кандидатом на данную роль являются WIMP-ы (Weakly Interactive Massive Particles) — слабо взаимодействующие массивные частицы.

- **Теплая темная материя.**

На сегодняшний день наиболее подходящей является теплая ТМ, в которой недостатки холодной ТМ уже устранены. Частиц данной категории имеют среднюю скорость между холодной и горячей, хотя и в ранней стадии они также были релятивистскими. Обычно к теплой ТМ относят легкие частицы, массы которых в 100 раз меньше массы электрона.

Основным кандидатом в данной категории является стерильное нейтрино с массой в диапазоне 1 эВ - 10 кэВ.

3 Свидетельства существования темной материи

Темная материя (ТМ) — это особый вид материи, которые не только не

испускает электромагнитное излучение, но и не взаимодействует с ним вовсе, что не позволяет проводить прямые наблюдения. Однако, эта материя проявляет себя в гравитаци-



онном взаимодействии, что позволяет обнаружить ее экспериментально. Перечислим основные свойства ТМ:

- Темная материя, так же, как и обычная барионная материя концентрируется в определенных сгустках (обычно вблизи барионной).
- По астрономическим наблюдениям на нынешний день, считается что ТМ является нерелятивистской.
- ТМ в большинстве случаев скапливается в местах скопления обычной материи.
- ТМ не взаимодействует с обычной материей, кроме того, как выяснилось она и сама с собой практически не взаимодействует [1].
- ТМ должна быть подобна жидкости (никаких дискретных образований пока не обнаружено).

Все выше перечисленные свойства создают ряд трудностей в обнаружении темной материи и поиска ее частиц-переносчиков.

3.1 Галактические ротационные кривые

Одним из наиболее наглядных доказательств существования ТМ служат ротационные кривые — зависимость скорости вращения звезд и газа в галактике от расстояния до центра этой галактики.

Рассмотрим спиральную галактику, т.е. скопление звезд и газа в форме сплюсненного диска. Воспользуемся законом Кеплера: масса $M(r)$ внутри скопления радиуса r и скорость вращения $v(r)$ на расстоянии r от центра галактики, описывается следующим соотношением:

$$v^2(r) = \frac{G \cdot M(r)}{r}$$

где G — гравитационная постоянная, а $M(r)$ имеет вид:

$$M(r) = \int_0^r \rho(r) \cdot 2\pi r \cdot dr$$

где $\rho(r)$ — распределение плотности вещества.

В области за наблюдаемым галактическим диском масса $M(r) \approx$ и скорость вращения будет $\sim 1/r$

Но наблюдения противоречат этой зависимости. На деле мы получаем, что с удалением от центра галактики, скорости почти не уменьшаются $v(r) \approx const$, в чем можно убедиться на примере галактики М33 [2]. (Рис.2)

Помимо галактики М33 были рассмотрены сотни спиральных галактик, для которых были получены схожие картины.

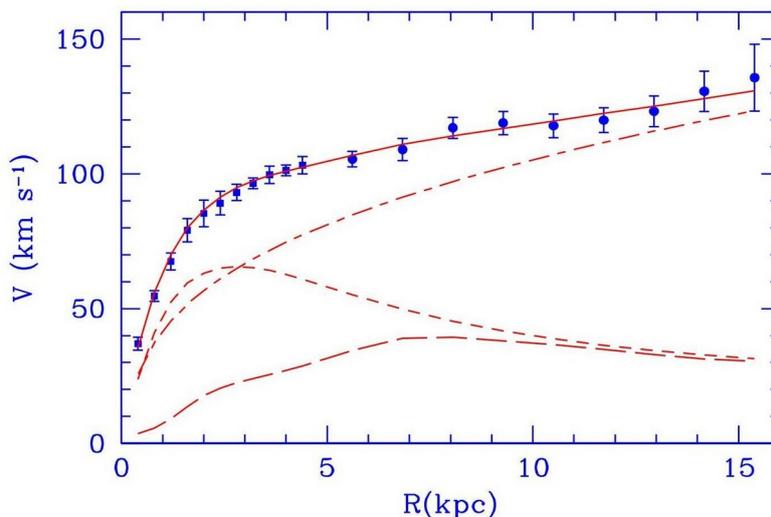


Рис. 2: Экспериментальная ротационная кривая для спиральной галактики М33 (точки) по сравнению с лучшей подгонки модели (сплошная линия). Кроме того, показано вклад гало (пунктир с точкой), звездный диск (короткая пунктирная линия) и вклад газа (длинный пунктир).

Из ротационных кривых для галактик следует, что темная материя почти полностью доминирует над видимой.

В добавок можно рассмотреть вращение холодного нейтрального водорода во внеш-ней области. Для этого проводится измерение эмиссии на длине волны 21 см с по- мощью радиотелескопов. В результате вращения галактик происходит доплеровский сдвиг линии 21 см, что позволяет определить скорость вращения газа. Исследо- вания показали, что скорость вращения водорода, так же, как и звезд, практически не меняется и остается постоянной, что является еще одним фактором в пользу темной материи.

3.2 Гравитационное линзирование

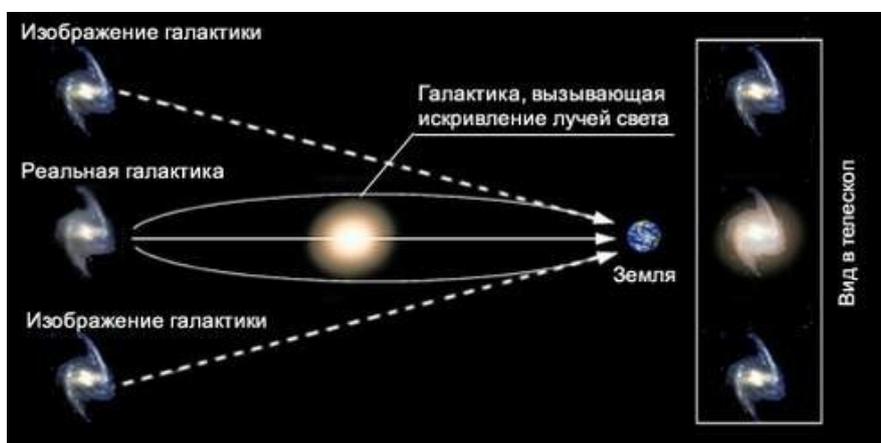


Рис. 3: Иллюстрация принципа эффекта гравитационного линзирования



Метод гравитационного линзирования заключается в явлении связанном с полевыми уравнениями ОТО (общая теория относительности), а именно, в отклонении электромагнитного излучения вблизи массивных тел. Как правило для заметного искажения изображения нужны массы порядка размера галактик или их скоплений. Вблизи же менее массивных тел, таких как звезды, отклонение луча происходит на очень малые углы, и удается заметить лишь кратковременное увеличение яркости (вспышка). Если объект имеет высокую яркость, то заметить такое изменение практически невозможно. Если же объект недостаточно яркий или же не виден вовсе, то такая кратковременная вспышка вполне может наблюдаться. События такого типа называются микролинзированием.

С помощью космического телескопа Hubble было получено изображение "кольца" темной материи в скоплении галактик C1 0024+17 [4]. На сегодняшний день это является одним из наиболее убедительных и наглядных доказательств существования темной материи. В данном случае скрытая масса участвует в роле гравитационной линзы, что объясняет наличие мнимых изображений от одних и тех же объектов и увеличение яркости оригинального источника.

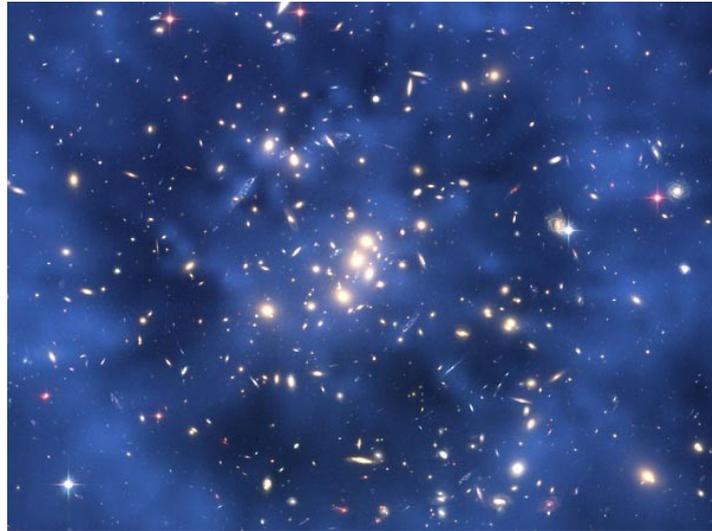


Рис. 4: Темное кольцо на изображении скопления галактик C1 0024+17 было идентифицировано с темным веществом. Само изображение было построено с использованием информации, полученной от орбитальной обсерватории «Хаббл», а происхождение кольца связывается со столкновением двух гигантских галактических кластеров [?].)

3.3 Галактические скопления

Теперь рассмотрим скопления галактик, или кластеров. Чтобы найти суммарную их массу используют теорему о вириале:

$$2 \langle T \rangle + \langle U \rangle = 0$$

где T — кинетическая энергия, а U — потенциальная, которые определяются следующими соотношениями для N галактик:

$$\langle T \rangle = \frac{1}{2} N \langle m v^2 \rangle, \quad \langle U \rangle = -\frac{1}{2} GN \left(N - \frac{\langle m \rangle}{\langle r \rangle} \right)$$

Учитывая, что $N m = M$ и $(N-1) \approx N$, для динамической массы получаем следующую оценку:

$$M \approx \frac{2 \langle v^2 \rangle \langle r \rangle}{G}$$

Таким образом, измеряя величины r и v можно вычислить M . Для скопления Комы, к примеру, с неопределенностью в фактор два получается следующее значение [5]:

$$\frac{M}{L} \approx 300 h \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$$

где $h = H/100$ — безразмерная постоянная Хаббла.

Следует отметить, что данные оценки проводились при некоторых условиях теоремы о вириале: замкнутая система находится в механическом равновесии и произведено усреднение по длительному периоду времени. Но наши наблюдения нельзя назвать усредненными по длительному периоду времени и, вообще говоря, скопления галактик не являются замкнутыми системами, а достигли ли они состояния равновесия или нет, пока неясно.

3.4 Количественный вклад темной материи

Определение количественного вклада всей гравитирующей материи производится на основе совершенно различных эффектов в космологии. Это гравитационное линзирование, описанное нами выше, наблюдение галактических скоплений при разных красных смещениях, сравнение теории образования крупномасштабной структуры Вселенной с наблюдениями и данные по угловым флуктуациям микроволнового излучения [6].

В последнее десятилетие были проведены эксперименты на SDSS (Sloan Digital Sky Survey) [9], WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [8] и 2dFGRS (Two-degree-Field Galaxy Redshift Survey) [7], которые позволили с высокой точностью определить космологические параметры. Эти данные хорошо описываются Вселенной Фридмана (космологическая модель, удовлетворяющая полевым уравнениям ОТО), в которой на долю нерелятивистской материи приходится $\approx 31.5\%$, а на темную энергию с отрицательным давлением $\approx 68.5\%$ [25]:

$$\Omega_M = 31.5^{+0.017}_{-0.016}, \quad \Omega_{\Lambda} = 68.5^{+0.017}_{-0.016}$$

где $\Omega = \rho/\rho_c$ — отношение средней плотности Вселенной к критической.

Материю во Вселенной вполне возможно описать через три параметра: постоян-

ную Хаббла, плотность материи и плотность барионов соответственно:

$$h = 0.673(12), \quad \Omega_M h^2 = 0.1198(26), \quad \Omega_B h^2 = 0.02207(27)$$



Таким образом, на барионную материю приходится ~ 5%, на ТМ ~ 26.5% и на ТЭ ~ 68.5%.

Также стоит отметить, что около двух лет назад международная группа ученых из DES (Dark Energy Survey) начала составлять карту распределения темной материи. Эта карта будет покрывать около 13 % видимого небосклона, однако ее отличает беспрецедентная подробность. Первые результаты работы группы DES были представлены в виде фрагмента карты в 0.4 % от видимой части (Рис.5) [29]. По предварительным оценкам, работы продлятся еще около трех лет.

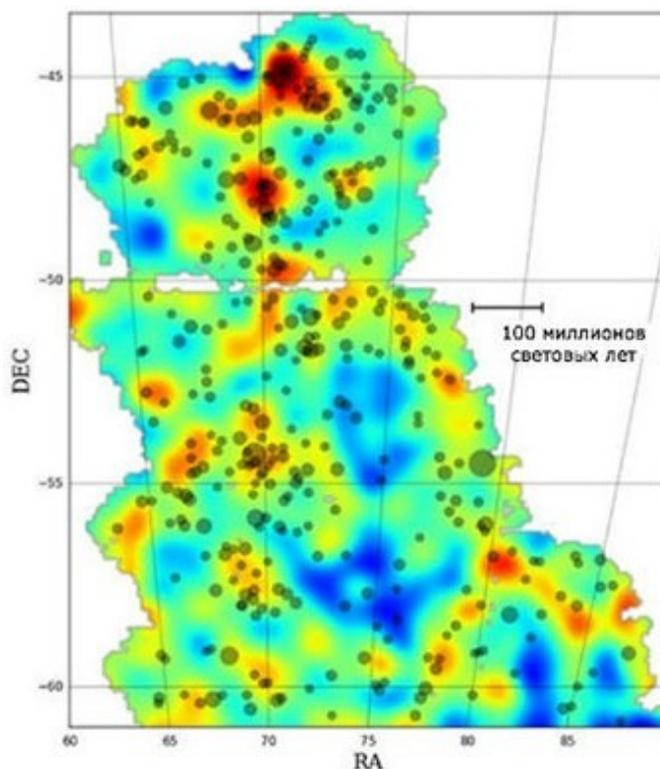


Рис. 5: Фрагмент карты создаваемой группой DES. теплые оттенки цвета соответствуют высокому числу галактик, а пустоты между ними обозначены голубым цветом. Черными кружками показаны кластеры галактик.

4 Кандидаты на роль частиц темной материи

В итоге, в современной физике космоса, возникла довольно странная ситуация: количественный вклад темной материи во Вселенной определен с достаточной точностью, но саму природу ТМ мы так и не понимаем. На данный момент частицы ТМ пока не были обнаружены, поиск этих частиц является одной из самых сложных проблем стоящей не только перед космологией, но и перед физикой частиц и астрофизикой. Т.к. наличие ТМ доказывается лишь ее гравитационными свойствами, то предпринимались попытки создать модифицированные теории гравитации без ТМ, такие как MOND (Модифицированная ньютоновская динамика), космологическая постоянная и гравитационная постоянная зависящая от времени

[5]. Но все эти теории имеют ряд



недочетов, так что на данный момент лучше объяснением гравитационных аномалий является наличие ТМ. Рассмотрим некоторых кандидатов на роль частиц темной материи.

4.1 Нейтрино Стандартной модели

После экспериментов по осцилляции ускорительных [15], атмосферных [14] и солнечных [13] нейтрино было полностью доказано что у этих частиц ненулевая масса, следовательно, они должны вносить вклад в скрытую массу. На нынешней момент, нейтрино — единственная частица в кандидаты на ТМ, которую можно зарегистрировать в эксперименте.

В отличие от других кандидатов, у нейтрино есть ряд преимуществ: их можно непосредственно наблюдать в экспериментах, т.е. доказан факт их существования и известна их распространенность в нашей Вселенной.

Нейтрино являются фундаментальными фермионами со спином 1/2, электрически нейтральны, имеют 3 поколения — τ , μ , e и относятся к горячей ТМ, т.к. ее энергия при выходе из равновесия многократно превышает ее массу. Такие нейтрино могут быть самыми распространенными частицами во вселенной, после реликтовых фотонов. Плотность числа состояний нейтрино, на данный момент, определяется следующим соотношением [18]

$$n^0 + n^0 \approx \frac{3}{4} \frac{T^0}{\pi^2} n^0 \approx 112 \text{ см}^{-3}$$

где n_γ^0 , n_ν^0 , $n_{\bar{\nu}}^0$ соответственно плотности реликтовых фотонов, нейтрино и антинейтрино в современную эпоху. Нейтринная плотность легких нейтрино связано с фотонной плотностью следующим выражением:

$$n^0 = \frac{3}{4} n_\gamma^0, \quad n^0 \approx 400 \text{ см}^{-3}$$

Получаем, что количество нейтрино должно превосходить барионную материю в 10^9 раз.

Для определения массы нейтрино проводился целый ряд экспериментов по исследованию энергетического спектра электронов при β - распаде трития. Наиболее точными оказались эксперименты, проводимые в г. Троицк [17] и г. Майнц [19], которые дали следующие оценки для верхней границы массы электронного нейтрино:

$$m_\nu < 2.05 \text{ эВ}, \quad m_\nu < 2.3 \text{ эВ}$$

Из полученных данных для верхней границы масс нейтрино следует ограничение на полную реликтовую плотность для этих частиц [25]:

$$\Omega_\nu h^2 < 0.0025$$

Это ограничение показывает, что нейтрино ΣM не может преобладать в ТМ, несмотря на их большое количество в сравнении с барионной материей. Даже учитывая этот факт, нейтрино по-прежнему остается одной из самых важных частиц в космологии и физики элементарных частиц.



4.2 Сверхмассивные нейтрино

Массивные нейтрино уже не являются частицами Стандартной модели. Согласно данным LEP [20], по измерению ширины распада Z^0 - бозона, существует только три типа легких нейтрино (τ , μ , e), которые были рассмотрены нами выше и исключается существование тяжелых нейтрино вплоть до 45 ГэВ.

Были предложены несколько моделей существования сверхмассивных нейтрино, но все они были вне рамок СМ и предполагали массы от 45 ГэВ до 1 ТэВ.

Сверхмассивные нейтрино относятся к частицам холодной материи. При их наличии началось бы ранее гравитационное сжатие материи, т.е. происходило бы образование более мелких структур. В дальнейшем, уже за счет сжатия мелких структур в сгустки, началось бы образование скоплений и суперскоплений галактик [5].

4.3 Стерильное нейтрино

Стерильные нейтрино (СН) впервые были упомянуты более 20 лет назад в работе [16]. Модели с данными частицами активно развиваются и классифицируются как расширения Стандартной модели физики элементарных частиц.

Активные попытки в изучении СН объясняются тем, что введение в СМ стерильных нейтрино позволяет решить ряд основных проблем космологии и физики элементарных частиц.

Сами СН не участвуют в слабых взаимодействиях, однако они могут смешиваться с активными нейтрино (нейтрино СМ), что обуславливает наличие массы у последнего и смешивание нейтрино разных ароматов (τ , μ , e) между собой, которое в свою очередь и вызывает осцилляции. Для объяснения экспериментов по осцилляции нейтрино достаточно внедрить в СМ два новых фермиона майроновского типа, при этом, изменяя значения модельных параметров можно не только объяснить осцилляции, но и барионную асимметрию Вселенной. В таком случае, только два из трех активных нейтрино будут обладать массой. Для придания массы всем трем нейтрино СМ нужно также три стерильных нейтрино. При такой реализации, для некоторой области пространства легчайшее из стерильных нейтрино окажется долгоживущим и сможет претендовать на роль частиц темной материи.

Основным параметром является масса СН. На данный момент, еще четко не определено максимальное и минимальное значение масс, они могут принимать значения от самых малых ~ 1 эВ, вплоть до значений $\sim 10^{15}$ ГэВ. Есть несколько групп масс СН, в зависимости от ожидаемых феноменологических проявлений, но нас интересует лишь область от 1 - 10 кэВ, СН с данной массой образуют горячую темную материю, о которой мы уже упоминали выше.

В относительно недавней работе по исследованию скоплений галактик Эзрой Булбулом из Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики и Алексеем Боярским, представляющим Лейденский университет, были обнаружены неизвестные линии спектра (Рис.6), которые могут соответствовать распаду СН. [11] В теории, стерильное нейтрино может, хотя и очень редко, распадаться на "обычное" нейтрино и фотон. При этом каждый из продуктов распада унесёт с собой половину энергии предка, то есть линии в районе 3,52 - 3,56 кэВ могут указывать на обнаружение таких распадов стерильного нейтрино с массой в интервале 7,04 - 7,12 кэВ. Однако, никаких

поспешных выводов ученые делать не берутся, ибо еще толком не ясно, что именно они нашли.



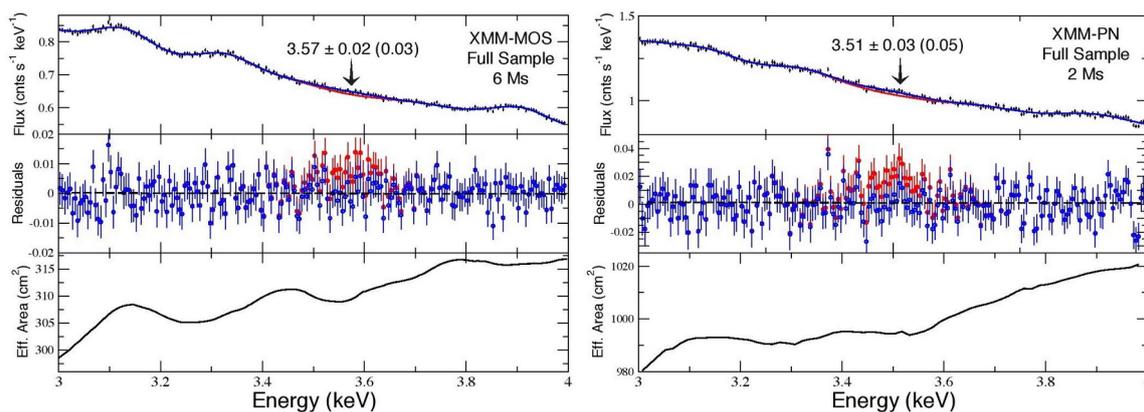


Рис. 6: Графики показывают энергетическую зону (3 - 4 кэВ), где возникает новая спектральная характеристика. Красные линии — избыток излучения, синие линии — общая модель излучения с Гауссианами других источников.

4.4 Аксионы

Еще один кандидат на роль скрытой массы — аксионы. Это псевдоскалярная гипотетическая частица, постулированная в 1977 г. в связи с нарушением CP-инвариантности в КХД (квантовая хромодинамика). Масса аксиона выражается следующим образом [5]:

$$m_a = \frac{\sqrt{z} f_\pi m_\pi}{1 + z f_\pi / N_F} \sim \frac{10^7 \text{ ГэВ}}{PQ/N_F} \cdot 0.62 \text{ эВ},$$

где $z = m_u/m_d = 0.56$, $m_\pi = 135 \text{ МэВ}$ и $f_\pi = 93 \text{ МэВ}$.

В начале предполагалось, что масштаб нарушения данной симметрии совпадает с электрослабым масштабом и масса аксиона равна примерно 200 кэВ. Но эксперименты на ускорителях частиц весьма быстро исключили такую возможность. На сегодняшний день считают, что масса аксиона варьируется в интервале от 10^{-5} эВ до 10^{-3} эВ. Однако прямое детектирование пока не дало результатов.

Так же имеются и косвенные способы поиска аксионов, а именно, через свет. Согласно теоретическим представлениям аксион может распадаться на два фотона, которые мы уже можем детектировать. Также возможен и обратный процесс, т.е. получения аксиона из света. Из данного свойства следует что аксион хоть и является "неуловимой" частицей, но не лишен взаимодействия с магнитным полем. В таком случае аксионы можно стимулировать для распада на, так называемые, микро-волновые фотоны. Этот метод используется учеными в ADMX (Axion Dark Matter eXperiment). Если аксион окажется частицей ТМ, это даст еще один рыбок в понимании и изучении скрытой массы.

4.5 Слабовзаимодействующие массивные частицы

Мы добрались до лидирующего кандидата на роль таинственной массы, а именно,

WIMP-а (Weakly Interacting Massive Particle). К вимпам относятся частицы, которые в момента выхода из равновесия Вселенной имели плотности соответствующие



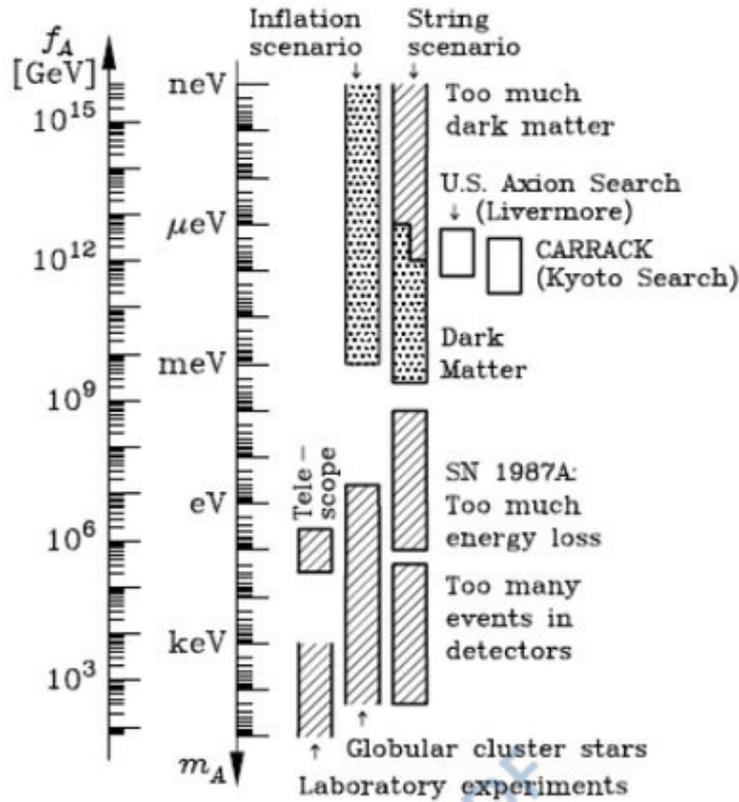


Рис. 7: Лабораторные, астрофизические и космологические ограничения на массу аксиона. [22]

темной материи. Этот класс частиц имеет ряд преимуществ, которые и поставили его впереди "гонки" кандидатов, давайте же перечислим основные из них:

- Вимпы обладают малым сечением аннигиляции, которое и позволяет получить достаточную реликтовую плотность и распространённость¹ во Вселенной, чтобы претендовать на роль ТМ
- Появление вимпов в теоретической физике обуславливается проблемами, связанным с нарушением электрослабой симметрии.
- Требование достаточной плотности означает, что вимпы должны достаточно сильно взаимодействовать с материей для прямого детектирования.

Также стоит отметить, что вимпы участвуют не только в гравитационном, но и в слабом взаимодействии (что можно было заметить из выше перечисленных свойств). Современная оценка плотности вимпов [12]:

$$\Omega_{WIMP} h^2 = \frac{3 \times 10^{-27} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}}{\langle \sigma_{ann} v \rangle}$$

¹Согласно уравнениям Больцмана, распространённость частица обратно пропорциональна сечению аннигиляции, из чего следует, что чем более частицы слабозаимодействующая, тем более она распространена на данный момент.

Верхняя граница сечения аннигиляции дается условием унитарности (т.е. условием, что вероятность реакции не может быть больше 1), которое для точечных частиц имеет вид $\sigma_{ann} v < 8\pi/m^2$. Из данного условия, учитывая также унитарность для $\Omega_{WIMP} h^2 \approx 1$ мы получаем ограничение на массу вимпов: $m_{WIMP} > 340$ ТэВ. В дальнейшем, экспериментальным путем с помощью WMAP, были получены более строгие ограничения:

$$m_{WIMP} \leq 120 \text{ ТэВ.}$$

Отметим также, что к вимпам можно прийти и из расширений СМ, таких как SUSY (Суперсимметрия).

4.6 Суперсимметричные частицы

Суперсимметрия или на англ. SUSY (Supersymmetry) — одно из расширений СМ, которое добавляет новые частицы и взаимодействия. SUSY постулирует наличие связи между фермионами и бозонами и введение для каждой обычной частицы ее частицу- суперпартнера, масса которой превышает массу ее обычного партнера, а спин отличается на 1/2.

Минимальным суперсимметричным расширением СМ является MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model). MSSM добавляет для всех калибровочных полей фермионных суперпартнеров. Так, к примеру, для бозонов Z^0 и W^\pm фермионными суперпартнерами являются бино (\tilde{B}) и вино (\tilde{W}^i) соответственно. Общее название для всех этих партнеров — *гауино*. Для фермионов же, партнерами будут скалярные частицы.

MSSM и СМ различаются по R -четности:

$$R = (-1)^{3B+L+2s}$$

где B — барионное число, L — лептонное число, s — спин частицы.

Так для обычных частиц $R = +1$, для суперпартнеров $R = -1$. Следовательно, для стабильных SUSY-частиц, сохраняющих R -четность возможна лишь парная аннигиляция. Легчайшая из данных частиц наиболее привлекательна для кандидата в ТМ. Также, она не должна обладать электрическим и цветным зарядом. Такая частица называется *нейтралино*. Она получается из линейной комбинации суперпартнеров для бозонов Хиггса H^0 , H^0 и Z^0 :

$$\chi = C_1 \tilde{B} + C_2 \tilde{W}_3 + C_3 \tilde{H}_1^0 + C_4 \tilde{H}_2^0.$$

где C_i — некоторые константы.

Существуют теоретические предсказания массы и реликтовой плотности нейтралино (Рис.8). Кроме нейтралино другими возможными кандидатами на роль частиц темной материи являются снейтрино и гравитино. Однако, экспериментальные данные полученные в [21] исключают снейтрино из кандидатов в ТМ. Что же касается гравитино, то ввиду наличие лишь гравитирующего взаимодействия, он является не слишком приятным кандидатом для экспериментов по поиску частиц ТМ.

Мы рассмотрели вкратце основных небарионных кандидатов на роль частиц нашей таинственной массы. Явными лидерами пока что являются вимпы, но не стоит забывать и других, менее популярных, но вполне вероятных кандидатов (Рис.9).



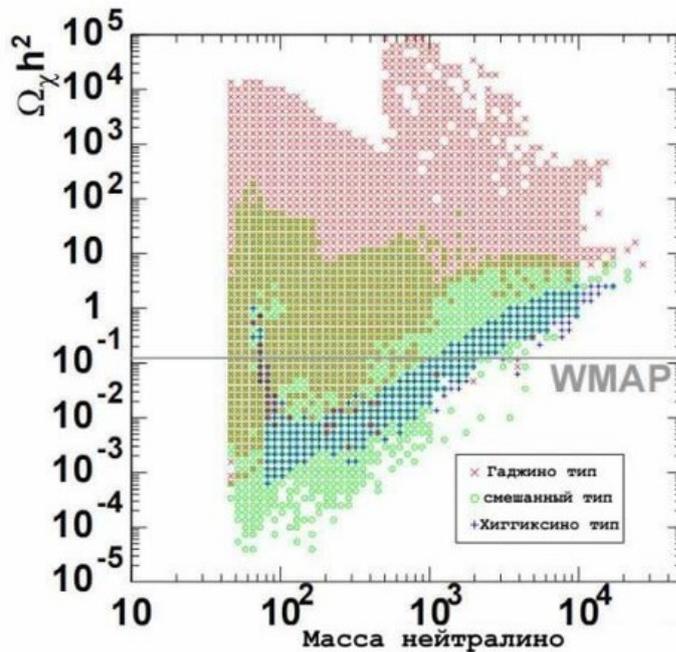


Рис. 8: Реликтовая плотность нейтралино, как функция от ее массы. Различные цвета точек показывают тип смешивания нейтралино. Горизонтальная серая линия - значение плотности холодной темной материи из измерений WMAP. Рисунок из [12].

4.7 Бариионные кандидаты

До сих пор мы рассматривали лишь небарионных кандидатов на роль ТМ. Однако, существуют и теории, которые предлагают экзотических претендентов из барионной материи. Давайте вкратце познакомимся с некоторыми из них.

Массивные компактные объекты гало галактики

Есть предположения о существовании некоторого класса космических объектов, которые ввиду своей малой светимости и малых размеров не могут быть обнаружены визуально. Эти гипотетические объекты получили название МАСНОs (Massive Astrophysical Compact Halo Objects).

После экспериментов на эффекте гравитационного микролинзирования, в которых проводился мониторинг более чем 55 млн. звезд в Большом и Малом Магеллановых Облаках, были получены приблизительные оценки вклада МАСНОs в ТМ. По результатам, общая масса МАСНОs в гало галактик составляет лишь 15% от массы гало [27].

Магнитные монополи

Идею о существовании монополей выдвинул Дирак в 1931 для объяснения квантования электрического заряда. Дирак выдвинул гипотезу о существовании частиц с магнитным зарядом g , который связан с электрическим следующим образом:

$$ge = \frac{nkc}{2\pi}, \quad n = 1, 2, \dots$$



Кандидат	Масса	Источник	Проявление
$G(R)$	—	Ньютонова гравитация	ТМ на больших расстояниях
Космологическая постоянная Λ	—	ОТО	$\Omega = 1$ без ТМ
Аксион, майорон, голдстоуновский бозон	10^{-5} эВ	КХД; нарушение PQ-симметрии	Холодная ТМ
Обычные нейтрино	10–100 эВ	GUT-теории	Горячая ТМ
Легкие хиггсино, фотино, гравитино, аксино, снейтрино	10–100 эВ	SUSY/SUGRA	Горячая ТМ
Парафотон	20–400 эВ	Модифицир. КЭД	Горячая/Теплая ТМ
Правые нейтрино	500 эВ	Сверхслабое взаимодействие	Теплая ТМ
Гравитино и т.д.	500 эВ	SUSY/SUGRA	Теплая ТМ
Фотино, аксино, зеркальные частицы гравитино, нейтрино Симпсона	~ 1 кэВ	SUSY/SUGRA	Теплая/ Холодная ТМ
Фотино, снейтрино, хиггсино, глюино, тяжелые нейтрино	~ 1 МэВ	SUSY/SUGRA	Холодная ТМ
Теневая материя (барионоподобная)	~ 1 МэВ	SUSY/SUGRA	Горячая/ Холодная ТМ
Преон	20–200 ТэВ	Составные модели	Холодная ТМ
Монополь	10^{16} ГэВ	GUT-теории	Холодная ТМ
Пиргон, максимон, полюс Перри, ньюторит, шварцшильд	10^{19} ГэВ	Теории высших размерностей	Холодная ТМ
Суперструны	10^{19} ГэВ	SUSY/SUGRA	Холодная ТМ
Кварковые нуггеты, нуклериты	10^{15} г	КХД, GUT-теории	Холодная ТМ
Первоначальные черные дыры	10^{15-30} г	ОТО	Холодная ТМ
Космические струны, доменные стенки	$10^{8-10} M_{\odot}$	GUT-теории	Образование галактик большого вклада в Ω

Рис. 9: Возможные небарионные виды темной материи, предсказываемые различными теориями [5]. К сожалению, в настоящее время эти теории не в состоянии однозначно предсказать ожидаемые массы таких частиц. Сокращения: ТМ — темная материя; PQ — Печчеи и Квинн; SUGRA — супергравитация; ОТО — общая теория относительности.

Оценка массы монополя, в предположении что его радиус равен радиусу электрона, давала значение в 2.4 ГэВ (для $n = 1$). Однако поиски на ускорителях в рамках данной гипотезы ни к чему не привели.

Тесная связь монополей и элементарных частиц объясняется теорией великого объединения — GUT (Grand Unified Theory). Согласно GUT масса монополей должна быть порядка 10^{17} ГэВ. Что показывает тщетность попыток найти монополи в экспериментах на ускорителях.

Зеркальные частицы

Идея зеркальных частиц появилась больше полвека назад. Сейчас эти частицы также являются претендентами на роль скрытой массы.

Сама идея “зеркального мира” возникла в результате нарушения CP-симметрии в слабом взаимодействии. Теория заключается в постулировании существования зеркальных партнеров. Масса зеркальных частиц, их заряд и характер гравитационного взаимодействия такие же как и у обычных частиц, отличие лишь в том, что у зеркальных партнеров слабое взаимодействие является правым, а не левым.

Чампы

Массивные заряженные частицы — CHAMPs (CHARGE Massive Particles) были предложены в работе [28]. Согласно теории данных частиц, чампы могли бы существовать в виде сверхтяжелого водорода ($Z = +1$). Тогда как их античастицы ($Z = -1$) могли бы образовывать связанные состояния с ядрами или протонами в качестве сверхтяжелого изотопа или нейтрона (нейтрочампа).

В многочисленных экспериментах были проведены оценки масс для различных чампов. Результаты работ основывались на динамических моделях галактик, на экспериментах с космическими лучами, подземных экспериментах и т.д. Эксперименты позволили исключить чампы с массами 10^2 - 10^{16} ГэВ, что делает чампы маловероятным кандидатом на роль частиц ТМ.

5 Обзор экспериментов

Мы уже поговорили о том, как именно нынешняя физика пришла к вопросу о темной материи и от том, какие частицы могут претендовать на роль этой загадочной массы. Теперь же мы обсудим каким образом ученые пытаются обнаружить, те или иные частицы.

На данный момент проводятся десятки экспериментов по поиску частицы в различных странах. Эксперименты проводятся на земле в различных уголках нашей планеты, глубоко под землей в заброшенных шахтах и даже в космосе (рис.10). Все они отличаются друг от друга методом поиска, зависит это от того, какие именно частицы они хотят обнаружить, будь то аксион, стерильные нейтрино или вимпы. Но, к сожалению, ни один из этих экспериментов, на момент написания данной работы, не принес достоверных результатов.

Все эксперименты, по методу детектирования, можно разделить на две большие

группы: косвенные и прямые (рис.11). Прямой метод заключается в том, чтобы регистрировать взаимодействия частиц ТМ в лабораторных условиях. Косвенный же



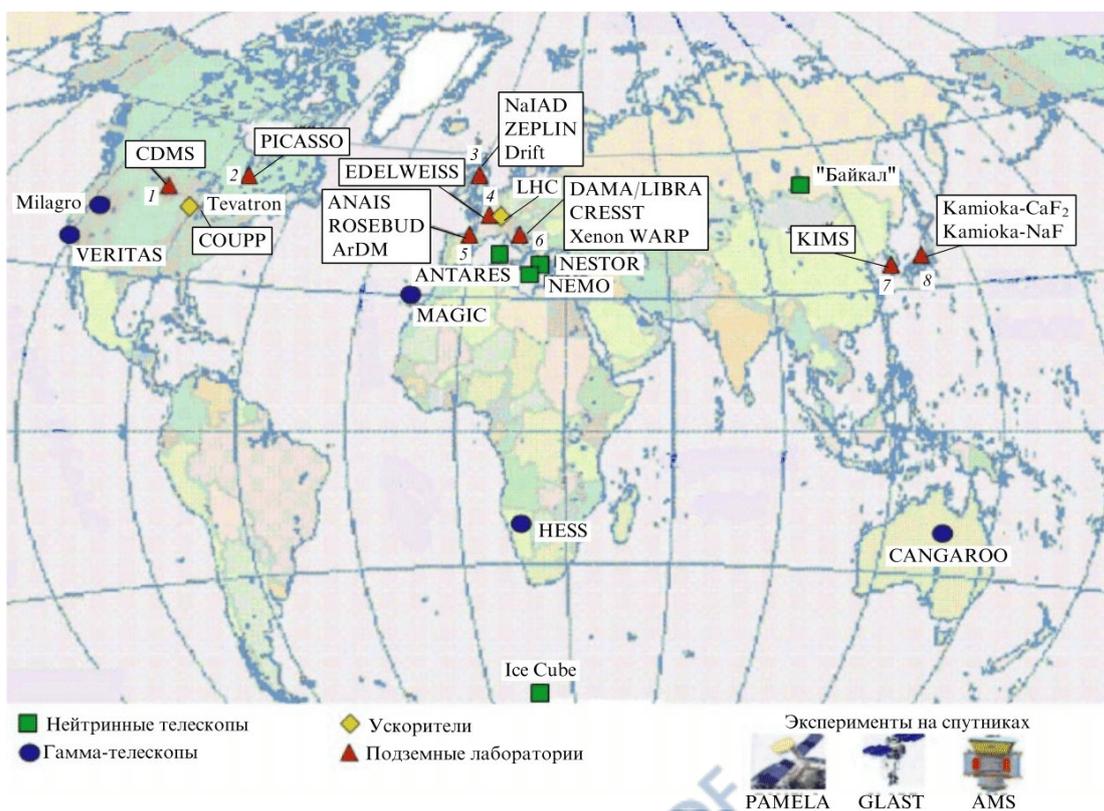


Рис. 10: Географическое месторасположение установок по поиску частиц ТМ. [10]

опирается на попытки регистрации вторичных продуктов данного взаимодействия (на земле или в космосе). Давайте рассмотрим некоторые из экспериментов и попробуем разобраться в их методиках поиска ТМ.

5.1 EDELWEISS.

EDELWEISS (Expérience pour DETecter Les Wimps En Site Souterrain) — франко-немецко-русский эксперимент целью которого является прямая регистрация слабо взаимодействующих массивных частиц (вимпов)². Вимпы очень слабо взаимодействуют с обычной материей (за один год можно получить лишь около десяти случаев рассеяния), поэтому данный эксперимент нужно проводить с очень малым фоновым излучением. Для этого нужно выбрать определённое место эксперимента и соответствующее оборудование.

В эксперименте EDELWEISS предусмотрена активная и пассивная защита для изоляции от естественного фона, также детекторы были расположены глубоко под землей, в подземной лаборатории LSM, на юге Франции, чтобы избежать космогенной составляющей фона. Регистрация вимпов в детекторе осуществляется с помощью криогенных германиевых болометров. Это позволяет одновременно регистрировать два сигнала — тепловой и ионизационный. Сравнение этих двух сигналов позволяет выделить искомые акты взаимодействия на ядре из общего фонового рассеивания

²Стоит заметить, что помимо вимпов, в данном эксперименте осуществлялся и поиск аксионов [23].

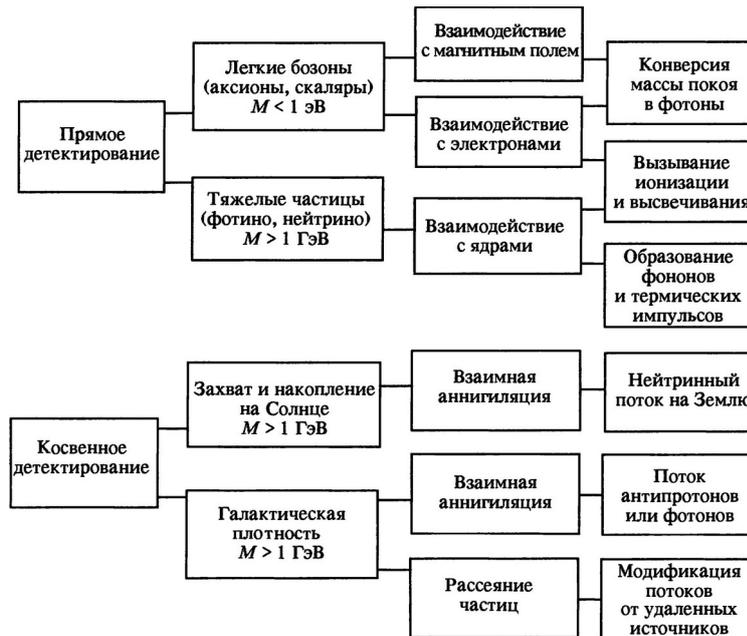


Рис. 11: Основные методы детектирования темной материи . [5]

на электронах. Таким способом удалось снизить влияние фонового излучения на четыре порядка.

Принцип реализации эксперимента заключается в детектировании ядер отдачи, которые образуются в результате рассеяния вимпов на ядрах атомов обычного вещества (рис.12). На данный момент плотность темной материи в земных пределах составляет около 0.3 ГэВ/см^3 [26]. Наличие ТМ в области нашей планеты дает надежду на то, что все-таки удастся зарегистрировать вимпы.

Весь эксперимент можно разделить на три основных этапа, в зависимости от чувствительности к вимпам. В EDELWEISS-I (2004) использовались германиевые детекторы, в количестве трех штук и общей массой около одного килограмма. Это позволило определить более точно основные источники фонового излучения и найти способ их нейтрализации. В EDELWEISS-II (2009) уже использовалась 28 детекторов с массой по 320 грамм, что позволило значительно увеличить эффективность работы. EDELWEISS-III — последний реализованный на данный момент этап эксперимента, который имеет уже около 40 детекторов по 800 грамм каждый.

EDELWEISS-I

На данном этапе, как уже отмечалось выше, использовалось всего три германиевых детектора, каждый весом 320 грамм, которые были охлаждены в криостате растворения до 20 мК. Чтобы достичь таких низких температур использовалась смесь из двух изотопов гелия — ^3He и ^4He , с процентным содержанием в 10% и 90% соответственно. Криостат растворения был выбран потому что с помощью него можно было поддерживать образцы больших размеров при постоянной

температуре на протязенні довгого періоду часу (тиждні і місяці).



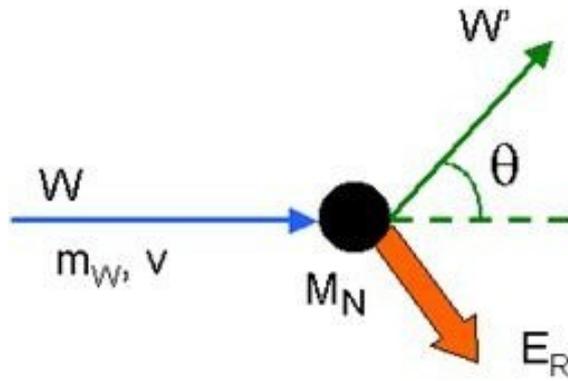


Рис. 12: Принцип детектирования вимпов. Где m_W , V — масса и скорость вимпа, M_N — масса ядра, E_R — энергия отдачи, которая впоследствии и детектируется. [24]

В ходе проведения эксперимента было подтверждено то, что детектор способен одновременно измерять тепловой и ионизационный сигнал от поглощаемых частиц. Ввиду того, что ионизационный выход у электронов выше, чем у ядер отдачи, это позволяет отобрать более чем 99.9% фоновых событий от электронов и гамма-квантов при энергиях свыше 15 кэВ [12]. Для еще большей изоляции от фонового излучения, установку покрыли свинцовым щитом, толщиной 15 см, и медью толщиной 10 см. Для защиты от нейтронного фона в эксперименте была предусмотрена защита из поли-этилена толщиной 30 см. Внутри криостата, чтобы снизить радиоактивный фон, электроника была размещена под 7-ми сантиметровым барьером из сверхчистого свинца (археологического), сам же криостат был сделан, по большей части, из сверхчистой меди.

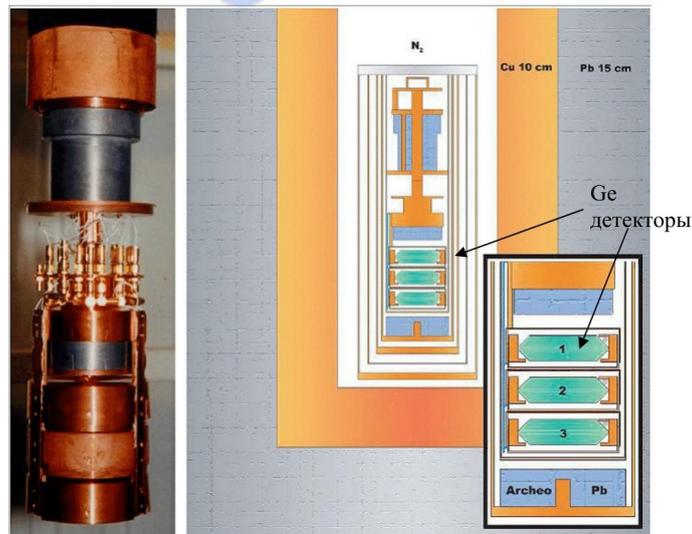


Рис. 13: Фотографии детекторов (слева) и схема экспериментальной установки EDELWEISS-I (справа).

В течение 4-х месяцев удавалось поддерживать стабильные условия детектора. За это время удалось собрать статистику в 62 кг сут. Анализ этих результатов позволил получить самое точное на то время ограничение на сечение вимп-нуклон, хотя почти в тот же год, эксперимент CDMS-II получил в три раза более точные ограничения, благодаря возможности отделения событий электронной отдачи на основе определения времени прихода фонового сигнала [10].

EDELWEISS-II

После окончания экспериментов EDELWEISS-I в начале 2004 года, полученные данные ясно дали понять перспективность подхода с использованием криогенных детекторов на германии. Проблема была лишь в том, что для получения более точных данных нужно было увеличить кол-во детекторов, как следствие, разработать новый криостат растворения. В марте того же года начались работы по подготовке к следующему этапу EDELWEISS-II. Новый криостат, разработанный специально для новой установки, мог охлаждать более 120 детекторов до температуры менее 2 мК, с улучшенной стабильностью температурного режима до 0.01 мК. Также была значительно повышена защита от фонового излучения нейтронов и космических лучей, с помощью мюонного вето. Во время транспортировки и установки деталей были предприняты соответствующие меры по защите от излучения, в частности от радона.

На данном этапе уже использовались несколько видов криогенных германиевых болометров, однако основным является детектор типа NTD (Nuclear Track Detector) (рис.14,15), использовавшийся еще и на первом этапе эксперимента EDELWEISS.

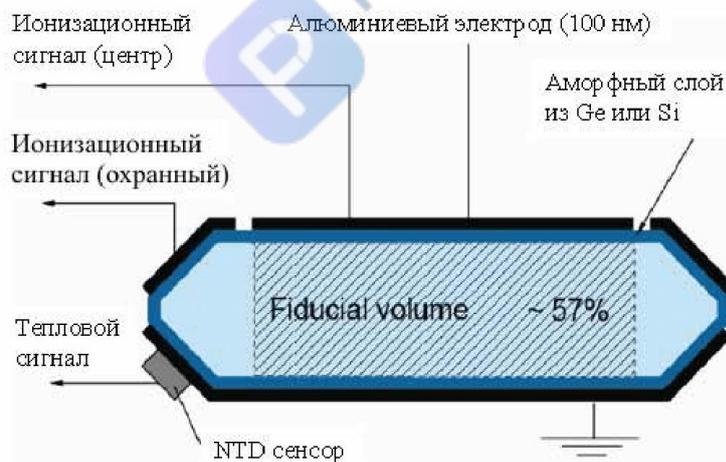


Рис. 14: Принципиальная схема NTD германиевого болометра, используемого в эксперименте EDELWEISS. [12]

Болометр изготовлен из сверхчистого германия, имеет вид цилиндра диаметром около 7 см, толщиной около 2 см и массой 300-400 грамм. В детекторе предусмотрены меры противодействия радиоактивному фону, возникающему из-за загрязненных оправок детектора, в виде охранного электрода на боковой поверхности болометра. Ввиду данных мер по фоновой изоляции, эффективный

объем детектора составляет около 60% от объема кристалла. Алюминиевые электроды толщиной в 60-100 нм,



расположенные сверху и снизу детектора, передают ионизационный сигнал. Между кристаллом детектора и электродом располагается слой из кремния и германия приблизительно в 60 нм, который позволяет избежать эффекта деградации³ детектора и снизить число фоновых поверхностных событий. Из-за работы со сверхнизкими температурами, напряжение на электродах не превышает 10 В. При таком напряжении, длительность сигнала составляет несколько микросекунд.

Температурный сигнал ΔT позволяет определить энергию, которую частица оставила в детекторе:

$$\Delta E = C(T)\Delta T$$

где $C(T) \propto T^3$ — теплоемкость детектора при низких температурах.

Так, при экспериментальных температурах в 20 мК, частица с энергией 10 кэВ вызывает нагрев на величину ~ 1 мК. Для того чтобы измерить это изменение температуры, используют термистор в виде германиевой пластины объемом 7 мм³, которая приклеена к детектору, и через температурную связь сопротивления находят ΔT :

$$R(T) = R_0 e^{\sqrt{\frac{T_0}{T}}}$$

где R_0 — параметр термистора (обычно несколько Ом), и T_0 — характеристическая температура (порядка нескольких Кельвин).

Для NTD, при рабочей температуре детектора в 20 мК, сопротивление термистора составляет несколько миллионов Ом. Длительность теплового сигнала значительно превышает ионизационный и составляет десятые доли секунды.

Мы уже говорили выше о том, что регистрация частиц происходит по двум каналам одновременно. По разнице ионизационного выхода можно различить рассеяние на электроне и ядре, что позволяет отделить электронные случаи из общей массы данных. Но данный способ "отчистки" имеет свою опасность. Из-за того, что на поверхностном слое детектора заряд от проходящей частицы может собираться не полностью, мы можем получить ложный сигнал. Такие ложные события исключаются с помощью позиционно-чувствительных детекторов двух типов:

- 1. Первый детектор использует двойной слой NbSi. Дискриминировать поверхностные сигналы позволяет сравнительная оценка форм температурного сигнала с разных сторон детектора.
- 2. Вторым типом это ID детектор — Ge/NTD/INTERDIGIT. При его использовании заряд от поверхностных и объемных событий собирается на противоположных электродах.

Чтобы иметь достоверные данные нужно получить и проанализировать три независимых сигнала от каждого из детекторов. Для этой цели были специально разработаны система методов усиления и оцифровки сигнала. Конфигурация электроники была выбрана с учетом требования к фоновым условиям эксперимента. Энергетические пороги, с которыми ведется набор данных в ионизационном и тепловом канале, составляют 1.5-3 кэВ. Поиск вимп осуществляется с порога 10-30 кэВ. Конкретный порог определяется из калибровок с

γ -источником и соответствует подавлению 99.9% электронных событий.

³Данный эффект связан с накоплением объемного заряда в детекторе с течением времени, что влечет за собой ухудшение разрешимости и эффективности сбора заряда детектором.



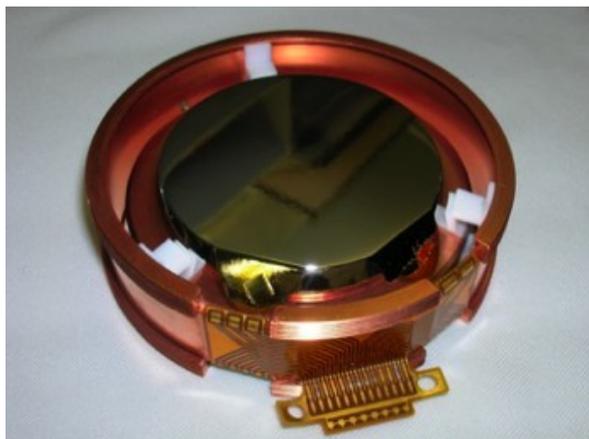


Рис. 15: Внешний вид NTD германиевого детектора, используемого в эксперименте EDELWEISS. По бокам можно заметить электроды и сверхчувствительный прямоугольной термометр, наклеенный на кристалл. [24]

В результате трехлетней работы EDELWEISS-II (2006-2009) была получена статистика в 240 кг сут. Во время работы, в области поиска вимпов (10-30 кэВ) было зарегистрировано три события. Энергетический спектр и расчетная форма спектра от вимп для сечения рассеяния $\sigma = 10^{-5}$ пб представлены на рис.16. Для получения верхнего ограничения на сечение рассеяния вимп-нуклон при неизвестном уровне фона использовался метод оптимальных интервалов.

Однако количество фонового излучения в NTD детекторах слишком велико, чтобы достичь необходимого уровня чувствительности для регистрации вимпов. По предсказаниям некоторых SUSY моделей это сечение колеблется в области от 10^{-8} до 10^{-9} пб (пикобар).

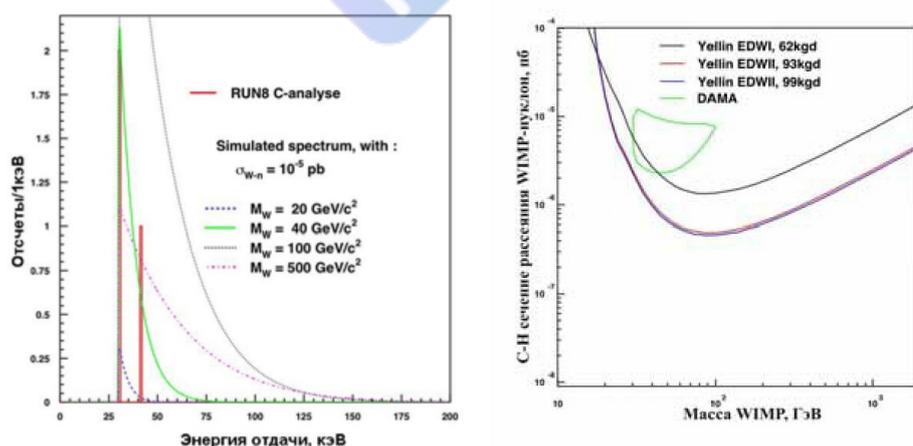


Рис. 16: Первые результаты измерений с NTD детекторами в EDELWEISS-II. Слева - фитирование кандидатов на роль WIMP. Справа - полученное ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон. Синяя и красная линия соответствует анализу данных эксперимента EDELWEISS-II с различными параметрами отбора, черной линией показано ограничение из EDELWEISS-I, сиреневой линией показаны результаты эксперимента CDMS, положительный результат эксперимента DAMA обозначен замкнутой зеленой линией. [12]

EDELWEISS-III

На момент написания данной работы, сбор данных EDELWEISS-III еще не закончился, эксперимент начался весной 2014 г. и продолжится по предварительным данным до 2017 года. Он проходит под руководством EURECA (European Research Coordination Agency). Как уже отмечалось выше, на данном этапе количество детекторов возросло до 40, с массой по 800 грамм.



Рис. 17: Финальная установка EDELWEISS-III. [24]

5.2 DAMA/LIBRA

DAMA (DARk MATter) — это обсерватория для редких процессов (таких как WIMP прямого обнаружения, процессы $\beta\beta$ распада, процессы нарушения запрета Паули, нуклонная нестабильность, поиск солнечных аксионов и другая экзотика) на основе развития и использования различных сцинтилляторов. DAMA включает в себя около полутра десятков низкофоновых установок, расположенных в 100 км от Рима глубоко в толще горы Гран-Сассо (Gran Sasso), в одноименной лаборатории, принадлежащей итальянскому национальному институту ядерной физики (INFN). Этот проект также являлся пионером в исследовании частиц темной материи в галактическом гало.

Перечислим основные установки DAMA [30]:

- DAMA / NaI (~100 кг NaI (Tl)), который собирал данные под землей в течение семи годовых циклов и был выведен из эксплуатации в июле 2002 года.
- DAMA / LXE (~6.5 кг жидкого ксенона, обогащенного либо ^{129}Xe или ^{136}Xe).
- DAMA / R&D, которая посвящена испытаниям прототипов и относительно ма-

ломасштабных экспериментов.



DAMA / Ge, используется в LNGS(Laboratori Nazionali del Gran Sasso) с объектом из германия для выборочных измерений и маломасштабных экспериментов.

DAMA / CRYSTAL, небольшая установка использующаяся для проверки прототипов и претендовать на детекторы.

DAMA / LIBRA (~250 кг сверхчистого NaI(Tl)) — второе поколение установок DAMA. Введена в эксплуатацию в марте 2003. Собирала данные на протяжении 7 лет до 2010 г, в рамках первой фазы (DAMA / LIBRA-phase1). Результаты были представлены в 2008, 2010 и окончательные в августе 2013. Осенью 2010 была проведена модернизация установки и эксперимент вошел во вторую фазу (DAMA / LIBRA-phase2), который проводят до сих пор.

Далее мы более подробно рассмотрим установку последнего поколения экспериментов данной обсерватории — DAMA / LIBRA.

Идея эксперимента

Целью эксперимента DAMA / LIBRA (Large sodium Iodide Bulk for Rare processes) является поиск частиц ТМ, а именно, самого вероятного кандидата — вимпа.

Согласно гипотезам, если вимпы и существуют, то они должны быть практически повсюду в нашей галактике, формируя "вимповое облако". Таким образом, наша солнечная система, вращаясь вокруг центра галактики со скоростью порядка 200 км/сек, должна ощущать встречный "вимповый ветер". Но нельзя забывать также, что и наша планета вращается вокруг Солнца со скоростью 30 км/сек, поэтому этот вимповый ветер будет то сильнее, то слабее, в зависимости от годового цикла (Рис.18).

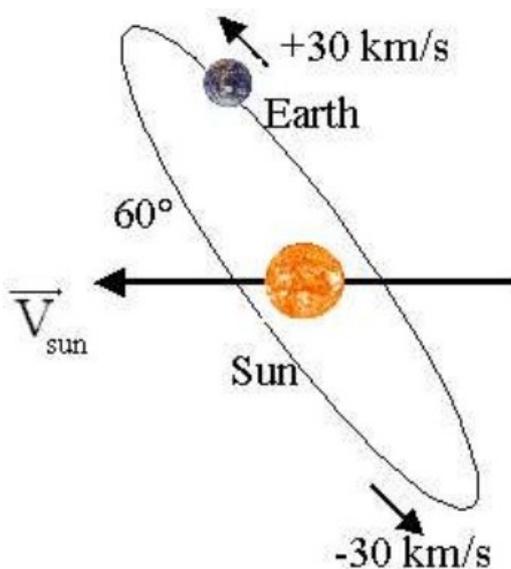


Рис. 18: Схематическое представление вращения Земли вокруг Солнца . [31]



Сами вимпы, как уже отмечалось выше, очень редко взаимодействуют с барионным веществом. Однако, изредка столкновения между атомами барионной материи и вимпами все же происходит. Результатом такого взаимодействия может быть либо передача импульса, либо выбивание электрона, что в свою очередь вызовет испускание фотонов, которые нетрудно зарегистрировать.

Именно за такими редкими годичными вспышками и охотятся участники эксперимента DAMA / LIBRA. Стоит отметить что в предшествующем эксперименте DAMA / NaI были уже обнаружены колебания частоты вспышек, что было интерпретировано участниками эксперимента как вимпы, однако научное сообщество довольно скептически отнеслось к этим данным, ввиду больших погрешностей.

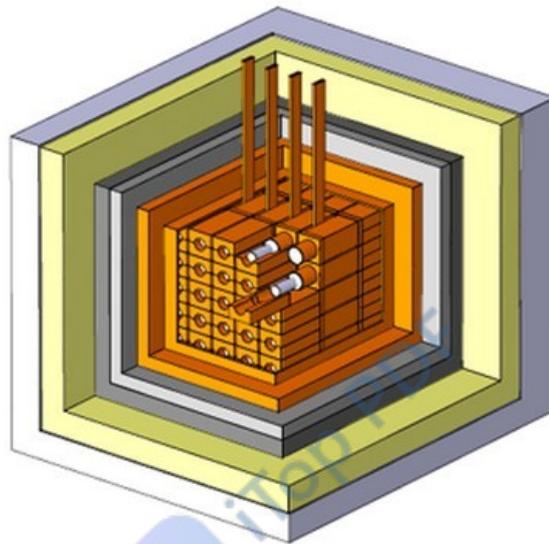


Рис. 19: Схематический вид пассивного щита аппарата DAMA / LIBRA . За пределами рисунка аппарат окружен еще слоем камня в 1 м. [31]

Экспериментальная установка

В качестве материала мишени был выбран монокристаллический йодистый натрий, активированный таллием (сцинтиллятор NaI(Tl)), который имеет ряд достоинств, среди которых [32]: 1) хорошо известная технология изготовления; 2) широкий массовый диапазон регистрации; 3) устойчивость к высоким нагрузкам; 4) процедура калибровки осуществима вплоть до кэВ в рабочих условиях; 5) удобный способ эксплуатации и мониторинга; 6) отсутствие микрофонных шумов; 7) высокий световыход — на образование одного фотона в нем затрачивается около 25 эВ [36]; 8) нет необходимости повторной очистки или охлаждения / нагревания перед процедурой (что предполагает высокую воспроизводимость, высокую стабильность, и т.д.); 9) относительно небольшие размеры детектора; 10) возможна дискриминация сигнала по форме импульса;

11) экологически чистый; 12) возможность эффективного исследования годовых модуляций во всех интересующих аспектах; 13) высокая чувствительность к кандидатам вимп со спин-независимым (SI), спин-зависимым (SD) и смешанным (SI&SD); 14) сцинтилляционные кристаллы NaI(Tl) выращиваются с типичным уровнем содер-

жания калия менее 0,00005%, что позволяет использовать их в низкофоновых применениях [36].

Данный вид детекторов использовался в первом проекте DAMA и используется до сих пор не только в экспериментах по поиску вимпов, но и таких как: 1) поиск спонтанного перехода ядер в сверхплотное состояние; 2) сценарии нарушения принципа Паули в ^{123}I и ^{23}Na ; 3) поиск солнечных аксионов; 3) поиск возможных видимых каналов распада нуклона, ди-нуклона и три-нуклона; 4) поиск экзотического вещества;

5) спонтанное излучение тяжелых кластеров и т.д.

DAMA / LIBRA использует около 250 кг сверхрадиочистых детекторов NaI(Tl), в количестве 25 штук по 9.7 кг каждый (объемом 10,2 10,2 25,4 см³), расположенных в кубе 5 на 5 [32]. Вместе с детекторами в кубе размещены ФЭУ со световодами (рис. 20), длиной около 10 см [32], для регистрации вспышек. ФЭУ изготовлены из ультра низкофоновом стекла. Материалы, использовавшиеся при создании ФЭУ были выбраны на основе различного вида измерений и, в частности, измерения на образцах были также проведены с низкофоновым детектором DAMA / Ge, расположенным глубоко под землей.



Рис. 20: Внешний вид низкофоновом ФЭУ используемый в DAMA / LIBRA. [32]



Рис. 21: Установка детекторов внутри куба. [32]

В DAMA / LIBRA позаботились о высоком уровне защиты от космических лучей и естественного фона, источниками которых являются радиоактивные изотопы. Для защиты детекторов, каждый ФЭУ заключен в герметичный медный кирпич, который поддерживается при небольшом избыточном давлении. Все медные блоки были сделаны с целью максимального уменьшения радиоактивности от загрязнителей, в частности, от таких как ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K .

Сам куб, в котором расположены детекторы также помещен в медный блок. На внешней стороне медного блока, располагается пассивный щит состоящий из бескислородной (OFCH) и низкорadioактивной меди толщиной в 10 см, далее следует слой из 15 см низкого радиоактивного свинца, 1,5 мм кадмия и слой в 10-40 см из полиэтилена / парафина (толщиной оставшегося свободного места). Вся конструкция окружена слоем камня толщиной в 1 м.(Рис.19)

Результаты эксперимента.

Мы кратко ознакомимся с результатами эксперимента DAMA / LIBRA-phase1 и не будем вдаваться в глубокий анализ. Для интересующихся, с подробным анализом мож- но ознакомиться в [34, 33].

На рис.22 представлена суммарная статистика экспериментов DAMA / NaI и DAMA / LIBRA в энергетическом интервале 2-6 кэВ для одиночных ударов⁴. На график на- ложена синусоидальная кривая, со следующими параметрами:

$$f(t) = A \cos \omega(t - t_0), \quad t_0 = 152.5 \text{ сут.}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = 1 \text{ г.};$$

где A — амплитуда модуляции, полученная по лучшему расчету за 13 годовых циклов. Гипотеза об отсутствии модуляции данных могут быть отброшены [37, 38]. После со- ответствующей модуляции и для периода, а также с учетом тех интервалов, в которых ожидается появление частиц ТМ, мы получим следующее [35]:

$$A = (0.0116 \pm 0.0013) \text{ чос/кг/кэВ},$$

$$T = (0.999 \pm 0.002) \text{ г.}, \quad t_0 = (146 \pm 7) \text{ сут.}$$

где чос — число отсчетов за сутки.

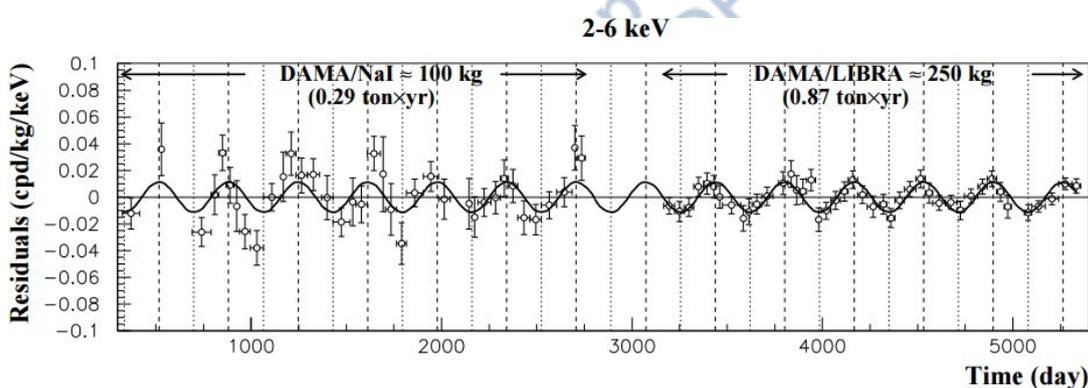


Рис. 22: Суммарные экспериментальные сцинтилляционные события, измеряемые DAMA / NaI в течение семи и DAMA / LIBRA в течение шести ежегодных циклов в интервале 2-6 кэВ. [35]

Можно заметить, что по сравнению с DAMA / NaI в эксперименте DAMA / LIBRA сильно повысилась точность, что способствует получению более достоверных данных. Для того, чтобы исключить наличие годовых модуляций в другой энергетической области и убедиться в отсутствии значительных изменений в фоне, были проведены соответствующие измерения для энергетических зон не входящие в область поиска частиц ТМ. Это позволило исключить фоновые модуляции в широком энергетическом диапазоне, на многом меньшем, чем исследуемая область, в которой были зарегистрированы искомые отклонения от фона.

⁴В эксперименте различались два типа сигналов — одиночные (*single-hit*), которые регистрировались только одним из 25 детекторов, и множественные (*multiple-hit*), которые регистрировались одновременно несколькими детекторами. Далее, для краткости мы будем называть их ОУ и МУ соответственно.



Проведение анализа и расчета данных был необходим только для случаев ОУ. Действительно, поскольку вероятность того, что частиц ТМ взаимодействует в нескольких детекторах одновременно, крайне мала, то всеми случаями МУ можно пренебречь и анализировать лишь статистику ОУ.

Суммарная экспозиция, включая данные более раннего эксперимента DAMA / NaI (0.29 т год), равна сейчас 1.17 т год, что соответствует 13 годовым циклам. Данная экспозиция на порядки превышает аналогичные экспозиции и является самой большой для всех экспериментов по поиску частиц ТМ. Данные продолжают подтверждать модельно независимое свидетельство существования частиц ТМ в галактическом гало, которые получены на основе годовых модуляций ТМ (8.9σ доверительная вероятность для суммарной экспозиции).

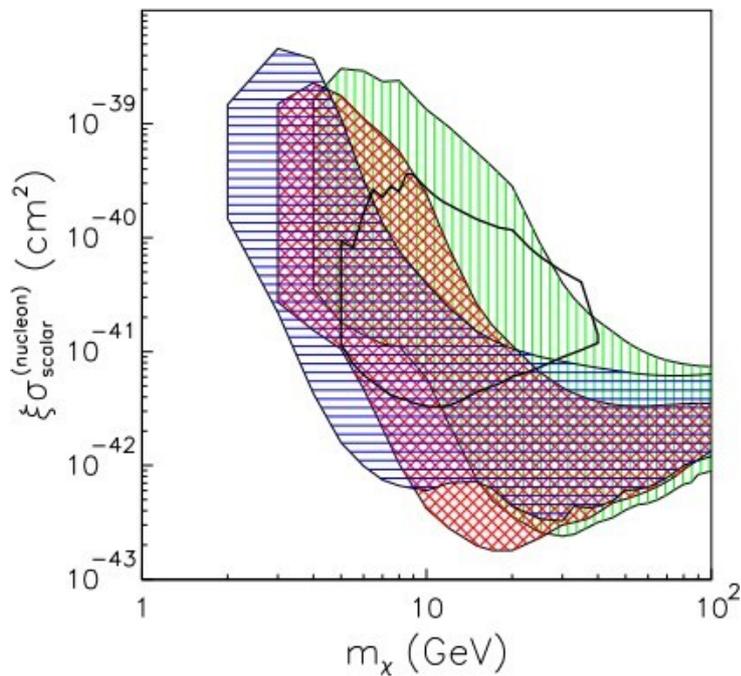


Рис. 23: Область допустимых значений нуклонного сечения в зависимости от массы вимпа по результатам эксперимента DAMA / LIBRA для трех разных случаев в зависимости от факторов закалки Na и I: 1) не учитывая направление эффекта [(зеленый) вертикально-заштрихованная область]; 2) включая направление эффекта [(синий) горизонтально-заштрихованная область], и 3) без направления, с учетом энергетической зависимости фактора закалки Na и I. [35]

Перспективы и DAMA / LIBRA-phase2

После модернизации установки в 2008 г., в ходе которой были улучшены ФЭУ, приобретены новые дискретизаторы, модернизирована система DAQ (Data Acquisition systems) и др., был проведен последний цикл (седьмой) DAMA / LIBRA-phase1, закончившийся в 2010 г.

После еще более значимой модернизации, проведенной в 2010 году, все ФЭУ были заменены на новые с более высокой квантовой эффективностью (QE). Что помогло увеличить чувствительность приборов и достичь высокой точности в области ниже 2 кэВ. Так же некоторые обновления были проведены и в 2012 году.

Участники проекта DAMA / LIBRA постоянно работают с целью: 1) увеличить энергия программного порога эксперимента; 2) улучшить точность исследований ча- стиц ТМ и смежных проблем астрофизики, ядерной физики и физики частиц; 3) ис- следовать другие, более экзотические проблемы. Это требует длительного и тяжелого полного рабочего дня, самоотверженную работу, надежный сбор и анализ очень круп- ных объемов данных, что участники проекта DAMA и делали все это время и будут продолжать, чтобы как можно ближе приблизиться к тайне ТМ.

6 Заключение

В нашей работе мы рассмотрели почему люди начали задаваться вопрос наличием скрытой массы, как именно получилось убедиться в том, что эта масса, называемая темной материей, все-таки присутствует в нашей Вселенной. Так же мы ознакомились с кандидатами на роль этой неизученной материи, которая составляет более четвер- ти всей материи во Вселенной. Рассмотрели некоторые способы регистрации данных кандидатов, на примере двух экспериментов, которые имели весомый вклад в иссле- довании ТМ.

Проведение таких экспериментов, как DAMA и EDELWEISS открывают перспек- тивы в обнаружении частиц темной материи. Активные исследования по изучению ТМ, неговоря уже о ТЭ, помогут нам более ясно понимать что именно из себя пред- ставляет наша Вселенная, как происходило рождение нашей Вселенной и что ее ждет в будущем. Эти вопросы являются одними из главных не только в астрофизике и кос- мологии, но и в физике в целом.

Список литературы

- [1] David Harvey, Richard Massey, Thomas Kitching, Andy Taylor, Eric Tittley "The non-gravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters"// Science, Vol 347, Issue 6229 (2015)
- [2] Edvige Corbelli, Paolo Salucci "The Extended Rotation Curve and the Dark Matter Halo of M33"(1999) // arXiv:astro-ph/9909252
- [3] "Тёмная материя : сборник материалов" по ред. Ишханова Б.С. (2014) ISBN 978-5-91304-567-6
- [4] M.J. Jee, H.C. Ford, G.D. Illingworth, R.L. White, T.J. Broadhurst, D.A. Coe, G.R. Meurer, A. Van Der Wel, N. Benitez, J.P. Blakeslee, R.J. Bouwens, L.D. Bradley, R. Demarco, N.L. Homeier, A.R. Martel, S. Mei "Discovery of a Ringlike Dark Matter Structure in the Core of the Galaxy Cluster Cl 0024+17"// Astrophys.J.661:728- 749,2007 // arXiv:0705.2171
- [5] Кляндор-Клайнгротхаус Г.В., Цюбер К. Астрофизика элементарных частиц // М.: УФН, 2000,. - 496 с.
- [6] Космология и элементарные частицы, или небесные тайны. А. Д. Долгов // Фи- зика элементарных частиц и атомного ядра 2012 Т.43 Вып. 3
- [7] Cole S, Sanchez A. G., Wilkins S ASP Conf. Ser. 379 57 (2007); astro-ph/0611178
- [8] Spergel D. N. et al. Astrophys. J. Suppl. 170 377 (2007); astro-ph/ 0603449
- [9] Tegmark M. et al. Phys. Rev. D 74 123507 (2006); astro-ph/0608632
- [10] Рябов В. А., Царев В. А., Цховребов А. М. "Поиски частиц темной материи"УФН 178 1129-1164 (2008)
- [11] Горбунов Д. С. "Стерильные нейтрино и их роль в физике частиц и космологии"УФН 184 545-554 (2014)
- [12] Лубашевский А.В., Результаты поиска WIMP в эксперименте EDELWEISS, Объединённый институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова, Дубна, 2010.
- [13] Aharmim B. et al. Phys. Rev. C 72 055502 (2005); nucl-ex/0502021
- [14] Adamson P. et. al. (MINOS Collab.) Phys. Rev. D 73 072002 (2006); hep- ex/0512036
- [15] Michael D. G. et al. (MINOS Collab.) Phys. Rev. Lett. 97 191801 (2006); hep- ex/0607088
- [16] Dodelson S, Widrow L M Phys. Rev. Lett. 72 17 (1994); hep-ph/ 9303287
- [17] Lobashev V. M. Nucl. Phys. A 719 C153 (2003)

[18] Dolgov A. D. Phys. Rep. 370 333 (2002); hep-ph/0202122



- [19] Kraus Ch. et. al. Eur. Phys. J. C 40 447 (2005); hep-ex/0412056
- [20] Bjorken J. D., Llewellyn Smith C. H. Phys. Rev. D 7 887 (1973)
- [21] Falk T, Olive K A, Srednicki M Phys. Lett. B 339 248 (1994); hep-ph/9409270
- [22] K.Hagiwara et al., "Review of particle physics", Physical Review D, 66:10001, (2002)
- [23] E. Armengaud, Q. Arnaud, C. Augier, A. Benoit,..., "Axion searches with the EDELWEISS-II experiment"//JCAP 1311 (2013) 067 arXiv:1307.1488
- [24] <http://edelweiss.in2p3.fr/Presentation/index.php>
- [25] ASTROPHYSICAL CONSTANTS AND PARAMETERS //Revised November 2013 by D.E. Groom (LBNL).
- [26] J.D. Lewin, and P.F. Smith, "Review of Mathematics, Numerical Factors, and Corrections for Dark Matter Experiments Based on Elastic Nuclear Recoil", Astropart. Phys., 6, 87-112, (1996)
- [27] Tisserand P et al. Astron. Astrophys. 469 387 (2007); astro-ph/0607207
- [28] De Rujula A, Glashow S L, Sarid U Nucl. Phys. B 333 173 (1990)
- [29] V. Vikram, C. Chang, B. Jain, D. Bacon and oth. "Wide-Field Lensing Mass Maps from DES Science Verification Data"//arXiv:1504.03002v1
- [30] <http://people.roma2.infn.it/~dama/web/det.html>
- [31] R. Bernabei (1), P. Belli (1), F. Cappella (1), R. Cerulli (1) and others "Dark Matter search"(2003) // arXiv:astro-ph/0307403v1
- [32] R. Bernabei (1,2), P. Belli (2), A. Bussolotti (2), F. Cappella (3,4), R. Cerulli (5), and others "The DAMA/LIBRA apparatus"(2008) // arXiv:0804.2738
- [33] R. Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 62, 327-332 (2009).
- [34] R. Bernabei et al., Int. J. Mod. Phys. A 28, 1330022 (2013).
- [35] R. Bernabei, P. Belli, S. d'Angelo, A. Di Marco, F. Montecchia, F. Cappella, A. d'Angelo, A. Incicchitti, V. Caracciolo, S. Castellano, R. Cerulli, C.J. Dai, H.L. He, X.H. Ma, X.D. Sheng, R.G. Wang, Z.P. Ye "DAMA/LIBRA results and perspectives, Bled 2013"//arXiv:1403.1404
- [36] <http://www.azimp.ru/catalogue/Scintillators-crystals1/31/>
- [37] R. Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 56, 333 (2008)
- [38] R. Bernabei et al., Eur. Phys. J. C 67, 39 (2010).

1 Введение	2
2 Классификация темной материи	3

3	Свидетельства существования темной материи	3
3.1	Галактические ротационные кривые	4
3.2	Гравитационное линзирование	5
3.3	Галактические скопления	6
3.4	Количественный вклад темной материи	7
4	Кандидаты на роль частиц темной материи	8
4.1	Нейтрино Стандартной модели	9
4.2	Сверхмассивные нейтрино.....	10
4.3	Стерильное нейтрино.....	10
4.4	Аксионы.....	11
4.5	Слабовзаимодействующие массивные частицы.....	11
4.6	Суперсимметричные частицы.....	13
4.7	Барионные кандидаты.....	14
5	Обзор экспериментов	16
5.1	EDELWEISS.....	17
5.2	DAMA/LIBRA.....	23
6	Заключение	29
	Литература	30