

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное автономное образовательное учреждение высшего профессионального
образования

Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»
Кафедра №40 Физика элементарных частиц

Реферат по курсу “Космомикрофизика” на тему:
МОДЕЛИ СКРЫТОЙ МАССЫ

Ноздрина Александра Олеговна М16-115

Москва 2017

Содержание

1	Введение	1
2	Свидетельства существования скрытой массы	2
2.1	Галактические кривые вращения	2
2.2	Гравитационное линзирование	3
2.3	Возникновение галактик	4
2.4	Динамика скоплений галактик	4
3	Холодная и горячая темная материя	5
3.1	Распад темной материи	6
4	Кандидаты на роль скрытой массы	7
4.1	Барионная темная материя	7
4.1.1	Магнитные монополи	7
4.2	Небарионная темная материя	8
4.2.1	Слабовзаимодействующие массивные частицы WIMP	8
4.2.2	Нейтрино	9
4.3	Новые частицы - кандидаты на роль темной материи. Суперсимметричные ча- стицы	11
4.4	Мультикомпонентная темная материя	12
4.5	Другие кандидаты	12

1 Введение

Наличие скрытой массы во Вселенной является одной из главных проблем в современной физике. В начале прошлого столетия появились экспериментальные свидетельства того, что некоторые звезды и галактики ведут себя иначе чем предсказывала теория, а именно, вращение более отдаленных частей галактик не поддавалось законам механики. Эти явления были объяснены тем, что масса галактик может быть значительно больше, чем наблюдается непосредственно. Это положило начало поискам новой, скрытой массы, которую в последствии назвали темной материей (dark matter). О наличии такой невидимой материи можно узнать по ее гравитационному воздействию на известную нам барионную материю (1).

Барионная материя – материя, состоящая из барионов (нейтронов, протонов) и электронов. То есть, привычная нам форма материи. Если принять во внимание все формы барионной материи, такие, как межзвездный газ, коричневые и белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры, то оказывается, что для объяснения всех наблюдаемых явлений необходима значительная доля небарионной материи. Измерения Planck и WMAP показывают, что вклад темной материи в полную плотность вещества в современной Вселенной около 20%. Мы предполагаем, что она состоит из новых массивных частиц, отсутствующих в Стандартной Модели. Такие частицы должны быть нерелятивистскими, стабильными и плохо взаимодействовать между собой.

По определению темная материя - это неизвестный нам тип материи, отличный от темной энергии и известной нам барионной материи. Название отражает тот факт, что скрытая

масса невидима в электромагнитном спектре излучения.

Плотность вещества во Вселенной ρ можно оценить из наблюдений движения отдельных галактик. Обычно ρ приводится в единицах критической плотности ρ_c

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

в этой формуле H - постоянная Хаббла, G - гравитационная постоянная.

При $\rho > \rho_c$ Вселенная является замкнутой, т.е. гравитационное взаимодействие достаточно сильно для того, чтобы Вселенная начала сжиматься.

Интерпретация данных по анизотропии реликтового излучения, полученных в ходе работы WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2003 г.) дала следующие результаты: наблюдаемая плотность $\Omega = \rho/\rho_c$, близка Ω_{crit} . Данные распределения

$$\Omega = \Omega_{neutrino} + \Omega_{vis} + \Omega_{DM} + \Omega_{\Lambda}$$

по компонентам оказались равными: барионная материя $\Omega_{vis} = 4,4 \%$, тёмная материя $\Omega_{dark} = 23 \%$, «тёмная энергия» $\Omega_{\Lambda} = 72,6 \%$ и доля нейтрино $\Omega_{\nu} = 0,5\%$.

2 Свидетельства существования скрытой массы

2.1 Галактические кривые вращения

Одно из главных свидетельств о существовании темной материи появилось при рассмотрении вращательных скоростей звезд. Движение звезд должно описываться следующим законом:

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

где M - вся масса материи внутри сферы радиуса r . В первом приближении центральную область галактики можно считать сферической, т.е. $v_c \propto r$.

Во внутренней части галактики ожидается линейный рост скорости вращения с увеличением расстояния от центра. Во внешней области галактики масса M практически постоянна и предполагается что $v_c \propto r^{-1/2}$.

Вместо этого, оказывается что, кривая вращения выравнивается с увеличением расстоянием, подразумевая что $M(r) \propto r$. Это можно объяснить присутствием дополнительной неизлучающей компоненты материи вне видимой части галактического диска. Звезды движутся быстрее, чем это предсказывалось теорией.

Первые убедительные данные были опубликованы в 1970 году Рубиной и Фордом (2), их измерения охватывали расстояние 24 кпс от центра спиральной галактики М31. На рис. 1 изображен их результат совмещенный с другими измерениями, продленными до 30 кпс. Поведение экспериментально измеренных галактических кривых вращения не соответствует уменьшению v_c с увеличением радиуса.

Ротационная скорость v_c определяется путем измерения доплеровского сдвига в спектре излучения H^2 областей вокруг звезд. Исследование 21-см линии (переход сверхтонкой

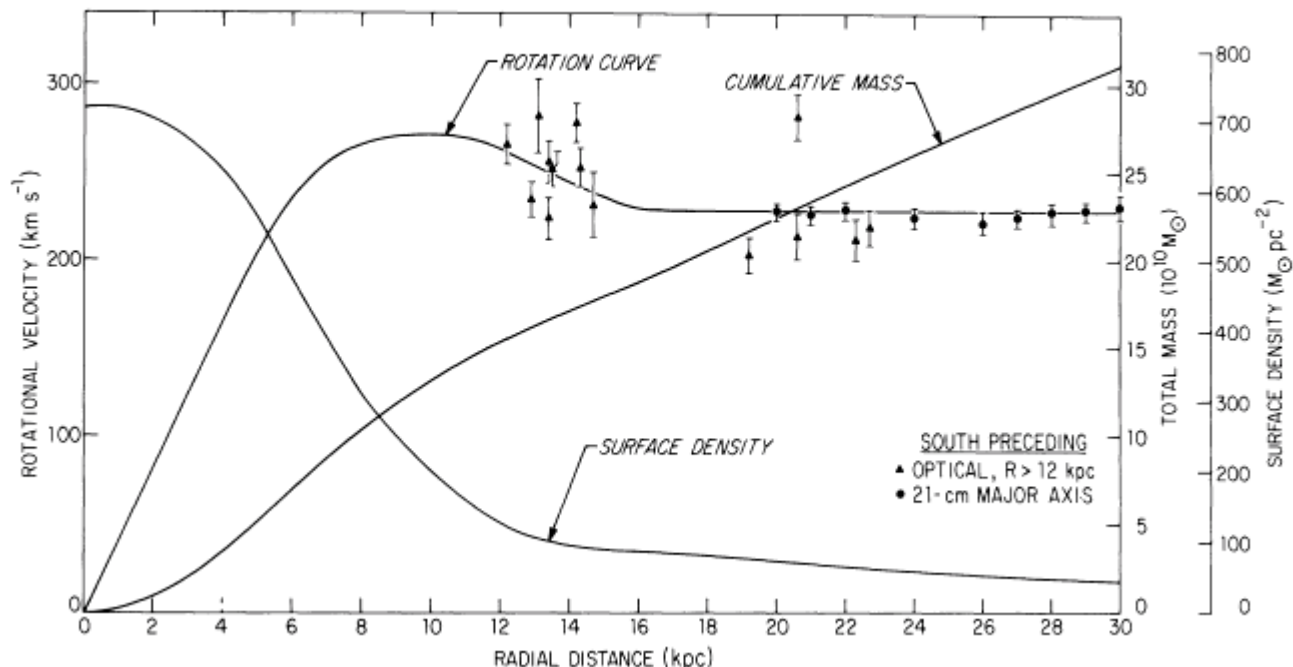


Рис. 1: Кривая вращения для галактики M31

структуры в атоме водорода), излучаемой межзвездным веществом, привело к аналогичному результату.

Форма кривой вращения показывает что плотность темной материи в галактике распределена следующим образом:

$$\rho(r) \propto \frac{M(r)}{r^3} \sim \frac{1}{r^2}$$

На основе этих наблюдений было постулировано существование сферического гало темной материи, окружающего галактику и объясняющего поведение полученных ротационных кривых.

2.2 Гравитационное линзирование

Так же в пользу существования темной материи служат измерения гравитационного поля в скоплениях галактик. Метод гравитационного линзирования заключается в явлении связанном с полевыми уравнениями общей теории относительности, а именно, в отклонении электромагнитного излучения вблизи массивных тел. Как правило для заметного искажения изображения нужны массы порядка размера галактик или их скоплений. Гравитационное поле скопления искривляет лучи света, испущенные галактикой, находящейся за скоплением, т. е. гравитационное поле действует как линза.

Скопление галактик создает гравитационную линзу на Рис. 2 слева. Она искажает форму расположенных за линзой объектов — вытягивая их изображения в одном направлении. По величине и направлению вытягивания группа ученых, построила распределение масс, которое показано на правом изображении. Как видно, в скоплении сосредоточено гораздо больше

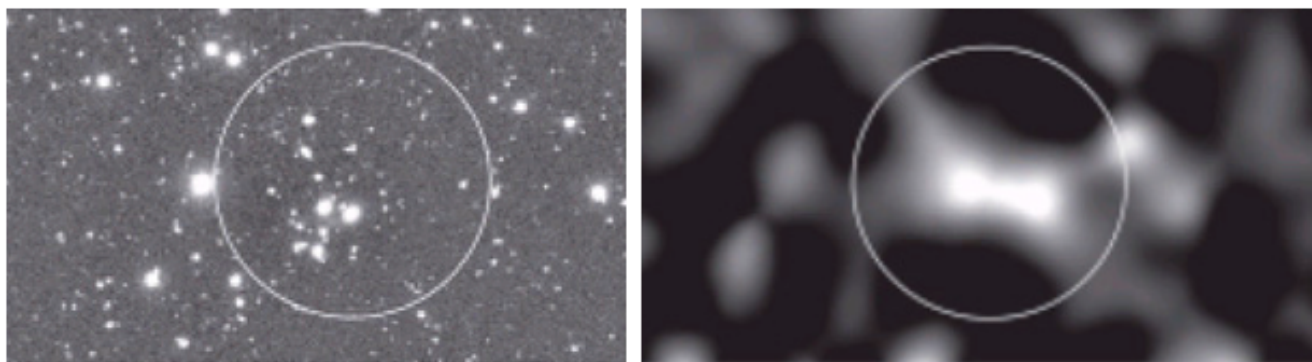


Рис. 2: Слева: Скопление галактик создает гравитационную линзу. Справа: Распределение масс для данного скопления галактик

массы, чем видно в телескоп. В данном случае скрытая масса предположительно участвует в роле гравитационной линзы.

2.3 Возникновение галактик

Для возникновения галактик необходимы неоднородности плотности во Вселенной. Галактики могли возникнуть в таких пространственных областях, где плотность выше, чем в окружающем пространстве. В результате гравитационного взаимодействия эти области успевали кластеризоваться быстрее, чем наступало их разрежение за счет всеобщего расширения.

Накопление вещества должно было начаться уже после формирования атомов из ядер и электронов, так как на ранних этапах эволюции Вселенной вещество находилось в состоянии динамического равновесия: излучение не могло вырваться за пределы этой материи. Заметные флуктуации плотности обычной материи в то время были исключены вплоть до очень низкого уровня изотропностью фонового излучения. После стадии формирования атомов излучение перестает находиться в состоянии термодинамического равновесия с материей, тем самым возникающие после этого флуктуации плотности не находят более своего отражения в характере излучения.

Однако, если провести вычисления процесса накопления материи во времени, то оказывается, что прошедшего с момента формирования атомов времени недостаточно для того, чтобы успели образоваться такие структуры, как галактики и их скопления. Проблему можно решить, потребовав существования массивных частиц, вышедших из состояния термодинамического равновесия на более ранней стадии, так чтобы эти частицы имели возможность проявить себя как некоторую основу для конденсации вокруг них обычной материи, например WIMP (которые будут далее обсуждаться). При этом необходимо учитывать требование изотропности фонового космического излучения.

2.4 Динамика скоплений галактик

Динамика скоплений галактик свидетельствует в пользу существования темной материи. Когда движение системы, потенциальная энергия которой является однородной функцией координат, происходит в ограниченной пространственной области, то усредненные по времени

значения кинетической и потенциальной энергии связаны друг с другом теоремой о вириале. Она может быть использована для оценки плотности вещества в скоплениях большого числа галактик:

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

Средняя кинетическая и потенциальная энергия скопления N галактик дается выражением:

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

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

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

Измерения среднего расстояния $\langle r \rangle$ и средней скорости $\langle v \rangle$ дают значение динамической массы, которое примерно на два порядка превышает массу, полученную на основе анализа светимости галактик. Данный факт может быть использован как еще одно свидетельство в пользу существования темной материи.

Этот аргумент тоже имеет свои слабые места. Теорема о вириале справедлива только при усреднении по длительному временному периоду, когда замкнутые системы находятся в равновесии. Однако измерения галактических скоплений представляют информацию о конкретном моменте времени. Более того, скопления галактик не являются замкнутыми системами, они связаны друг с другом. И наконец, не ясно, достигли они состояния равновесия или нет.

3 Холодная и горячая темная материя

Сделаем предположением о том, что частицы ТМ находились в термодинамическом равновесии с обычным веществом на ранних стадиях эволюции Вселенной. В определённый момент времени эти частицы вышли из равновесия, и распространяются с тех пор свободно. В зависимости от температуры T_f (freeze-out), при которой это произошло, ТМ делят на «горячую», «холодную» и «тёплую».

1. Горячая тёмная материя (HDM): $T_f > M_x$ Если в момент выхода из равновесия энергия частиц много превышала их массу $M_x \approx 10 - 100$ эВ, ТМ называют "горячей". Такими могли бы быть лёгкие частицы движущиеся с околосветовыми скоростями типа нейтрино, но космологические данные исключают возможность того, что последние составляют значительную долю скрытой массы. Если M_x порядка КэВ в таком случае говорят о "теплой" темной материи. Разница между этими двумя случаями состоит в том, что к моменту перехода от радиационно-доминирующей стадии к пылевой HDM является релятивистской, а теплая уже нерелятивистской (3), (4).
2. Холодная тёмная материя (CDM): Если частицы ТМ отщепились от космической плазмы уже будучи нерелятивистскими, т. е. T_f значительно меньше массы частиц M_x , то такую ТМ называют «холодной». Она должна состоять из массивных медленно движущихся (и в этом смысле «холодных») частиц или сгустков вещества. Она наиболее

предпочтительна с точки зрения космологии, так как частицы HDM при движении с релятивистскими скоростями разглаживали бы неоднородности плотности материи на масштабах порядка хаббловского в ту эпоху и, таким образом, препятствовали бы образованию крупномасштабных структур, что противоречит наблюдательным данным. Фактически, поведение частиц уже с массами свыше 30 КэВ обнаруживает все свойства холодной темной материи.

Рассмотрим момент времени, когда ТМ находилась в термодинамическом равновесии в ранней Вселенной. Возможны следующие взаимодействия частиц ТМ с частицами Стандартной Модели:

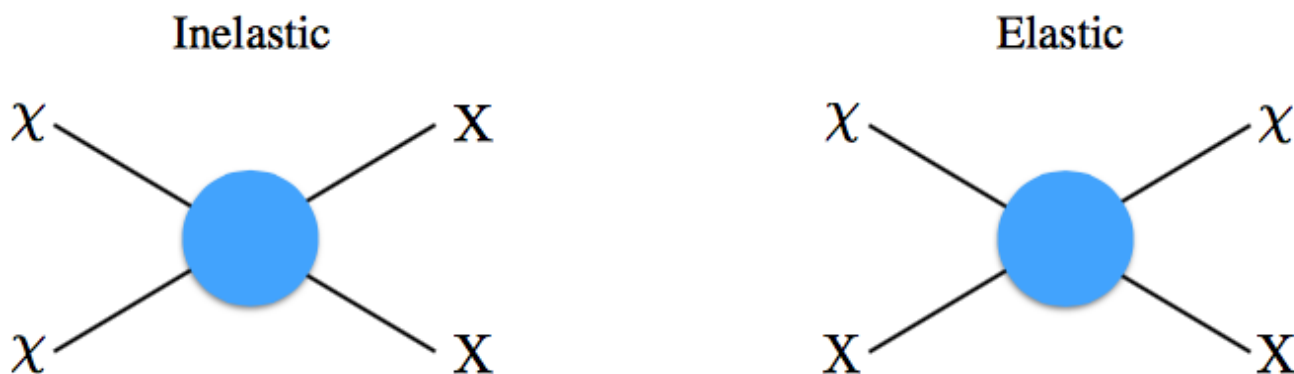


Рис. 3: Иллюстрация возможного рассеяния частиц ТМ в момент термодинамического равновесия

На рис. 3 изображены диаграммы возможных взаимодействий, здесь χ частицы ТМ и X частицы Стандартной Модели. Так как Вселенная расширяется, частицам ТМ становится труднее найти партнера для аннигиляции и со временем эта реакция подавляется. Однако, аннигиляция предположительно возможна и в наше время в областях с высокой плотностью ТМ, что дает возможность изучать природу скрытой массы регистрируя продукты ее аннигиляции. В зависимости от модели, ТМ может аннигилировать в пару фотонов, которые в свою очередь создадут другие частицы в последующих взаимодействиях.

3.1 Распад темной материи

Частицы темной материи могут быть нестабильными со временем жизни превышающим возраст Вселенной (5). Если эти частицы способны распадаться, продуктом распада являются практически монохроматичные фотоны. Это свойство позволяет нам искать такие распады с помощью космических обсерваторий и детекторов космических лучей. Подобный сигнал может так же исходить от двухфотонной аннигиляции темной материи.

Данные полученные с помощью Planck говорят о том, что в настоящий момент Вселенная расширяется заметно быстрее, чем это следовало ожидать из анализа реликтового излучения. Возможное объяснение предлагает модель DDM (Decaying Dark Matter) (6).

В этой теории предполагается (7), что темная материя состоит из нескольких компонент, и одна компонента состоит из нестабильных частиц, чье время жизни довольно большое:

в момент образования водорода они еще есть во Вселенной, а в наше время уже исчезли, распавшись в нейтрино или другие релятивистские частицы. Количество темной материи в таком случае в прошлом и сегодня будет разным.

Для объяснения наблюдаемых несоответствий требуется распад относительно небольшого количества темной материи – от 2,5 – 5% от ее общей массы. Сейчас вся эта материя распалась, и оставшаяся стабильная часть скрытой массы ведет себя как описывает теория CDM. С другой стороны, возможно что она продолжает распадаться.

4 Кандидаты на роль скрытой массы

4.1 Барийонная темная материя

Небольшая часть темной материи 4-5% может состоять из обычного барионного вещества, которое почти не испускает собственного излучения и поэтому невидимо. Существование нескольких классов таких объектов можно считать экспериментально подтвержденным. Эксперименты EROS и MACHO, основанные на гравитационном линзировании, привели к открытию массивных объектов, расположенных на периферии галактических дисков. Когда темное массивное тело проходит между наблюдателем и далекой галактикой, ее яркость на короткое время уменьшается (или увеличивается, поскольку темное тело выступает в роли гравитационной линзы). В результате кропотливых поисков такие события были выявлены. Природа массивных компактных галообъектов все еще не ясна до конца.

Это могут быть Коричневые карлики - космические тела с массами значительно меньше, чем масса Солнца ($M < 0.08 M_{sun}$). Гравитационного давления внутри этих объектов оказывается недостаточно для создания температур, при которых начинается процесс слияния протонов в гелий. Из-за отсутствия ядерного синтеза излучение коричневых карликов очень слабо, если не считать излучения тех из них, которые находятся на ранней стадии своего развития. Планеты также могли бы входить в эту группу.

Очень компактные объекты, находящиеся на конечных стадиях развития звезд (белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры), также могли бы входить в состав темной материи. Поскольку в течение своего времени жизни практически каждая звезда достигает одной из этих трех конечных стадий, то значительная часть массы более ранних и более тяжелых звезд должна присутствовать в неизлучающей форме в виде белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр. Часть этого вещества возвращается в межзвездное пространство путем вспышек сверхновых или другими путями и принимает участие в образовании новых звезд. При этом не следует принимать во внимание звезды с массами $M < 0.9 M_{sun}$, так как их время жизни больше, чем возраст Вселенной, и они еще не достигли конечных стадий в своем развитии (8).

4.1.1 Магнитные монополи

Магнитный монополю — гипотетическая элементарная частица, обладающая ненулевым магнитным зарядом — точечный источник радиального магнитного поля. Идею о существовании монополей выдвинул Дирак в 1931 для объяснения квантования электрического заряда (9). Нижнюю оценку для массы монополя Дирака можно оценить исходя из классического

радиуса электрона, $m_D \approx 2.4 \text{ ГэВ}$:

$$m_D = \frac{m_e}{4\alpha_E} \approx 4692m_e$$

Тесная связь монополей и элементарных частиц объясняется теорией великого объединения — GUT (Grand Unified Theory). Согласно GUT масса монополей должна быть порядка 10^{17} ГэВ . В настоящее время такие энергии недоступны для экспериментов на ускорителях.

4.2 Небарионная темная материя

4.2.1 Слабовзаимодействующие массивные частицы WIMP

Теоретические модели предоставляют большой выбор возможных кандидатов на роль небарионной темной материи. В качестве главных кандидатов на небарионную темную материю выступают так называемые WIMP (Weakly Interactive Massive Particles — слабовзаимодействующие массивные частицы). Как видно из названия WIMP участвуют только в слабом и гравитационном взаимодействии. Именно поэтому их чрезвычайно сложно обнаружить. Масса WIMP должна быть как минимум в десятки раз больше массы протона. Поиски WIMP ведутся во многих экспериментах в течение последних 20–30 лет, но, несмотря на все усилия, они до сих пор обнаружены не были.

Одна из идей состоит в том, что если такие частицы существуют, то Земля в своем движении вместе с Солнцем по орбите вокруг центра Галактики должна лететь сквозь облако, состоящее из WIMP. Были построены специальные детекторы, которые должны зафиксировать реакцию рассеяния WIMP (эксперименты DAMA NaI, DAMA LIBRE). Поскольку, двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля меняет свою скорость и направление движения относительно ветра, состоящего из WIMP, то величина потока частиц ТМ, проходящих сквозь землю, меняется в зависимости от времени года. Экспериментальная группа DAMA, сообщает о наблюдаемых годовых вариациях скорости счета сигналов (10). Однако другие группы пока не подтверждают этих результатов, и вопрос, по существу, остается открытым.

Другой метод поиска WIMP основан на предположении о том, что в течение своего существования различные астрономические объекты (Земля, Солнце, центр нашей Галактики) должны захватывать WIMP, которые накапливаются в центре этих объектов, и, аннигилируя друг с другом, рождать поток нейтрино. Попытки детектирования избыточного нейтринного потока из центра Земли в направлении к Солнцу и к центру Галактики были предприняты на подземных и подводных нейтринных детекторах MACRO, LVD (лаборатория Гран-Сассо), NT-200 (озеро Байкал, Россия), SuperKamiokande, AMANDA (станция Скотт-Амундсен, Южный полюс), но пока не привели к положительному результату.

Прямое детектирование частиц ТМ проводится на подземных сцинтилляционных детекторах (EDELWEISS (11), LUX (12), DARK SIDE (13), XENON (14) и тд), на пузырьковой камере (BubXe) и многих других экспериментах. Сцинтилляционные детекторы нацелены на регистрацию энергосвечения в объеме детектора, вызванного возможным рассеянием тяжелой частицы на ядре сцинтиллятора. Энергия передачи составляет всего десятки кэВ.

Тем не менее, в экспериментах ведется поиск энерговыделений такой величины. Они должны происходить с частотой:

$$\nu = v_x * n_x * N_A * \sigma_{NX}$$

где σ_{NX} сечение упругого рассеяния WIMP на ядре, v_x – скорость WIMP, и локальной плотностью числа этих частиц $n_x = \rho_{CDM}/M_x$, а также количеством ядер в детекторе N_A . В качестве примера, при сечении $\sigma_{NX} \sim 10^{-38} \text{ см}^2$ и массе $M_x = 10 \text{ ГэВ}$ в детекторе массой 10 кг заполненным ядрами минеши с $A = 100$ ожидается $\nu \sim 5 * 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, т.е. порядка одного события в год. Отсутствие сигнала позволяет исключить соответствующую область в пространстве параметров (M_x, σ_{NX})

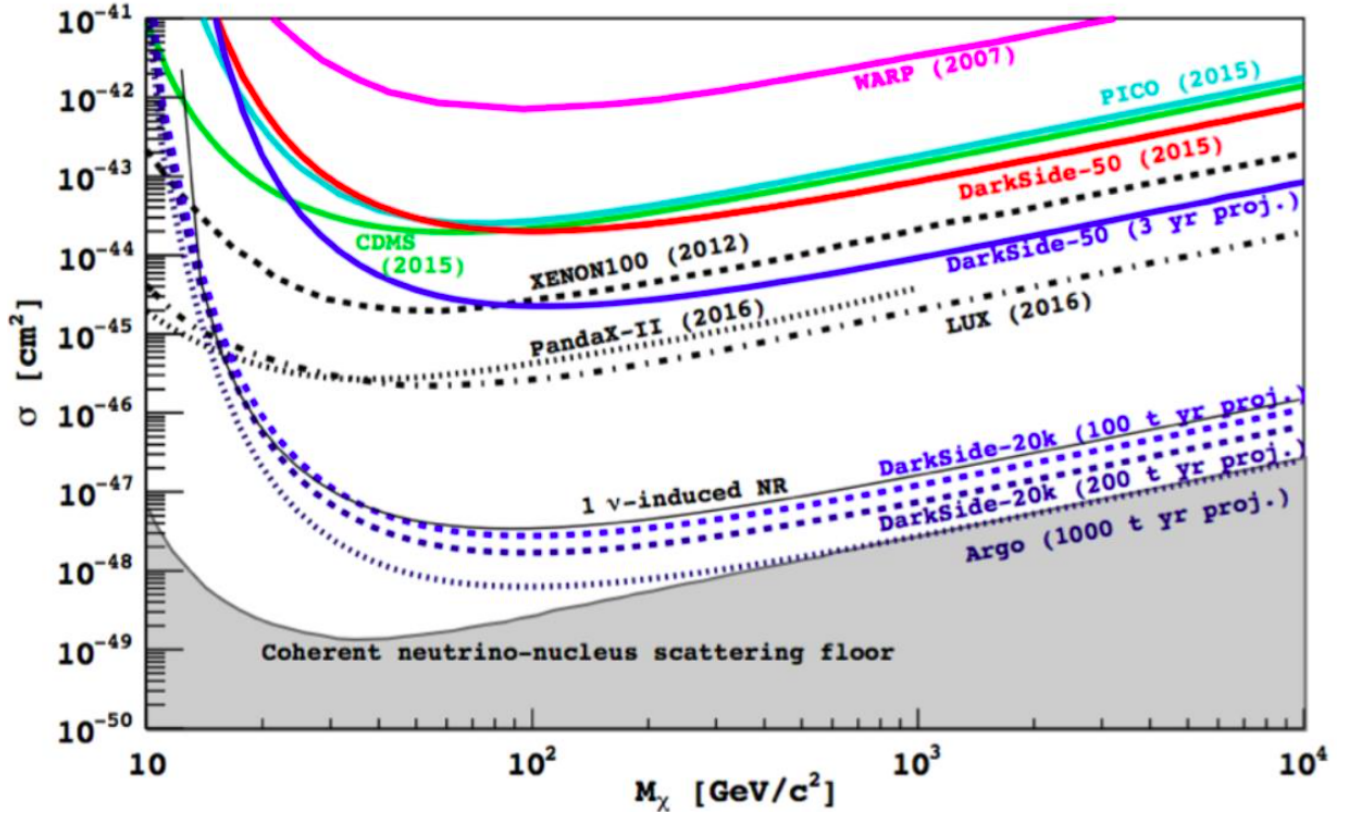


Рис. 4: Области выше кривых показывают соответствуют области параметров, в которых работали или начнут свою работу соответствующие эксперименты по поиску частиц – WIMP

Эксперименты по поиску WIMP активно проводят также на ускорителях элементарных частиц. Ускорив частицы до высоких энергий и сталкивая их друг с другом, можно ожидать рождения пар других частиц и античастиц (в том числе WIMP), суммарная масса которых равна суммарной энергии сталкивающихся частиц. Но и ускорительные эксперименты пока не привели к положительному результату.

4.2.2 Нейтрино

Эксперименты по обнаружению нейтринных осцилляций доказали, что эти частицы обладают массой отличной от нуля, следовательно, они должны вносить вклад в скрытую массу. Для

достижения $\Omega = \rho/\rho_c = 1$, необходимы нейтринные массы порядка $(15 - 65)/N_\nu$ эВ, где N_ν обозначает число типов лёгких нейтрино.

Нейтрино вышли из состояния термодинамического равновесия примерно через 1 с после Большого Взрыва при температуре 1010 К (что отвечает энергии 1 МэВ). В это время они обладают релятивистскими энергиями и тем самым считаются частицами горячей темной материи.

Для определения массы нейтрино проводился целый ряд экспериментов по исследованию энергетического спектра электронов при β – распаде трития. Наиболее точными оказались эксперименты дали следующие оценки для верхней границы массы электронного нейтрино: $m_{\nu_e} < 2$ эВ. Более того, изучения вариаций космического микроволнового фона с помощью Planck дали следующие ограничения на сумму масс трех сортов нейтрино: $M_{\text{summ}} \leq 0.320 \pm 0.081$ эВ.

Таким образом, нейтрино практически исключается в качестве кандидата на доминирующий компонент темной материи.

Тяжелые нейтрино: Согласно данным LEP и SLAC, относящимся к прецизионному измерению ширины распада Z – бозона, существует только три типа легких нейтрино и исключается существование тяжелых нейтрино вплоть до значений масс $M_z/2$ ГэВ.

Таким образом, тяжелые нейтрино, если они существуют, относятся к четвертому поколению и должны иметь массу большую чем 45 ГэВ. А из того, что они, как и электронное, мюонное и тау-нейтрино, стабильны и нейтральны, то совокупность данных свойств, казалось бы, позволяет считать их кандидатами на роль WIMP.

Нейтрино четвертого поколения могут быть как лево-, так и правополяризованными. Теоретический расчет сечения прямого детектирования левополяризованных нейтрино четвертого поколения показал (15), что сечение оказывается слишком большим, что противоречит предыдущим экспериментальным данным. С константой связи, соответствующей электро-слабому взаимодействию, и в предположении, что нейтрино рассеивается на протоне, оно получается равным 10^{-38} см² на нуклон, в то время как эксперименты по поиску темной материи дают ограничения порядка 10^{-44} см² на нуклон (по данным экспериментов CDMS и XENON (16)). Следовательно, масса таких нейтрино даже слишком велика, чтобы считать их хорошими кандидатами, а кроме того, трудно объяснить, почему они остаются стабильными при такой большой массе.

В таком случае, можно предположить существование еще одного массивного калибровочного бозона – Z' , с помощью которого взаимодействуют правополяризованные нейтрино. Его масса и константа связи отличны от аналогичных характеристик обычного Z -бозона (17). После введения новой калибровочной $U(1)$ симметрии, что вполне можно реализовать и что согласуется с общей идеей четвертого поколения, получается теория, в которой правополяризованные нейтрино существуют, массивны и стабильны. Новые нейтрино будут майорановскими и окажутся хорошими кандидатами на роль частиц темной материи. Численные оценки сечения взаимодействия дают почти нулевой результат, если считать смешивание между право- и левополяризованными нейтрино пренебрежимо малым.

Масса Z' -бозона должна быть масштаба ТэВ, однако, его поиски на БАК весьма затруднительны из-за почти нулевого поперечного сечения.

Стерильные нейтрино: Некоторые из возможных расширений стандартной модели подразумевают введение дополнительных частиц – стерильных нейтрино – левых фермионов, смешивающихся с обычными активными нейтрино. Стерильные нейтрино предположительно участвуют только в гравитационном взаимодействии.

Существование трех поколений нейтрино было проверено и изучено в экспериментах с нейтрино атмосферного происхождения, с нейтрино, рожденными в ядерных реакторах, и с нейтрино, полученными на ускорителе.

Однако, имеется ряд экспериментальных фактов, свидетельствующих о том, что измеренный поток ν оказался меньше расчетного. Первый из них — ускорительные эксперименты LSND (18) в Лос-Аламосе и последующий MiniBooNE (19) в Фермилаб. Результат LSND — самый первый и до сих пор имеет наибольшую статистическую значимость. Другим экспериментальным фактом является «галлиевая аномалия», возникшая при калибровке галлиевых нейтринных детекторов на эксперименте Gallex (20) с помощью искусственного источника $\bar{\nu}_e$ ^{51}Cr .

Наконец, было заявлено о существовании реакторной антинейтринной аномалии (21). Новые, более точные вычисления показали, что измеренный поток $\bar{\nu}_e$ оказался значительно меньше ожидаемого. Авторы работ заявили о дефиците зарегистрированных событий в нейтринных экспериментах.

Полученные данные могут свидетельствовать в пользу существования стерильного нейтрино. Если стерильные нейтрино существуют, они могли бы внести вклад в известную нам плотность Ω_{DM}

4.3 Новые частицы - кандидаты на роль темной материи. Суперсимметричные частицы

Суперсимметрия это симметрия между бозонами и фермионами. Большинство суперсимметричных теорий содержит одну стабильную частицу, которая является новым кандидатом на роль темной материи. Существование стабильной суперсимметричной частицы следует из сохранения мультипликативного квантового числа - R-четности, которое принимает значение +1 для обычных частиц, и -1 для их суперпартнеров. Это есть закон сохранения R-четности. Согласно этому закону сохранения SUSY-частицы могут образовываться только парами и SUSY-частицы могут распадаться только на нечетное число SUSY-частиц. Следовательно, легчайшая суперсимметричная частица должна быть стабильной.

Среди возможных кандидатов на роль нейтральной легчайшей суперсимметричной частицы имеются фотино ($S = 1/2$) и зино ($S = 1/2$), а также хиггсино ($S = 1/2$), sneйтрино ($S = 0$) и гравитино ($S = 3/2$). Линейные комбинации всех вышеперечисленных частиц называются Нейтралино. Его масса, скорее всего, должна быть больше 10 ГэВ. Рассмотрение SUSY-частиц в качестве темной материи представляет особый интерес, так как они появились совершенно в другом контексте и не были специально введены для разрешения проблемы (небарионной) темной материи. Поиск суперсимметричных частиц является одной из основных задач экспериментов в области физики высоких энергий, в частности, поиск суперпартнеров ведется на коллайдере LHC

4.4 Мультикомпонентная темная материя

Скрытая масса возможно состоит из одного из этих кандидатов. Но нет причин для того, что бы темная материя состояла только из одного типа частиц. Известное нам вещество состоит из разных типов частиц, скрытая масса может также иметь смешанный состав. Более того, с физической точки зрения наиболее обоснованным оказывается мультикомпонентные сценарии, чем обычные однопараметрические модели. Смешанный состав темной материи естественным образом получается в суперсимметричных моделях. Так же есть ряд экспериментальных данных, которые свидетельствуют в пользу того, что темная материя может состоять из разных типов частиц. Например избыток позитронов зафиксированный в космических лучах с помощью PAMELA (22), а так же эксперименты HEAT, AMS (23),(24). Результаты экспериментов ATIC и PPB-BETS могут быть объяснены тем, что темная материя аннигилирует в лептоны, избыток которых был зарегистрирован (25). Трудность заключается в том, что ТМ должна в таком случае иметь большое сечение аннигиляции в лептоны и небольшое в адроны, так как данные показывают избыток позитронов но не антипротонов. Это могло бы быть объяснено смешанным составом темной материи.

Есть мультикомпонентные теоретические модели в которых тяжелый компонент скрытой массы несет лептонное число и аннигилирует в основном в лептоны (26). Легкий компонент мог бы объяснить результаты эксперимента DAMA и мог бы быть зафиксирован на экспериментах по прямому детектированию.

4.5 Другие кандидаты

В некоторых обобщения Стандартной модели имеются новые скалярные или псевдоскалярные частицы, некоторые из которых оказываются настолько легкими и слабовазаимодействующими, что их можно рассматривать в качестве кандидатов на роль частиц темной материи. Среди таких моделей можно перечислить модели с легкими аксионами, дилатонами, фамилонами, сголдстино и др.

Слабое взаимодействие этих частиц с частицами СМ и долгое время жизни связаны со специфическими особенностями соответствующих обобщений СМ, направленных на решение каких-либо ее проблем. Если по каким-то причинам параметры этих моделей принимают значения, обеспечивающих вышеперечисленные свойства данных частиц, то их можно считать естественными кандидатами на роль частиц темной материи.

Более экзотическими кандидатами на роль частиц темной материи являются стабильные сверхтяжелые частицы Wimpzilla's с $M_x \gg 100$ ТэВ. Такие частицы, находившиеся в термодинамическом равновесии в ранней Вселенной, запрещены из-за перепроизводства темной материи. Чем тяжелее частицы, тем меньше их сечение аннигиляции и тем более высокая у них температура закалки T_f . Из этого следует, что при известном нам значении $\Omega_x \sim 0,2$ такие частицы никогда не были в состоянии термодинамического равновесия. Причина введения частиц ТМ именно с такой массой в том, что слабовазаимодействующие частицы с массой до 1 ТэВ пока не найдены ни на ускорителях, ни в прямых поисках.

Так как 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 времён (27). Но все эти теории имеют ряд недочетов, так что на данный момент лучше объяснением гравитационных аномалий является наличие скрытой массы.

В заключение отметим, что есть еще целый ряд кандидатов на роль темной материи – стабильных частиц или других объектов. Среди них: первичные черные дыры, аксино – суперпартнер аксиона, зеркальная материя, теория плазменной космологии и другие.

Для объяснения наблюдаемого количества темной материи параметры соответствующих моделей могут принимать нереалистичные значения или требуются дополнительные предположения. Предсказания для плотности ТМ в таких теориях оказываются сильно модельно-зависимыми. В таком случае, частицы нельзя назвать естественными кандидатами, поскольку с теоретической точки зрения нет оснований ожидать, что параметры в действительности будут принимать нужные нам значения.

Список литературы

- [1] M. Lisanti. – Lectures on Dark Matter Physics arXiv:1603.03797
- [2] V. C. Rubin and W. K. Ford, Jr., “Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions,” *Astroph. J.* 159 (1970) 379.
- [3] Д.С. Горубнов, В.А. Рубаков – "Введение в теорию ранней вселенной. Теория горячего большого взрыва"
- [4] М.Ю. Хлопов – "Основы космомикрoфизики"
- [5] W. Bonivento, D. Gorbunov, M. Shaposhnikov and A. Tokareva – Polarization of photons emitted by decaying dark matter arXiv:1610.04532
- [6] Zurab Berezhiani, A.D. Dolgov, and I.I. Tkachev Reconciling Planck results with low redshift astronomical measurements *Phys. Rev. D* 92, 061303(R) – Published 22 September 2015
- [7] A. Chudaykin, D. Gorbunov, I. Tkachev – Dark matter component decaying after recombination: Lensing constraints with Planck data INR-TH/2016-006
- [8] Ишханова Б. С. – "Тёмная материя: сборник материалов"(2014) ISBN978-5-91304-567-6
- [9] Hooft, G. (1974). "Magnetic monopoles in unified gauge theories". *Nuclear Physics B.* 79 (2): 276–284. Bibcode:1974NuPhB..79..276T. doi:10.1016/0550-3213(74)90486-6.
- [10] R. Bernabei et al. [DAMA Collaboration], *Eur. Phys. J. C* 56, 333 (2008) [arXiv:0804.2741 [astro-ph]].
- [11] E. Armengaud et al. – Final results of the EDELWEISS-II WIMP search using a 4-kg array of cryogenic germanium detectors with interleaved electrodes, *Phys. Lett. B* 702 (2011), 329-335 (arXiv:1103.4070)

- [12] [LUX Collaboration] – Improved WIMP scattering limits from the LUX experiment arXiv:1512.03506 Data from Figures 1-3
- [13] DarkSide Collaboration. “Results from the first use of low radioactivity argon in a dark matter search”. Physical Review D, 93 (2016): 081101(R). [arXiv: 1510.00702]
- [14] E. Aprile, et al.(XENON Collaboration): Dark Matter Results from 225 Live Days of XENON100 Data <http://arxiv.org/abs/1207.5988>
- [15] E. Aprile et al. [XENON100 Collaboration] – Dark Matter Results from 100 Live Days of XENON100 Data. Phys. Rev. Lett. 107, 131302 (2011). arXiv:1104.2549 [astro-ph.CO].
- [16] Z. Ahmed et al. [The CDMS-II Collaboration] Results from the Final Exposure of the CDMS II Experiment. Science 327, 1619 (2010). [arXiv:0912.3592 [astro-ph.CO]].
- [17] Hye-Sung Lee, Zuowei Liu and Amarjit Soni. Neutrino dark matter candidate in fourth generation scenarios. Phys.Lett.B704:30-35,2011. arXiv:1105.3490v3 [hep-ph].
- [18] A. Aguilar et al. Evidence for neutrino oscillations from the observation of anti-neutrino(electron) appearance in a anti-neutrino(muon) beam . Phys. Rev, 2001
- [19] A. A. Aguilar-Arevalo et al. Oscillations. Phys. Rev, 2010. Event Excess in the MiniBooNE Search for $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ Oscillations
- [20] F. Kaether et al. Reanalysis of the GALLEX solar neutrino flux and source experiments Phys. Rev. Lett. Phys. Lett. B685 (2010) 47.
- [21] G. et al Mention. The reactor antineutrino anomaly. 2011. Phys.Rev. D83 (2011) 073006
- [22] O. Adriani et al., arXiv:0810.4995 [astro-ph]. O. Adriani et al., arXiv:0810.4994 [astro-ph].
- [23] S. W. Barwick et al. [HEAT Collaboration], Astrophys. J. 482, L191 (1997) [arXiv:astro-ph/9703192]. J. J. Beatty et al., Phys. Rev. Lett. 93, 241102 (2004) [arXiv:astro-ph/0412230].
- [24] M. Aguilar et al. [AMS-01 Collaboration], Phys. Lett. B 646, 145 (2007) [arXiv:astro-ph/0703154].
- [25] Nature 456, 362 (2008). S. Torii et al., arXiv:0809.0760 [astro-ph].
- [26] Kathryn M. Zurek – Multi-Component Dark Matter FERMILAB-PUB-08-542-A
- [27] Клапдор-Клайнгротхаус Г.В., Цюбер К. Астрофизика элементарных частиц // М.: УФН, 2000,. - 496 с.