

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

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

МОДЕЛИ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Ноздрина Александра Олеговна

Москва 2016

Содержание

1	Введение	1
2	Свидетельства существования скрытой массы	2
3	Холодная, горячая и теплая темная материя	3
4	Кандидаты на роль темной материи	4
4.1	Барионная темная материя	4
4.2	Небарионная темная материя	5
4.2.1	Нейтрино	6
4.3	Новые частицы - кандидаты на роль темной материи. Суперсимметричные частицы	7
4.4	Другие кандидаты	8

1 Введение

Наличие скрытой массы во Вселенной является одной из главных проблем в современной физике. Имеются экспериментальные свидетельства в пользу того, что значительная часть вещества во Вселенной не излучает и поэтому не может быть обнаружена с помощью телескопов и космических обсерваторий. О наличии такой невидимой материи можно узнать по ее гравитационному воздействию на известную нам барионную материю. Исследование скоплений галактик и галактических кривых вращения свидетельствует о существовании скрытой массы. 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 физики элементарных частиц. Такие частицы должны быть нерелятивистскими, стабильными и плохо взаимодействовать между собой.

По определению темная материя - это материя, которая не взаимодействует с электромагнитным излучением, то есть не испускает его и не поглощает.

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 ($0,4 < H < 1$), G - гравитационная постоянная.

При $\rho > \rho_c$ Вселенная является замкнутой, т.е. гравитационное взаимодействие достаточно сильно для того, чтобы Вселенная начала сжиматься. Суммарная плотность вещества складывается из следующих компонент:

$$\rho = \rho_{\text{radiation}} + \rho_{\text{barions}} + \rho_{DM} + \rho_{\Lambda}$$

Космологическая плотность $\Omega = \rho/\rho_c$, определенная на основе динамики галактических кластеров и суперкластеров, равна $0.1 < \Omega < 0.3$.

С другой стороны, оценка барионной плотности Ω_b по светимости галактик дает значительно меньшую величину: $\Omega_b < 0.05$. Плотность всех трех сортов нейтрино: $\Omega_\nu < 0.01$.

Это несоответствие обычно рассматривается как указание на существование темной материи.

2 Свидетельства существования скрытой массы

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 [1], 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 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.

Так же в пользу существования темной материи служат измерения гравитационного поля в скоплениях галактик. Гравитационное поле скопления искривляет лучи света, испущенные галактикой, находящейся за скоплением, т. е. гравитационное поле действует как линза.

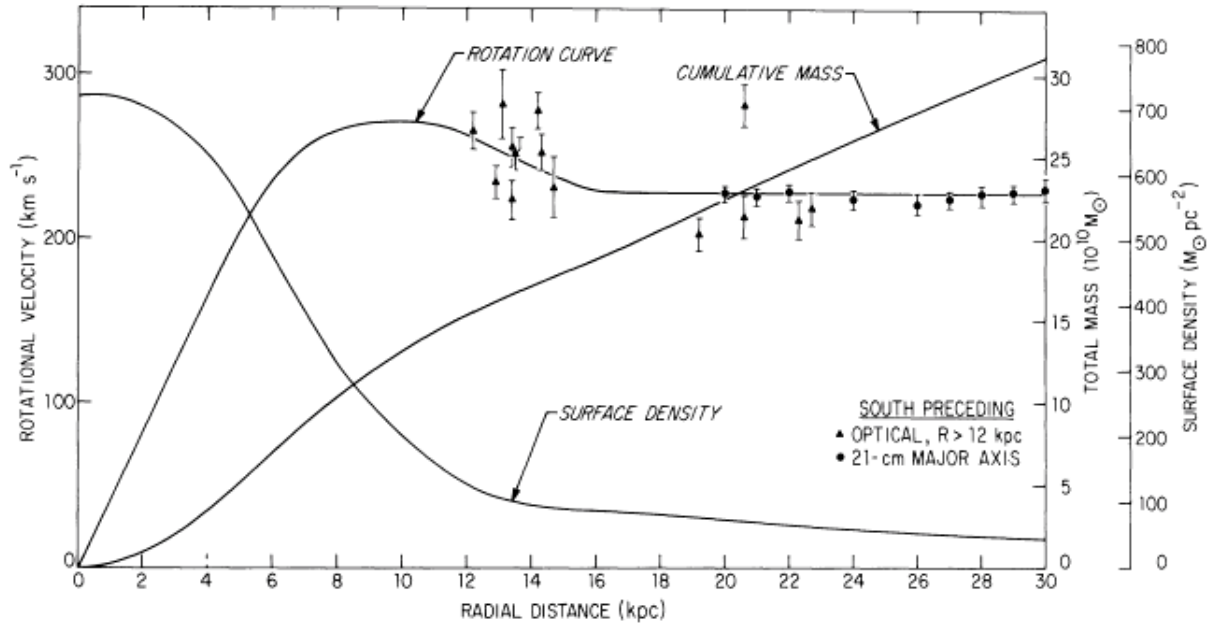


Рис. 1: Кривая вращения для галактики M31

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 массы, чем видно в телескоп.

3 Холодная, горячая и теплая 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».

Горячая тёмная материя (HDM): $T_f > M_x$ Если в момент выхода из равновесия энергия частиц много превышала их массу $M_x \leq 1\text{эВ}$, 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 $M_x \geq 1\text{эВ}$ 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.

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

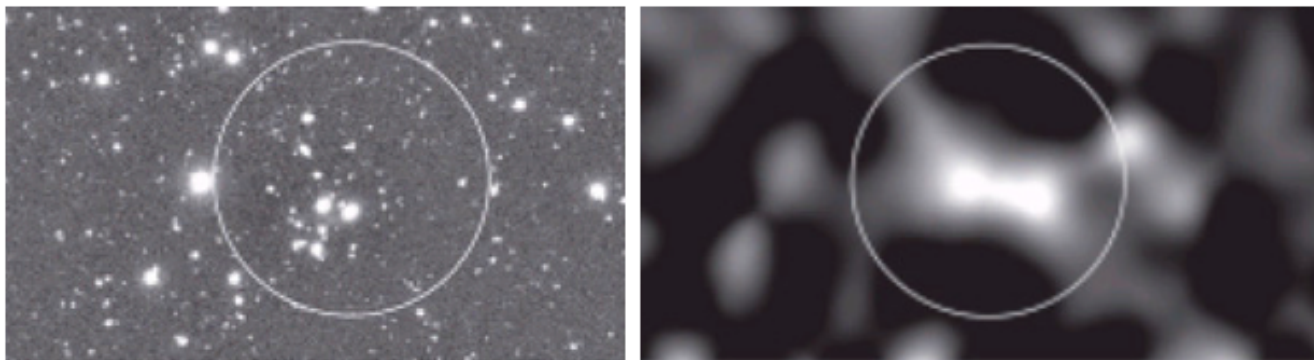


Рис. 2: Слева: Скопление галактик создает гравитационную линзу. Справа: Распределение масс для данного скопления галактик

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 выше 30 КэВ обнаруживает все свойства холодной темной материи.

Однако, с физической точки зрения наиболее обоснованным оказывается сценарий горячая + холодная скрытая масса, чем обычные однопараметрические модели.

4 Кандидаты на роль темной материи

4.1 Барионная 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 ясна не 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.

4.2 Небарионная темная материя

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 вероятность частицам ТМ быть задетектированным меняется в зависимости от времени года. Экспериментальная группа DAMA, сообщает о наблюдаемых годовых вариациях скорости счета сигналов. 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 (LUX, DARK SIDE, XENON и тд), на пузырьковой камере (BubXe) и многих других экспериментах. Сцинтилляционные детекторы нацелены на регистрацию энерговыделения 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 $\sigma_{NX} \sim 10^{-382}$ и массе $M_x = 10$ 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})

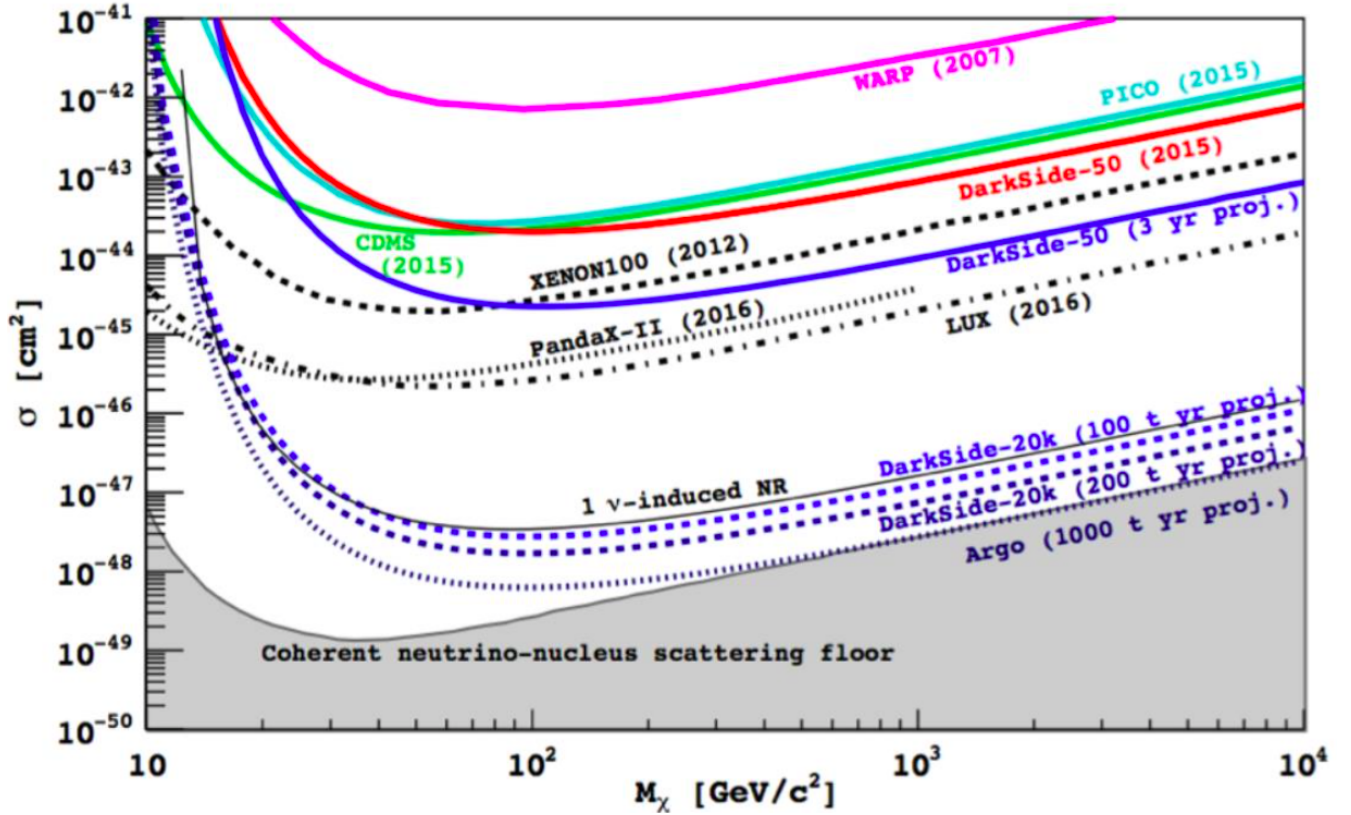


Рис. 3: Области выше кривых показывают соответствуют области параметров, в которых работали или начнут свою работу соответствующие эксперименты

Эксперименты по поиску WIMP активно проводят также на ускорителях элементарных частиц. Ускорив частицу (например, протон) до очень высокой энергии и столкнув ее с другой частицей, 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.

4.2.1 Нейтрино

Для того, чтобы нейтрино могли быть кандидатами на роль темной материи, они должны обладать массой. Для достижения критической плотности Вселенной массы нейтрино долж-

ны лежать в области нескольких ГэВ или в области от 10 до 100 эВ. Для достижения $\Omega/\rho_c = 1$ необходимы нейтринные массы примерно 15-65 эВ. Экспериментальные верхние границы для масс трех известных типов нейтрино: $m(\nu_e) < 2$ эВ, $m(\nu_\mu) < 250$ кэВ, $m(\nu_{\tau\mu}) < 31$ МэВ. Таким образом, электронное нейтрино практически исключается в качестве кандидата на доминирующий компонент темной материи. Нейтрино вышли из состояния термического 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.

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 45 ГэВ. Когда нейтрино с такими большими массами покинули состояние термического равновесия, они уже имели нерелятивистские скорости, поэтому их называют частицами холодной темной материи. Присутствие тяжелых нейтрино могло привести к раннему гравитационному сжатию материи. В этом случае сначала образовались бы более мелкие структуры. Скопления и суперскопления галактик сформировались бы позднее путем аккумуляирования отдельных групп галактик.

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.

Есть ряд экспериментальных данных, такие как свидетельства о пропаже $\bar{\nu}_e$ и ν_e в экспериментах по детектированию нейтрино от ядерных реакторов. Так же эксперименты LSND и MiniBoone по детектированию нейтрино рожденных на ускорителе, 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 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.

В заключение отметим, что есть еще целый ряд кандидатов на роль темной материи – стабильных частиц или других объектов. Среди них: первичные черные дыры, гипотетические, чрезвычайно сильно взаимодействующие частицы, аксино – суперпартнер аксиона, зеркальная материя и многие другие. Для объяснения наблюдаемого количества темной материи параметры соответствующих моделей могут принимать нереалистичные значения или требуются дополнительные предположения. В любом случае, предсказания для плотности ТМ в таких моделях оказываются сильно модельно-зависимыми.

Список литературы

- [1] 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.
- [2] M. Lisanti. – Lectures on Dark Matter Physics arXiv:1603.03797
- [3] Д.С. Горубнов, В.А. Рубаков – "Введение в теорию ранней вселенной. Теория горячего большого взрыва"
- [4] М.Ю. Хлопов – "Основы космомикрoфизики"