

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ И.Я. ПОМЕРАНЧУКА

Зеркальное вещество и другие модели для тёмной материи

С.И. Блинников

Краткий обзор места модели зеркального вещества (Mirror Matter, ММ) в современной картине проблемы тёмной материи (Dark Matter, DM). Модель зеркального вещества была предложена И.Ю. Кобзаревым, Л.Б. Окунем и И.Я. Померанчуком в 1966 г. Зеркальное вещество является старейшим, но до сих пор допустимым кандидатом для описания реальной DM, хотя, возможно, и не в чистом виде. Кратко обсуждаются трудности стандартной Λ CDM-модели, содержащей слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMPs). Указано, где зеркальное вещество могло бы помочь решению некоторых из этих проблем. Зеркальные частицы входят в более широкий класс моделей асимметричной тёмной материи (ADM), в которых частицы DM не аннигилируют, в отличие от суперсимметричных частиц в Λ CDM. Даны ссылки на ограничения в моделях ADM сечений бозонов при их аккреции на нейтронные звёзды. Эти пределы могут быть гораздо ниже экспериментальных пределов для WIMPs.

PACS numbers: 12.60. – i, 95.30. – k, 95.35. + d

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201402h.0194

Содержание

1. Введение (194).
 2. Первая модель тёмной материи: статья Кобзарева, Окуня, Померанчука (1966 г.) (195).
 3. Задачи, возникшие после появления статьи Кобзарева, Окуня, Померанчука (1966 г.) (195).
 - 3.1. Кто ввёл скрытый сектор в тёмную материю.
 - 3.2. Литература последних лет по зеркальной материи.
 - 3.3. Возможные модели тёмной материи.
 - 3.4. Микролинзирование: конец эры MACRO?
 - 3.5. Ограничения на сечения частиц тёмной материи из наблюдений за скоплениями галактик.
 - 3.6. Трудности моделей холодной тёмной материи. Пределы подземных экспериментов и модели асимметричной тёмной материи.
 4. Заключение (198).
- Список литературы (198).

1. Введение

Гипотеза о наличии тёмной материи (Dark Matter, DM) во Вселенной была выдвинута Фрицем Цвикки ещё в 1933 г. В работе [1] Цвикки обнаружил "вириальный

парадокс" в скоплении галактик Кома (в созвездии Волосы Вероники (Coma Berenices)) и предположил, что в скоплении много невидимого вещества. Очень скоро, сразу после публикации статьи Эйнштейна [2] о гравитационном линзировании (которое уже 12 годами ранее рассматривал Хвольсон [3] для обычных звёзд), Цвикки предложил проверять наличие тёмной материи по эффекту гравитационной линзы [4, 5] — теперь это называют макролинзированием.

Для исследований DM очень важно изучение кривых вращения галактик, что тоже предложил Цвикки [6], и вскоре скрытая масса была обнаружена в галактике M31 (Туманность Андромеды) [7].

Однако важные идеи Цвикки и его статьи были забыты почти на полвека. Переоткрытие DM произошло несколько десятилетий спустя, в 1970-е годы. В то время идея тёмной материи была гораздо более популярной в СССР, чем на Западе, где она сначала была встречена с недоверием [8]. Проблема скрытой, или тёмной, массы в галактиках стала острой из-за сильного рассогласования прямых (кинематических) и косвенных (фотометрических) оценок массы галактик (и их систем) [9]. Необходимость DM стала понятна и после открытия в рентгеновском диапазоне огромного количества горячего газа (с температурой порядка 1 кэВ) в скоплениях галактик. Такой газ не может удерживаться в скоплениях гравитацией видимых барионов.

Флуктуации реликтового излучения (Cosmic Microwave Background, CMB) говорят нам, что на момент рекомбинации возмущения барионной материи были очень малы: порядка 10^{-5} при красном смещении $z = z_{\text{rec}} \approx 10^3$. Тогда к нашей эпохе эти флуктуации могли бы возрасти только как масштабный фактор, т.е. как $1 + z_{\text{rec}} \sim 10^3$, и мы получили бы сейчас, при $z = 0$, не

С.И. Блинников. Государственный научный центр Российской Федерации "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова", ул. Б. Черёмушкинская 25, 117218 Москва, Российская Федерация E-mail: sergei.blinnikov@itep.ru

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Университетский просп. 13, 119991 Москва, Российская Федерация Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Российская Федерация

Статья поступила 10 декабря 2013 г.

более 1 % флуктуаций плотности, что полностью противоречит наблюдаемой структуре. Тёмная материя, доминируя в гравитации, может иметь на момент рекомбинации большую амплитуду возмущений и обеспечивать образование структур (см., например, [10]). "Газ" DM должен быть нерелятивистским (холодным), иначе структуры "размоются". Основная модель для DM предполагает холодную тёмную материю (Cold Dark Matter, CDM).

Для изучения DM был развит аппарат не только для гравитационного макролинзирования, но и для "микролинзирования" и "слабого линзирования" [11–15] (см. обзор [16]).

2. Первая модель тёмной материи: статья Кобзарева, Окуня, Померанчука (1966 г.)

В основополагающей статье Кобзарева, Окуня и Померанчука [17] была фактически предложена первая модель DM. Работа [17] была опубликована в 1966 г., когда физики ещё не могли знать, что тёмная материя вскоре станет одной из важнейших задач в космологии и физике элементарных частиц. Побудительные мотивы у авторов были другие: они стремились показать, как может быть восстановлена нарушенная CP -симметрия.

В статье [17] было показано, что если существуют "зеркальные" частицы, восстанавливающие CP -симметрию, то они могут только очень слабо взаимодействовать с обычными частицами. Это именно то, что нужно для объяснения тёмной материи.

Приведём несколько подробных цитат из этой замечательной статьи.

Аннотация из [17]:

"В связи с обнаружением нарушения CP -инвариантности в распаде $K_2^0 \rightarrow 2\pi$ обсуждается возможность существования наряду с обычными частицами (L) "зеркальных" частиц (R), введение которых восстанавливает эквивалентность левого и правого. Показано, что "зеркальные" частицы не могут взаимодействовать с обычными частицами ни сильно, ни полусильно, ни электромагнитно. Допустимо слабое взаимодействие между L- и R-частицами, обусловленное обменом нейтрино. L- и R-частицы должны иметь общее гравитационное взаимодействие. Обсуждается вопрос о существовании макроскопических тел (звёзд) из R-вещества и возможность их обнаружения".

Центральный пункт статьи [17] — это доказательство слабости общего электромагнитного взаимодействия зеркальных и обычных частиц:

"Начнём со случая общего электромагнитного взаимодействия. В рассматриваемой теории должны существовать два π^0 -мезона: π_L^0 и π_R^0 ($\pi_R^0 = -CP\pi_L^0$). При наличии общего фотона возможен переход

$$\pi_R^0 \rightleftharpoons 2\gamma \rightleftharpoons \pi_L^0.$$

Тогда возникнут два состояния:

$$\pi_1^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\pi_R^0 - \pi_L^0), \quad \pi_2^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\pi_R^0 + \pi_L^0),$$

где π_1^0 — CPA -чётен (CA -нечётен), а π_2^0 — CPA -нечётен (CA -чётен). Мы будем считать, что электромагнитное взаимодействие CPA -чётно, P -чётно и, следовательно,

CA -чётно, но не обязательно C -чётно [18, 19]¹. γ -квант по предположению при CA -преобразовании переходит сам в себя. Тогда π_1^0 , который CA -нечётен, не может распадаться на два γ -кванта — ни реальных, ни виртуальных, но может распадаться на три γ -кванта. Так как ширина такого распада мала, то такой π_1^0 -мезон был бы долгоживущим, что противоречит опыту".

Далее было показано, что и общее сильное взаимодействие невозможно. Вывод был сделан довольно пессимистичный:

"Основной результат данной работы, заключающийся в том, что зеркальное вещество может взаимодействовать с обычным только очень слабо и что верхняя граница его концентрации в Солнечной системе не велика, не придаёт дополнительной привлекательности гипотезе о существовании зеркальной материи".

3. Задачи, возникшие после появления статьи Кобзарева, Окуня, Померанчука (1966 г.)

Фактически Кобзарев, Окунь и Померанчук [17] предложили первую модель тёмной материи, которая может содержать много невидимых звёзд. Остроту проблемы DM тогда не осознавали даже астрономы, а тем более физики. Однако вскоре проблема DM стала актуальной, появились предсказания о суперсимметричных частицах, об аксионах. Работы по CDM, состоящей из слабо взаимодействующих массивных частиц (Weakly Interacting Massive Particles — WIMPs), пошли большим потоком. Работ по зеркальной материи заметно меньше. Тем не менее гипотеза о существовании зеркальной материи до сих пор привлекательна при изучении тёмной материи.

Ниже я кратко обсужу некоторые факты, относящиеся к тёмной материи, и связанные с ней вопросы.

3.1. Кто ввёл скрытый сектор в тёмную материю

Часто пишут, что зеркальные частицы ввели Ли и Янг [20] в 1956 г. (см., например, недавнюю статью Павсича [21]). Сам Л.Б. Окунь писал в обзоре 1966 г. [22] в *УФН*: "Гипотеза о существовании зеркальных частиц была выдвинута в работе [20] (см. также Л. Кэрл, "Алиса в Зазеркалье") и подробно обсуждалась в работе [17]".

На самом деле Ли и Янг [20] ввели понятие правых протонов, но их R-вещество (R-matter) не относилось к скрытому сектору, как пишут в некоторых недавних статьях, например в [23].

Точная цитата из [20]:

"... the interaction between them is not necessarily weak. For example, p_R and p_L could interact with the same electromagnetic field and perhaps the same pion field. They could then be separately pair-produced, giving rise to interesting observational possibilities"².

Таким образом, Ли и Янг явно пишут о возможности прямого электромагнитного и сильного взаимодействия

¹ Работы, на которые есть ссылки в приводимой цитате, добавлены в список литературы настоящей статьи и указаны в соответствии с этим списком. (Примеч. ред.)

² "... взаимодействие между ними (протонами) не обязательно должно быть слабым. Например, p_R и p_L могли бы взаимодействовать через одно и то же электромагнитное и даже пионное поле. При этом они могли бы рождаться парами по отдельности, это имело бы интересные наблюдательные перспективы".

между левыми и правыми протонами, а Кобзарев, Окунь и Померанчук показали, что это невозможно, потому что зеркальные частицы "живут" в скрытом секторе, внутри которого микрофизика та же, что в видимом секторе. Термины "зеркальные частицы" и "зеркальное вещество" тоже впервые были введены в [17]. Здесь можно упомянуть статью их предшественников Нишиджимы и Сафури [24], в которой обсуждалась идея "теневого Вселенной" (ghost Universe). В работах Окуня и Померанчука [25, 26] было показано, что предложенная в [24] модель теневого Вселенной резко противоречит результатам нейтринных экспериментов. Существование "тневых" K_1^0 -мезонов, которые должны обладать высокой проникающей способностью, исключалось данными, полученными в нейтринном опыте в ЦЕРНе, где за защитой (25-метровым слоем железа) не было обнаружено никаких аномальных частиц, которые по своим свойствам были бы похожи на "тневые" K_1^0 -мезоны.

Другие пути прихода к концепции зеркальной материи на основе различных соображений рассмотрены в [27, 28].

3.2. Литература последних лет по зеркальной материи

Подробный обзор по состоянию на 2007 г. дал Л.Б. Окунь в УФН [29]. Оптимистичный взгляд на проблему предлагает З.К. Силагадзе [30]. Много статей публикует Р. Фут (см., например, [31, 32]), из самых последних его работ можно выделить [33]. Эта работа объясняет, как образуется структура галактик при учёте диссипации в ММ.

Интересно развитие модели с точки зрения фундаментальной физики, предложенное в серии статей [34–36].

В контексте асимметричной тёмной материи (ADM) модель зеркальных частиц обсуждается в [37] (см. подробнее об ADM в разделе 3.6).

П. Чиарчеллутти опубликовал обзор [38], в котором обсуждаются работы по возрастанию возмущений, СМВ и образованию крупномасштабной структуры при учёте зеркальной материи в качестве DM (см. работу З. Бережани и др. [39] на эту тему).

Об астрофизических аспектах, в частности о нагреве нейтронных звёзд частицами ММ [40], см. также обзор [41].

3.3. Возможные модели тёмной материи

Из множества кандидатов в частицы DM наиболее подробно обсуждались следующие:

- WIMPs — суперсимметричные частицы (нейтрально для тяжёлых частиц или гравитино для более лёгких частиц) и их скопления;
- аксионо-подобные частицы и объекты;
- зеркальные частицы и объекты. Эти кандидаты в частицы DM не так популярны сейчас, как два первых, но являются старейшими из всех предложенных моделей и до сих пор, на удивление, полезными.

Пока в подземных лабораториях, нацеленных на поиски WIMPs, не обнаружено никаких достоверных сигналов! Это стимулирует поиски моделей, альтернативных WIMPs (см. раздел 3.6), в том числе ММ.

У нейтрально и аксионов есть электромагнитные взаимодействия (на слабом масштабе). Зеркальная материя в чистом виде не участвует в электромагнитных взаимодействиях с обычной материей (ОМ) (или в других взаимодействиях Стандартной модели). Только

гравитация у нас общая. ММ имеет аналоги всех "наших" взаимодействий в зеркальном секторе. Помимо таких моделей ММ, предложены варианты с немного нарушенной зеркальной симметрией, которые имеют слабую электромагнитную связь с ОМ (см., например, [31, 32]). Многообразие других возможностей и осцилляций рассмотрено в [42].

Кратко перечислим некоторые предсказания о возможных свойствах ММ в "чистом" варианте, без примеси электромагнитных взаимодействий или осцилляций.

— В принципе ММ способна заменить холодную тёмную материю (CDM) в космологической эволюции [43–45]), если $T_{MM} < 0,3 T_{OM}$ в ранней Вселенной.

— ММ-барионы могут образовывать компактные объекты со звёздными массами и размерами.

— Зеркальные звёзды должны быть невидимыми, но должны давать эффект микролинзирования (см. раздел 3.4).

— Из-за снижения T_{MM} в космологическом нуклеосинтезе производится большая доля зеркального гелия, чем в ОМ, следовательно, быстрее проходит звёздная эволюция и может быть ниже доля ММ-межгалактического газа.

— Возможны жизнь и интеллект в ММ [29].

3.4. Микролинзирование: конец эры MACHO?

Гравитационное микролинзирование может происходить как на видимых, так и на невидимых звёздах — MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects). Это явление в связи с ММ впервые обсуждали Бережани, Долгов и Мохпатра [46], а также Блинников [47]).

3.4.1. Эксперименты MACHO, EROS, AGAPE, MEGA, OGLE: противоречивые результаты. Группа MACHO [48] по наблюдениям в Большом Магеллановом Облаке (БМО) получила, что компактные объекты MACHO в диапазоне масс $0,15 M_{\odot} < M < 0,9 M_{\odot}$ вносят вклад f в гало DM на уровне $0,08 < f < 0,50$ (95 % CL).

Беннетт из группы MACHO [49] утверждал, что MACHO реально наблюдались в их эксперименте.

Коллаборация EROS (Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres) наложила только верхний предел $f < 0,2$ (95 % CL) для объектов в этой области масс, а EROS-2 [50] даёт $f < 0,1$ для $10^{-6} M_{\odot} < M < 1 M_{\odot}$.

Коллаборация AGAPE (Andromeda Gravitational Amplification Pixel Experiment) [51], которая искала MACHO в галактике M31 (Андромеда), получила их долю в диапазоне $0,2 < f < 0,9$, тогда как группа MEGA (Microlensing Exploration of the Galaxy and Andromeda) [52] устанавливает верхний предел $f < 0,3$, что несколько противоречит результату AGAPE.

Подробный разбор запутанной ситуации с результатами разных групп дан в [53]. Из более новых работ отметим результаты [54] EROS-2 и OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) в направлении Малого Магелланова Облака: на уровне достоверности 95 % получено $f < 0,1$ для MACHO с массой $10^{-2} M_{\odot}$ и $f < 0,2$ для MACHO массой $0,5 M_{\odot}$.

Последние данные по микролинзированию в других аспектах рассмотрены в [55].

3.4.2 Разрушение широких пар видимых звёзд. Эванс и Белокуров [56] критикуют статьи серии "Конец эры

МАСНО (1974–2004)", в которой появилась работа [57], утверждавшая, что широкие пары видимых звёзд должны разрушаться при пролёте невидимых МАСНО вблизи них. В дополнение к критике из [56] можно указать, что необходимо учитывать не только процесс разрушения, но и обратный процесс создания пар видимых звёзд из ранее не связанных гравитацией отдельных звёзд.

Вероятность микролинзирования [13, 58] естественным образом измеряется так называемой оптической глубиной τ . Эванс и Белокуров [56] подтвердили меньшее число компактных объектов в направлении БМО, чем получено группой МАСНО, т.е. $\tau < 0,36 \times 10^{-7}$, в согласии с результатами EROS [50]. Позднее появилась статья [59], в которой на основе исследований двойных звёзд приведены аргументы в пользу наличия МАСНО и против пессимистических выводов [57].

Общая масса гало DM в Галактике не может объясняться невидимыми звёздами, следовательно, более вероятно, что DM состоит из комбинаций CDM + MM или WDM + MM, где WDM (Warm Dark Matter) — тёплая тёмная материя — может состоять, например, из стерильных нейтрино (с массой несколько кэВ) или гравитино (см., например, [60, 61]).

3.5. Ограничения на сечения частиц тёмной материи из наблюдений за скоплениями галактик

3.5.1. Скопление 1E0657-56. Скопление галактик 1E0657-56 (получившее название Пуля (Bullet) — по форме облака) образовалось в результате столкновения двух меньших скоплений галактик. Это чётко видно по рентгеновским изображениям. Наблюдения этого скопления дают важные ключи к доказательству реальности DM. Эти наблюдения трудно объяснить без наличия DM в альтернативных моделях, таких как модифицированная ньютоновская динамика (MOND) или модифицированная гравитация (MG). В этом скоплении светящийся в рентгеновском диапазоне газ, содержащий основную массу барионов скопления, отделён от основной массы DM, обнаруживаемой по эффектам гравитационного линзирования. Это доказывает бесстолкновительность частиц DM либо то, что DM образует связанные объекты (типа астероидов или звёзд), которые уже представляют собой бесстолкновительную систему, как и обычные звёзды в галактиках.

3.5.2. Скопление MACS J0025.4-1222. По наблюдениям за скоплением MACS J0025.4-1222, которое очень похоже на скопление Пуля, получено, что сечение самодействия частиц DM не более $\sigma/m < 4 \text{ см}^2 \text{ г}^{-1}$ [62]. Для масс порядка нескольких ГэВ предел меньше, чем сечение для столкновений обычных атомов. Но этот предел будет верным для частиц тёмной материи, только если они не образуют связанных объектов! Если большая доля DM представляет собой что-то вроде наших нормальных твёрдых тел, скажем кусков льда плотностью $\sim 1 \text{ г см}^{-3}$ и размером r , большим нескольких сантиметров, то это ограничение очень легко выполняется, так как сечение σ возрастает $\propto r^2$, а масса $\propto r^3$.

Так что, если свойства частиц тёмной материи подобны свойствам наших частиц и частицы DM способны формировать звёзды, планеты, астероиды и т.д. (например, как MM), то все наблюдения сталкивающихся скоплений галактик воспроизводятся при большом сече-

нии самодействия. Тем не менее нужно перевести большую часть частиц DM в компактные объекты, не оставляя большой доли в виде газа.

3.5.3. DM в скоплении Абель 520. DM в скоплении Абель (Abell) 520 трудно объяснить в модели WIMPs. Положение DM по линзированию и источник рентгеновского излучения, в отличие от таковых в скоплении Пуля, здесь совпадают, причём они смещены по отношению к распределению галактик. Это говорит о том, что DM является столкновительной, как обычный газ: "...максимум в распределении массы без галактик нельзя просто объяснить в общепринятой парадигме бесстолкновительной тёмной материи" [63]. В MM-модели мы получаем такое поведение DM, если значительная доля DM осталась в виде газа. Модели зеркальной материи богаче, чем модели WIMPs, и для первых естественно ожидать различного поведения [30].

3.6. Трудности моделей холодной тёмной материи.

Пределы подземных экспериментов и модели асимметричной тёмной материи

Аргументы в пользу модели, наиболее популярной в настоящее время, — модели Λ CDM (холодной тёмной материи) — сильны. Например, ещё Эддингс [64] изучал влияние местной группы галактик на поле скоростей. Согласно современным исследованиям, хорошо видны следы падения DM в фазовой плоскости расстояние — скорость [65–67], в соответствии с предсказаниями Λ CDM-модели.

Трудности Λ CDM-модели обсуждает Долгов в статье [68], опубликованной в этом выпуске *УФН*. В частности, одной из проблем является нехватка карликовых галактик-спутников больших галактик. Λ CDM-модель предсказывает на порядок больше спутников галактик, чем наблюдается. Теория CDM предсказывает, кроме того, сингулярное распределение материи в центрах галактик — наличие острого каспа (cusp). Между тем считается, что наблюдается гладкий профиль, хотя ситуация в наблюдениях пока не очевидна [69].

Интересные результаты получены в Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО) относительно пустот в окружающем нас пространстве и нехватки тёмной материи [70–72]. Это не так просто понять в Λ CDM-модели.

К этому добавляет много других проблем П. Крупа [73]. Например, спутники в нашей Галактике и М31 имеют тенденцию образовывать дисковое распределение. В CDM следовало ожидать изотропно-хаотического распределения, а MM может разрешить эту проблему (см. обсуждение в [74]).

3.6.1. Подземные детекторы. В настоящее время работает несколько установок, нацеленных на прямое обнаружение WIMPs, в частности CDMS (Cryogenic Dark Matter Search), DAMA (DARK MATter), Xenon, LUX (Large Underground Xenon dark matter experiment). Обзоры методов, установок, а также соответствующие ссылки можно найти, например, в [75, 76].

Недавние результаты установки LUX [77] дали самые сильные ограничения на сечения. На уровне достоверности 90 % минимальный верхний предел сечения упругого рассеяния WIMP на нуклоне составил $7,6 \times 10^{-46} \text{ см}^2$ при массе WIMP 33 ГэВ. Этот результат перекрыл все другие

пределы и намёки на обнаружение WIMPs в других установках. Он является мощным стимулом для разработки моделей с частицами, совсем слабо взаимодействующими с обычными нуклонами. Именно к таким моделям и относится MM.

3.6.2. Асимметричная тёмная материя. Плотность реликтовых WIMPs в обычных моделях CDM объясняется закалкой в расширяющейся горячей Вселенной при правильном выборе их масс и сечений аннигиляции [78, 79]. Модели асимметричной тёмной материи исходят из совсем другого предположения: в них полагается, что в плотности частиц и античастиц DM в горячей Вселенной порождается асимметрия, аналогичная барион-антибарионной асимметрии обычного вещества [37, 80]. К этому классу относится и зеркальная материя, так как зеркальные барионы так же асимметричны зеркальным антибарионам, как и наши обычные барионы — обычным антибарионам. В свете сильных ограничений, полученных в экспериментах на установке LUX [77], чистая MM становится привлекательной, поскольку зеркальные барионы не должны давать никаких сигналов в подземных детекторах.

Но развиты и другие варианты ADM-моделей, например бозонные [37, 80, 81], в которых сечения ненулевые, однако могут быть намного меньше пределов LUX. Сильные ограничения получаются на бозонную ADM при рассмотрении аккреции бозонов ADM на нейтронную звезду, так как предельная масса холодной бозонной звезды в m_{Pl}/m раз меньше чандрасекаровского предела для фермионных звёзд [82]. Здесь m_{Pl} — планковская масса, m — масса частицы, определяющей самогравитацию звезды. Если масса бозона m порядка 1 ГэВ, то предельная масса на 19 порядков меньше массы Солнца. Накопление столь малого количества бозонов ADM внутри нейтронной звезды может привести к образованию чёрной дыры в её центре, которая поглотит всю нейтронную звезду. Это позволяет получать сильные ограничения на сечения бозонов в ADM [81].

Обзор различных моделей DM с новой физикой дан, например, в [83].

4. Заключение

До настоящего времени сохраняется мотивация для поисков зеркальной материи. Приведём основные аргументы.

— Слабовзаимодействующие массивные частицы (WIMPs) до сих пор не обнаружены.

— Свойства частиц тёмной материи по отношению к кластеризации на масштабах звёздных размеров и масс неизвестны.

— Существует проблема микролинзирования: нормальных звёзд не хватает, чтобы объяснить все события (хотя общая масса DM-гало не может объясняться невидимыми звёздами).

— Наблюдаются скопления галактик, такие как Абель 520, которые трудно объяснить в картине чистой CDM [30].

— Имеются и другие трудности в моделях CDM, которые может объяснить MM [74].

— Обнаружены новые виды таинственных нестационарных источников — "транзиентов", — описанных в [84].

В заключение можно сделать следующие выводы:

- зеркальное вещество (MM) до сих пор является полезной моделью DM, которая показывает, как многообразно может быть устроен мир в секторе тёмной материи;

- наблюдатели микролинзирования не пришли к согласию, но ясно, что DM в гало Млечного Пути может содержать не более $\sim 20\%$ невидимых звёзд;

- расчёты возрастания возмущений на линейной стадии с учётом MM уже проведены: MM может дать нужные возмущения для роста структур в барионном веществе [43–45] — но здесь требуется независимая проверка.

- нельзя использовать пределы сечений самодействия индивидуальных частиц DM, полученные из наблюдений сталкивающихся скоплений: такие частицы могут образовывать макроскопические тела.

Список литературы

1. Zwicky F *Helv. Phys. Acta* **6** 110 (1933)
2. Einstein A *Science* **84** 506 (1936)
3. Chwolson O *Astron. Nachricht.* **221** 329 (1924)
4. Zwicky F *Phys. Rev.* **51** 290 (1937)
5. Zwicky F *Phys. Rev.* **51** 679 (1937)
6. Zwicky F *Astrophys. J.* **86** 217 (1937)
7. Babcock H W *Lick Observ. Bull.* **19** 41 (1939)
8. Einasto J, arXiv:0901.0632
9. Zasov A V, in *Dark Matter, Dark Energy and Their Detection, Conf., Novosibirsk, Russia, July 22–26, 2013*
10. Гуревич А В, Зыбин К П *УФН* **165** 723 (1995) [Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Usp.* **38** 687 (1995)]
11. Refsdal S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **128** 295 (1964)
12. Liebes S (Jr.) *Phys. Rev.* **133** B835 (1964)
13. Бялко А В *Астрон. журн.* **46** 998 (1969) [Byalko A V *Sov. Astron.* **13** 784 (1970)]
14. Gurevich A V, Zybin K P, Sirota V A *Phys. Lett. A* **214** 232 (1996)
15. Гуревич А В, Зыбин К П, Сирота В А *УФН* **167** 913 (1997) [Gurevich A V, Zybin K P, Sirota V A *Phys. Usp.* **40** 869 (1997)]
16. Zakharov A F *Phys. Part. Nucl.* **39** 1176 (2008)
17. Кобзарев И Ю, Окунь Л Б, Померанчук И Я *ЯФЗ* **3** 1154 (1966) [Kobzarev I Yu, Okun L B, Pomeranchuk I Ya *Sov. J. Nucl. Phys.* **3** 837 (1966)]
18. Bernstein J, Feinberg G, Lee T D *Phys. Rev.* **139** B1650 (1965)
19. Barshay S *Phys. Lett.* **17** 78 (1965)
20. Lee T D, Yang C N *Phys. Rev.* **104** 254 (1956)
21. Pavšič M, arXiv:1310.6566
22. Окунь Л Б *УФН* **89** 603 (1966) [Okun' L B *Sov. Phys. Usp.* **9** 574 (1967)]
23. Feng J L, Tu H, Yu H-B *JCAP* (10) 43 (2008); arXiv:0808.2318
24. Nishijima K, Saffouri M H *Phys. Rev. Lett.* **14** 205 (1965)
25. Окунь Л Б, Померанчук И Я *Письма в ЖЭТФ* **1** 28 (1965) [Okun' L B, Pomeranchuk I Ya *JETP Lett.* **1** 167 (1965)]
26. Okun L B, Pomeranchuk I Ya *Phys. Lett.* **16** 338 (1965)
27. Pavšič M *J. Theor. Phys.* **9** 229 (1974)
28. Foot R, Lew H, Volkas R R *Phys. Lett. B* **272** 67 (1991)
29. Окунь Л Б *УФН* **177** 397 (2007) [Okun' L B *Phys. Usp.* **50** 380 (2007)]; hep-ph/0606202
30. Silagadze Z K, arXiv:0808.2595
31. Foot R *Int. J. Mod. Phys. D* **13** 2161 (2004); astro-ph/0407623
32. Foot R *Phys. Rev. D* **78** 043529 (2008); arXiv:0804.4518
33. Foot R *Phys. Rev. D* **88** 023520 (2013); arXiv:1304.4717
34. Das C R et al. *Phys. Rev. D* **84** 063510 (2011); arXiv:1101.4558
35. Das C R et al. *Phys. Lett. B* **696** 138 (2011); arXiv:1010.2744
36. Das C R, Laperashvili L V, Tureanu A *Int. J. Mod. Phys. A* **28** 1350085 (2013); arXiv:1304.3069
37. Petraki K, Volkas R R *Int. J. Mod. Phys. A* **28** 1330028 (2013); arXiv:1305.4939
38. Ciarcelli P *Int. J. Mod. Phys. D* **19** 2151 (2010); arXiv:1102.5530
39. Berezhiani Z et al. *Int. J. Mod. Phys. D* **14** 107 (2005); astro-ph/0312605

40. Sandin F, Ciarcelluti P *Astropart. Phys.* **32** 278 (2009); arXiv:0809.2942
41. Blinnikov S I *ЯФ* **73** 619 (2010) [*Phys. Atom. Nucl.* **73** 593 (2010)]; arXiv:0904.3609
42. Sarrazin M, Petit F *Eur. Phys. J. C* **72** 2230 (2012); arXiv:1208.2014
43. Ciarcelluti P *Int. J. Mod. Phys. D* **14** 187 (2005); astro-ph/0409630
44. Ciarcelluti P *Int. J. Mod. Phys. D* **14** 223 (2005); astro-ph/0409633
45. Ciarcelluti P *AIP Conf. Proc.* **1241** 351 (2010); arXiv:0911.3592
46. Berezhiani Z G, Dolgov A D, Mohapatra R N *Phys. Lett. B* **375** 26 (1996); hep-ph/9511221
47. Blinnikov S I, astro-ph/9801015
48. Alcock C et al. *Astrophys. J.* **542** 281 (2000); astro-ph/0001272
49. Bennett D P *Astrophys. J.* **633** 906 (2005); astro-ph/0502354
50. Tisserand P et al. *Astron. Astrophys.* **469** 387 (2007); astro-ph/0607207
51. Riffeser A, Seitz S, Bender R *Astrophys. J.* **684** 1093 (2008); arXiv:0805.0137
52. Ingrosso G et al. *Astron. Astrophys.* **462** 895 (2007); astro-ph/0610239
53. Moniez M *Gen. Relat. Grav.* **42** 2047 (2010); arXiv:1001.2707
54. Calchi Novati S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **435** 1582 (2013); arXiv:1308.4281
55. Mao S *Res. Astron. Astrophys.* **12** 947 (2012); arXiv:1207.3720
56. Evans N W, Belokurov V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **374** 365 (2007)
57. Yoo J, Chanamé J, Gould A *Astrophys. J.* **601** 311 (2004); astro-ph/0307437
58. Paczynski B *Astrophys. J.* **304** 1 (1986)
59. Quinn D P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **396** L11 (2009); arXiv:0903.1644
60. Gorbunov D, Khmel'nitsky A, Rubakov V *JHEP* (12) 055 (2008); arXiv:0805.2836
61. Gorbunov D, Khmel'nitsky A, Rubakov V *JCAP* (10) 041 (2008); arXiv:0808.3910
62. Bradač M et al. *Astrophys. J.* **687** 959 (2008); arXiv:0806.2320
63. Mahdavi A et al. *Astrophys. J.* **668** 806 (2007); arXiv:0706.3048
64. Sandage A *Astrophys. J.* **307** 1 (1986)
65. Sikivie P, Tkachev I I, Wang Y *Phys. Rev. Lett.* **75** 2911 (1995); astro-ph/9504052
66. Sikivie P, Tkachev I I, Wang Y *Phys. Rev. D* **56** 1863 (1997); astro-ph/9609022
67. Dolag K, Dolgov A D, Tkachev I I *Письма в ЖЭТФ* **96** 844 (2012) [*JETP Lett.* **96** 754 (2012)]; arXiv:1210.8009
68. Долгов А Д *УФН* **184** (2) (2014) [Dolgov A D *Phys. Usp.* **57** (2) (2014)]
69. Щелканова Г А, Блинные С И, Сабурова А С, Долгов А Д *Письма в Астрон. журн.* **39** 743 (2013) [Shchelkanova G A, Blinnikov S I, Saburova A S, Dolgov A D *Astron. Lett.* **39** 665 (2013)]
70. Караченцев И Д и др. *Астрофиз. бюлл.* **67** 129 (2012) [Karachentsev I D *Astrophys. Bull.* **67** 123 (2012)]; arXiv:1204.3377
71. Караченцев И Д *Астрофиз. бюлл.* **67** 367 (2012) [Karachentsev I D et al. *Astrophys. Bull.* **67** 353 (2012)]; arXiv:1210.6571
72. Элыив А А и др. *Астрофиз. бюлл.* **68** 1 (2013) [Elyiv A A et al. *Astrophys. Bull.* **68** 1 (2013)]; arXiv:1302.2369
73. Kroupa P *Publ. Astron. Soc. Australia* **29** 395 (2012); arXiv:1204.2546
74. Foot R, Silagadze Z K *Phys. Dark Univ.* **2** 163 (2013); arXiv:1306.1305
75. Akimov D *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **628** 50 (2011)
76. Pospelov M *Phys. Rev. D* **84** 085008 (2011); arXiv:1103.3261
77. Akerib D S et al. (LUX Collab.), arXiv:1310.8214
78. Lee B W, Weinberg S *Phys. Rev. Lett.* **39** 165 (1977)
79. Высоцкий М И, Долгов А Д, Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **26** 200 (1977) [Vysotskii M I, Dolgov A D, Zel'dovich Ya B *JETP Lett.* **26** 188 (1977)]
80. Zurek K M, arXiv:1308.0338
81. Kumar J, arXiv:1308.4513
82. Goldman I, Nussinov S *Phys. Rev. D* **40** 3221 (1989)
83. Gardner S, Fuller G M *Prog. Part. Nucl. Phys.* **71** 167 (2013); arXiv:1303.4758
84. Barbary K et al. *Astrophys. J.* **690** 1358 (2009); arXiv:0809.1648

Mirror matter and other dark matter models

S.I. Blinnikov

*Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, Russian Federation State Scientific Center,
ul. B. Cheremushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russian Federation*

E-mail: sergei.blinnikov@itep.ru

*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University,
Universitetskii prosp. 13, 119991 Moscow, Russian Federation;*

*Novosibirsk State University,
ul. Pirogova 2, 630090 Novosibirsk, Russian Federation*

This state-of-the-art review briefly discusses the role of the mirror matter (MM) model in the context of the dark matter (DM) problem. First proposed in 1966 by I.Yu. Kobzarev, L.B. Okun, and I.Ya. Pomeranchuk, MM is the oldest but still viable candidate — admittedly with some modifications — for describing real DM. The difficulties of standard Λ CDM model with WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) are outlined, and situations where mirror matter could be helpful in resolving some of them are identified. Mirror particles are a subclass of a wider set of ADM (Asymmetric DM, where DM particles do not annihilate, unlike supersymmetric particles in Λ CDM). References on limits for cross-sections of ADM model bosons accreting onto neutron stars are provided. They can be much lower than experimental limits for WIMPs.

PACS numbers: **12.60. -i, 95.30. -k, 95.35. +d**

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201402h.0194

Bibliography — 84 references

Received 10 December 2013

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **184** (2) 194–199 (2014)

Physics – Uspekhi **57** (2) (2014)