

ТЁМНОЕ ЗАЗЕРКАЛЬЕ

Когда мы смотрим на окружающий мир, нам кажется, что мы видим всё. Ну, или почти всё. На самом деле это совсем не так, уверены астрофизики: мир полон невидимой тёмной материей. Более того, рядом с нами может существовать целый параллельный зеркальный мир, образно названный теневым. Какие частицы его наполняют? Может ли он быть отчасти видимым?

Рассказывает доктор физико-математических наук **Сергей БЛИННИКОВ**, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ.

Беседу ведёт Наталия Лескова.

— **Сергей Иванович, о загадочной тёмной материи сейчас слышали даже школьники, но никто толком не понимает, что это такое. А вы понимаете?**

— Нет. К сожалению, пока мировая наука этого не понимает. Некоторые учёные даже считают, что нет никакой тёмной материи, а есть модифицированная гравитация. И у сторонников этой гипотезы, и у её противников есть свои аргументы, хотя наиболее весомые — за тёмную материю.

— Вы не сомневаетесь в существовании тёмной материи?

— Я не сомневаюсь. Она должна существовать. А не верю, что все эффекты тёмной материи можно объяснить просто модификацией гравитации, потому что эффектов много. А вот различные модели тёмной материи способны многое объяснить.

— **О каких эффектах речь?**

Началось всё с парадокса Фрица Цвикки, который 90 лет назад первым в мире обнаружил, что суммарная масса видимых галактик в сверхскоплении галактик Coma (названо по созвездию Волосы Вероники, на латыни Coma Berenices) совершенно недостаточна для того, чтобы удержать их внутри скопления за счёт гравитации, поскольку их скорости достигают 1000 км/с. Для снятия этого парадокса он уже тогда использовал скрытую массу, которую называл **Dunkle Materie** («тёмная материя» по-немецки). Его открытие забыли почти на 40 лет, но в 1970-е годы возникла рентгеновская астрономия, она обнаружила огромные количества газа во всех скоплениях галактик. Газ оказался с температурой в несколько миллионов градусов. Такой горячий газ нельзя удержать в скоплениях даже с учётом его массы, он должен был бы давно испариться (как водород испарился из атмосферы планет земной группы). Тут-то вспомнили про Цвикки и тёмную материю.

Самый важный эффект — образование структур во Вселенной. Без тёмной материи их и, соответственно, нас с вами не было бы. По наблюдениям реликтового фонового излучения мы видим, что его отклонения от среднего значения или возмущения плотности (2,7 К) совсем ничтожны: на уровне

нескольких микрокельвинов. Отсюда следует, что 13–14 миллиардов лет назад, на момент рекомбинации водорода, возмущения плотности вещества также были очень малы, на уровне одной стотысячной. С тех пор расстояния во Вселенной выросли почти в тысячу раз, и теория эволюции малых возмущений показывает, что контраст плотности мог бы вырасти не более чем в тысячу раз. Это означает, что возмущения от современного среднего значения плотности не превышали бы нескольких процентов.

— То есть никаких галактик, звёзд и планет, а значит, и людей не могло бы существовать?

— Именно. Сейчас во Вселенной в среднем плотность 10^{-29} г/см³. Эта оценка следует из экспериментального факта, что в настоящее время Вселенная практически плоская. Данное значение учитывает все виды энергии: барионы, тёмную материю и тёмную энергию. В барионной материи (то есть в обычном веществе) имеем примерно 10^{-31} г/см³. А в звёздах, в планетах плотность на **30** порядков больше (в нейтронных звёздах — на **45** порядков больше). Получается, что без учёта тёмной материи возмущения до нужных значений не нарастали. Дело в том, что возмущения в тёмной материи до рекомбинации водорода могли быть гораздо больше, чем возмущения плотности обычного вещества. Сгустки тёмной материи быстро уплотнялись, и созданные ими гравитационные ямы «падали» наше обычное вещество и очень сильно сжималось. Так и возник окружающий нас мир — со звёздами, планетами и животными...

Кроме того, есть отклонение света квазаров гравитацией от скоплений галактик, в результате чего мы видим множественные изображения одного и того же квазара. Это называют сильным гравитационным линзированием. Такое явление невозможно в общей теории относительности, если учитывать только видимое вещество. Его на порядок меньше, чем нужно для такого гравитационного линзирования.

А есть ещё эффекты столкновения скоплений галактик, как, например, в знаменитом скоплении галактик Пуля. Когда одно скопление газа пролетает через другое, оно порождает мощную ударную волну как от сверхзвукового реактивного самолёта. И газ тормозится. Но основные массы этих скоплений прошли друг сквозь друга без возмущения — значит, они реально не взаимодействуют и состоят из тёмной материи.

— Вы упоминали модифицированную гравитацию. Что это такое и чем она не устраивает астрофизиков?

— Это альтернативная теория гравитации, позволяющая объяснить некоторые эффекты без использования тёмной материи. Ньютоновская гравитация была скалярной теорией — достаточно было знать только одно число в зависимости от положения в пространстве, чтобы все эффекты описать. Но эта теория была неполной, то есть она не учитывала наличие в природе конечной скорости распространения всех сигналов, поэтому пришла в противоречие с

экспериментом. Первой успешной релятивистской теорией гравитации оказалась тензорная Общая теория относительности Эйнштейна — в ней в каждой точке нужно знать 10 чисел.

В 1982 году израильский физик **Мордехай Милгром** создал теорию, которую назвал **MOND** — модифицированная динамика Ньютона (**Modified Newtonian Dynamics**), но это была подгонка, а не настоящая физическая теория. Как должны знать выпускники средней школы, все скорости относительные, а ускорение в некотором смысле абсолютно: начнём двигаться с какой-то скоростью, и в нашей системе отсчёта все скорости изменятся, но ускорения останутся прежними. Так вот, гравитация массивных звёзд, по ньютоновской (и эйнштейновской) теории на расстоянии R от самого центра масс производит гравитационное ускорение $g = GM/R^2$ (здесь M — масса, а G — гравитационная постоянная. — Прим. ред.). Это то самое g , которое и в школе изучают, — ускорение свободного падения. Для нас важнее, что это мера напряжённости гравитационного поля. Однако в MOND формула $g = GM/R^2$ работает, только пока g больше предельного значения, приблизительно равного $1,2 \times 10^{-8} \text{ см/с}^2$. А далее по MOND оно спадает просто как $1/R$. То есть начинает спадать медленнее. Для Солнца переход на MOND-овский закон $1/R$ происходит на долях парсека. Для массивной галактики этот переход осуществляется на нескольких десятках килопарсек. Это объясняет наблюдаемую скорость обращения звёзд вокруг центров галактик на больших расстояниях.

Но MOND не может одновременно объяснить отклонение света квазаров в скоплениях галактик, парадокс Цвикки в скоплениях галактик и температуру газа в них. В каждом случае нужны разные параметры. Если, например, подогнать параметры для объяснения нашего с вами существования, то есть сделать так, чтобы в ранней Вселенной возмущения обычного вещества нарастали бы сильнее, чем в обычной гравитации без возмущений тёмной материи, то тогда не объясняются эффекты типа вращения галактик (парадокс Цвикки).

Позже другой израильский физик Яков Бекенштейн, который знаменит термодинамикой чёрных дыр, создал более полную теорию модифицированной гравитации. Не вдаваясь в подробности, скажем, что теория Бекенштейна — тензорно-векторно-скалярная, поэтому он назвал её TeVeS-теорией (несколько позже канадский физик Джон Моффат предложил скалярно-векторно-тензорную теорию). В теории Бекенштейна чуть больше параметров, чем в MOND, но всё, что нужно от тёмной материи, она тоже не может объяснить. Его теория полностью удовлетворяет эстетическим запросам теоретиков-релятивистов. Но астрофизиков она не удовлетворяет, поскольку предсказывает скорость распространения гравитационных волн, которая заметно отличается от скорости света, а астрономы по зарегистрированному гравитационно-волновому всплеску GW170817 видят, что скорости совпадают, так как одновременно наблюдалась гамма-вспышка GRB170817A (кстати, со свойствами, предсказанными нами ещё в 1984—1990 годах).

Я не верю, что все эффекты тёмной материи можно объяснить просто модификацией гравитации, но в том, что модификация гравитации не нужна, я могу сомневаться. Если гравитация описывается Общей теорией относительности, модификация наверняка должна быть: там ещё не проведено квантование (квантовать поле — это дать рецепт, как получить частицы, кванты из классических уравнений непрерывного поля). В своё время электродинамика также была чисто классической, незавершённой, но потом появилась квантовая теория поля. Гравитация до сих пор не поддаётся квантованию, это оказалось гораздо сложнее сделать. Кроме того, в ней могут быть отклонения от общей теории относительности как на малых, так и на больших расстояниях. Так или иначе, некоторые учёные пытаются изменить Общую теорию относительности на больших масштабах таким образом, чтобы гравитационные силы слабели с расстоянием гораздо медленнее, чем предсказывал Ньютон. Теоретически это не запрещено.

— Что же такое тёмная материя?

— Для объяснения тёмной материи сначала чисто эмпирически были предложены ВИМПы (WIMP — weakly interacting massive particle, слабо взаимодействующая массивная частица). Физики-теоретики совсем из других побуждений придумали супертсимметрию — любому нашему фермиону может соответствовать новый, ещё не открытый бозон, а любому нашему бозону — новый фермион. Потом оказалось, что некоторые супертсимметричные частицы обладают нужными свойствами ВИМПов. А наличие какой-нибудь подходящей супертсимметричной частицы может объяснить все эффекты тёмной материи. Проблема с этими супертсимметричными моделями в том, что они созданы уже давно, много миллионов долларов затрачено, чтобы найти подходящую частицу, но — нет. Ни в ЦЕРНе она не родилась, ни в детекторах по поиску тёмной материи. Аксоны (сверхлёгкие частицы) тоже ещё никто не открыл.

— Почему частицы тёмной материи не могут найти?

— Чтобы неведомая частица «застряла» в детекторе, она должна иметь достаточно большое сечение взаимодействия с веществом детектора. Поскольку ВИМПов в детекторе нет, то теоретики и экспериментаторы вынуждены сделать вывод, что масса ВИМПа, оказывается, больше, а сечение — меньше, чем они полагали при проектировании установки. Такую частицу подогнать под наблюдаемые свойства тёмной материи ещё можно, но поймать её, когда она прилетела к нам из космоса, становится сложнее. Кроме того, в наших детекторах ограниченный объём жидкости, воды или ксенона, и они ограниченной массы. Чем больше масса, тем дороже исследования. И эта частица должна там произвести какое-то необычное редкое взаимодействие. Но вот не производит ничего. Ждут уже десятки лет.

- А что это за придуманная вами теория зеркальной тёмной материи?

— Её изобрели довольно давно мы с моим коллегой Максимом Хлоповым. Точнее, в 1979 году я думал, что изобрёл зеркальную материю¹. Но оказалось, что в 1966 году уже вышла статья Кобзарева, Окуня и Померанчука². Они предположили существование частиц, которые отражают все свойства нашего мира, — там есть свои протоны, фотоны, любые частицы. То есть существуют двойники всех частиц — лептонов, кварков, бозонов. Но с нашим миром у них общая только гравитация (и, возможно, какое-то сверхслабое взаимодействие). Скажем, наши фотоны невидимы зеркальным наблюдателям, а нам не видны зеркальные фотоны. Зеркальные частицы не могут участвовать в обычных сильных и электромагнитных взаимодействиях, но они имеют собственные сильные и электромагнитные взаимодействия, и невидимый зеркальный мир может сосуществовать с нашим миром в одном пространстве². Это совершенно нормальные частицы, просто с очень слабым взаимодействием с нашим миром. Что и нужно, чтобы объяснить все свойства тёмной материи.

Они там написали, что никаких перекрёстных опытов обнаружить такие частицы нет. К 1966 году не только физики не знали, что есть тёмная материя, но и астрономы забыли про открытие Цвикки 1930-х годов. Но, как уже было сказано, именно к началу 1970-х вдруг полезли эффекты «неправильного» вращения галактик и горячего газа в скоплениях галактик, после чего люди вспомнили старинные работы Цвикки и других довоенных астрономов.

Подчеркну, что Лев Борисович Окунь с коллегами развивали физику зеркальных частиц, не зная о проблеме тёмной материи. В статье 1966 года они впервые в мире предложили правильную теорию зеркальных частиц, показали их основные свойства. Я с Хлоповым (и позже без Хлопова) впервые в мире начал развитие астрофизики и космологии зеркальных частиц в том случае, если сделанная из этих частиц материя является тёмной материей.

К слову, в 1979 году я услышал от Льва Борисовича на теоретическом семинаре ИТЭФа, что он изобрёл уникальные новые частицы — тета-частицы и связывающие их тетоны³. Мы шутили, что он их придумал для объяснения телепатии. У него есть интереснейшая статья про то, что тетоны могут накапливаться в живых организмах и передавать сигналы сверхслабой тонкой структурой, которая их связывает между собой на огромных расстояниях. Ссылки на эту статью не иссякают до сих пор.

Но ограничения на новые частицы всё сильнее и сильнее. Ещё в статьях той поры о зеркальных частицах Л. Б. Окунь предсказывал необычные колебания Земли, если они накопились в недрах нашей планеты, и предлагал искать их сейсмическими методами. Я же ему разъяснял, что частицы тёмной материи должны падать на Землю со скоростями в сотни км/с (это типичные скорости для гало нашей Галактики). В крайнем случае, около 50 км/с, если наша Солнечная система оказалась случайно в облаке тёмной материи, которое нам сопутствует. А земная гравитация слаба, вторая космическая скорость всего 11 км/с. Поэтому частицы зеркальной материи едва её чувствуют и «просвечивают» Землю насквозь. Другое дело — тело Солнца, где вторая космическая скорость уже

сотни км/с. Там было бы возможно накопление зеркальных частиц и зеркальных тел.

Частицы зеркальной материи должны взаимодействовать между собой точно так же, как наши частицы. Поэтому должны существовать зеркальные атомы, пылинки, камни (то есть метеориты), астероиды, планеты и звёзды. Зеркальные пылинки и метеориты должны падать (по принципу всемирного тяготения) на обычные звёзды типа нашего Солнца и могли бы накапливаться там, но в очень небольших количествах. Это всё есть в популярных статьях Льва Борисовича Окуня. Он любил всё зеркальное, следом за ним эту тематику полюбил академик Николай Семёнович Кардашёв, который предлагал общаться с нашими зеркальными собратьями по разуму через гравитационное излучение, поскольку мы обладаем общими гравитонами.

— Насколько всё это фантастично?

— Это не противоречит никакой физической теории. Но это противоречит некоторым экспериментальным данным о тёмной материи. Когда я предложил Льву Борисовичу совместную статью, он отказался. Лев Борисович сказал: «Да я ничего не понимаю в астрофизике», на что я ответил: «А я почти ничего не понимаю в вашей теории». После знакомства с Окунем я стал ходить к нему на лекции вместе с четверокурсниками и обнаружил тумму учёных той группы, а мне было уже далеко за 30. Так вот, из разных современных, популярных, в том числе и суНепсимметричных теорий можно выводить модели, очень похожие на эту зеркальную материю.

— Но при этом вы говорите, что эта теория часто противоречит экспериментальным данным...

— Абсолютно симметричное зарождение зеркальной материи не поможет проблеме тёмной материи, потому что её раз в пять больше нашей, барионной. Но зеркальной материи было бы столько же, сколько и нашей барионной, если бы все начальные условия были строго одинаковы и зеркальная материя состояла только из зеркальных барионов, лептонов и бозонов, точно таких, как наши. На самом деле и у нас, и «у них» могла бы быть какая-нибудь общая массивная нейтральная частица, которая давала бы основную массу тёмной материи. Есть и другие красивые варианты, например, что на стадии инфляции количество образовавшихся наших и зеркальных барионов вполне могло бы различаться в несколько раз.

Наши звёзды исходно состоят из водорода, при этом отношение первичного водорода к гелию очень важно во всех теориях горячей Вселенной. Так вот, оказывается, зеркальные звёзды рождаются гелиевыми карликами, без водорода (по-видимому, первым это понял Александр Дмитриевич Долгов). При этом дальше гелиевое ядро, если оно достаточно массивное, живёт как гелиевое ядро в нашей обычной материи. У нас полно звёзд без водорода. И сверхновые, которые вообще без водорода, у нас взрываются, и многие звёзды теряют свой

водород, но прекрасно могут дойти до коллапса и до взрыва без водорода. Точно так же и с теми зеркальными «соседями».

Чему это может противоречить? Выше говорилось про столкновения скоплений галактик. Если бы их гало было наполнено зеркальным газом, который обладает такими же свойствами, как и наш газ, то одно скопление не прошло бы через другое. Мы не совсем в скоплении, мы на периферии, что, может, к лучшему для человечества. У нас газа по массе гораздо больше, чем звёзд, в основном барионная Вселенная — вот в таком газе. Мы должны были бы ощущать какие-то эффекты, но их нет. И теоретики придумали, что зеркальные звёзды образуются с помощью зеркального газа, который не испытывает столкновений. Но я в это не очень верю.

Если таких невидимых звёзд очень много, допустим, в пять раз больше в диске нашей Галактики, то тогда существует ничтожная вероятность того, что мы заметим от них эффект сильного гравитационного линзирования. Но не нулевая вероятность, что мы заметим микролинзирование. Ничтожная вероятность, что звезда размером с Солнце, находящаяся близко от нас, попадёт на какую-то другую звезду. Но если мы будем смотреть на галактику Андромеды (M31) или на Большое Магелланово Облако с его миллиардами звёзд, то уже не нулевая вероятность «поймать» за год несколько штук таких событий. При микролинзировании дополнительных изображений вроде кольца Эйнштейна мы не увидим, его угловой радиус будет меньше изображения звезды, но будет «усиление» самой звезды.

— А их фиксируют?

— Фиксируют! Но меньше, чем ожидалось для зеркальной материи. Много раз пытались найти какое-то невидимое тело по такому микролинзированию. Причём не обязательно это будет зеркальная звезда, это может быть чёрная дыра или очень слабо светящаяся холодная звезда, даже бурый карлик. Очень многие неправильно их называют «коричневыми». По-английски brown horse — это не «коричневая лошадь», а бурая. И brown bread — это не «коричневый хлеб». Так вот, пытались найти много этих бурых карликов, думали, что в них сидит вся тёмная материя. Но тогда должно быть огромное число событий линзирования — по одному такому событию раз в два-три дня, если смотреть на Большое Магелланово Облако. Исходя из этого, сделали проекты MACHO, EROS и др. Один из них дал 3—5 событий за год, — тогда примерно половина тёмной материи могла бы сидеть в зеркальных звёздах. Другой — ничего не дал вообще. Все эти дорогие проекты заброшены и не доделаны: когда нет сенсации, очень трудно получить деньги.

— Значит, всю тёмную материю зеркальными звёздами не объяснить?

— Да, потому что мало событий микролинзирования.

— Выходит, это безнадёжное занятие — искать частицы, которые могли бы быть носителями тёмной материи...

— Оно безнадежное, если наша зеркальная модель верна. Эти частицы неуловимы, ничтожны, они могут лепить из себя куски, которые в руки не возьмёшь, потому что наши руки через это вещество проходят насквозь. Но искать придётся до конца, пока все ограничения не пройдем. И ведь ищут! Австралиец Роберт Фут даже в Москву приезжал лет пятнадцать назад, мы с ним на речном трамвайчике катались. Ни о чём, кроме как о зеркальной материи, он говорить не мог. Написал о ней довольно интересную книгу «Shadow worlds» — «Теневые миры», где и на нас ссылается. Фут — авторитетный учёный, публикуется в рецензируемых журналах. Он там придумал ситуацию, в которой можно обнаружить зеркальную материю: для этого надо, чтобы она участвовала в слабеньком электромагнитном взаимодействии, не нарушающем наблюдаемые ограничения на свечение тёмной материи. Она всё же именно тёмная...

Он не одинок, и другими исследователями были придуманы различные модели слабо нарушенной полной зеркальной симметрии. В таких моделях кое-что из зеркального мира может слабо взаимодействовать с нашими частицами, значит, может быть видно нам.

Но есть у Фута и оригинальные идеи. По его мнению, Тунгусский метеорит — тоже интересное явление: взрыв был, а тело не нашли. Можно придумать тепловой взрыв кометы, но можно придумать красивое объяснение через слегка поправленную зеркальную материю. И это не единичный случай: совсем недавно в Иордании с огромным грохотом пролетел метеорит, а ничего не нашли.

— То есть, по его мнению, Тунгусский метеорит и подобные явления — это пришельцы из зеркального мира тёмной материи?

— Да, именно. Из-за того, что они обладают очень слабеньким электромагнитным полем, он предлагал организовать поиски. Он говорит, что если упавшее тело ушло не очень далеко в почву, надо копать. Просто так его не найдёшь, оно же почти совсем прозрачное. Вся красота в этом. Я думаю, что у явлений вроде Тунгусского метеорита всё же есть более простое объяснение, типа теплового взрыва рыхлого кометного ядра. Но и гипотеза Фута имеет право на существование. Он многие годы собирал эти факты — коллекцию явлений, которые произвели грохот, вспышку, поломанные ветки — а ничего нет.

— Как же искать тёмную материю?

— Мне кажется, что основное направление должно быть сосредоточено на самом детальном развитии всех методов обнаружения гравитационных линзирования.

В 1980—1981 годах появилось новое направление, в 2009 году получившее название Asymmetric Dark Matter (ADM). Оно активно развивается в настоящее время. В частности, согласно этому направлению, тёмная материя может накапливаться в плотных телах вроде белых карликов и нейтронных звёзд, но если она слабо взаимодействующая, то в более крупных звёздах. Её можно

обнаружить по изменению плотности и температуры звёзд. А поражаюсь, что программы типа MACHO не поддерживаются и не развиваются: ведь именно их надо развивать, потому что там есть реальные события. Событие зарегистрировано — так вы после этого навестите 40-метровый телескоп в то место и посмотрите, что там? Уже экзопланеты нашли, и на огромных расстояниях. А такие ADM звёзды должны быть очень близко к нам. И это — один из путей реального научного поиска.

Я верю, что открытие тёмной материи произойдёт ещё, может быть, в оставшиеся мне годы жизни. Это было бы фантастическое открытие! Если обнаружится что-то реальное, что можно получить и проверить, будет установлена настоящая картина мира. Может быть, возникнет новый класс физических теорий, конечно, если вдруг появится мельчайшая, строго квантованная теория модифицированной гравитации, которая всё объяснит, тогда будет ещё веселее. Кстати, Эйнштейн создал первую теорию квантов и потом всю жизнь с ними боролся.

— А что если тёмной материи всё-таки нет?

— Тогда надо модифицировать гравитацию. Может быть, кто-то это сделает, но пока это не представляется возможным.