



Темная материя

Невидимые действующие лица и их предполагаемые исполнители

В предыдущих статьях цикла мы рассмотрели устройство видимой Вселенной. Поговорили о ее структуре и частицах, которые формируют эту структуру. О нуклонах, играющих главную роль, поскольку именно из них состоит все видимое вещество. О фотонах, электронах, нейтрино, а также о второстепенных актерах, занятых во вселенском спектакле, что разворачивается 14 миллиардов лет, прошедших с момента Большого взрыва. Казалось бы, рассказывать больше не о чем. Но это не так. Дело в том, что видимое нами вещество – лишь малая часть того, из чего состоит наш мир. Все остальное – нечто, о чем мы почти ничего не знаем. Это загадочное «нечто» получило название темной материи.

Если бы тени предметов зависели не от величины сих последних, а имели бы свой произвольный рост, то, может быть, вскоре не осталось бы на всем земном шаре ни одного светлого места.

Козьма Прутков

Что будет с нашим миром?

После открытия в 1929 году Эдвардом Хабблом красного смещения в спектрах удаленных галактик стало ясно, что Вселенная расширяется. Одним из вопросов, возникших в этой связи, был следующий: как долго будет продолжаться расширение и чем оно закончится? Силы гравитационного притяжения, действующие

Продолжение. Начало см. в N 6—10, 2006



между отдельными частями Вселенной, стремятся затормозить разбегание этих частей. К чему торможение приведет — зависит от суммарной массы Вселенной. Если она достаточно велика, силы тяготения постепенно остановят расширение и оно сменится сжатием. В результате Вселенная в конце концов опять «схлопнется» в точку, из которой когда-то начала расширяться. Если же масса меньше некоторой критической массы, то расширение будет продолжаться вечно. Обычно принято говорить не о массе, а о плотности, которая связана с массой простым соотношением, известным из школьного курса: плотность есть масса, деленная на объем.

Расчетное значение критической средней плотности Вселенной примерно 10^{-29} граммов на кубический сантиметр, что соответствует в среднем пяти нуклонам на кубический метр. Следует подчеркнуть, что речь идет именно о средней плотности. Характерная концентрация нуклонов в воде, земле и в нас с вами составляет около 10^{30} на кубический метр. Однако в пустоте, разделяющей скопления галактик и занимающей львиную долю объема Вселенной, плотность на десятки порядков ниже. Значение концентрации нуклонов, усредненное по всему объему Вселенной, десятки и сотни раз измеряли, тщательно подсчитывая разными методами количества звезд и газопылевых облаков. Результаты таких измерений несколько различаются, но качественный вывод неизменен: значение плотности Вселенной едва дотягивает до нескольких процентов от критической.

Поэтому вплоть до 70-х годов XX столетия общепринятым был прогноз о вечном расширении нашего мира, которое неизбежно должно привести к так называемой тепловой смерти. Тепловая смерть — это такое состояние системы, когда вещество в ней распределено равномерно и разные ее части имеют одну и ту же температуру. Как следствие, невозможна ни передача энергии от одной части системы к другой, ни перераспределение вещества. В такой системе ничего не происходит и никогда уже не сможет произойти. Наглядной аналогией служит вода, разлитая

по какой-либо поверхности. Если поверхность неровная и есть хотя бы небольшие перепады высот, вода перемещается по ней с более высоких мест на более низкие и в конце концов собирается в низинах, образуя лужи. Движение прекращается. Осталось утешаться только тем, что тепловая смерть наступит через десятки и сотни миллиардов лет. Следовательно, еще очень долго об этой мрачной перспективе можно не задумываться.

Однако постепенно стало ясно, что истинная масса Вселенной намного больше видимой массы, заключенной в звездах и газопылевых облаках и, скорее всего, близка к критической. А возможно, в точности равна ей.

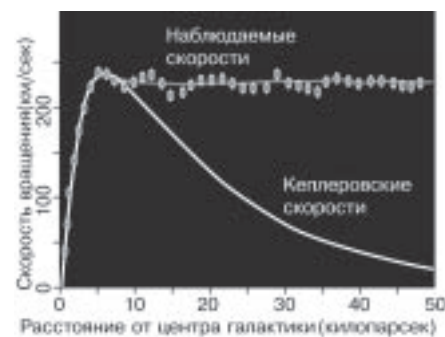
Свидетельства существования темной материи

Первое указание на то, что с подсчетом массы Вселенной что-то не так, появилось в середине 30-х годов XX века. Швейцарский астроном Фриц Цвикки измерил скорости, с которыми галактики скопления Волосы Вероники (а это одно из самых больших известных нам скоплений, оно включает в себя тысячи галактик) движутся вокруг общего центра. Результат получился обескураживающим: скорости галактик оказались гораздо больше, чем можно было ожидать, исходя из наблюдаемой суммарной массы скопления. Это означало, что истинная масса скопления Волосы Вероники гораздо больше видимой. Но основное количество материи, присутствующей в этой области Вселенной, остается по каким-то причинам невидимой и недоступной для прямых наблюдений, проявляя себя только гравитационно, то есть только как масса.

О наличии скрытой массы в скоплениях галактик свидетельствуют также эксперименты по так называемому гравитационному линзированию. Объяснение этого явления следует из теории относительности. В соответствии с ней, любая масса деформирует пространство и подобно линзе искажает прямолинейный ход лучей света. Искажение, которое вызывает скопление галактик,

столь велико, что его легко заметить. В частности, по искажению изображения галактики, которая лежит за скоплением, можно рассчитать распределение вещества в скоплении-линзе и измерить тем самым его полную массу. И оказывается, что она всегда во много раз больше, нежели вклад видимого вещества скопления.

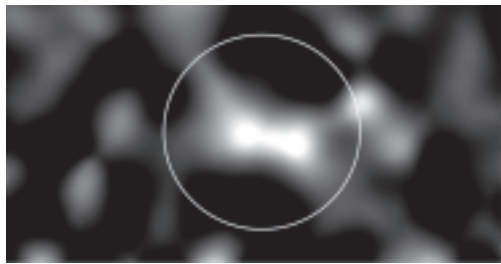
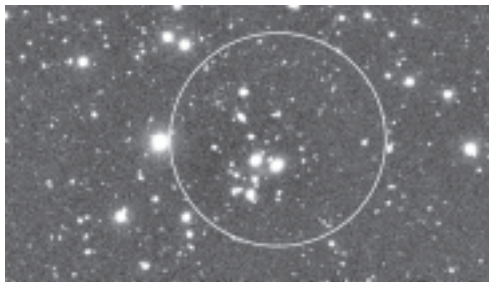
Через 40 лет после работ Цвикки, в 70-е годы, американский астроном Вера Рубин изучала скорости вращения вокруг галактического центра вещества, расположенного на периферии галактик. В соответствии с законами Кеплера (а они напрямую следуют из закона всемирного тяготения), при движении от центра галактики к ее периферии скорость вращения галактических объектов должна убывать обратно пропорционально квадратному корню из



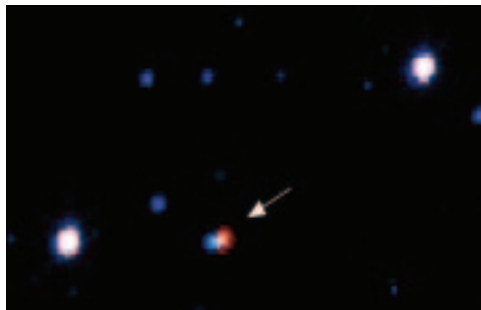
Расчитанная и измеренная скорость вращения звезд в зависимости от расстояния до центра галактики

расстояния до центра. Измерения же показали, что для многих галактик эта скорость остается почти постоянной на весьма значительном удалении от центра. Эти результаты можно истолковать только одним способом: плотность вещества в таких галактиках не убывает при движении от центра, а остается почти неизменной. Поскольку плотность видимого вещества (содержащегося в звездах и межзвездном газе) быстро падает к периферии галактики, недостающую плотность должно обеспечивать нечто, чего мы по каким-то причинам увидеть не можем. Для количественного объяснения наблюдаемых зависимостей скорости вращения от расстояния до центра галактик требуется, чтобы этого невидимого «чего-то» было примерно в 10 раз больше, чем обычного видимого вещества. Это «нечто» получило название «темная материя» (по-английски «dark matter») и до сих пор остается самой интригующей загадкой в астрофизике.

Еще одно важное свидетельство присутствия темной материи в нашем мире приходит из расчетов, моделирующих процесс формирования галактик, который начался примерно через 300 тысяч



Скопление галактик (в левой нижней части участка, обведенного кружком) создает гравитационную линзу. Она искажает форму расположенных за линзой объектов — вытягивая их изображения в одном направлении. По величине и направлению вытягивания международная группа астрономов из Южной Европейской обсерватории, возглавляемая учеными из парижского Института астрофизики, построили распределение масс, которое и показано на нижнем изображении. Как видно, в скоплении сосредоточено гораздо больше массы, нежели удается разглядеть в телескоп



Охота на темные массивные объекты — дело небыстрое, и на фотографии результат выглядит не самым эффектным образом. В 1995 году телескоп «Хаббл» заметил, что одна из звездочек Большого Магелланова облака вспыхнула ярче. Это свечение продолжалось три с лишним месяца, но потом звезда вернулась к своему естественному состоянию. А шесть лет спустя рядом со звездой появился какой-то едва светящийся объект. Это и был холодный карлик, который, проходя на расстоянии 600 световых лет от звезды, создал гравитационную линзу, усиливающую свет. Расчеты показали, что масса этого карлика составляет всего 5–10% от массы Солнца

лет после начала Большого взрыва. Эти расчеты показывают, что силы гравитационного притяжения, которые действовали между разлетающимися осколками возникшей при взрыве материи, не могли скомпенсировать кинетической энергии разлета. Вещество просто не должно было собраться в галактики, которые мы тем не менее наблюдаем в современную эпоху. Эта проблема получила название галактического парадокса, и долгое время ее считали серьезным аргументом против теории Большого взрыва. Однако если предположить, что частицы обычного вещества в ранней Вселенной были перемешаны с частицами невидимой темной материи, то в расчетах все становится на свои места и концы начинают сходиться с концами — формирование галактик из звезд, а затем скоплений из галактик становится возможным. При этом, как показывают вычисления, сначала в галактики сгущивалось огромное количество частиц темной материи и только потом, за счет сил тяготения, на них собирались элементы обычного вещества, общая масса которого составляла лишь несколько процентов от полной массы Вселенной. Получается, что знакомый и, казалось бы, изученный до деталей видимый мир, который мы совсем недавно считали почти понятным — только небольшая добавка к чему-то, из чего в действительности состоит Вселенная. Планеты, звезды, галактики да и мы с вами — всего лишь ширма для громадного «нечто», о котором мы не имеем ни малейшего представления.

Наконец, общая теория относительности однозначно связывает темп расширения Вселенной со средней плотностью вещества, заключенного в ней. В предположении о том, что средняя кривизна пространства равна нулю, то есть в нем действует геометрия Эвклида, а не Лобачевского (что надежно проверено, например, в экспериментах с реликтовым излучением), эта плотность должна быть равна 10^{-29} граммам на кубический сантиметр. Плотность же видимого вещества примерно в 20 раз меньше. Недостающие 95% от массы Вселенной и есть темная материя. Обратите внимание, что измеренное из скорости расширения Вселенной значение плотности равно критическому. Два значения, независимо вычисленные совершенно разными способами, совпали! Если в действительности плотность Вселенной в точности равна критической, это не может быть случайным совпадением, а представляет собой следствие какого-то фундаментального свойства нашего мира, которое еще предстоит понять и осмыслить.

Что это?

Что же мы знаем сегодня о темной материи, составляющей 95% массы Вселенной? Почти ничего. Но что-то все же знаем. Прежде всего, нет никаких сомнений в том, что темная материя существует — об этом неопровержимо свидетельствуют факты, приведенные выше. А еще нам доподлинно известно, что темная материя существует в нескольких формах. После того как к началу XXI века в результате многолетних наблюдений в экспериментах SuperKamiokande (Япония) и SNO (Канада) было установлено, что у нейтрино масса есть, стало ясно, что от 0,3% до 3% из 95% скрытой массы заключается в давно знакомых нам нейтрино — пусть масса их чрезвычайно мала, но количество во Вселенной примерно в миллиард раз превышает количество нуклонов: в каждом кубическом сантиметре содержится в среднем 300 нейтрино. Оставшиеся 92—95% состоят из двух частей — темной материи и темной энергии. Незначительную долю темной материи составляет обычное барионное вещество, построенное из нуклонов, за остаток отвечают, по-видимому, какие-то неизвестные массивные слабо взаимодействующие частицы (так называемая холодная темная материя). Баланс энергий в современной Вселенной представлен в таблице, а расказ о ее трех последних графах — ниже.

Барионная темная материя

Небольшая (4—5%) часть темной материи — это обычное вещество, которое не испускает или почти не испускает собственного излучения и поэтому невидимо. Существование нескольких классов таких объектов можно считать экспериментально подтвержденным. Сложнейшие эксперименты, основанные все на том же гравитационном линзировании, привели к открытию так называемых массивных компактных галообъектов, то есть расположенных на периферии галактических дисков. Для этого потребовалось следить за миллионами удаленных галактик в течение нескольких лет. 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. Скорее всего, это либо остывшие звезды (коричневые карлики), либо планетоподобные объекты, не связанные со звездами и путешествующие по галактике сами по себе. Еще один представитель барионной темной

| | |
|----------------------------|--------|
| Обычное видимое вещество | 5% |
| Нейтрино | 0,3–3% |
| Барионная темная материя | 4–5% |
| Небарионная темная материя | 20–25% |
| Темная энергия | 65–70% |

материи — недавно обнаруженный в галактических скоплениях методами рентгеновской астрономии горячий газ, который не светится в видимом диапазоне.

Небарионная темная материя

В качестве главных кандидатов на небарионную темную материю выступают так называемые WIMP (сокращение от английского Weakly Interactive Massive Particles – слабо взаимодействующие массивные частицы). Особенность WIMP состоит в том, что они почти никак не проявляют себя во взаимодействии с обычным веществом. Именно поэтому они и есть самая настоящая невидимая темная материя, и 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 дождь, состоящий из WIMP. Несмотря на то что WIMP представляет собой чрезвычайно слабо взаимодействующую частицу, какая-то очень малая вероятность провзаимодействовать с обычным атомом у нее все же есть. При этом в специальных установках — очень сложных и дорогостоящих — может быть зарегистрирован сигнал. Количество таких сигналов должно меняться в течение года, поскольку, двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля меняет свою скорость и направление движения относительно ветра, состоящего из WIMP. Экспериментальная группа DAMA, работающая в итальянской подземной лаборатории Гран-Сассо, 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 миллиардов лет своего существования различные астрономические объекты (Земля, Солнце, центр нашей Галактики) должны захватывать WIMP, которые накапливаются в центре этих объектов, и, аннигилируя друг с другом, рождают поток нейтрино. Попытки детектирова-

ния 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.

Эксперименты по поиску WIMP активно проводят также на ускорителях элементарных частиц. В соответствии со знаменитым уравнением Эйнштейна $E=mc^2$, энергия эквивалентна массе. Следовательно, 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.

Темная энергия

В начале прошлого века Альберт Эйнштейн, желая обеспечить космологической модели в общей теории относительности независимость от времени, ввел в уравнения теории так называемую космологическую постоянную, которую обозначил греческой буквой «лямбда» — Λ . Эта Λ была чисто формальной константой, в которой сам Эйнштейн не видел никакого физического смысла. После того как было открыто расширение Вселенной, необходимость в ней отпала. Эйнштейн очень жалел о своей поспешности и называл космологическую постоянную Λ своей самой большой научной ошибкой. Однако спустя десятилетия выяснилось, что постоянная Хаббла, которая определяет темп расширения Вселенной, меняется со временем, причем ее зависимость от времени можно объяснить, подбирая величину той самой «ошибочной» эйнштейновской постоянной Λ , которая вносит вклад в скрытую плотность Вселенной. Эту часть скрытой массы и стали называть темная энергия.

О темной энергии можно сказать еще меньше, чем о темной материи. Во-первых, она равномерно распределена по Вселенной, в отличие от обычного вещества и других форм темной материи. В галактиках и скоплениях галактик ее столько же, сколько вне их. Во-вторых, она обладает несколькими весьма странными свойствами, понять которые можно, лишь анализируя уравнения теории относительности и интерпретируя их решения. Например, темная энергия испытывает антигравитацию: за счет ее при-



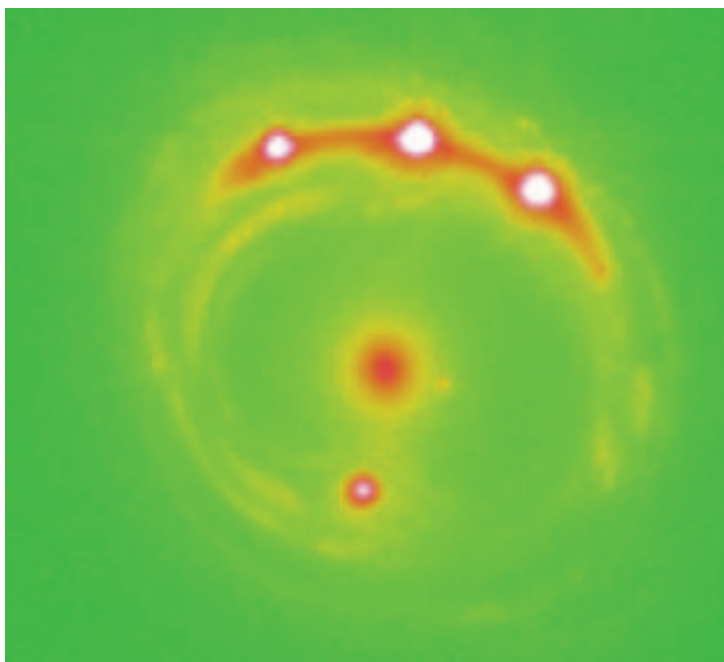
КАРТИНА МИРА: ФИЗИКА

сутствия темп расширения Вселенной растет. Темная энергия как бы расталкивает саму себя, ускоряя при этом и разбегание обычной материи, собранной в галактиках. А еще темная энергия обладает отрицательным давлением, благодаря которому в веществе возникает сила, препятствующая его растяжению.

Главный кандидат на роль темной энергии — вакуум. Плотность энергии вакуума не изменяется при расширении Вселенной, что и соответствует отрицательному давлению. Еще один кандидат — гипотетическое сверхслабое поле, получившее название квинтэссенция. Надежды на прояснение природы темной энергии связывают прежде всего с новыми астрономическими наблюдениями. Продвижение в этом направлении, несомненно, принесет человечеству радикально новые знания, поскольку в любом случае темная энергия должна представлять собой совершенно необычную субстанцию, абсолютно непохожую на то, с чем имела дело физика до сих пор.

Итак, наш мир на 95% состоит из чего-то, о чем мы почти ничего не знаем. Можно по-разному относиться к такому не подлежащему никакому сомнению факту. Он может вызывать тревогу, которая всегда сопутствует встрече с чем-то неизвестным. Или огорчение, оттого что такой долгий и сложный путь построения физической теории, описывающей свойства нашего мира, привел к констатации: большая часть Вселенной скрыта от нас и неизвестна нам.

Но большинство физиков сейчас пытаются воодушевление. Опыт показывает, что все загадки, которые ставила перед человечеством природа, рано или поздно разрешались. Несомненно, разрешится и загадка темной материи. И это наверняка принесет совершенно новые знания и понятия, о которых мы пока не имеем никакого представления. И возможно, мы встретимся с новыми загадками, которые, в свою очередь, также будут разгаданы. Но это будет совсем другая история, которую читатели «Химии и жизни» смогут прочесть не раньше, чем через несколько лет. А может быть, и через несколько десятилетий.



1
Расположенная в центре
галактика сформировала
четыре изображения
квараза RXJ1131-1231



ФОТОИНФОРМАЦИЯ

Космический телескоп

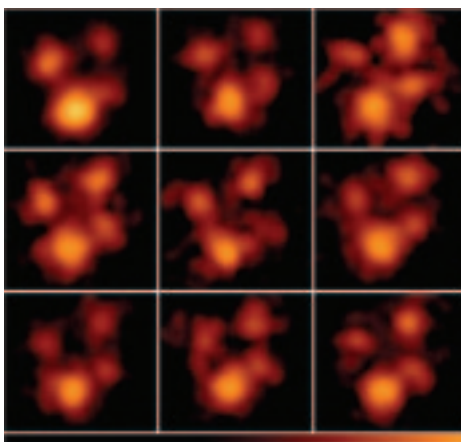
Классические приборы для разглядывания чего-то очень маленького состоят из стеклянных зеркал и линз. С их помощью удается заглянуть в микромир и в глубины космоса. Однако всему есть пределы. В телескоп можно увидеть многое, даже разглядеть огромную планету у далекой звезды, но для этого нужно проявлять чудеса изворотливости. Что уж тут говорить о загадочных ярких объектах на окраинах Вселенной, о квазарах? Расстояние до них столь велико, что нет даже надежды увидеть подробности их строения с помощью оптики. По крайней мере, рукотворной. А вот нерукотворная оптика, оказывается, может это сделать. Скопления галактик, образуя гравитационные линзы, работают как гигантский природный телескоп. И ученые из Огайского университета во главе с доктором Кристофером Кочанеком и Жинью Даи сумели воспользоваться такой линзой, чтобы выявить структуру квазара («NewsWise», 2 октября 2006).

Порой линза дает несколько изображений одного и того же расположенного за ней квазара (рис. 1). Яркость этих изображений различная, потому что свет для каждого из них идет своим путем, который пролегает через области с разными искажениями пространства-времени. В результате у каждого луча возникает своя задержка по времени. В пространстве движется все — и мы, наблюдатели, и линза, и квазар. Поэтому яркость изображений постоянно меняется; космический телескоп работает так, будто у его линз переменное фокусное расстояние (рис. 2). И по этим изменениям яркости астрономы получают шанс узнать интересные детали устройства Вселенной.

Во-первых, сравнивая изменения яркости разных изображений квазара, можно померить плотность распределения мас-

сы в скоплении-линзе. А во-вторых, удается рассчитать размеры квазара.

Согласно одной из гипотез, эти объекты, яркость свечения которых в тысячи раз превосходит яркость звезд (за что их и назвали «квазизвезды»), представляют со-



2
Так меняется со временем яркость
изображений квазара Q2237-0305 в
рентгеновском диапазоне

бой не что иное, как гигантские черные дыры, на которые падает вещество. Разгоняясь в диске аккреции, вещество сильно нагревается, за счет чего и получается высокая яркость. Чем ближе к горизонту событий дыры находится вещество, тем меньше длина волны его излучения; например, вещество внутренней части диска, уже фактически падая внутрь дыры, излучает свой последний свет в рентгеновском диапазоне. Диаметры диска аккреции и сумели вычислить американские астрономы, изучая изменения ярко-

сти квазаров в гравитационных линзах.

Астрофизики провели сложный расчет: они расположили в области виртуального пространства те миллионы звезд, что составляют линзу, и с помощью компьютера следили за тем, как искажаются лучи света, проходя мимо них. Затем провели наблюдения квазара. К сожалению, эти наблюдения очень непросты. Чтобы снять более или менее информативную кривую изменения яркости, нужно каждую ночь хотя бы по часу вести наблюдения на телескопе с диаметром зеркала более метра. И так много ночей подряд. А время наблюдений на всех таких телескопах занято столь плотно, что много ночей никто не дает. И все же несколько серий наблюдений для разных линз и квазаров провести удалось. А затем опять же с помощью расчета ученые так подобрали параметры квазара, что расчетная кривая изменения яркости совпала с полученной экспериментально. Проводя эту процедуру для разных длин волн, на которых проходит наблюдение, можно фактически не только показать, что квазар — это черная дыра с тонким диском падающего на нее вещества, но и восстановить его структуру. Проверкой же послужила зависимость диаметра диска от массы черной дыры: массу квазара (а если считать его гигантской черной дырой, то вся масса в ней и сосредоточена) можно померить по уширению линий в спектре его излучения. Эта зависимость для шести подопытных квазаров оказалась в хорошем соответствии с результатами теории.

«Фактически мы создали промышленный метод использования гравитационных линз для решения таких задач, как построение распределения звезд по массам, измерения их средней массы и изучение структуры квазаров, чего нельзя делать никакими другими методами. Теперь нас останавливает только время. Во-первых, нужно найти окно в расписании работы телескопов. А во-вторых, хорошие данные получаются при длительных наблюдениях, которые растягиваются на десятилетия. Впрочем, эту трудность можно преодолеть, если вести наблюдения за многими линзами одновременно», — говорит Жинью Даи.

С.Анофелес

Фото Огайского университета