



THE UNIVERSE

Тамара Дэвис

УТЕЧКА ЭНЕРГИИ ВО ВСЕЛЕННОЙ?

Энергия не создается и не исчезает. Этот принцип, называемый законом сохранения энергии, — один из наиболее «уважаемых» законов физики. Он руководит нашей жизнью, присутствует во всех ее проявлениях: это и тепло, нагревающее кофе в чашке, и химические реакции, происходящие при выделении кислорода листьями деревьев, и движение Земли по орбите вокруг Солнца, и пища, заставляющая биться наши сердца. Мы не можем жить без еды, машины не могут двигаться без топлива, а вечный двигатель — всего лишь заманчивая, но несбыточная мечта фантастов. И если в ходе какого-либо эксперимента оказывается возможным нарушение закона сохранения энергии, то нас это чрезвычайно изумляет. Но что же делать в том случае, когда наши наблюдения все-таки противоречат этому незыблемому закону?

Оставим на некоторое время ближайшие окрестности Земли и подумаем о Вселенной в целом. Наибольшее количество информации о внешнем мире нам приносят лучи света. Согласно общей теории относительности (ОТО) Альберта Эйнштейна, свет, путешествуя по расширяющейся Вселенной, приходя от удаленных объектов, например галактик, обладает красным смещением (электромагнитные волны меняют свою частоту, «сжимаются»). Чем больше длина волны, тем меньше ее энергия. Так, может возникнуть вопрос: когда длина вол-

Полная энергия должна сохраняться. Любой студент, изучающий физику, проходит этот фундаментальный закон. Однако он неприменим к Вселенной как к целому

ны излучения смещается в красную область спектра, то куда девается его энергия? Она что, куда-то теряется, нарушая закон сохранения энергии?

Стоит только нам покинуть уют привычной жизни и отправиться исследовать области экстремальных пространства и времени, как благодаря исследованиям современной физики начинают рушиться многие обыденные представления о мире. Из принципа относительности Эйнштейна мы знаем, что понятие одновременности иллюзорно, что время и расстояние относительно. Существуют теории, согласно которым кажущаяся непрерывность времени и пространства так же призрачна, как и гладкость материи. На какие же физические законы мы все-таки можем твердо опереться? И наоборот, какие из физических прин-

ципов, долгое время считавшихся незыблемыми, заслоняют нам понимание реальной картины мира? Работа ученого заключается в открытии нового и в обнаружении ситуаций, когда наше знание неполно или даже просто неверно. История науки замусорена обломками отброшенных идей и не прижившихся концепций. Не может ли оказаться так, что в их числе должен отправиться на свалку истории и закон сохранения энергии?

Ответ отрицательный: нет, не может. В масштабе отдельных фотонов энергия всегда сохраняется, даже если свет приобретает красное смещение. Более того, для процессов в нашей Галактике нарушение закона сохранения энергии невозможно. Однако в космологических масштабах вопрос об энергии становится более тонким — в этом-то и заключается весь интерес.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

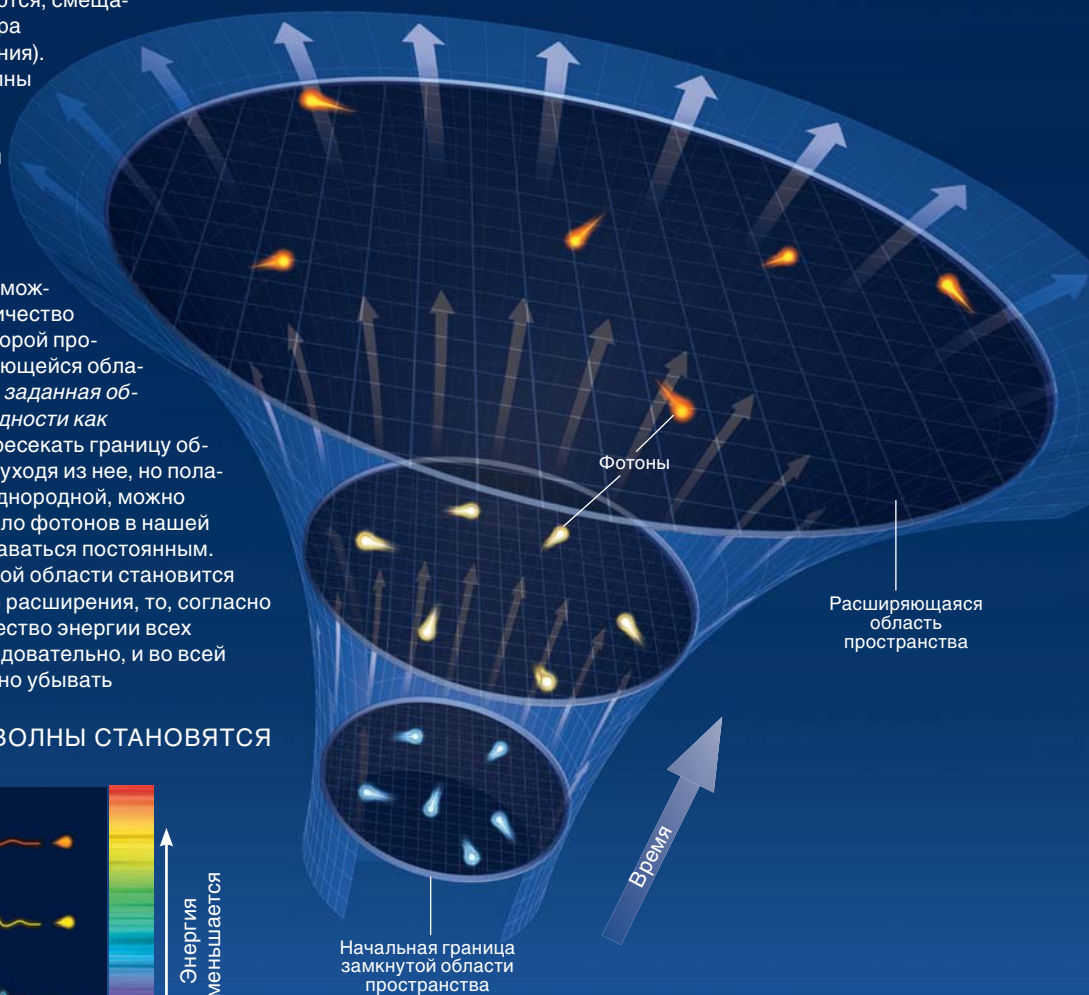
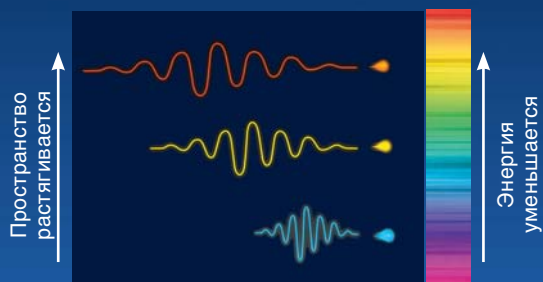
- Поскольку Вселенная расширяется, и далекие галактики разбегаются от нас, их излучение приходит к нам, обладая красным смещением, т.е. меньшей энергией.
- Кажущееся нарушение закона сохранения энергии в действительности не противоречит общепринятым физическим законам.
- По мнению автора, энергия индивидуальных фотонов сохраняется. Энергия сохраняется и в результате процессов, происходящих внутри отдельной галактики.

ПОЧЕМУ НАМ КАЖЕТСЯ, ЧТО ЭНЕРГИЯ ИСЧЕЗАЕТ?

Те, кто согласны, что Вселенная теряет энергию, основывают свои выводы частично на феномене красного смещения приходящего к нам излучения. Оказывается, наша Вселенная расширяется, как если бы растягивалось само пространство. Вследствие этого волны электромагнитного излучения растягиваются, смещаются в красную область спектра (в видимом диапазоне излучения). Фотоны с большей длиной волны обладают меньшей энергией, откуда напрашивается вывод, что приходящие к нам фотоны обладают меньшей энергией.

Но теряет ли энергию вся Вселенная как целое? Общую энергию всех фотонов во Вселенной подсчитать нельзя, но можно формально вычислить количество энергии, заключенное в некоторой произвольно выбранной расширяющейся области Вселенной (на рис. справа заданная область представлена для наглядности как двумерная). Фотоны могут пересекать границу области, проникая в нее извне и уходя из нее, но полагая плотность пространства однородной, можно приближенно считать, что число фотонов в нашей выбранной области будет оставаться постоянным. Поскольку каждый фотон в этой области становится менее энергичным по мере ее расширения, то, согласно модели автора, полное количество энергии всех фотонов в этой области, а следовательно, и во всей оставшейся Вселенной, должно убывать

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ СТАНОВЯТСЯ ДЛИННЕЕ...



... А ЧИСЛО ФОТОНОВ ОСТАЕТСЯ ВСЕ ТЕМ ЖЕ; ЭНЕРГИЯ ТЕРЯЕТСЯ

Симметрия и сохранение

Закон сохранения энергии не только был установлен эмпирически, но и обоснован с помощью строгой теории. Около ста лет назад немецкий математик Эмми Нетер (Emmy Noether) открыла, что все законы сохранения физических величин основаны на существующих в природе симметриях.

В обыденной жизни под симметрией мы понимаем изображение предметов в зеркале, отражения различных типов и вращения. Равносторонний треугольник симметричен, потому что вы можете повернуть его на одну треть

полного поворота и получить неотличимую фигуру. Квадрат тоже симметричен, но его нужно поворачивать на одну четверть полного поворота, чтобы получить точно такую же фигуру. Из всех фигур на плоскости наибольшей степенью симметрии обладает окружность, потому что ее можно поворачивать на любой угол и отражать относительно любой оси, проходящей через ее центр, — говорят, что окружность обладает непрерывной симметрией в отличие от дискретной симметрии в приведенных выше примерах.

Физические законы также могут быть симметричны. Так, движе-

ние во времени не меняет законов природы. Это означает следующее: если вы повторите эксперимент много раз — например, сталкивая под одним и тем же углом два бильярдных шара, — результат всегда будет один и тот же. Это свойство называется временной симметрией¹. Далее, законы физики не меняются в зависимости от места, где вы проводите эксперимент, — они обладают пространственной симметрией. И еще законы природы не меняются в зависимости от направления, в котором вы смотрите, — это вращательная симметрия. Конечно, исследуемые процессы могут меняться в зависимо-

сти от вашего местоположения, от времени, от направления взгляда, но фундаментальные законы физики, диктующие, как именно протекают эти процессы, от этих параметров не зависят. Таким образом, если физический закон остается неизменным, то он, подобно окружности, обладает непрерывной симметрией.

Нетер открыла, что каждой непрерывной симметрии в природе соответствует закон сохранения некоторой физической величины и наоборот. Так, пространственная симметрия означает сохранение момента движения. Вращательная симметрия — сохранение углового момента движения. Временная симметрия приводит к закону сохранения энергии.

Закон сохранения энергии означает, что законы физики в прошлом и будущем такие же, как в настоящем. С другой стороны, если временная симметрия нарушается, то может нарушиться и закон сохранения энергии. Как далее полагает автор, формулировка «сохранение энергии» может оказаться противоречивой во Вселенной, описываемой законами Эйнштейна.

Плывя по течению

Один из неплохих тестов, помогающих установить, сохраняется ли энергия во Вселенной, — выявить непрерывную связь настоящего с прошлым с помощью астрономических наблюдений. Современные астрономические инструменты достигли такой мощи, что способны увидеть зарождение первых галактик во Вселенной и проникнуть даже еще глубже, в эпоху немногим позже Большого взрыва, когда ранняя Вселенная представляла собой первичную плазму. Свет, который мы регистрируем, путешествовал миллиарды лет. Изменение длины волн света и есть ключ к пониманию закона сохранения энергии.

Сравнение Вселенной с расширяющимся надутым шариком хорошо только для наглядности, но не отражает физической сути процесса

В 1920 г. Эдвин Хаббл открыл, что излучение большинства галактик смещено в красную область спектра. Он обнаружил, что длины волн приходящих к Земле фотонов, которые были излучены или поглощены атомами (например, атомами водорода) во всех ближайших к нам галактиках, растянуты по сравнению с длинами волн фотонов, испущенных или поглощенных теми же атомами, но на Земле. Растяжение пропорционально расстоянию до галактик.

Красное (и голубое) смещение встречается и на Земле. Так, звук удаляющегося поезда кажется нам более низким, а приближающегося — более пронзительным. Этот эффект известен как эффект Доплера. Хотя в случае сигнала поезда электромагнитные волны — звуковые, а не лежат в видимой области спектра, физики все равно говорят о растяжении и сокращении волн как об их красном и голубом смещении соответственно.

Космологическое красное смещение в общем случае отличается от эффекта Доплера. Эффект Доплера вызван относительностью движения источника и наблюдателя. В этом случае фотоны не теряют и не приобретают энергию. В противоположность этому космологическое красное смещение определяется движением фотонов в искривленной расширяющейся Вселенной.

Космологическое красное смещение имеет место, даже если вообще не происходит никакого движения, что показывает следующий мысленный эксперимент. Представьте себе одну далекую-далекую галактику, связанную с нами длинной

длинной веревкой. Относительно нас галактика находится в покое, остальные галактики рядом с ней удаляются от нас. Вычисления показывают, что свет, идущий к нам от этой привязанной галактики, все равно будет обладать красным смещением, характеризующим растяжение пространства, сквозь которое идет свет.

Пекулярная физика

Таким образом, путешествующие в расширяющейся Вселенной фотоны теряют энергию. А как насчет не только обладающих нулевой массой частиц, но и вещества? Будет ли оно тоже терять энергию? Когда мы описываем движение вещества во Вселенной, мы различаем два типа движения. Объект может быть «вмороженным», следуя расширению, как нарисованные на резиновом шаре точки движутся при надувании шара. В космологии такие объекты называются сопутствующими. Но объект может обладать и собственным движением дополнительно к движению, вызванному расширением. Второй тип движения называют пекулярным. Оно может быть вызвано, например, гравитационными взаимодействиями объектов.

Сами по себе галактики обязательно обладают пекулярным движением. Но для удаленных галактик оно мало по сравнению со скоростью их разбегания. На сверхбольших масштабах распределение галактик равномерно, поэтому локальные эффекты становятся незначимыми, и эти галактики — сопутствующие. Таким образом, их можно считать точками на раздуваемом шарике, т.е. своего рода верстовыми столбами расширяющейся Вселенной.

Сопутствующая система отсчета, определенная с помощью галактик,

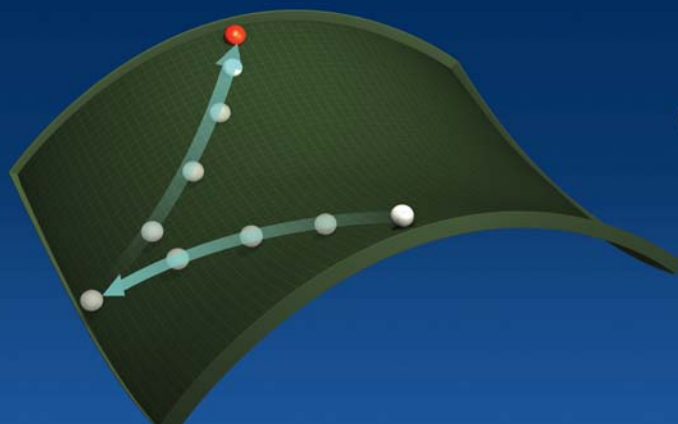
¹ Наша Вселенная расширяется, в разные времена она разная, симметрии во времени нет (специалисты говорят о симметрии относительно сдвигов во времени). Теорема Нетер неприменима, закон сохранения энергии не работает. Тесно связанное с этим утверждение: в общей теории относительности невозможно ввести понятие энергии, применимое к Вселенной. — Академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор В.А. Рубаков.

ПРИЧИНА ИСКРИВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ

Законы сохранения теснейшим образом связаны с симметриями в природе. Так, энергия сохраняется в том случае, когда законы природы «симметричны во времени». Такая симметрия означает, что результат любого физического эксперимента одинаков вне зависимости от времени его проведения. Но если результат может отличаться из-за проведения экспериментов в разные моменты времени, то энергия может не сохраняться. Наглядный пример — игра в бильярд на неровном столе. В космологических масштабах геометрия нашей Вселенной изменчива, что и означает, что энергия всей Вселенной как целого может и не сохраняться

ИСКРИВЛЕННЫЙ БИЛЬЯРДНЫЙ СТОЛ

Для игры в бильярд на неровном — обладающим неевклидовой геометрией — столе нужно оценивать силу своего удара, учитывая эту геометрию. Так, если геометрия фиксирована, один и тот же удар приведет к одному и тому же результату и сейчас, и в будущем. Пользуясь такой аналогией, можно сказать, что во Вселенной с фиксированной геометрией энергия сохраняется



МЕНЯЮЩАЯСЯ ГЕОМЕТРИЯ

Если поверхность бильярдного стола меняется со временем, то отработанный ранее удар может уже не сработать — симметрия во времени нарушается. Нечто похожее может происходить и во Вселенной, поскольку согласно ОТО движение материи и энергии изменяет геометрию пространства-времени. При таких условиях энергия может и не сохраняться



очень удобна. Так, она дает универсальное соглашение о счете времени — кто угодно, находясь в любой такой галактике, одинаково отвечает на вопрос о возрасте Вселенной.

Если межгалактический путешественник пройдет миллиарды световых лет, он сможет пройти множество таких верстовых галактик. Но за счет того, что Вселенная расширяется, эти верстовые столбы будут удаляться друг от друга, и наш путешественник будет двигаться все медленнее и медленнее, конечно, относительно только этой выбранной системы отсчета.

Таким образом, свет теряет энергию, увеличивая длину волны, а материя теряет энергию, замедляя свое движение. На первый взгляд эти два типа поведения различ-

ны. Но интересно то, что в квантовой механике объединяет их. Если смотреть на материю с точки зрения квантовой механики, массивные частицы обладают волновыми свойствами. Французский физик Луи Дебройль (Louis de Broglie) нашел, что чем больше момент движения частицы, тем меньше ее длина волны и тем больше ее энергия. За это открытие он был удостоен Нобелевской премии 1929 г.

Частицы вещества могут обладать большим моментом движения, обладая или большой массой, или большой скоростью, или обеими характеристиками. Это в частности объясняет, почему бейсбольный мяч при броске не демонстрирует волновых свойств, ведь с точки зрения квантовой

механики он обладает чудовищно большой массой. При типичной скорости этого мяча в 145 км/ч его длина волны Дебройля составляет всего 10^{-34} м — слишком малую величину, чтобы быть регистрируемой каким-либо образом. С другой стороны, электрон, движущийся с такой же скоростью, обладает длиной волны в 18 микрон, что при своей малости все же на 29 порядков выше, чем у бейсбольного мяча, и значимо при изучении движения электрона.

Когда вы вычисляете, как много относительной скорости теряет массивная частица, проходя вблизи удаляющихся от нее частиц, вы обнаруживаете, что длина волны Дебройля у частиц растет точно в такой же пропорции, как и длина волны фотонов. Таким образом, свет и вещество ведут себя одинаково, когда дело касается потери энергии в расширяющейся Вселенной, и в обоих случаях это выглядит так, как если бы нарушался закон сохранения энергии. В случае вещества этот парадокс объясняется тем, что мы вычисляем скорости в различных системах отсчета —

ОБ АВТОРЕ

Тамара Дэвис (Tamara M. Davis) в 2004 г. защитила диплом в Университете Нового Южного Уэльса, в настоящее время — научный сотрудник Университета штата Квинсленд в Брисбене (Австралия), а также профессор Копенгагенского университета. Сфера интересов — темная энергия, темная материя, обработка больших массивов астрофизических данных с целью понять, что космология может открыть для фундаментальной физики.

относительно разбегающихся галактик. Как мы увидим в дальнейшем, аналогичная ситуация складывается и с фотонами.

Творческая бухгалтерия

Когда космологи хотят выяснить, теряет ли Вселенная энергию, они могли бы попытаться подсчитать сразу полную энергию Вселенной, а не сосредоточиваться на каком-то одном объекте. Прежде всего можно просто сложить энергию, содержащуюся в веществе Вселенной (масса m и энергия E эквивалентны согласно уравнению Эйнштейна $E = mc^2$, где c — скорость света). Потом следует прибавить кинетическую энергию, связанную с пекулярным движением вещества. К полученной сумме надо добавить энергию излучения, а потом проделать сложную работу по вычислению энергии всех гравитационных

полей вокруг планет, звезд и галактик, а также энергии химической и ядерной связи. (Звук и тепло — движение частиц, поэтому их тоже нужно учесть.)

Первая трудность: Вселенная может быть бесконечно большой и содержать бесконечное количество вещества и энергии. В этом случае нужно на каком-то этапе прервать суммирование — представим себе воображаемую сферу, окружающую некоторый участок Вселенной, и посчитаем всю энергию, сосредоточенную внутри этого шара. Пусть теперь эта сфера расширится, как и наша Вселенная: так, чтобы сопутствующие галактики оставались внутри. Свет и вещество извне могут переходить границы сферы, но поскольку Вселенная однородна, количество вещества и излучения, поступающих в сферу, равно количеству исходящих из нее вещества и излучения.

Вся Вселенная состоит из множества таких сфер. Если во Вселенной как целом действует закон сохранения энергии, то достаточно показать, что этот закон действует внутри отдельно взятой сферы.

Для расширяющейся и охлаждающейся сферы, заполненной веществом, расчеты провести легко. В таком простейшем случае энергия содержится только в массе вещества, и поскольку она по условию не покидает пределы сферы, энергия, очевидно, сохраняется. Для излучения и для вещества, обладающего пекулярной скоростью, ситуация более сложная. Хотя число фотонов и число частиц вещества внутри сферы постоянны, со временем энергия фотонов падает, так же как и кинетическая энергия пекулярного движения вещества. Таким образом, полная энергия на мембране уменьшается.

МНЕНИЕ: КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ И ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Энергия индивидуального фотона, путешествующего по Вселенной, сохраняется, а красное смещение можно интерпретировать как проявление эффекта Доплера.

В первом вопросе автор совершенно права, а во втором вопросе — нет. Частота фотона, а стало быть, его измеряемая энергия действительно зависит от системы отсчета, в которой проводится измерение. Однако во Вселенной есть выделенная система отсчета. Это та система, в которой пространство однородно (все части Вселенной выглядят одинаково) и изотропно (Вселенная одинакова во всех направлениях). В ранней Вселенной вещество было горячим и плотным, оно представляло собой плазму. Так вот, эта плазма покоилась как целое именно в рассматриваемой системе отсчета. Удаленные галактики покоятся в этой системе отсчета (с точностью до пекулярных движений с небольшими скоростями, о которых упоминает автор статьи), а расстояние между ними увеличивается именно благодаря растяжению пространства. Измеренная в этой, космической системе отсчета частота фотона убывает со временем; фотон краснеет именно из-за растяжения пространства.

Особенно наглядно это видно на примере реликтовых фотонов, испущенных горячим веществом в ранней Вселенной незадолго до того, как оно, остывая, перешло из состояния плазмы в газообразное. Как уже говорилось, это вещество в целом никуда не двигалось. Соответственно, газ реликтовых фотонов в целом тоже никуда не движется, хотя отдельные фотоны в нем движутся во всех направлениях (разница с обычным газом состоит только в том, что в отличие от молекул газа, фотоны сегодня не испытывают столкновений ни между собой, ни с веществом). Спектр реликтовых фотонов — тепловой, причем именно в космической системе отсчета. Энергия, и, соответственно, температура реликтовых фотонов убывает со временем в процессе расширения Вселенной. При чем тут эффект Доплера? Ответ однозначный: ни при чем. Красное смещение реликтовых фотонов иначе как растяжением пространства не объяснишь.

С фотонами, испущенными удаленными галактиками, дело обстоит немного сложнее. Автор статьи по существу предлагает отказаться от представления о растяжении пространства и заменить его представлением о том, что галактики буквально разлетаются от нас в радиальных направлениях, а испущенный ими свет выглядит покрасневшим из-за связанного с этим движением эффекта Доплера. Такой взгляд действительно ничему не противоречит, но только если речь идет о галактиках, удаленных от нас на сравнительно небольшое расстояние, много меньшее размера видимой Вселенной. В противном случае интерпретация, рассматриваемая автором статьи, приводит к противоречиям. Последние утверждения, кстати, вполне согласуются с высказанным в статье соображением о том, что «в достаточно малой области Вселенная с высокой точностью плоская. Но в плоском пространстве-времени нет гравитации, нет растяжения волн, и любое красное смещение должно быть эффектом Доплера». Вот и концепция, изложенная в статье, годится лишь для достаточно малой области Вселенной. В этой области (но не во всей видимой Вселенной!) можно выбрать такую систему отсчета, в которой пространство не расширяется; эта система отсчета отличается от космической, и галактики относительно нее движутся. Такова особенность общей теории относительности: локальные явления могут выглядеть совершенно по-разному в разных системах отсчета. Вспомним Эйнштейна: земное притяжение можно «выключить» в небольшой области пространства, если сесть в свободно падающий лифт. Однако всюду и одновременно избавиться от гравитационного поля Земли нельзя. Точно так же нельзя «выключить» расширение пространства сразу во всей Вселенной.

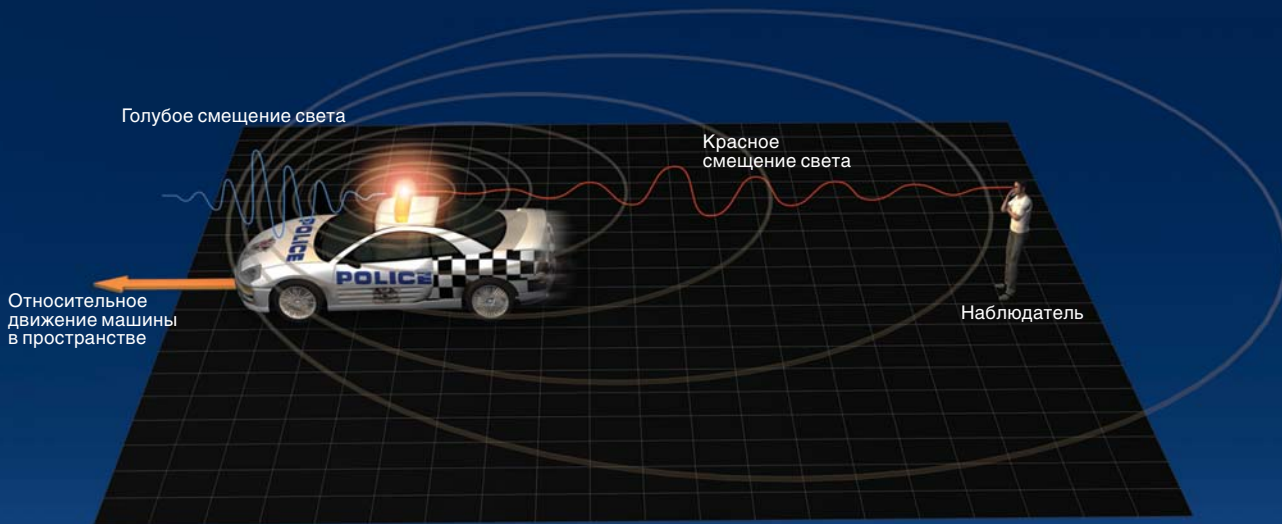
Итак, наиболее общая и адекватная интерпретация красного смещения — растяжение пространства. Интерпретировать красное смещение в терминах эффекта Доплера можно лишь с большими оговорками.

Академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор Валерий Рубаков

КАК СОХРАНЯЕТСЯ ЭНЕРГИЯ ФОТОНА

Красное смещение, наблюдаемое нами от удаленных галактик, обычно объясняется растяжением пространства, но оно также может быть объяснено и эффектом движения галактик относительно нас. Это так называемый эффект Доплера, который, например, можно понять, слыша изменения в звуке сирены приближающейся и удаляющейся полицейской машины. В примере с автомобилем мы име-

ем дело с эффектом Доплера звуковых волн, или, для полицейской мигалки, — световых, так же как и в галактиках мы измеряем красное смещение видимых лучей. В примере с машиной энергия сохраняется; точно так же, вычисляя эффект Доплера для галактики, мы получаем, что излученные фотоны не теряют энергию



ОБЫКНОВЕННОЕ ДОПЛЕРОВСКОЕ СМЕЩЕНИЕ

Смещение Доплера — эффект относительности движения. Свет от мигалки полицейской машины кажется нам более красным или более голубым в зависимости от того, удаляется от нас машина или приближается к нам. Чем больше скорость машины относительно наблюдателя, тем

сильнее этот эффект. Наличие эффекта Доплера не означает, что фотоны тоже меняют цвет, т.е. что они теряют энергию по пути своего распространения. Они обладают разными цветами (их излучение смещено в различные части спектра) с точки зрения неподвижного наблюдателя и с точки зрения водителя машины

Ситуация становится еще более сложной, если учитывать темную энергию, выступающую причиной ускоренного расширения нашей Вселенной. Природа и свойства темной энергии до сих пор остаются загадочными, но с определенностью известно, что ее плотность при расширении Вселенной не меняется. Так, если объем на нашей выбранной мембране возрастает, количество энергии на ней тоже растет. Можно подумать, что рост темной энергии смог бы сбалансировать потери всех других форм энергии, но этого не происходит. Даже с учетом темной энергии полная энергия на мембране не сохраняется.

Как согласуется такое изменение энергии с теоремой Нетер? Наши рассуждения могут означать, что нет оснований применять теорему Нетер к нашей меняющейся Вселенной. Согласно ОТО, материя и энергия искривляют пространство-время. Поскольку материя

и энергия находятся в движении (или разлетаются в расширяющемся пространстве), геометрия пространства соответственно меняется. В повседневной жизни эти эффекты слишком малы, чтобы их обнаружить, но на космологических масштабах они значимы.

Такая способность пространства к деформациям означает, что расширение Вселенной несимметрично во времени. Простейший способ продемонстрировать этот факт — вернуться к нашему примеру про бильярдные шары. Если мы посмотрим несколько фильмов о движении шаров при изменении геометрии стола — например, вначале ровный, а со временем деформируется, — то каждый фильм будет отличаться от предыдущего; можно всегда указать, когда и в какой последовательности был снят каждый фильм.

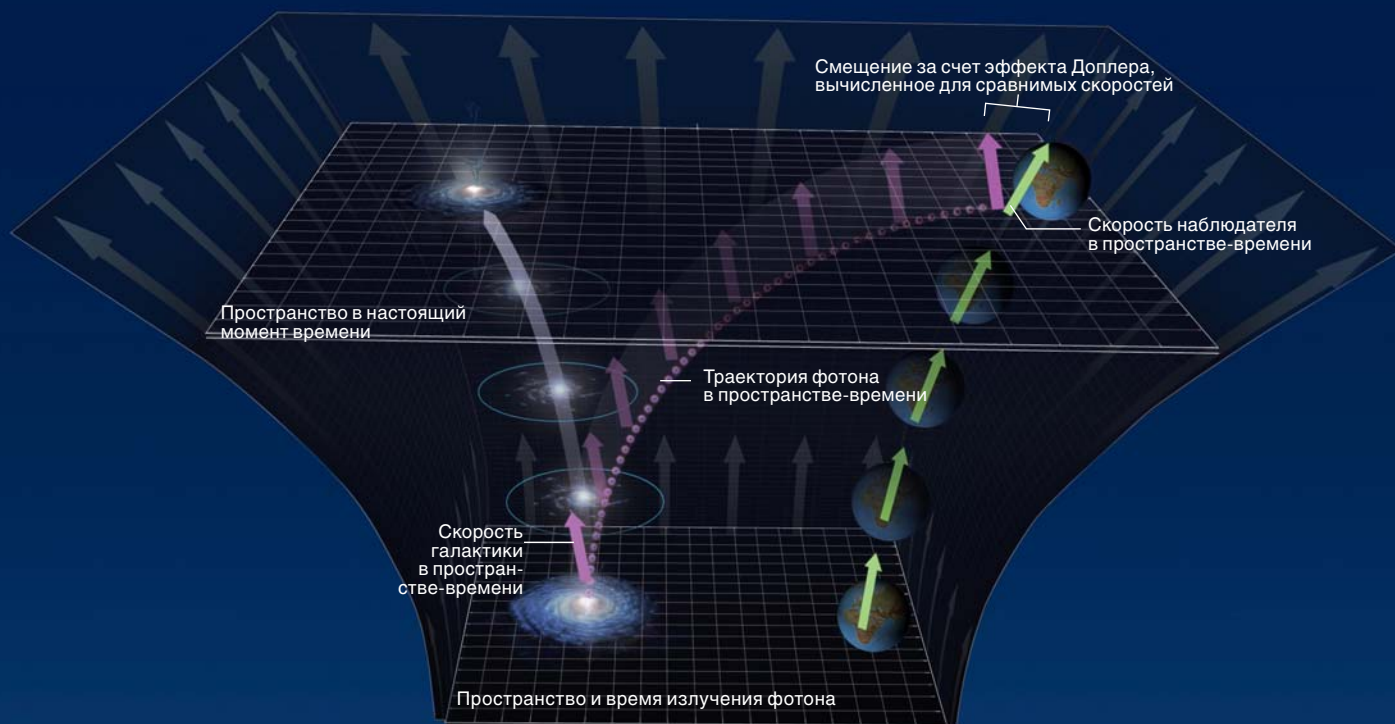
Мы пришли к концу принципов сохранения: когда пространство

и время изменчивы, симметрия теряется, и закон сохранения энергии нарушается.

Космическая семантика

Даже если кривизна пространства не меняется, попытка подсчитать энергию Вселенной есть бесполезное упражнение: рассмотренные подсчеты не могут принадлежать ни одному наблюдателю во Вселенной. В частности, в этих расчетах не учитывается энергия движения галактик друг относительно друга, т.е. их кинетическая энергия. Другой момент — гравитационная энергия взаимодействия галактик. Известная проблема ОТО заключается в том, что в теории мы никогда не можем однозначно определить гравитационную энергию таким образом, чтобы это было применимо ко всей Вселенной в целом.

Таким образом, полная энергия Вселенной и сохраняется и не теряется — она неопределима. С дру-



КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИКИ КАК ДОПЛЕРОВСКОЕ СМЕЩЕНИЕ

Красное смещение галактики идентично смещению Доплера, которое обнаруживает наблюдатель, следя за удалением полицейской машины, движущейся с той же относительной скоростью, что и галактика при следующем правильном определении относительного движения. Во-первых, мы должны нарисовать траектории галактики и наблюдателя не только в пространстве, но и во времени. (Для удобства изображения на представленной схеме пространство показано этапами эволюции двумерной поверхности; пространственно-временные траектории пронизывают его.) Во-вторых, мы

должны сравнить скорость галактики в тот момент времени, когда она излучила фотон (розовая стрелка на схеме), со скоростью наблюдателя в момент приема фотона (зеленая стрелка), а потом, используя необходимый математический аппарат ОТО, посчитать относительную скорость. Доплеровский сдвиг, вычисленный по этой относительной скорости, совпадает с красным смещением галактики, подтверждая, что оно может быть интерпретировано и как результат ее относительного движения, и как эффект расширения пространства. Таким образом, энергия не теряется

гой стороны, если мы рассмотрим ситуацию с точки зрения конкретного наблюдателя, сфокусируемся на одной частице в конкретный момент времени и проследим движение фотона от удаленной галактики, то обнаружим, что в такой интерпретации фотон не теряет энергию. Дело в том, что наше сравнение расширяющейся Вселенной с надувающимся шаром полезно только для визуализации расширения и должно использоваться с той оговоркой, что пустое пространство не имеет физического смысла. Поскольку галактики удаляются друг от друга, мы можем рассматривать их относительное движение или как «расширение самого пространства», или как «движение сквозь пространство» — различие только семантическое, а не физическое.

Космологическое красное смещение обычно характеризует расширение пространства. Однако в общей

теории относительности Эйнштейна пространство относительно, значимо только пространство-время. Соответственно, мы можем вычислить относительную скорость удаленной галактики, сравнивая нашу и ее траектории движения в пространстве-времени. Космологическое красное смещение становится эквивалентно красному смещению эффекта Доплера.

Это происходит потому, что в достаточно малой области Вселенная с высокой точностью плоская. Но в плоском пространстве-времени нет гравитации, нет растяжения волн, и любое красное смещение должно быть эффектом Доплера.

Относительность движения излучателя и наблюдателя означает то, что они видят фотоны в различных направлениях, а не то, что фотон теряет энергию при своем движении.

В заключение скажем, что нет никакого чуда в потере энергии фотонами: энергии измерены наблю-

дателями в удаляющихся друг от друга галактиках, все дело в относительности движения.

Таким образом, если мы решим узнать, сохраняется ли энергия во всей Вселенной как в целом, мы наткнемся на фундаментальное ограничение, поскольку не существует единого числа, определяющего величину энергии Вселенной.

Таким образом, Вселенная не нарушает закон сохранения энергии. Точнее сказать, этот вопрос лежит вне юрисдикции данного закона. ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

■ The Kinematic Origin of the Cosmological Redshift. Emory F. Bunn and David W. Hogg in *American Journal of Physics*, Vol. 77, No. 8, pages 688–694; August 2009.