



Проблемы логики и методологии науки

ЭВОЛЮЦИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ*

А.Ю. Сторожук

Общая теория относительности (ОТО) описывает одно из четырех фундаментальных взаимодействий – гравитационное. Если специальная теория относительности применима только к инерциальным системам отсчета, то общая теория относительности применима к произвольным (неинерциальным) системам отсчета, что и отражает слово «общая» в ее названии. В основе ОТО лежат два постулата:

1) *принцип относительности*: законы природы в *любой* системе отсчета имеют одинаковый вид;

2) *принцип эквивалентности*: неинерциальная система отсчета эквивалентна некоторому гравитационному полю.

Оба этих принципа были известны задолго до Эйнштейна, но переосмыслены и расширены им. Рассмотрим данные принципы более подробно.

Принцип относительности

Принцип относительности был введен Галилеем в известной работе «Диалог о двух главнейших системах мира – птоломеевой и коперниковой», где ученый демонстрирует, что находясь в каюте корабля, невозможно установить, стоит ли корабль или движется прямолинейно и равномерно: «Уединитесь с кем-либо из друзей в просторное помещение

* Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 06-03-90305 а/Б).

под палубой корабля... подвесьте, далее, наверху ведро, из которого вода будет падать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, поставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли попадут в поставленный сосуд, и вам, бросая какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояние будет одним и тем же... Прилежно наблюдайте все это, хотя у вас не возникает никакого сомнения в том, что пока корабль стоит неподвижно, все должно происходить именно так. Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту или другую сторону) во всех названных направлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете усмотреть, движется ли корабль или стоит неподвижно. Прыгая, вы переместитесь по полу на то же расстояние, что и раньше, и не будете делать больших прыжков в сторону кормы, чем в сторону носа, на том основании, что корабль быстро движется, хотя за то время, как вы будете в воздухе, пол под вами будет двигаться в сторону, противоположную вашему прыжку... капли, как и ранее, будут падать в нижний сосуд, и ни одна не упадет ближе к корме, хотя, пока капля находится в воздухе, корабль пройдет много пядей... И причина согласованности всех этих явлений заключается в том, что движение корабля обще всем находящимся на нем предметам» [1].

На современном языке принцип относительности Галилея звучит следующим образом: законы механики во всех инерциальных системах отсчета имеют одинаковый вид. *Инерциальной системой отсчета* называется система, в которой выполняется закон инерции: если на тело не действуют внешние силы, то оно находится в состоянии покоя или прямолинейного равномерного движения. Произвольная система отсчета, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно некоторой инерциальной системы отсчета, также является инерциальной. Это значит, что если наряду с имеющейся инерциальной системой ввести другую, движущуюся с постоянной по величине и направлению скоростью относительно первой, то законы движения будут точно такими же. Эти системы будут механически эквивалентны: во всех таких системах одинаковы свойства пространства и времени и законы механики.

Эйнштейн расширяет принцип относительности таким образом, чтобы он был применим не только к механическим, но и электромагнитным явлениям в *любой* системе отсчета, включая ускоренно движущиеся.

Принцип эквивалентности

В основе принципа эквивалентности лежит открытие Галилея: все тела независимо от их массы движутся в гравитационном поле с одним и тем же ускорением (закон Галилея) [2]. Это свойство позволяет установить аналогию между телами, находящимися в гравитационном поле, и телами, рассматриваемыми в неинерциальной системе отсчета.

Ньютон, изучая движение тела под действием гравитации, установил, что движение тела в поле тяготения происходит потому, что на тело действует гравитационная сила, пропорциональная его *массе*. Масса, входящая в запись закона тяготения, называется гравитационной массой. Это понятие, вообще говоря, отличается от понятия инертной массы, входящей в запись второго закона Ньютона: $F = m\mathbf{a}$. Ньютон считал, что масса, входящая в запись закона тяготения, есть та же самая масса, которая входит в запись второго закона, – другими словами, гравитационная и инертная массы равны [3]. Этот принцип Ньютоном был только постулирован. В конце XIX в. он был проверен экспериментально Этвешем, который в 1890–1906 гг. установил равенство гравитационной и инертной масс [4].

Равенство $m_i = m_g$, где m_i – инертная масса, m_g – гравитационная масса, указывает на глубокую аналогию между движением тел в поле тяготения и движением тел в отсутствие тяготения, но относительно ускоренной системы отсчета.

Мысленный эксперимент Эйнштейна. Представим лифт, поднимающийся вверх с ускорением, равным ускорению свободного падения, в отсутствие гравитационного поля. Механические явления, происходящие в ускоренно движущемся лифте, неотличимы от происходящих в покоящемся лифте, на который действует гравитация. Следовательно, силы инерции в ускоренной системе отсчета (связанной с лифтом) эквивалентны гравитационному полю. Этот факт выражается принципом эквивалентности Эйнштейна. Согласно этому принципу, можно осуществить и процедуру, обратную описанной выше

е имитации поля тяготения ускоренной системой отсчета, а именно, можно «уничтожить» в данной точке истинное гравитационное поле введением системы отсчета, движущейся с ускорением свободного падения. В кабине падающего лифта наступает состояние невесомости – не проявляются силы тяготения. Эйнштейн предположил, что не только механические, но и вообще все физические процессы протекают по одинаковым законам как в истинном поле тяготения, так и в ускоренно движущейся системе в отсутствие тяготения. Этот принцип получил название *сильного принципа эквивалентности* – в отличие от слабого принципа эквивалентности, относящегося только к законам механики.

Что было известно о гравитации до Эйнштейна

Если рассматривать равномерно ускоренную систему отсчета, то относительно нее тела любой массы будут обладать одинаковым постоянным ускорением, равным по величине ускорению самой этой системы отсчета и противоположным ему по направлению. Поэтому равномерно ускоренная система эквивалентна постоянному однородному внешнему полю. Но истинные гравитационные поля не вполне «тождественны» соответствующим ускоренным системам отсчета. Имеется два существенных отличия:

1) истинное гравитационное поле неоднородно. При удалении от тяготеющих тел на большое расстояние истинное гравитационное поле уменьшается. Поля, которым эквивалентны ускоренно движущиеся системы отсчета, либо остаются конечными по величине, либо стремятся к бесконечности. Например, центробежные силы во вращающейся системе отсчета на бесконечности неограниченно возрастают;

2) поле, эквивалентное ускоренно движущейся системе отсчета, исчезает при переходе к инерциальной системе отсчета. Истинные гравитационные поля невозможно исключить никаким выбором системы отсчета.

Рассмотрим свойства неоднородности истинного гравитационного поля, проявляющиеся в приливном эффекте, деформации объема, неравномерном ходе времени.

Приливный эффект. Свойства неоднородности гравитационного поля были установлены еще Ньютоном. Гравитационное поле неоднородно как в направлении, перпендикулярном к поверхности

гравитирующей массы, так и в направлении, «горизонтальном» относительно этой поверхности. Рассмотрим в пространстве, где есть гравитационное поле, область пустого пространства, которая первоначально имеет сферическую форму. Поскольку в ньютоновском законе тяготения сила гравитационного поля убывает пропорционально квадрату расстояния, постольку на более близкую к поверхности тяготеющего тела часть пространства поле будет действовать сильнее, чем на более удаленную (рис. 1). Таким образом, истинное гравитационное поле неоднородно в вертикальном направлении.

Гравитационное притяжение действует по направлению к центру Земли, поэтому для участков, занимающих различное положение по горизонтали, существует различие в направлении ускорения (рис. 2). Из-за этой неоднородности первоначально сферическая область начнет деформироваться, приобретая яйцеобразную форму (рис. 3). Исходная сфера удлинится в направлении к центру тяготеющего тела, поскольку более близкие части притягиваются сильнее, чем более далекие, и сужается по горизонтали, так как вектора сил, действующих на диаметрально противоположные точки, слегка «скошены внутрь» – в направлении к центру Земли. Заметим, что если исходная сфера ограничивала участок *пустого* пространства ($m = 0$), то объем исходного шара *равен* объему получившегося эллипсоида ($V = \text{const}$). Этот эффект характерен для закона обратных квадратов, что в ньютоновском законе гравитации отражено как факт, что гравитационная сила убывает обратно пропорционально расстоянию [5].

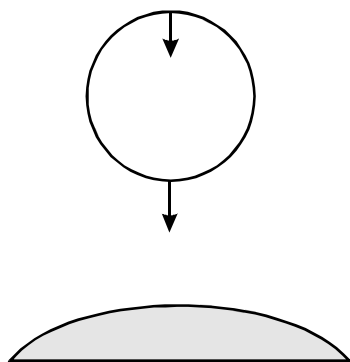


Рис. 1

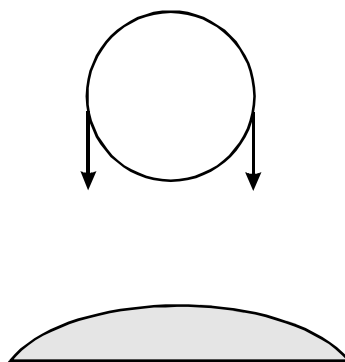


Рис. 2

Данное деформирующее действие известно как *приливный эффект* гравитации. Если в качестве тяготеющего тела взять Луну, а в качестве области пространства – Землю, то получится описание действия Луны, вызывающей на Земле приливы, причем «горбы» образуются по направлениям к Луне и от Луны. Приливный эффект является общей особенностью гравитационных полей, и он не может быть исключен выбором неинерциальной системы отсчета и служит мерой неоднородности ньютоновского гравитационного поля.

Деформация объема. Другим эффектом гравитации является наличие дополнительного ускорения вблизи массивных тел. Предположим, что исходная сфера окружает не пустое пространство, а некоторое массивное тело массой M (рис. 4). Тогда возникает дополнительный эффект из-за действия сил притяжения, направленных внутрь сферы. Объем исходной сферы *сокращается* на величину, пропорциональную M . Если в качестве исходной сферы выбрать поверхность, которая окружает Землю на одинаковой высоте, то обычное ускорение свободного падения будет причиной сокращения объема этой сферы. Данный эффект описывается тензором (или кривизной) Риччи. В этом свойстве сжатия объема отражена та часть закона всемирного тяготения Ньютона, которая гласит, что гравитационная сила пропорциональна массе притягиваемого тела.

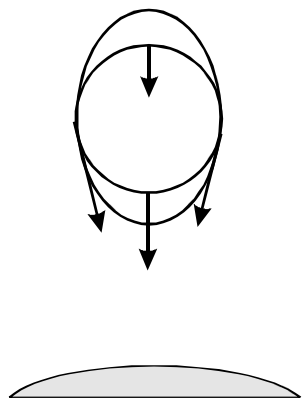


Рис. 3

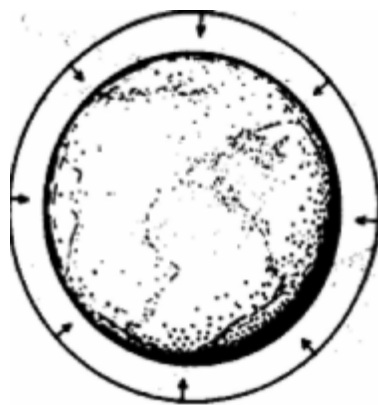


Рис. 4

Неравномерный ход времени. Рассмотрим пример вращающегося диска. При движении от центра круга к его краям скорость движения будет возрастать. Согласно специальной теории относительности ход времени замедляется с увеличением скорости. Следовательно, показания часов, находящихся в центре круга, будут отличаться от показаний таких же часов, находящихся на краю вращающегося круга. В последнем случае часы будут отставать. Этот эффект можно рассматривать как проявление изменения хода времени.

Эффект замедления времени возникал и в специальной теории относительности, но там он имел относительный характер и мог быть устранен выбором системы отсчета. Замедление времени под действием гравитационного поля имеет абсолютный характер. Это значит, что в какой бы системе отсчета ни находился наблюдатель, он все равно будет воспринимать эффект «искривления времени». Иначе говоря, эффект замедления хода времени в гравитационном поле не может быть устранен выбором соответствующей системы отсчета.

Графически этот эффект может быть продемонстрирован следующим образом. Представим кабину лифта, в стенке которой есть дырочка, и через нее попадает луч света (рис. 5). Тогда относительно неподвижного наблюдателя траектория луча света в ускоренно движущейся кабине будет выглядеть искривленной. Это можно понять, обратившись к принципу эквивалентности: так как все тела в гравитационном поле движутся с одинаковым ускорением, луч света тоже будет «падать» и опишет параболическую траекторию, характерную для свободно падающего тела.

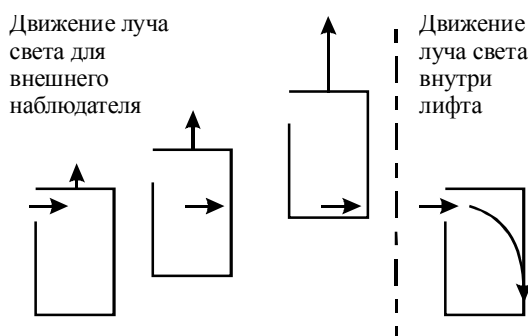


Рис. 5

Искривленность пространства-времени делает невозможным введение единой системы отсчета. Ввести систему отсчета можно лишь локально, в малой окрестности точки наблюдения. Вообще говоря, в гравитационном поле требуется вводить криволинейные координаты. То, что на поверхности Земли мы можем с хорошим приближением пользоваться евклидовыми координатами, обусловлено тем, что гравитационное взаимодействие является самым слабым из известных взаимодействий. Например, сила кулоновского отталкивания двух протонов в 10^{39} раз больше силы их гравитационного взаимодействия.

Недостатки ньютоновской теории гравитации

Во-первых, ньютоновская теория только описывает движение тел под действием тяготения, но ничего не говорит о том, что представляет собой тяготение. Ньютон не решился строить предположения о том, каким образом тела, разделенные пустым пространством, могут оказывать влияние друг на друга. Знаменитая фраза Ньютона: «Гипотез не измышляю» – выражает его отказ от обсуждения природы тяготения. Во-вторых, в механике Ньютона предполагается, что гравитационное взаимодействие распространяется мгновенно. Это противоречит специальной теории относительности, согласно которой скорость распространения света является максимально возможной скоростью.

В ОТО преодолены оба недостатка механики Ньютона, т.е. теория гравитации согласована со специальной теорией относительности и дана трактовка природы гравитации. Рассмотрим сначала последний из этих вопросов.

Природа гравитации в ОТО

Идея, положенная в основу решения проблемы природы гравитации, возникла у Эйнштейна в результате размышления над парадоксом Эренфеста.

Парадокс Эренфеста. В 1909 г. вышла статья Э. Эренфеста, в которой был изложен удивительный факт, получивший название *парадокса Эренфеста*. Этот парадокс состоит в том, что абсолютно твердое тело, например диск или цилиндр, невозможно привести в быстрое вращение относительно оси, так как иначе возникает противоречие со специальной теорией относительности. В самом деле, согласно

СТО движущееся тело должно претерпевать сокращение в направлении движения, т.е. при вращении длина окружности вращающегося тела должна уменьшаться, а радиус остается неизменным. Следовательно, отношение длины окружности к ее радиусу изменится и уже не будет равняться 2π .

Эйнштейн предположил, что в действительности абсолютно твердый диск может вращаться с большой скоростью, а изменение отношения длины окружности l к ее радиусу связано с *искривлением пространства*. В самом деле, известно, что отношение длины окружности к ее радиусу r равно 2π . Но это справедливо только для плоского или неискривленного пространства. Если пространство будет иметь положительную или отрицательную кривизну, то это отношение изменится. В пространстве с положительной кривизной (в качестве примера такого пространства можно рассмотреть поверхность сферы) $l < 2\pi r$, а в пространстве с отрицательной кривизной (это, например, поверхность гиперboloида) $l > 2\pi r$. Таким образом, окружность одного и того же радиуса будет иметь различную длину в зависимости от кривизны пространства (рис. 6).

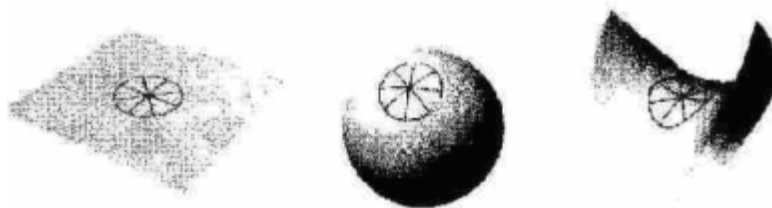


Рис. 6

Эйнштейн пришел к выводу, что вращение и другие виды неинерциального движения можно эквивалентным образом представить как искривление пространства.

Основная идея общей теории относительности: гравитация как искривление пространства. Принцип эквивалентности позволил Эйнштейну установить связь между загадочным явлением гравитации и вполне понятным ускоренным движением. Эта аналогия дала возможность пролить свет на природу гравитации. Эйнштейн предложил рассматривать гравитацию как *искривление*

4-мерного пространства-времени, а силу гравитационного притяжения – как геометрическую деформацию прямых путей.

Связь между гравитацией, ускорением и кривизной пространства привела Эйнштейна к мысли о том, что присутствие тела влечет за собой искривление пространства вокруг тела. Для наглядного представления этого эффекта часто используется следующая аналогия. Пространство вблизи массивных тел деформируется подобно резиновой пленке, на которую положили тяжелый шар (рис. 7). Эта аналогия полезна, поскольку наглядна, но она дает упрощенное понимание: пленка имеет только два измерения, а гравитация искривляет 4-мерное пространство-время.



Рис. 7

Эйнштейну удалось предложить модель, иллюстрирующую механизм действия гравитации. Гравитационное притяжение вызывается деформацией структуры пространства, и посредником, передающим действие массивных тел на огромные расстояния, является само пространство-время.

Забегая вперед, скажем, что идея представлять взаимодействие как искривление пространства оказалась необычайно плодотворной и неоднократно использовалась в физике. Аналогичный подход был применен Калуцей и Клейном, которые пытались объединить ОТО и теорию электромагнитного поля Максвелла [6]. В 1919 г. Калуца высказал предположение о наличии дополнительного, пятого, измерения, искривлением которого является электромагнитное взаимодействие. Однако дальнейший анализ гипотезы Калуцы показал, что она находится в противоречии с экспериментальными данными, – в частности, предсказанное отношение заряда электрона к его массе отличалось от измеренного.

Позже были открыты еще два вида взаимодействий – сильное и слабое, а в 1980-е годы попытка объединить все виды взаимодействий

была предпринята в рамках теории струн. В этой теории число измерений было увеличено до 11 и каждое взаимодействие представлено как искривление соответствующего пространства.

Итак, основная идея общей теории: гравитационное взаимодействие представляется как искривление 4-мерного пространства-времени.

Уравнение Эйнштейна. Основная идея общей теории относительности состоит в том, что действие тяготеющей массы проявляется как изменение метрических свойств пространства. Образно выражаясь, масса указывает пространству, как ему искривляться, а пространство управляет массой, говоря, как ей двигаться.

Уравнения Эйнштейна являются формальной записью этого факта:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g^{ik} R = 8\pi G/c^4 T_{ik}.$$

Здесь R_{ik} – тензор Риччи; R – скалярная кривизна, которая является сверткой или следом тензора Риччи, $R = g^{ik} R_{ik}$; T_{ik} – тензор энергии-импульса; G – гравитационная постоянная.

Уравнения гравитационного поля содержат в себе и уравнения состояния самой материи, которая создает это поле, и метрические свойства пространства. В уравнении Эйнштейна справа стоит тензор, описывающий распределение вещества и излучения в пространстве, а в левую часть входят только пространственные характеристики. Это значит, что свойства пространства зависят от расположенных в нем масс и всех видов энергии и, наоборот, траектории свободного движения массивных тел определяются пространственными характеристиками. В уравнении Эйнштейна и слева, и справа стоят тензоры второго ранга. Оба этих тензора содержат по 16 компонент, но поскольку их можно привести к симметричному виду, независимыми являются только десять. Поэтому уравнение Эйнштейна представляет собой систему 10 дифференциальных уравнений второго порядка, содержащих 10 неизвестных – компонент метрики g_{ik} . Уравнения Эйнштейна являются нелинейными, и это приводит к тому, что они не удовлетворяют принципу суперпозиции, т.е. нельзя произвольным образом задать правую часть T_{ik} , зависящую от распределения материи, а затем вычислить гравитационное поле. Решение уравнений приводит к совместному определению движений материи, создающей поле, и вычислению самого поля. Физически это соответствует тому, что в теории Эйнштейна материя создает искривление пространства, а искривление, в свою очередь, влияет на движение материи, его создающей.

При малых скоростях и в слабых гравитационных полях система уравнений Эйнштейна переходит в закон всемирного тяготения Ньютона. Последний можно записать как уравнение поля, где ускорение свободного падения трактуется как напряженность гравитационного поля.

Некоторые решения уравнения Эйнштейна. Основная задача ОТО – нахождение решений уравнений Эйнштейна, что соответствует нахождению траекторий движения тел в гравитационном поле и определению геометрических свойств пространства-времени. Одним из решений уравнений Эйнштейна для пустого пространства является псевдоевклидова метрика, используемая в СТО. Требовалось найти решения для непустого пространства, т.е. пространства с помещенными в него массами. Было найдено несколько решений уравнений Эйнштейна для одного тела. В частности, это решение Шварцшильда [7] и решение Керра [8]. Шварцшильд нашел метрику пустого пространства вокруг точечной массы, а Керр – метрику пространства вокруг вращающегося тела.

Здесь мы рассмотрим следствия решения Шварцшильда о существовании гравитационного радиуса, который называется *радиусом Шварцшильда*.

Существует минимальная скорость, с которой должно двигаться тело, чтобы оторваться от поверхности планеты и улететь в пространство. Эта скорость называется *второй космической*, и ее значение находится по соответствующей формуле. В частности, при достаточно большой массе и достаточно малом радиусе скорость убегания может стать равной скорости света c . Для Земли гравитационный радиус равен 0,9 см, а для Солнца – 3 км. Сфера, имеющая радиус, равный гравитационному: $r = 2GM/c^2$, – называется *горизонтом событий* (здесь M – масса тела, а G – гравитационная постоянная). Никакие сигналы, идущие изнутри сферы, не могут достигнуть внешнего наблюдателя, находящегося за горизонтом событий. Тело с радиусом, меньшим r_g , называется *черной дырой*.

Внутри горизонта событий в черной дыре никакие силы не могут удержать тело от дальнейшего сжатия (*гравитационный коллапс*). С приближением размера небесного тела к гравитационному радиусу сила тяготения стремится к бесконечности. Может ли тело реально сжаться до размера гравитационного радиуса? Оказывается, образование черной дыры является одним из этапов звездной эволюции, ход которой зависит от массы звезды. Когда в результате ядерной реакции

запасы термоядерного горючего исчерпываются, давление излучения не может противодействовать гравитационным силам и звезда начинает сжиматься. Если масса звезды меньше 1,44 массы Солнца (предел Чандрасекара), то звезда превращается в белый карлик. Если ее масса равна 2–3 массам Солнца (предел Оппенгеймера – Волкова [9]), то после вспышки сверхновой звезда превращается в нейтронную. Если масса звезды еще больше, то гравитационные силы достаточно велики, чтобы сжать звезду до ее гравитационного радиуса, после чего она превращается в черную дыру.

Хотя из черной дыры не может вырваться свет, тем не менее она имеет внешние проявления, связанные с существованием у нее гравитационного поля, момента вращения и электрического заряда, если исходная звезда имела заряд. Наличие горизонта событий ведет к *эффекту квантового испарения* черных дыр [10]. Вблизи черной дыры за счет энергии ее гравитационного поля рождаются пары виртуальных частиц. Если рождение пары произошло таким образом, что одна частица движется в направлении к черной дыре, а другая – от нее, то эта вторая частица уносит с собой часть массы. В результате черная дыра должна излучать как абсолютно черное тело с температурой $T = 10^{26} / M$, т.е. обратно пропорционально своей массе. Интенсивность чернотельного излучения черной дыры низкая, но с уменьшением массы температура черной дыры повышается, процесс испарения ускоряется, завершаясь исчезновением черной дыры.

Черная дыра может также терять энергию при вращении. У вращающейся черной дыры вне горизонта событий существует особая область – эргосфера. Попадающие в эргосферу тела вовлекаются во вращение и могут вылететь в направлении вращения со скоростью, превышающей начальную, что приводит к потере черной дырой энергии вращения. Кроме того, энергия вращения может теряться в процессе рассеяния внешнего электромагнитного и гравитационного излучения. В эргосфере могут также образовываться пары частиц, одна из которых может вылететь наружу, унося с собой часть энергии.

Астрономы пытались обнаружить черные дыры в двойных звездных системах. Хотя черная дыра не излучает в видимом диапазоне, она должна вносить возмущение в орбиты ближайших к ней тел. Первый объект, который был интерпретирован как черная дыра, – это двойная звезда Лебедь X-1. Здесь видимая звезда имеет массу, равную 25 массам Солнца, а невидимый объект имеет массу около 10 масс

Солнца и настолько малый размер, что не может быть нейтронной звездой. Еще одним признаком наличия черной дыры является рентгеновское излучение. Черная дыра может захватывать вещество соседней звезды, которое, пересекая горизонт событий, разогревается до высоких температур и испускает рентгеновские лучи. Было найдено несколько объектов, излучающих в рентгеновском диапазоне, которые тоже интерпретируются как черные дыры.

Применение ОТО в космологии

Гравитация действует на больших расстояниях и является единственным видом сил, определяющим движение космических тел. Когда теория относительности еще только разрабатывалась, считали, что Вселенная неизменна и статична. Однако уравнения Эйнштейна не допускали существование статичных решений: Вселенная должна была либо расширяться, либо сжиматься. Чтобы получить статичное решение, Эйнштейн добавил в правую часть уравнения еще один член – космологическую постоянную (λ -член). Гравитационное взаимодействие является силой притяжения, а космологический член вводил некую неизвестную силу отталкивания, которая должна была уравновесить гравитационное притяжение.

Однако сначала в 1917 г. де Ситтер нашел решения уравнения Эйнштейна для Вселенной без масс, которые описывали искривленные «пустые» миры [11], а в 1922–1923 гг. были найдены нестационарные решения для вселенных, содержащих массы. Рассмотрим эти решения подробнее.

Решения Фридмана. Петербургский математик А.А. Фридман [12] нашел три решения уравнений Эйнштейна. Согласно его расчетам, Вселенная может только расширяться или сжиматься, но не остается стационарной. Эйнштейн сначала не поверил предложенным решениям и попытался найти ошибку в вычислениях. Но убедившись, что вычисления Фридмана правильны, снял свои возражения и признал введение космологической постоянной своей самой большой ошибкой.

Согласно Фридману, возможны три сценария развития Вселенной, которые описываются соответственно открытой (I), плоской (II) и замкнутой (III) моделями (рис. 8). Начальный момент соответствует Большому взрыву, а дальнейшая эволюция Вселенной зависит от количества вещества в ней. Значение плотности, которое соответствует плоской

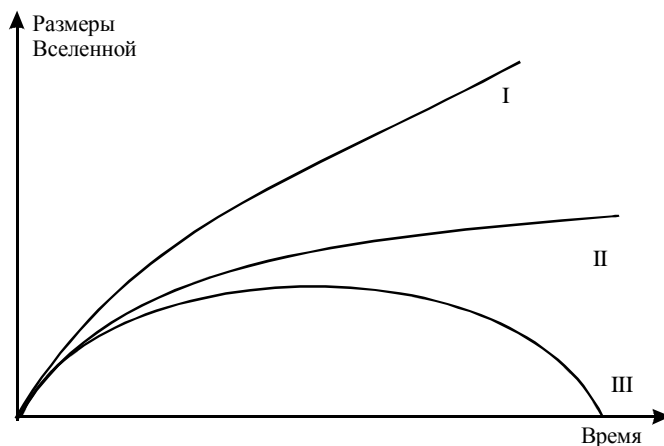


Рис. 8

модели, называется критической плотностью, и на данное время считается, что $\rho_{\text{кр}} = 10^{-29} \text{ г/см}^3$. При такой плотности Вселенная будет бесконечно расширяться, а пространство-время будет плоским. Если плотность больше критической, то гравитационные силы окажутся достаточными, чтобы остановить расширение, и Вселенная начнет сжиматься. Этому сценарию развития Вселенной соответствует замкнутое пространство положительной кривизны. Если плотность меньше критической, то Вселенная будет бесконечно расширяться, а пространство имеет отрицательную кривизну.

В 1929 г. Хаббл открыл красное смещение, т.е. смещение спектральных линий элементов в свете, приходящем от удаленных галактик в длинноволновую часть спектра [13]. Это открытие было интерпретировано как экспериментальное подтверждение расширения Вселенной. Скорость удаления от нас галактик пропорциональна расстоянию до них и описывается формулой $V = HR$, где H – постоянная Хаббла.

На начальном этапе расширение характерно для всех трех моделей Фридмана. Чтобы установить, какая из этих моделей будет реализована, необходимо определить среднюю плотность вещества во Вселенной. По сегодняшним оценкам, она близка к критической. Более точный ответ удалось дать после того, как в 2002 г. японские физики экспериментально установили наличие у нейтрино массы покоя. Открытие

массы нейтрино является одним из двух крупнейших достижений экспериментальной физики. Второе достижение – это обнаружение ускоренного расширения Вселенной. Три физика из Университета штата Вашингтон (г. Сиэтл) предлагают связать эти два открытия с одной из самых странных сущностей во Вселенной – темной энергией. Природа и физические свойства «темных сущностей» пока остаются неисследованными. Предположительно, темная материя должна отличаться от обычной материи, состоящей из барионов, т.е. состоять из каких-то пока неизвестных частиц, а темная энергия ассоциируется с энергией вакуума. Имеются попытки связать ее с λ -членом в раннем варианте уравнения Эйнштейна, который должен был описывать «отталкивающую силу» во Вселенной [14].

Современная наблюдательная космология. За последние 10–15 лет точность космологических наблюдений значительно возросла, что привело к открытию многих новых фактов. Согласно данным современной космологии, обычное вещество во Вселенной составляет не более 5%, 25% приходится на долю темной материи и около 70% – на долю темной энергии (рис. 9). *Темная материя* участвует только в гравитационном взаимодействии и склонна образовывать «сгустки» – скопления, подобно обычной материи. Хотя природа темной материи на сегодняшний день остается неизвестной, наиболее правдоподобной является гипотеза, согласно которой темная материя состоит из новых, еще не открытых частиц, масса которых в 100–1000 раз превосходит массу протона. *Темной энергией* называют некоторую субстанцию, которая равномерно распределена во Вселенной (не образует скоплений) и является источником антигравитации. Наиболее вероятным кандидатом на роль темной энергии является физический вакуум.

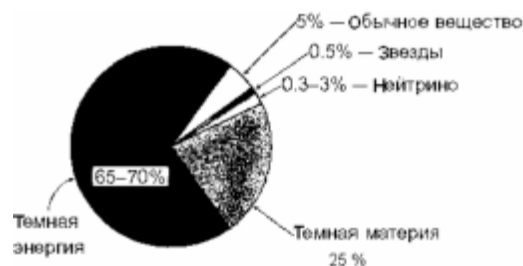


Рис. 9

Перечислим те наблюдательные данные, на основании которых был сделан вывод о существовании темной энергии и темной материи.

1. *Открытие ускоренного расширения Вселенной.* Предположение о существовании темной энергии было сделано на основании факта ускоренного расширения Вселенной, открытого в 1998 г. Согласно моделям Фридмана либо Вселенная должна была расширяться равномерно (если масса вещества меньше критической), либо расширение должно было начать замедляться (если вещества во Вселенной достаточно для того, чтобы силы гравитации погасили начальный импульс, полученный во время Большого взрыва). В 2005 г. данные телескопа «Хаббл» показали, что ускоренное расширение началось, когда отношение плотности вещества к критической плотности достигло определенного значения: $\Omega \rho / \rho_{кр} = 0,29 \pm 0,04$, где Ω – безразмерная средняя плотность Вселенной.

2. *Измерение параметров Вселенной по скорости расширения.* Постоянная Хаббла H не является константой в математическом смысле, а зависит от плотности и давления разных видов материи-энергии: газа, пыли, излучения, вакуума и др. Она представляет собой полиномиальную функцию, в запись которой члены, соответствующие различным видам материи-энергии, входят с различными степенями, что позволяет оценить вклад каждой составляющей:

$$H^2(z) = H_0^2 [(1 - \Omega_{0,tot})(1 + z^2) + \Omega_{0,m}(1 + z^3) + \Omega_{0,m}(1 + z)^{3(1+W_i)} + \dots],$$

$$\Omega_{0,j} = \rho_{0,j} / 3H_0^2 / 8\pi G.$$

Измерения величины постоянной Хаббла дают информацию о составе Вселенной. Она зависит от параметра Z , значение которого можно определить, измеряя красное смещение спектров галактик:

$$Z = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} - 1,$$

где λ_0 – длина волны испущенная; λ_e – эталонная длина волны.

Для определения $H(z)$ необходимо знать еще расстояние до объекта, которое находят путем сравнения светимости исследуемого объекта с яркостью источника с известной светимостью (*метод стандартной свечи*).

3. *Давление вакуума.* Для объяснения ускоренного расширения Вселенной из измерений постоянной Хаббла был сделан вывод о существовании некоторой субстанции с отрицательным давлением. На роль такой субстанции подходил вакуум. Изменение энергии при изменении объема определяется давлением: $\Delta E = -p\Delta V$. При расширении Вселенной энергия вакуума растет вместе с объемом (плотность энергии постоянна), что возможно только в том случае, если давление вакуума отрицательно. Вакуум может обладать плотностью энергии, которая не должна зависеть от выбора системы отсчета и меняться при расширении. Учитывая, что $E = \rho c^2$, получим

$$\begin{aligned}dE &= -pdV, \\ \rho_V c^2 dV &= -pVdV (\rho_V = \text{const}), \\ pV &= -\rho_V c^2.\end{aligned}$$

Если давление p и плотность ρ положительны (обычный случай), то расширение Вселенной заменится сжатием. С учетом отрицательного давления вакуума гравитация заменится на антигравитацию, и Вселенная будет расширяться с ускорением.

4. *Флуктуации реликтового излучения.* Изображения неба в микроволновом диапазоне – к северу и югу от экватора нашей Галактики – построены по данным четырехлетних (1989–1993 гг.) наблюдений, сделанных с помощью запущенного НАСА спутника COBE (COsmic Background Explorer – «Исследователь космического реликтового излучения»). Карта неба отражает области разной температуры ранней Вселенной (рис. 10). Распределение температуры реликтового излучения показывает, что существовали ее вариации, амплитуда которых составляла 10^{-4} – 10^{-5} от средних значений. На карте распределения температуры по небесной сфере (фотоснимок ранней Вселенной) более холодные области показаны темным цветом, более теплые – светлым. Эти неоднородности породили неоднородности плотности, из которых возникли галактики.

Флуктуации плотности в ранней Вселенной дают разбегающиеся акустические волны обычной (барионной) материи, в то время как флуктуации темной материи остаются на месте. Эти неоднородности стали зародышами галактик.

5. *Неустойчивость Джинса.* Разница плотностей распределения вещества в современной Вселенной достигает 100%: в ней есть

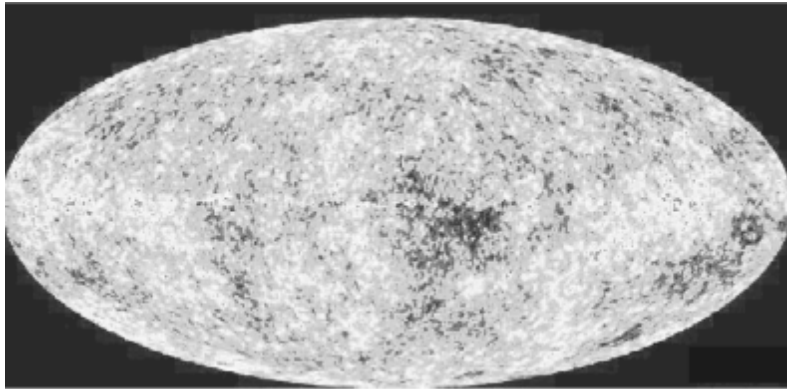


Рис. 10

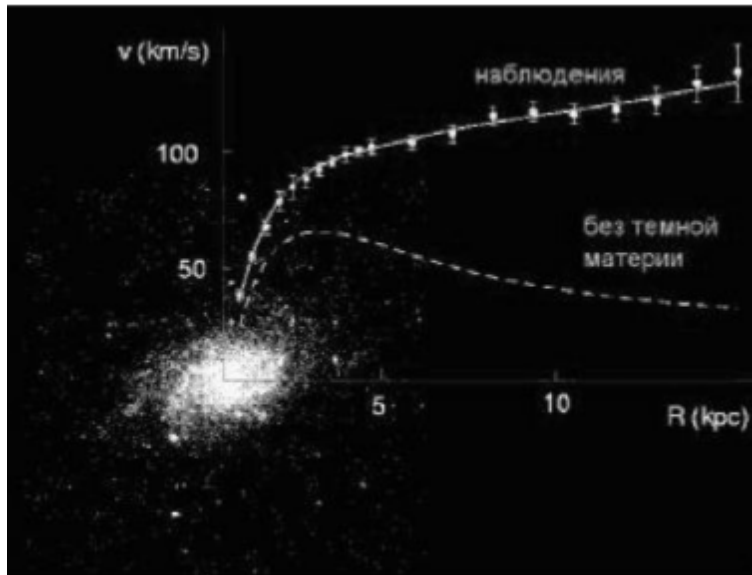


Рис. 11

и сильно разреженное межгалактическое пространство, и нейтронные звезды. Но если предположить, что неравномерность в распределении вещества возникла благодаря неустойчивости Джинса, то принимая во внимание лишь обычную материю, можно получить только разницу в десятки раз. Для объяснения наблюдаемого распределения плотности необходимо предположить существование темной материи.

6. *Вклад темной материи в общую массу галактики.* Чем сильнее гравитационное поле, тем быстрее вращаются вокруг галактики звезды и облака газа. Поэтому измерение скоростей вращения в зависимости от расстояний до центра галактики позволяет восстановить распределение масс в ней. На рисунке 11 показаны наблюдаемая и теоретическая зависимости скоростей вращения от расстояния до галактики.

7. *Гравитационные линзы.* Гравитационное поле скопления галактик искривляет лучи света, испускаемые галактиками, находящимися

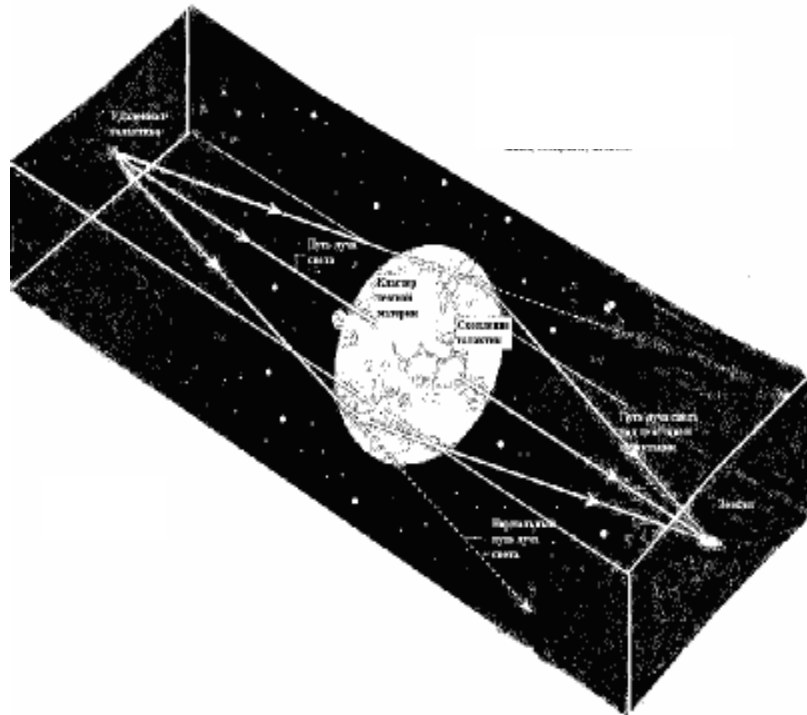
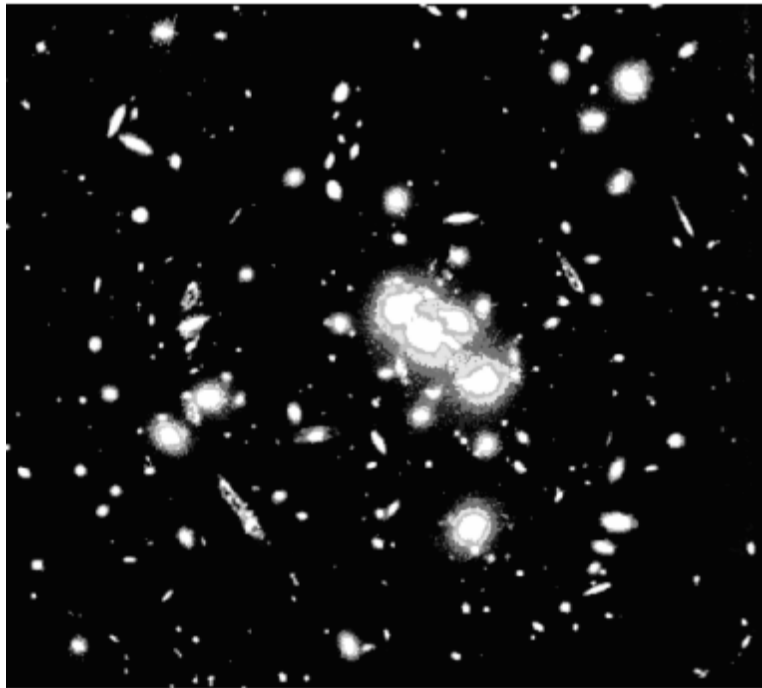


Рис. 12

*Рис. 13*

за скоплением. Таким образом, гравитационное поле действует как линза (рис. 12). При этом иногда появляется несколько образов удаленной галактики (рис. 13)

На рисунке 14 отображена картина столкновения двух галактик. Видимое свечение сосредоточено в центре фотографии, но данные, полученные в результате изучения гравитационного линзирования, свидетельствуют, что центры масс галактик сосредоточены намного дальше. Эти данные заставляют думать, что большую часть массы галактик составляет невидимое вещество. Невидимая темная материя, рассчитанная по гравитационному линзированию, показана белым цветом. Светится обычная материя. Белые контуры – это распределение гравитирующей материи, найденное по гравитационному линзированию.

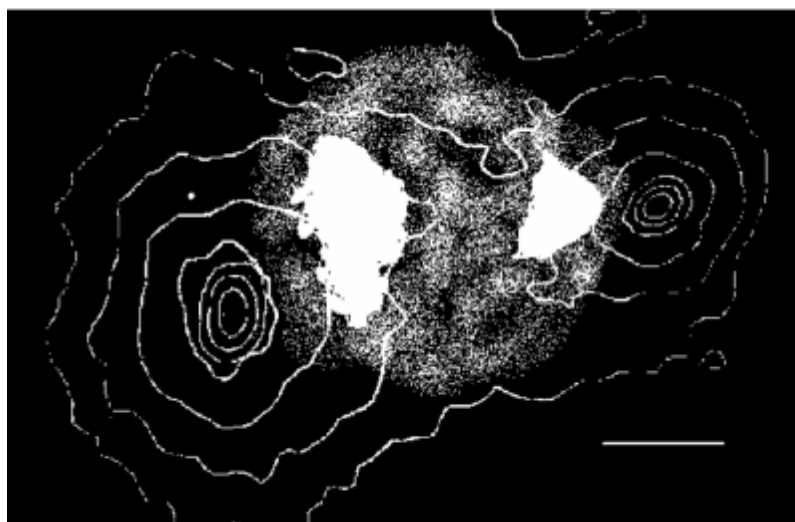


Рис. 14

В настоящее время актуальной задачей физики является поиск частиц на ускорителях. Если частицы темной материи будут рождаться на ускорителях, то ученые смогут больше узнать о ее свойствах. Энергий, достигнутых на современных коллайдерах, не хватает для получения темной материи, но планируется строительство нового ускорителя в ЦЕРНе.

Примечания

1. *Галилей Г.* Диалог о двух главнейших системах мира – птоломеевой и коперниковой. – М.; Л.: ОГИЗ, 1948. – С. 101.
2. Там же. – С. 34.
3. См.: *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии / Пер. с лат. А.Н. Крылова. – М.: Наука, 1989.
4. См.: *Эйнштейн А.* К современному состоянию проблемы тяготения // Эйнштейн А. Сборник научных трудов. – М.: Наука, 1965. – С. 317.
5. См.: *Пенроуз Р.* Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. – М.: Эдиториал УРСС, 2003. – С. 170–171.
6. См.: *Калица Т.* К проблеме единства физики // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – М.: Мир, 1979. – С. 529–534.

7. См.: Шварцшильд К. О гравитационном поле точечной массы в эйнштейновской теории // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – М.: Мир, 1979. – С. 199–207.
8. См.: Керр Р. Гравитационное поле вращающейся массы как пример алгебраической специальной метрики // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – С. 208–211.
9. См.: Оппенгеймер Ю., Волков Г. О массивных нейтронных сердцевинах // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – С. 337–352.
10. См.: Хокинг С. Рождение частиц на черных дырах // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – С. 479–509.
11. См.: Ситтер В., де. О теории тяготения Эйнштейна и ее следствиях для астрономии // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – С. 299–319.
12. См.: Фридман А.А. О кривизне пространства // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – С. 320–329.
13. См.: Сэндидж А. Зарождение наблюдательной космологии во времена Хаббла: Исторический обзор / <http://www.astronet.ru:8101/db/msg/1190938/> (03.07.2007).
14. См.: Чернин А.Д. Темная энергия вблизи нас / <http://www.astronet.ru/db/msg/1210535> (08.03.2006).
15. Материалы лекции доктора физико-математических наук В.И. Тельнова, прочитанной 9 апреля 2007 г. в Новосибирском государственном университете. См. также: Тельнов В.И. Физика элементарных частиц и космология: на пороге великих открытий // Вестник НГУ. Сер.: Физика. – 2006. – Вып. 2. – С. 54–70.

Институт философии и права
СО РАН, г. Новосибирск

Storozhuk, A.Yu. Evolution and modern problems of the general theory of relativity

The paper considers the main ideas of the general theory of relativity and their evolution in the 20th century. Its effect on the development of cosmology is shown; on this basis and taking into account recent observation data, the main problems of cosmology are formulated.