

**ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ:
история и современные проблемы.
Часть I***

А.Л. Симанов, А.Ю. Сторожук

В первой части работы, посвященной философско-методологическому анализу современного состояния исследований в области структуры пространства-времени, рассматривается генезис основных идей общей теории относительности, определивших направления развития теории тяготения и космологии.

Ключевые слова: теория относительности, космология, теория тяготения, пространство-время, основания теории, эксперимент

Из истории создания общей теории относительности

Общая теория относительности (ОТО), или, что точнее, релятивистская теория тяготения, является логическим продолжением, развитием специальной теории относительности. В предыдущей статье мы отмечали, что основные идеи специальной теории относительности (СТО) как физической теории пространства и времени формулируются в виде следующих утверждений. *Пространственные и временные координаты образуют единое четырехмерное многообразие с псевдоевклидовой геометрией. Физические законы одинаковы во всех инерциальных системах, то есть в системах, движущихся с постоянными скоростями относительно друг друга. Длины и времена, измеряемые в какой-либо подобной системе, кажутся иными из другой системы, но результаты измерений связаны между собой преобразованиями Лоренца [1].* Как справедливо заметил М.Борн, «специальная теория относительности Эйнштейна не порывает окончательно с ньютоновским абсолютным пространством... В известном смысле эта теория приводит всю физику, в том числе и электродинамику, в то состояние, в котором находилась

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда, проект № 08-03-90302 а/Б.

Публикуется в авторской редакции.

механика со времен Ньютона» [2]. Проблема состояла в том, что СТО, подобно классической механике, сохраняла известную «привилегированность» инерциальных систем отсчета. Но ясно, что такие системы приближенны, абстрактны, идеализированы. В реальности же мы имеем дело с системами, движущимися с изменяющимися скоростями, т.е. неинерциальными. Отсюда естественным образом возникает вопрос: можем ли мы применить принципы СТО к неинерциальным системам?

В V разделе обзорной статьи, опубликованной в 1907 г., А.Эйнштейн этот вопрос ставит прямо: «До сих пор мы применяли принцип относительности, т. е. требование независимости законов природы от состояния движения системы отсчета, только к *неускоренным* системам отсчета. Можно ли представить себе, что принцип относительности выполняется и для систем, движущихся относительно друг друга с ускорением? ... Этот вопрос должен возникнуть перед каждым, кто следил за применениями принципа относительности до настоящего времени...» [3]. Далее он предлагает достаточно стандартное решение поставленной задачи, к которому он, однако, пришел далеко не сразу. Как пишет А.Пайс, известный исследователь научной биографии Эйнштейна, при подготовке упомянутой обзорной статьи Эйнштейн «задумался над тем, каким образом следует видоизменить теорию тяготения Ньютона, чтобы она удовлетворяла СТО» [4]. И далее Пайс цитирует неопубликованную рукопись Эйнштейна, в которой он рассказывает: «Когда в 1907 г. я работал над обзорной статьей по СТО для журнала “*Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*”, я попытался видоизменить теорию тяготения Ньютона так, чтобы ее законы соответствовали [специальной] теории относительности. Попытки такого рода продемонстрировали, что это возможно, но они не удовлетворяли меня, так как строились на физически необоснованных гипотезах» [5]. Далее в рукописи говорится: «И тогда мне в голову пришла счастливейшая мысль в моей жизни. Существование гравитационного поля может считаться лишь относительным, точно так же, как существование электрического поля, наводимого в результате электромагнитной индукции. Это связано с тем, что *для наблюдателя, свободно падающего с крыши, гравитационное поле, по крайней мере, в его ближайшем окружении, не существует.* В самом деле, если при этом наблюдатель бросает какие-то предметы, то они находятся по отношению к нему в состоянии покоя или равномерного движения вне

зависимости от их химического или физического состава (здесь, естественно, не учитывается сопротивление воздуха). Таким образом, наблюдатель имеет право утверждать, что находится в “покое”. При таком подходе исключительно интересный экспериментально установленный закон, в соответствии с которым все тела падают с одинаковым ускорением, сразу приобретает глубокий физический смысл. Ясно, что если бы существовал один-единственный предмет, падающий в гравитационном поле не так, как другие тела, то это позволило бы наблюдателю установить, что вокруг него имеется поле тяготения, и он в нем падает. Если же таких предметов не существует (как с большой точностью демонстрирует эксперимент), то в распоряжении наблюдателя нет объективных средств обнаружения своего падения в гравитационном поле. В таком случае он вправе считать, что находится в покое в пространстве, лишенном поля тяготения. Экспериментально установленная независимость ускорения свободного падения от массы тела является, таким образом, мощным аргументом в пользу того, что постулат относительности может быть распространен на системы отсчета, находящиеся в относительном равномерном движении» [6].

В связи с этим для нашего исследования представляется важным отметить тот факт, что соответствующие теоретические и эмпирические предпосылки приведенных выше умозаключений Эйнштейна в физике были уже известны. Среди них, во-первых, *закон свободного падения тел в гравитационном поле*, сформулированный Г.Галилеем: все тела независимо от их массы движутся в гравитационном поле с одним и тем же ускорением. Во-вторых, полученный И.Ньютоном *закон всемирного тяготения*, согласно которому гравитационное притяжение между любыми двумя телами прямо пропорционально их массам и обратно пропорционально квадрату расстояния. В-третьих, *принцип эквивалентности гравитационной и инертной массы*. Масса, входящая в запись закона тяготения, называется гравитационной массой. Это понятие, вообще говоря, отличается от понятия инертной массы, входящей в запись второго закона Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$. 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. Этот принцип Ньютоном был только постулирован. В конце XIX в. данный принцип был проверен экспериментами Этвеша, который определил равенство гравитационной и инертной

массы с точностью до восьмого знака после запятой. Равенство $m_{\text{ин}} = m_{\text{тяг}}$ показывает глубокую аналогию между движением тел в поле тяготения и движением тел в отсутствие тяготения, но относительно ускоренной системы отсчета. Однако до Эйнштейна все эти факты не были не только обобщены, но даже не сопоставлены друг с другом. Очевидно, без создания специальной теории относительности такое обобщение было невозможно.

Но рассмотрим же, как Эйнштейн предварительно решает поставленную им задачу (здесь и далее мы будем пользоваться более принятой сейчас символикой) [7]. Рассматриваются две системы отсчета K и K' . K движется с постоянным ускорением a в направлении своей оси X . Система K' покоится, но находится в гравитационном поле, которое сообщает всем телам ускорение $-a$ в направлении оси X . Поскольку все тела в гравитационном поле ускоряются одинаково, постольку физические законы относительно K не отличаются от законов, отнесенных к K' . «Поэтому, – делает Эйнштейн вывод, – при современном состоянии наших знаний нет никаких оснований полагать, что системы отсчета... в каком-либо отношении отличаются друг от друга, и в дальнейшем мы будем предполагать полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета. Это предположение распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета. Эвристическая ценность этого предположения состоит в том, что оно позволяет заменить однородное поле тяжести равномерно ускоренной системой отсчета, которая до известной степени поддается теоретическому рассмотрению» [8].

Есть еще один мысленный эксперимент, размышления над которым привели Эйнштейна к формулировке основных идей ОТО. Речь идет о так называемом *парадоксе Эренфеста*, сформулированным им в 1909 г. Этот парадокс гласит, что абсолютно твердое тело, например диск или цилиндр, невозможно привести во вращение, скорость которого близка к световой. Согласно специальной теории относительности движущееся тело должно претерпевать сокращение в направлении движения, т.е. при вращении длина окружности вращающегося тела должна уменьшаться, а радиус остается неизменным. Эйнштейн предположил, что в действительности абсолютно твердый диск может вращаться с большой скоростью, а изменение отношения длины окружности к ее радиусу связано с *искривлением пространства*. Действительно, если пространство будет иметь положительную или отрицательную

кривизну, то отношение длины окружности к радиусу изменится: окружность одного и того же радиуса будет иметь различную длину в зависимости от кривизны пространства.

Некоторые основные выводы общей теории относительности

Таким образом, в общей теории относительности идея относительности распространяется и на неинерциальные движения. Это позволяет показать, что все физические законы выражаются в форме, не зависящей от конкретного выбора пространственно-временных координат, так как в противном случае любое различие могло бы послужить критерием выделения абсолютного движения и абсолютной системы координат. Но это предполагает учет эффектов гравитационного воздействия. Дело в том, что связывая изменения численных значений при сохранении формы уравнений физики независимо от системы отсчета с наблюдаемыми изменениями гравитационного поля, можно сохранить идею относительности всех движений.

Поясним этот тезис. Представим себе систему координат, находящуюся в пустом псевдоевклидовом пространстве. Ясно, что если пространство пустое, то сила тяжести, т.е. гравитационное поле, отсутствует, и, таким образом, в этой системе отсчета отсутствует вес. Пусть наша система начинает двигаться с ускорением $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Тогда явления в ней будут происходить так же, как и в однородном гравитационном поле. Иными словами, в системе координат, движущейся с равномерным ускорением, имитируется гравитационное поле. Это и есть известный принцип эквивалентности Эйнштейна.

Результаты измерений, полученные в такой равноускоренно движущейся системе, будут идентичны результатам измерений, полученным в системе, движущейся равномерно в гравитационном поле (разумеется, только в том случае, если ускорение движения в пустом пространстве равно по величине и противоположно по направлению ускорению, получаемому под воздействием гравитационного поля). Примечательно, что в случае свободного падения в гравитационном поле эффекты гравитации исчезают, и мы получаем инерциальную систему координат.

Если гравитационное поле неоднородно, т.е. меняется от точки к точке, то, видимо, можно выбрать такую достаточно малую область каждой точки, где эффекты гравитации можно нейтрализовать

в системе координат, свободно падающей с ускорением, соответствующим силе тяжести, которая действует в данной области. Но тогда метрика пространства будет также меняться от области к области, от точки к точке. Поэтому для определения интервала на таком пространстве необходимо использовать формулу

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k \quad (g_{ik} = g_{ik}), \quad (1)$$

в которой компоненты метрического тензора g_{ik} уже зависят от координат: $g_{ik} = g_{ik}(x_1, x_2, x_3)$.

Это утверждение равносильно высказыванию, что метрика пространства определяется гравитацией, или распределением гравитирующих масс, а само пространство – искривленное. Его кривизна характеризуется значениями метрического тензора. Но каким образом можно установить, вычислить, как гравитирующая масса определяет геометрию?

Известно, что геодезическая линия в искривленном пространстве вычисляется путем приравнивания к нулю вариации длины линии AB : $\partial \int_A^B ds = 0$. Подставляя сюда ds из выражения (1) и проводя вычисления, получаем уравнение геодезической линии:

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} = -\frac{1}{2} g^{im} \left(\frac{\partial g_{im}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{km}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{km}}{\partial x^m} \right) \frac{dx^i}{dx^m} \frac{dx^k}{ds}.$$

Пусть

$$\frac{1}{2} g^{im} \left(\frac{\partial g_{im}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{km}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{km}}{\partial x^m} \right) = \Gamma_{ik}^i.$$

Это выражение, называемое символами Кристоффеля, представляет собой комбинации первых производных от метрического тензора g_{ik} . Тогда

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} = -\Gamma_{ik}^i \frac{dx^i}{ds} \frac{dx^k}{ds}. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что движение частицы от ее массы не зависит: оно определяется только свойствами пространства-времени,

в котором происходит ее движение. Выражение d^2x/ds^2 представляет собой ускорение движения частицы (аналогично d^2x/dt^2 – ускорению в ньютоновской механике). Таким образом, мы получили уравнение движения частицы в гравитационном поле. Для получения уравнений, описывающих само гравитационное поле, воспользуемся известным из дифференциальной геометрии выражением тензора Римана – Кристоффеля R_{mki} через символы Кристоффеля:

$$R_{mki} = \frac{dx_{km}^s}{dx^i} - \frac{dx_{kl}^s}{dx^m} + \Gamma_{ip}^s \Gamma_{km}^p - \Gamma_{mp}^s \Gamma_{kl}^p.$$

Как мы уже отмечали, из тензора четвертого ранга R_{mki} можно получить тензоры более низких рангов: $R_{ik} = R_{miki}$, $R = R_{ikgik}$, – т.е. соответственно тензор Риччи и скалярную кривизну. Опираясь на все эти уравнения, Эйнштейн предположил, что

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} r = \chi T_{ik}, \quad (3)$$

где R_{ik} и R – тензоры кривизны; χ – эйнштейновская гравитационная постоянная ($\chi = 8cg/c^4$); g – гравитационная постоянная Ньютона; c – скорость света); T_{ik} – тензор энергии-импульса материи, находящейся в искривленном пространстве.

Из уравнений (3) следует, что искривленность пространства-времени (левая, геометрическая часть) определяется величинами физических характеристик материи, находящейся в этом пространстве-времени (правая часть уравнений). Таким образом, кривизна пространства-времени приобретает физическую значимость. Уравнения (3) представляют собой третий принцип общей теории относительности. Они отражают зависимость метрического (геометрического) и гравитационного полей от состояния пространства-времени и позволяют вычислять гравитационные эффекты при известных распределениях материи и энергии.

Разработка общей теории относительности и ее экспериментальные подтверждения окончательно закрепили переход от представления о пространстве как о пустом и абсолютномместилище мира к представлению о пространстве как об объекте, структура которого определяется материей. Но именно физические взгляды на пространство породили новые проблемы и собственно физического,

и философского плана. Что касается физических проблем, то речь идет прежде всего о пространстве Вселенной, так как на первый взгляд именно гравитационные взаимодействия являются ведущими в формировании ее структуры.

Экспериментальные подтверждения общей теории относительности

Искривление луча света при прохождении в поле тяготения

Галилей установил, что тела, на которые не действуют силы, движутся прямолинейно. Эйнштейн обобщил этот закон в следующем виде: тело, на которое не действуют силы, движется в поле тяготения по геодезическим. Это предсказание ОТО было проверено экспериментально английским астрофизиком А. Эддингтоном 29 мая 1919 г. во время солнечного затмения.

Согласно ОТО, отклонение светового луча у края Солнца должно достигать $1,74''$, что для астронома должно быть вполне заметным. Эддингтон пытался установить наличие этого эффекта, фотографируя звездное небо во время солнечного затмения и сравнивая с фотографией того же участка неба ночью. Результаты измерений показали, что наблюдаемое отклонение уменьшалось с удалением от Солнца.

Наблюдения Эддингтона были первой проверкой ОТО. 6 ноября 1919 г. после пяти месяцев анализа фотографий, на совместном заседании Королевского научного общества и Королевского астрономического общества было объявлено, что предсказания, сделанные Эйнштейном на основе общей теории относительности, подтвердились. Эта дата – дата триумфа общей теории относительности. За короткое время весть об этом успехе облетела весь мир, и ОТО по праву обрела статус научной теории.

Подобные измерения проводились еще несколько раз до 1970 г., когда был изобретен радиотелескоп. Дальнейшие измерения отклонения волн в гравитационном поле Солнца проводились в радиодиапазоне и отношение наблюдаемой величины к вычисленной согласно ОТО составляет $0,99997 \pm 0,00016$.

Эффект отклонения луча света в поле тяготения проявляется при наблюдениях «линзирования» или фокусировки электромагнитных волн, испущенных источником находящимся за областью сильного гравитаци-

онного поля. Отклонение лучей дает изображение удаленного источника в виде кольца, если и источник и гравитационная линза лежат на одной прямой с наблюдателем или в виде двух дуг, одна из которых лежит внутри, а другая снаружи кольца, возникающего при центральном положении. Если масса звезды, действующей как линза меньше массы Солнца, то различить изображения не представляется возможным, но эффект проявляется как суммарное увеличение яркости (так называемое микролинзирование). Первая гравитационная линза была обнаружена в 1979 г. для квазара, а в настоящее время наблюдения линзирования и микролинзирования достаточно распространены и широко используются в астрономии для обнаружения различных эффектов. Так, в 1994 г. с помощью микролинзирования был обнаружен новый класс слабосветящихся звезд – коричневые карлики.

Изменение частоты света при его распространении в гравитационном поле

Из теории Эйнштейна следует, что при движении в гравитационном поле свет должен терять энергию, подобно тому как брошенный вверх камень теряет кинетическую энергию, замедляя скорость. Потеря энергии светом проявляется как увеличение длины волны, то есть как смещение в красную сторону спектра. Это смещение в условиях Земли очень мало – порядка 10^{-15} , поэтому экспериментально обнаружить его удалось лишь в 1960 г.

Первые точные измерения гравитационного красного смещения были проделаны Р. Паундом и Г. Ребке для гамма-лучей, которые направлялись вверх и вниз в башне Гарвардской лаборатории. В результате было обнаружено изменение длины волны гамма лучей, которое с точностью до 10 % согласовывалось с предсказаниями общей теории относительности. В 1976 г. этот эффект был измерен Р. Вессо с точностью до 0,02 %. В этом эксперименте исследовалось смещение спектральных линий атомов водорода при движении ракеты в поле Земли. Оба эксперимента показали, что с ростом силы гравитационного поля возрастает смещение в красную часть спектра.

Замедление темпов хода часов в гравитационном поле

Теория относительности предсказывает замедление хода часов при помещении их в гравитационное поле. Первый эксперимент заключался в том, что очень точные атомные часы были отвезены

высоко в горы, где гравитационное поле слабее и после нескольких часов сравнили показания с предварительно синхронизированными часами, оставшимися на равнине. Точность этого эксперимента была не велика – 5%. В более точном эксперименте часы были помещены на самолет, который непрерывно летал в течение 14 ч. Окончательная разница в ходе часов была 45 нс, что подтверждало ОТО с точностью до 1%.

Эффект замедления времени проявляется и в большем времени распространении света в поле тяготения Солнца. Экспериментально этот эффект был обнаружен при наблюдении в радиотелескоп за прохождением Меркурия и Венеры за диском Солнца. ОТО предсказывает замедление времени прохождения луча света у края Солнца на $2 \cdot 10^{-4}$ с. В 1980 г. предсказания теории были измерены с точностью до 2%.

Смещение перигелия Меркурия

Перигелием называется самая близкая к Солнцу точка эллиптической орбиты (противоположная ей самая удаленная от Солнца точка называется афелием). Ньютоновская теория тяготения предсказывала, что орбита Меркурия должна прецессировать на угол, равный 532 угловым секундам за 100 лет. Поворот орбиты объяснялся гравитационными возмущениями движения Меркурия со стороны других планет Солнечной системы. В 1859 г. было установлено, что орбита Меркурия поворачивалась за столетие на 43" больше. Это расхождение на протяжении полувека волновало астрономов.

В 1915 г. Эйнштейн смог объяснить дополнительную прецессию Меркурия. Он использовал эквивалентность массы и энергии и учел вклад не только масс тел, но и их энергий. Объяснение давно известной аномалии было первым успехом новой теории.

Потеря энергии при излучении гравитационных волн

Этот эффект был установлен при наблюдении за пульсарами в двойной звездной системе. Пульсары – это звезды, которые очень быстро вращаются и могут обладать очень сильным магнитным полем. Пульсары впервые были открыты в 1967 г. радиоастрономами, зафиксировавшими регулярно повторяющиеся радиосигналы, приходящие из космоса. Необычайная точность, с которой они повторялись, сначала навела астрономов на мысль о разумной жизни, но

в течение полугода было обнаружено еще три таких объекта, и была принята гипотеза о природном происхождении этих сигналов.

Нейтронная звезда – один из этапов звездной эволюции достаточно массивных звезд. Исчерпав ядерное горючее, звезда оказывается не в силах противостоять быстрому гравитационному сжатию, сопровождаемому взрывом сверхновой. При сжатии происходит «вдавливание» электронов в протоны с образованием нейтронов. Звезда под действием гравитации сжимается в очень плотный объект – нейтронную звезду со средней плотностью $\rho \geq 10^{12} \text{ г / см}^3$.

Чтобы момент импульса сохранялся при уменьшении размеров вращающегося тела, его скорость должна увеличиться. Наглядно действие закона сохранения импульса можно продемонстрировать на примере вращающегося фигуриста: скорость его вращения увеличивается, когда он прижимает руки. Нейтронная звезда, сжавшаяся до очень маленьких размеров, начинает очень быстро вращаться. Например, скорость вращения самого быстрого пульсара, открытого в 2007 г., – 1 122 об / с.

Эффект излучения гравитационных волн был впервые отслежен на бинарном пульсаре созвездия Орла, паре нейтронных звезд вращающихся друг относительно друга, одна из которых – пульсар. Эта система уникальна тем, что в ней намного заметнее релятивистские эффекты. Общая теория относительности предсказывает, что подобная орбита медленно сжимается, потому что происходит потеря энергии вследствие излучения гравитационных волн. Для большинства пульсаров время, в течение которого период возрастает вдвое, совпадает по порядку величины с их возрастом и составляет миллионы и десятки миллионов лет. Этот процесс действительно был зафиксирован экспериментально (измеренное значение составляет $2,4 \cdot 10^{-12}$ с, что совпадает с предсказаниями до 1 %).

Эффект потери энергии за счет излучения гравитационных волн был обнаружен и при изучении двойных звезд. При изучении двойного пульсара PRS 1913+16 (где буквы обозначают сокращение от слова pulsar, а цифры – положение на небесной сфере – восхождение и склонение) было обнаружено, что компоненты этой двойной звезды сближаются ежегодно на несколько метров. Количественно эффект совпадает с предсказанным ОТО.

(Продолжение следует)

Примечания

1. См.: Головкин Н.В., Симанов А.Л., Сторожук А.Ю. Специальная теория относительности: основные предпосылки и идеи // *Философия науки*. – 2003. – № 2 (17).
2. Борн М. Эйнштейновская теория относительности. – М.: Мир, 1972. – С. 299.
3. Эйнштейн А. Собр. науч. трудов в 4-х т. Т. I. – М.: Наука, 1965. – С. 105.
4. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. – М.: Наука, 1989. – С. 170.
5. Цит. по: Там же.
6. Цит. по: Там же. – С. 170–171.
7. См.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов: В 4 т. – Т. I. – С. 105–106.
8. Там же. – С. 106.

Институт философии и права
СО РАН, г. Новосибирск

Simanov, A.L. and A.Yu. Storzuk. The general relativity: its history and modern problems. Part I

The paper deals with philosophical-methodological analysis of the modern situation in the study of the space-time structure. Its first part discusses the genesis of fundamental ideas of the general relativity which determined trends in the development of the gravitation theory and cosmology.

Keywords: relativity theory, cosmology, gravitation theory, space-time, theory foundation, experiment