



2.7. Теория гравитации (общая теория относительности), ее опытная проверка

Кратко изложим теорию гравитации Эйнштейна, которую не совсем правильно (например, по мнению академика В.А. Фока) называют общей теорией относительности. Начнем прежде всего с обсуждения опытов Галилея, которые показали, что все тела под действием силы тяготения движутся одинаково. Он производил свои опыты, бросая тела с высоты Пизанской башни в Италии. Опыты Галилея показали, что тяжелые и легкие тела при сбрасывании их с высоты башни достигали поверхности Земли одновременно во всех случаях, конечно, если не будет сильного сопротивления падению, скажем, сопротивления воздуха земной атмосферы. А оно всегда будет, если наблюдать движение тел не в откачанном от воздуха сосуде, например, этот эффект очень заметен для легчайшей «пушинки».

Любопытно отметить, что в свое время Аристотель считал, что скорость падающего тела зависит от его веса, например, трехфунтовый шар будет падать втрое быстрее, чем однофунтовый. Авторитет Аристотеля был настолько велик, что никто не интересовался, как он пришел к этому выводу, а тем более никто не осмеливался опровергать его. И вот молодой профессор Пизанского университета Галилео Галилей решил заняться проверкой выводов Аристотеля. Как говорит легенда, ему пришлось, бросая пушечное ядро и маленькую пульку с высоты башни в Пизе, наглядно доказать свое утверждение, что все тела падают с одинаковой скоростью. Мы можем с полным правом после опытов на Пизанской башне назвать Галилея подлинным отцом экспериментальной физики.

Остановимся на опытах Галилея несколько подробнее ввиду их принципиальной важности. Из формулы для пройденного пути s при равноускоренном движении с ускорением a при начальной скорости v_0 мы имеем:

$$s = v_0 t + at^2/2.$$

В опытах Галилея начальная скорость была равна нулю и время падения

$$t = (2s/a)^{1/2}.$$



2.7. Теория гравитации...

Поскольку путь был один и тот же во всех случаях и равен высоте Пизанской башни, то значения времен t будут для разных тел одинаковыми, если ускорение a будет одинаковым. Оно совпадает с ускорением силы тяжести у поверхности Земли, равным

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2. \quad (7.1)$$

Введем наряду с инертной массой M , которая входит во второй закон динамики Ньютона и связана с ускорением a и силой F по формуле

$$a = F/M, \quad (7.2)$$

еще и гравитационную массу M_G и гравитационную силу F_G

$$F_G = M_G g. \quad (7.3)$$

Используя закон Ньютона для гравитационной силы $F_G = Ma$, получаем после сравнения этой формулы с (7.2) выражение:

$$a = (M_G/M)g. \quad (7.4)$$

Из формулы (7.4) мы видим, что только при условии $M_G = M$ все тела будут падать с одинаковым ускорением, т.е. $a = g$.

Чтобы сравнить массы M_G и M , рассмотрим движение гармонического маятника в виде грузика с инертной массой M , нитью длиной l и с наибольшим амплитудным отклонением x (по горизонтальной оси), связанным с максимальным отклонением нити от вертикали углом θ (рис. 87 а, б). На грузик действуют две силы: во-первых, сила тяжести $F_G = gM_G$ и сила реакции нити T . Результирующая сила равна их векторной сумме (рис. 87б):

$$\mathbf{f} = \mathbf{F}_G + \mathbf{T}.$$

Треугольник сил на рис. 87б подобен треугольнику, показанному на рис. 87а. Поэтому из подобия треугольников:

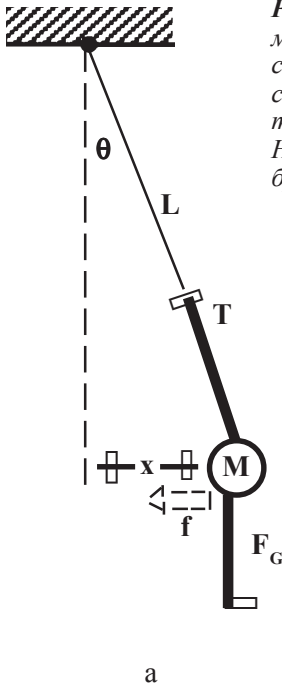
$$f/F_G = x/l,$$

но $f = Ma$, $F_G = gM_G$. Тогда:

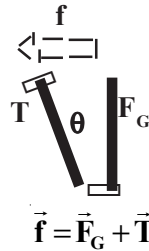
$$a = (M_G/M)(g/l)x.$$

Из теории колебаний маятника для периода его колебания τ имеем

$$a/x = 4\pi^2/\tau^2, \quad (7.5)$$



а



б

Рис. 87. Схема колебаний простого гармонического маятника в виде грузика массы M , подвешенного на нити длиной L . T – сила натяжения нити; F_G – сила тяжести; f – результирующая сила. На рисунке: а) общий вид маятника; б) треугольник сил.

откуда

$$\tau = 2\pi(l/g)^{1/2}(M/M_G)^{1/2}. \quad (7.6)$$

Выбирая различные грузики для маятника с различными массами M , мы получаем различные периоды колебаний по формуле (7.6). В настоящее время отношение M/M_G измерено для разных веществ с очень высокой точностью, и оно оказалось равным единице. Таким образом, инертная и гравитационная массы полностью совпали. Этот вывод является основой для теории гравитации Эйнштейна и носит название *принципа эквивалентности инертной и тяготеющей масс*.

Результат опытов Галилея был также проверен в последние годы. Так, например, физик из МГУ В.Б. Брагинский в 1971 году определил с большой точностью, что все тела действительно падают одинаково, т.е. он показал, что принцип эквивалентности ($M = M_G$) строго выполняется.



Гравитационная сила, действующая со стороны Земли на различные тела, локально не отличима от любых других силовых действий, искусственно создающих ускорение. Так, если заключить наблюдателя в закрытую кабину, то он не сможет сказать, стоит ли он неподвижно на поверхности Земли или движется вверх с ускорением g . Аналогичное происходит с имитацией гравитационной силы с помощью ускорения, которое можно использовать для компенсации тяготения. Именно это происходит в системе, которой предоставлена возможность свободно падать, например, в лифте, у которого оборвались канаты. Вычислим вес тела в лифте, который движется вниз с ускорением a (направление вниз при этом считается положительным). Сила по второму закону динамики Ньютона равна:

$$f = Ma.$$

Но одновременно она равна разности между силой тяготения на поверхности Земли F_G и весом тела в движущемся лифте с ускорением a , т.е. F_a . Тогда:

$$f = F_G - F_a = Ma \text{ или}$$

$$F_a = F_G - Ma = M(g - a).$$

Таким образом, как только лифт начнет двигаться, вес тела с массой M уменьшается и при его свободном падении, когда для ускорений наступит равенство $g = a$, $F_a = 0$, т.е. достигается состояние *невесомости*, возникающее в свободно падающем лифте.

Заметим, что принцип эквивалентности верен только локально. Поэтому такого типа опыты осуществляются в закрытых помещениях (кабинах, лифтах). Если же производить подобные наблюдения в больших областях пространства, например, когда космонавт смотрит в окно своей кабины, он отметит наличие поля тяготения.

Тяготение, как мы уже говорили, действует и на свет, поскольку в механике теории относительности имеет место соотношение между массой и энергией $E = Mc^2$. Т.к. свет, обладая энергией, имеет и массу, он отклоняется под действием тяготения, двигаясь около Солнца, как мы уже показывали на *рис. 84*. Этот эффект детально наблюдал английский физик-астроном Эддингтон в 1909 году во время солнечного затмения.



2.7. Теория гравитации...

В ходе приведенных здесь соображений о тяготении Эйнштейн пришел к выводу, что структуру пространства и времени, воплощенную в принципах специальной теории относительности, нельзя отделять от тяготения. И он предпринял вторую смелую попытку, построив новую теорию тяготения, отличную от ньютоновской. Ньютон предполагал, что сила тяготения равна:

$$F_G = GM_1M_2/R^2$$

и считал, что эта сила распространяется в пространстве мгновенно. Эйнштейн же хотел органически включить принцип эквивалентности тяготеющей и инертной масс, а также все, что давал его специальный принцип относительности, в фундамент новой теории тяготения.

Первое изменение предыдущих выводов специального принципа относительности касалось характера мировых линий в пространстве Минковского на плоскости x, ict . Там мировые линии изображались для движущихся частиц прямыми линиями внутри светового конуса. При наличии гравитации, как показал Эйнштейн, мировые линии будут искривляться, т.е. гравитация вносит кривизну в пространство-время. Мы можем только локально выбрать такую систему отсчета, где в некоей весьма малой ограниченной части искривленного пространства-времени мировые линии, вернее, их небольшие участки будут приближенно выпрямляться, что соответствует свободно падающей системе. Таким образом, инерциальная система отсчета, с которой мы имели дело раньше, теперь заменяется свободно падающей, и она здесь уже будет привилегированной.

Пространственно-временная диаграмма, описывающая более общую, т.е. более протяженную область, чем «свободно падающий ящик», должна отражать кривизну мировых линий. Здесь полезно сравнить кривизну поверхности сферической Земли и обычные плоские географические карты ее поверхности в типичном географическом атласе (проекция Меркатора), которые отличаются от изображения поверхности Земли на глобусе. На его поверхности геометрия Евклида не выполняется и наше пространство-время при действии гравитации тоже оказывается искривленным, только не в двух, а в трех измерениях. Эйнштейн высказал революционное предположение, что следует связать геометрические свойства искривленного пространства с физическими свой-



2.7. Теория гравитации...

ствами тяготения. На этом пути он и получил свои уравнения гравитационного поля, которые оказались довольно сложными.

Пока известно только несколько решений уравнений эйнштейновской теории тяготения. Укажем, что смысл теории заключается в том, что траектории всех свободно движущихся тел одинаково искривляются, так как они двигаются с одинаковым ускорением. Это ускорение и является тем общим свойством пространства, которое лежит в основе тяготения.

Назовем имена тех ученых, которые нашли решения уравнений тяготения в теории Эйнштейна.

В 1906 году астроном К. Шварцшильд получил первое решение уравнений Эйнштейна для сферической массы, окруженной пустым пространством, мало отличающееся от ньютоновских результатов. Из него следовало, что в теории тяготения Эйнштейна планеты двигаются не просто по неподвижным орбитам в виде эллипсов, а сами орбиты еще прецессируют (т.е. вращаются) в своей плоскости движения, но эффект оказался очень малым, поэтому его и не замечали раньше. Как показали точные астрономические наблюдения, даже в случае ближайшей к Солнцу планеты Меркурия, для которого эффект наибольший, он составлял всего лишь 43 угловых секунд за столетие, и опыт блестяще подтвердил этот принципиальный вывод теории Эйнштейна.

Такие же малые поправки были получены и для хода часов в поле тяготения. Как и следовало ожидать, релятивистская теория тяготения предсказывала, что все часы в поле тяготения должны замедлять свой ход. Любопытно, что двое совершенно одинаковых по конструкции часов, расположенные по высоте у поверхности Земли с расстоянием друг от друга на один метр, будут идти неодинаково. Нижние часы будут отставать от верхних на 10^{-16} секунды, что, конечно, далеко за пределами возможных измерений.

Другим следствием теории гравитации Эйнштейна является то, что поскольку свет имеет инертную массу, то он теряет энергию на преодоление гравитационного взаимодействия от испускающего его массивного источника. Потеря энергии светом приводит к увеличению его длины волны или уменьшению частоты. Данный эффект называется *гравитационным красным смещением*. Он наблюдается в спектрах света, испущенного Солнцем и звездами. Точно так же часы на Солнце идут медленнее, чем на Земле, из-за



2.7. Теория гравитации...

разности масс этих двух небесных тел. Чтобы измерить столь малые эффекты, надо было получить эталоны частоты, и впервые такие эталоны были созданы в 1960 году. Они работают на основе испускания фотонов радиоактивными атомными ядрами.

Однако теория тяготения Эйнштейна предсказывает и большие эффекты. Воспользуемся методом размерностей. Из трех мировых констант, входящих в теорию гравитации: скорости света c , массы M и гравитационной постоянной G можно образовать только одним способом величину размерности длины. Она была впервые получена Шварцшильдом и равна $R_G = 2GM/c^2$. Поэтому ее называют *радиусом Шварцшильда*, или просто *гравитационным радиусом*. Космический объект, возникающий в результате сжатия тела гравитационными силами до размеров сферы с радиусом, меньшим R_G , получил название *черной дыры*. Такие космические объекты втягивают в себя все, что хочет «убежать» от них, в том числе и свет.

Сам термин «черная дыра» появился в науке недавно – его ввел в обиход американский физик, занимающийся космологией, Д. Уиллер в 1969 году. Предсказание о существовании подобных образований было сделано почти 200 лет тому назад Митчелом, школьным учителем из английского города Кембриджа. Он представил в Королевское общество в Лондон доклад, в котором высказал идею о том, что массивная звезда создает столь большое поле тяготения, в результате чего свет, который тогда по Ньютону считали состоящим из летящих световых частиц, не сможет вылететь за пределы этого поля и будет втянут обратно в звезду. Автор считал, что таких звезд довольно много, мы их хотя и не видим, но должны ощущать по гравитационному действию. Аналогичные идеи примерно в то же время, независимо, высказывал и знаменитый французский ученый Лаплас.

Черные дыры в современной теории тяготения Эйнштейна вполне могут образовываться в результате эволюционного развития звезд. Так, черной дырой может стать звезда, в недрах которой угасли все термоядерные источники энергии. Повторяем, основным свойством черной дыры является то, что все сигналы от света и микрочастиц, которые создаются внутри нее, не могут выйти наружу.

Приведем наглядную картину сферического сжатия или *коллапса* звезды. Он может быть изображен на пространст-



2.7. Теория гравитации...

венно-временной диаграмме, где две из трех пространственных координатных осей направлены во взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости x, y , а временная ось ict направлена вертикально вверх. Звезда, имея вначале радиус R больше гравитационного радиуса $R > R_G$, не сжимается, т.е. не коллапсирует до тех пор, пока ее гравитационное поле не становится настолько сильным, что свет не может испускаться ею, т.е. до образования так называемого *горизонта событий*. Вещество звезды может вообще коллапсировать до сингулярности, т.е. до нулевого объема и бесконечной плотности, т.е. когда все законы физики теряют свою силу. Распространение световых сигналов из различных точек указано на чертеже (*рис. 88*) световыми конусами. Свет, испущенный из точек, более близких к звезде, больше смещается по направлению к ней, чем свет, испущенный из более удаленных точек.

Английские физики С. Хокинг и Р. Пенроуз показали, что если просчитать механизм движения не неподвижных, а вращающихся черных дыр, то они уже оказываются не столь черными и от них можно получать информацию. В частности, частица вблизи вращающейся черной дыры недалеко от горизонта ее событий может делиться на две микрочастицы так, что одна из образовавшихся микрочастиц падает в дыру, а другая удаляется на бесконечно большое расстояние, обладая большей массой и энергией, чем те, которыми обладала исходная микрочастица. Таким образом, мы получили не только информацию о существовании черной дыры, но и добились того, что вращательная энергия дыры частично уносится этой второй микрочастицей.

Остановимся еще на одном важном не до конца решенном вопросе, связанном с теорией тяготения. Специальная и общая теории относительности установили общий принцип, что абсолютная скорость не может быть измерена. Что же касается ускорения, то согласно современной теории тяготения, абсолютное ускорение существует. Его можно измерить с помощью прибора *акселерометра*, причем в качестве простейшего такого прибора можно использовать пружину с грузом на конце. Если упругость пружины неизменна и масса известна, то величина ускорения измеряется по натяжению пружины. Имея несколько наблюдателей, двигающихся ускоренно друг относительно друга, среди бесконечного числа возможных систем отсчета, мы найдем такую, в которой

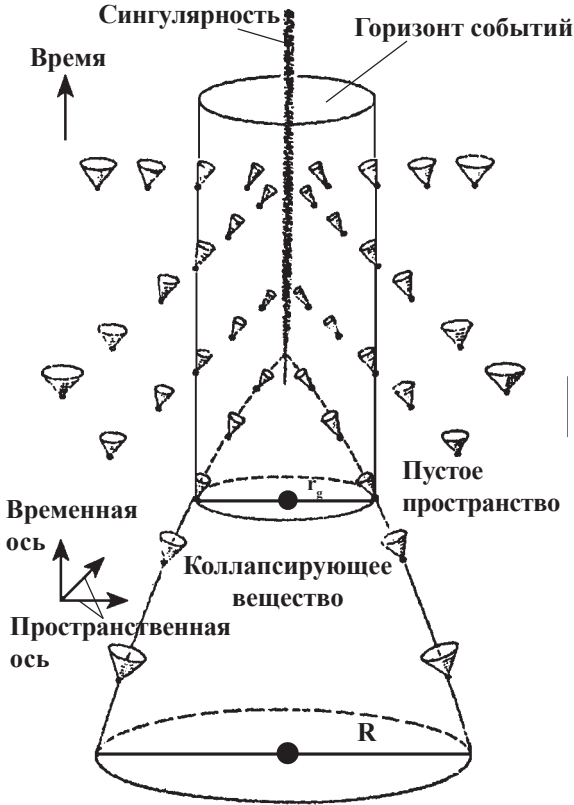


Рис. 88. Сферический гравитационный коллапс звезды, изображенный на пространственно-временной диаграмме. Когда радиус звезды достигает гравитационного радиуса R_G , то световые конусы целиком направлены внутрь черной дыры.

ускорение окажется равным нулю, – инерциальную. Еще Ньютон указывал, что его законы механики и всемирного тяготения справедливы только в инерциальной системе отсчета.

Представление об абсолютной инерциальной системе отсчета оспаривалось некоторыми философами, в их числе был философ и физик Эрнест Мах. Он предположил, что в общем случае ускорение не абсолютно, а определяется распределением вещества во Вселенной. Согласно принципу



2.7. Теория гравитации...

Маха, если бы распределение вещества во Вселенной внезапно изменилось, то изменилась и величина ускорения, и система, бывшая до того инерциальной, с этого момента могла бы не оказаться таковой. Мах предполагал, что величина инертной массы любого тела определяется всем остальным веществом Вселенной, но пока принцип Маха является спорным и не проверен экспериментально.

В теории гравитации Эйнштейна есть также предсказание о существовании *гравитационных волн*, т.е. о волновом характере распространения гравитационного взаимодействия. Если воспользоваться квантовыми представлениями, то оно распространяется со скоростью света с помощью своеобразных квантов такого поля – *гравитонов*. Эта проблема пока остается нерешенной из-за отсутствия, во-первых, сколько-нибудь разработанной квантовой теории гравитации и, во-вторых, из-за отсутствия прямых экспериментов, которые бы доказывали существование гравитонов.

Однако в астрофизике есть некоторые любопытные косвенные указания, связанные с открытием особых объектов в Космосе в июле 1967 года в Кембридже группой ученых, руководимой Э. Хьюишем, которые стали называть *пульсарами*. Несколько позже Д. Белл обнаружила, что от этих объектов исходят периодические радиоимпульсы. Отсюда и пошло название пульсаров, от английского слова *pulsar* – импульс. Быстрые вариации – «мерцания» радиосигналов – стали подвергаться детальному изучению. Было открыто большое число таких источников радиоизлучения, которые расположены в различных местах нашей Галактики. Их расстояния от Земли лежат в пределах от 200 до 7000 световых лет. В конце концов, после долгих споров астрофизики – теоретики и экспериментаторы – склонились к мнению, что обнаруженные радиоисточники – пульсары – не что иное, как быстро вращающиеся *нейтронные звезды*.

Нейтронная звезда – один из этапов в звездной эволюции. Мы не имеем возможности подробно останавливаться на теории образования нейтронных звезд, только укажем, что при гравитационном сжатии звезды в некий момент масса системы *протон + электрон* становится больше массы покоя нейтрона и энергетически выгоднее перейти к нейтронному состоянию вещества. Нейтронные звезды являются источниками очень сильных магнитных полей с напряженностями до $\sim 10^{12}$ Эрстед на их поверхности. Ось вращения



2.7. Теория гравитации...

нейтронной звезды, как и у Земли, не совпадает с магнитной осью, соединяющей северный и южный магнитные полюса. Поэтому при вращении нейтронной звезды из нее вылетают электроны, которые ускоряются гигантским магнитным полем звезды и становятся источниками наблюдаемого и периодически меняющегося радиоизлучения, а также излучений в других диапазонах частот. Нейтронная звезда по размерам очень компактное тело. Его масса близка к массе Солнца, но радиус нейтронных звезд всего порядка 20 километров. Поэтому плотность вещества в них колоссальная и достигает $5 \times 10^{14} \text{ г/см}^3$, что сравнимо с плотностью нуклонов внутри атомных ядер. Вращение нейтронных звезд происходит с очень стабильными периодами, которые чрезвычайно медленно уменьшаются со временем.

Два американских ученых Джо Тейлор и Рассел Халс в США в 1974 году открыли излучение *двойного пульсара*, в нем два таких объекта вращаются вокруг их общего центра тяжести. Эта система стала своеобразной физической космической лабораторией вне пределов Солнечной системы. Благодаря большим массам данных объектов системы можно было бы наблюдать тонкие эффекты, предсказываемые теорией гравитации Эйнштейна и трудно наблюдаемые в пределах Земли и Солнечной системы. В частности, по уменьшению периода вращения двойного пульсара можно судить о потере его энергии благодаря излучению гравитационных волн, т.е. энергии, уносимой гравитонами. К сожалению, из-за большой удаленности этих источников излучения мы пока не можем наблюдать гравитоны на Земле. Однако теория позволяет с большой точностью (до 0,05%) предсказать уменьшение периода вращения двойного пульсара из-за гравитационного излучения. На *рис. 89* показано уменьшение некоей величины (орбитального фазового сдвига), связанное с уменьшением периода импульсов радиоизлучения двойного пульсара со временем за период с 1975 по 1992 гг., которое показывает блестящее совпадение с опытными данными. Тейлор и Халс за свои исследования, доказавшие, хотя и косвенно, существование гравитонов, получили в 1993 году Нобелевскую премию по физике.

При создании в 1915 году общей теории относительности А.Эйнштейн сразу же указал на три экспериментальных эффекта, которые могли бы служить ей опытной проверкой: гравитационное смещение спектральных линий, отклонение



световых лучей в поле тяготения Солнца и смещение перигелия Меркурия. Все они наблюдались так, как это предсказывала теория тяготения Эйнштейна, однако точность экспериментов была весьма невысокой. Например, при измерении смещений спектральных линий погрешность измерений составляла 1%. Только в 1979 году, как указывает В.Л. Гинзбург, были опубликованы результаты такого рода измерений, которые совпадали с предсказаниями теории с ошибкой около 0,01%.

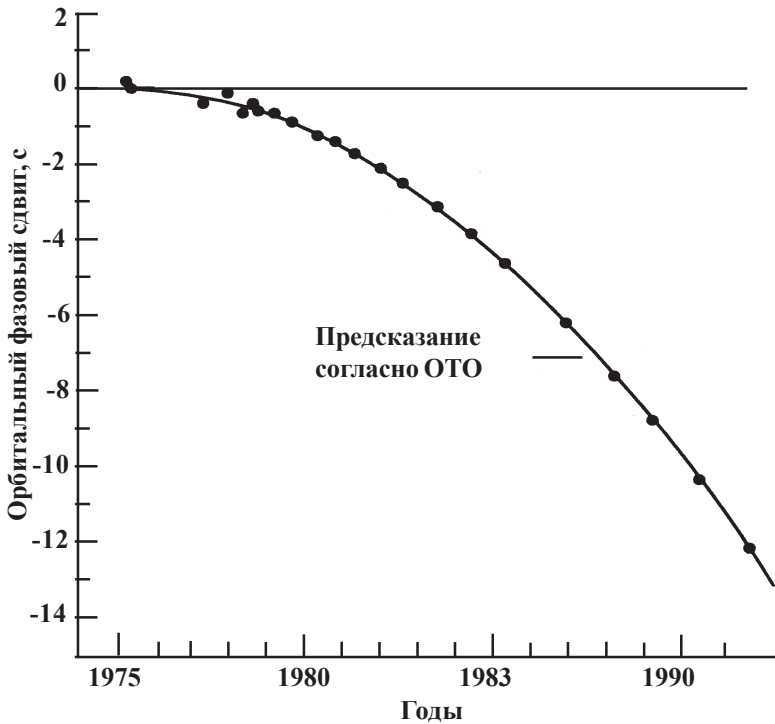


Рис. 89. Влияние уменьшения орбитального периода на фазу двойного пульсара. Сплошная линия соответствует предсказанию теории тяготения Эйнштейна для измеренных значений масс компонент двойного пульсара. Точками нанесены данные наблюдений.



2.7. Теория гравитации...

Отклонение световых лучей в поле тяготения Солнца наблюдалось только во время его затмения, и погрешность соответствующих измерений была порядка 10%. Однако здесь, кроме световых лучей, можно воспользоваться эффектом отклонения для радиоволн и использовать радиолокационные методы, причем снизить погрешность до 0,1%.

Что касается эффекта смещения перигелия Меркурия, то он измерен с погрешностью в 1%.

Итак, сейчас можно утверждать, что даже в случае слабых гравитационных полей общая теория относительности проверена в лучшем случае с погрешностью порядка 0,1%, для современной физики такая точность считается весьма невысокой.

Трудности с опытной проверкой общей теории относительности связаны с малостью эффектов, доступных наблюдению на Земле и в пределах Солнечной системы. Хотя можно надеяться, что, например, техника межпланетных полетов ракет может уменьшить соответствующие погрешности до 0,01%.

Все же проблема дальнейшей экспериментальной проверки общей теории относительности, особенно в сильных полях гравитации, остается важной актуальной задачей современной физики. Здесь многое может дать дальнейшее более детальное изучение пульсаров, а также обнаружение черных дыр.