GENERAL RELATIVITY

I. B. KHRIPLOVICH

Elementary foundations of General Relativity are discussed on a level which is comprehensible for high school students. Some new achievements in this field are described.

Элементы общей теории относительности обсуждаются на уровне, доступном для старшеклассников. Рассказывается о некоторых новейших достижениях в этой области.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

И. Б. ХРИПЛОВИЧ

Новосибирский государственный университет

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Общая теория относительности (ОТО) – современная теория тяготения, связывающая его с кривизной четырехмерного пространства–времени.

В своем, так сказать, классическом варианте теория тяготения была создана Ньютоном еще в XVII веке и до сих пор верно служит человечеству. Она вполне достаточна для многих, если не для большинства, задач современной астрономии, астрофизики, космонавтики. Между тем ее принципиальный внутренний недостаток был ясен еще самому Ньютону. Это теория с дальнодействием: в ней гравитационное действие одного тела на другое передается мгновенно, без запаздывания. Ньютоновская гравитация так же соотносится с общей теорией относительности, как закон Кулона с максвелловской электродинамикой. Максвеллу удалось изгнать дальнодействие из электродинамики. В гравитации это сделал Эйнштейн.

Начать рассказ следует с замечательной работы Эйнштейна 1905 года, в которой была сформулирована специальная теория относительности и которая завершила в идейном отношении развитие классической электродинамики. У этой работы несомненно были предшественники, среди которых нельзя не упомянуть Лоренца и Пуанкаре. В их статьях уже содержались многие элементы специальной теории относительности. Однако ясное понимание, цельная картина физики больших скоростей появились лишь в упомянутой работе Эйнштейна. Не случайно, несмотря на наличие прекрасных современных учебников, ее до сих пор можно рекомендовать для первого знакомства с предметом не только студентам, но и старшеклассникам.

Что же касается ОТО, то все ее основополагающие элементы были созданы Эйнштейном.

Впрочем, предчувствие того, что физика может быть связана с кривизной пространства, можно найти в трудах замечательных ученых прошлого века Гаусса, Римана, Гельмгольца, Клиффорда. Гаусс, который пришел к идеям неевклидовой геометрии несколько ранее Лобачевского и Больяи, но так и не опубликовал своих исследований в этой области, не только считал, что “геометрию приходится ставить в один ряд не с арифметикой, существующей чисто a priori, а скорее с механикой”. Он пытался проверить экспериментально, путем точных (для того времени) измерений геометрию нашего пространства. Его идея вдохновила Римана, полагавшего,

© Хриплович И.Б., 1996

что наше пространство действительно искривлено (а на малых расстояниях даже дискретно). Жесткие ограничения на кривизну пространства были получены из астрономических данных Гельмгольцем. Клиффорд считал материю рябью на искривленном пространстве.

Однако все эти блестящие догадки и прозрения были явно преждевременны. Создание современной теории тяготения было немыслимым без специальной теории относительности, без глубокого понимания структуры классической электродинамики, без осознания единства пространства–времени. Как уже отмечалось, ОТО была создана в основном усилиями одного человека. Путь Эйнштейна к построению этой теории был долгим и мучительным. Если его работа 1905 года "К электродинамике движущихся сред" появилась как бы сразу в законченном виде, оставляя вне поля зрения читателя длительные размышления, тяжелый труд автора, то с ОТО дело обстояло совершенно иначе. Эйнштейн начал работать над ней с 1907 года. Его путь к ОТО продолжался несколько лет. Это был путь проб и ошибок, который хотя бы отчасти можно проследить по публикациям Эйнштейна в эти годы. Окончательно задача была решена им в двух работах, доложенных на заседаниях Прусской Академии наук в Берлине 18 и 25 ноября 1915 года. В них были сформулированы уравнения гравитационного поля в пустоте и при наличии источников.

В последнем этапе создания ОТО принял участие Гильберт, который одновременно и независимо сформулировал уравнения поля с источниками. Вообще значение математики и математиков для ОТО очень велико. Ее аппарат, тензорный анализ, или абсолютное дифференциальное исчисление, был развит Риччи и Леви-Чивита. Друг Эйнштейна, математик Гроссман познакомил его с этой техникой.

И все же ОТО – это физическая теория, в основе которой лежит ясный физический принцип, твердо установленный экспериментальный факт.

ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ И ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ ТЯГОТЕНИЯ

Факт этот по существу был установлен еще Галилеем. Он хорошо известен каждому успевающему старшекласснику: все тела движутся в поле тяжести (в отсутствие сопротивления среды) с одинаковым ускорением, траектории всех тел с заданной скоростью искривлены в гравитационном поле одинаково. Благодаря этому, в свободно падающем лифте никакой эксперимент не может обнаружить гравитационное поле. Иными словами, в свободно движущейся в гравитационном поле системе отсчета в малой области пространства–времени гравитации нет. Последнее утверждение – это одна из формулировок принципа эквивалентности.

Данное свойство поля тяготения отнюдь не тривиально. Достаточно вспомнить, что в случае электромагнитного поля ситуация совершенно иная. Существуют, например, незаряженные, нейтральные тела, которые электромагнитного поля вообще не чувствуют. Так вот, гравитационно-нейтральных тел нет, не существует ни линеек, ни часов, которые не чувствовали бы гравитационного поля. Любой эталон прямой, например луч света, не обладает в поле тяготения свойствами прямой линии. Нет объектов, которые в этом поле можно было бы отождествить с прямыми, как в евклидовой геометрии. Поэтому геометрию нашего пространства естественно считать неевклидовой.

Некоторое представление о свойствах такого пространства можно получить на простейшем примере сферы, поверхности обычного глобуса. Рассмотрим на ней сферический треугольник, фигуру, ограниченную дугами большого радиуса. (Дуга большого радиуса, соединяющая две точки на сфере, – это кратчайшее расстояние между ними; она естественный аналог прямой на плоскости.) Выберем в качестве этих дуг участки меридианов, отличающихся на 90° долготы, и экватора (см. рис. 1). Сумма

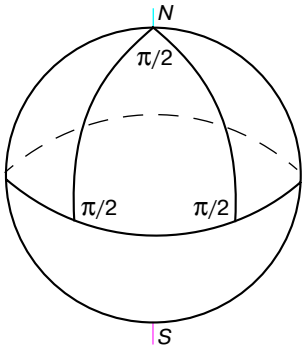


Рис. 1. Сферический треугольник.

углов этого сферического треугольника отнюдь не равна π, сумме углов треугольника на плоскости:

$$\alpha + \beta + \gamma = \frac{3}{2}\pi. \qquad (1)$$

Заметим, что превышение суммы углов данного треугольника над π может быть выражено через его площадь S и радиус сферы R:

$$\alpha + \beta + \gamma - \pi = \frac{S}{R^2}. \qquad (2)$$

Можно доказать, что это соотношение справедливо для любого сферического треугольника. Заметим также, что обычный случай треугольника на плоскости также вытекает из этого равенства: плоскость может рассматриваться как сфера с $R \longrightarrow \infty$.

Перепишем формулу (2) иначе:

$$K = \frac{1}{R^2} = \frac{\alpha + \beta + \gamma - \pi}{S}. \qquad (3)$$

Отсюда видно, что радиус сферы можно определить, оставаясь на ней, не обращаясь к трехмерному пространству, в которое она погружена. Для этого достаточно измерить площадь сферического треугольника и сумму его углов. Иными словами, R или K является внутренней характеристикой сферы. Величину K принято называть гауссовой кривизной, она естественным образом обобщается на произвольную гладкую поверхность:

$$K(x) = \lim_{S \to 0} \frac{\alpha + \beta + \gamma - \pi}{S}. \qquad (4)$$

Здесь углы и площадь относятся к малому треугольнику на поверхности, ограниченному линиями кратчайших расстояний на ней, а кривизна, вообще говоря, меняется от точки к точке, является величиной локальной. И в общем случае, так же как и для сферы, K служит внутренней характеристикой поверхности, не зависящей от ее погружения в трехмерное пространство. Гауссова кривизна не меняется при изгибании поверхности без ее разрыва и растяжения. Так, например, конус или цилиндр можно разогнуть в плоскость, и поэтому для них, так же как для плоскости, $K = 0$.

На соотношения (3), (4) полезно взглянуть несколько иначе. Вернемся к рисунку 1. Возьмем на полюсе вектор, направленный вдоль одного из меридианов, и перенесем его вдоль этого меридиана, не меняя угла между ними (в данном случае нулевого), на экватор. Далее, перенесем его вдоль экватора, снова не меняя угла между ними (на сей раз $\pi/2$), на второй меридиан. И наконец, таким же образом вернемся вдоль второго меридиана на полюс. Легко видеть, что, в отличие от такого же переноса по замкнутому контуру на плоскости, вектор окажется в конечном счете повернутым относительно своего исходного направления на $\pi/2$ или на

$$\alpha + \beta + \gamma - \pi = KS. \qquad (5)$$

Этот результат, поворот вектора при его переносе вдоль замкнутого контура на угол, пропорциональный охваченной площади, естественным образом обобщается не только на произвольную двумерную поверхность, но и на многомерные неевклидовы пространства. Однако в общем случае n-мерного пространства кривизна не сводится к одной скалярной величине $K(x)$. Это более сложный геометрический объект, имеющий $n^2(n^2 - 1)/12$ компонент. Его называют тензором кривизны, или тензором Римана, а сами эти пространства – римановыми. В четырехмерном римановом пространстве–времени общей теории относительности тензор кривизны имеет 20 компонент.

КЛАССИЧЕСКИЕ ОПЫТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ОТО

В начале предыдущего раздела уже отмечалось, что гравитационное поле влияет на движение не только массивных тел, но и света. В частности, фотон, распространяясь в поле Земли вверх, совершает работу против силы тяжести и поэтому теряет энергию. Как известно, энергия фотона пропорциональна его частоте, которая, естественно, тоже падает. Этот эффект – красное смещение – был предсказан Эйнштейном еще в 1907 году. Нетрудно оценить его величину. Работа против силы тяжести, очевидно, пропорциональна gh, где g – ускорение свободного падения, а h – высота подъема. Произведение gh имеет размерность квадрата скорости. Поэтому результат для относительного смещения частоты выглядит из соображений размерности так:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{gh}{c^2}, \qquad (6)$$

где $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света. При $g \approx 10^3$ см/с^2, $h \sim 10^3$ см относительное смещение ничтожно мало: $\sim 10^{-15}$. Неудивительно, что экспериментально красное смещение удалось наблюдать лишь спустя полвека, с появлением техники, использующей эффект Мёссбауэра. Это сделали Паунд и Ребка.

Еще один эффект, предсказанный Эйнштейном на заре ОТО, – отклонение луча света в поле Солнца. Его величину нетрудно оценить следующим образом. Если характерное, прицельное расстояние луча от Солнца равно ρ, то радиальное ускорение составляет GM/ρ^2, где G – ньютоновская гравитационная постоянная, а M – масса Солнца. За характерное время пролета ρ/c радиальная компонента скорости фотона изменится на $GM/(\rho c)$ и соответственно угол отклонения составит

$$\theta \sim \frac{GM}{c^2\rho}.$$

Удобно ввести часто используемую в ОТО характеристику массивного тела, так называемый гравитационный радиус:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}. \qquad (7)$$

Наивное использование полуклассических соображений действительно приводит к ответу

$$\theta = \frac{r_g}{\rho}.$$

Именно этот результат был получен Эйнштейном в одном из первоначальных вариантов ОТО. Первая мировая война воспрепятствовала проверке, неблагоприятной для теории. Окончательный, правильный результат ОТО вдвое больше:

$$\theta = 2\frac{r_g}{\rho}. \qquad (8)$$

Гравитационный радиус Солнца $r_g \approx 3$ км, а прицельный параметр естественно сделать как можно ближе к обычному радиусу Солнца, который составляет $7 \cdot 10^5$ км. Таким образом, для луча света, проходящего вблизи поверхности Солнца, угол

отклонения равен 1,75″. Измерения, проведенные группой Эддингтона во время солнечного затмения 1919 года, подтвердили последнее предсказание. Это был подлинный триумф молодой общей теории относительности.

И наконец, к числу классических тестов ОТО относится также вращение перигелия орбиты Меркурия. Замкнутые эллиптические орбиты – это специфика нерелятивистского движения в притягивающем потенциале $1/r$. Неудивительно, что в ОТО орбиты планет незамкнуты. Малый эффект такого рода удобно описывать как вращение перигелия эллиптической орбиты. Задолго до появления ОТО астрономы знали, что перигелий орбиты Меркурия поворачивается за столетие примерно на 6000″. Поворот этот в основном объяснялся гравитационными возмущениями движения Меркурия со стороны других планет Солнечной системы. Оставался, однако, неустранимый остаток – около 40″ в столетие. В 1915 году Эйнштейн объяснил это расхождение в рамках ОТО.

Из простых соображений размерности можно ожидать, что поворот перигелия за один оборот составляет

$$\delta \sim \frac{r_g}{R},$$

где R – радиус орбиты. Результат аккуратного расчета в рамках ОТО для орбиты, близкой к круговой, равен

$$\delta = \frac{3\pi r_g}{R}. \qquad (9)$$

При радиусе орбиты Меркурия $R \approx 0{,}6 \cdot 10^8$ км это дает 43″ в столетие, снимая таким образом существовавшее расхождение. Ясно, кстати, чем выделяется в этом отношении Меркурий: это планета, ближайшая к Солнцу, планета с наименьшим радиусом орбиты R. Поэтому вращение перигелия орбиты у нее максимально.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Однако роль ОТО отнюдь не сводится к исследованию малых поправок к обычной ньютоновской гравитации. Существуют объекты, так называемые черные дыры, в которых эффекты ОТО играют ключевую роль, важны стопроцентно. Это компактные звезды.

Еще в XVIII веке Митчел и Лаплас независимо заметили, что могут существовать звезды, обладающие совершенно необычным свойством: свет не может покинуть их поверхность. Рассуждение выглядело примерно так. Тело, обладающее радиальной скоростью υ, может покинуть поверхность звезды радиуса R и массы M при условии, что кинетическая энергия этого тела $m\upsilon^2/2$ превышает энергию притяжения GMm/R, то есть при $\upsilon^2 > 2GM/R$. Применение последнего неравенства к свету (как мы теперь понимаем, совершенно не обоснованное) приводит к выводу: если радиус звезды массы M меньше, чем

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

то свет не может покинуть ее поверхность, такая звезда не светит! Последовательное применение ОТО приводит к такому же выводу, причем, поразительно, правильный критерий количественно совпадает с наивным, необоснованным. Величина r_g, гравитационный радиус, уже встречалась раньше (см. формулу (7)).

Черная дыра – вполне естественное название для такого объекта. Свойства его весьма необычны. Черная дыра возникает, когда звезда сжимается настолько сильно, что усиливающееся гравитационное поле не выпускает во внешнее пространство ничего, даже свет. Поэтому из черной дыры не выходит никакая информация.

Занятно выглядит падение пробного тела на черную дыру. По часам бесконечно удаленного наблюдателя это тело достигает гравитационного радиуса лишь за бесконечное время. С другой стороны, по часам, установленным на самом пробном теле, время этого путешествия вполне конечно.

Многочисленные результаты астрономических наблюдений дают серьезные основания полагать, что черные дыры – это не просто игра ума физиков-теоретиков, а реальные объекты, существующие по крайней мере в ядрах галактик.

ПУЛЬСАР PSR 1913+16 И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

Нобелевская премия по физике за 1993 год была присуждена Халсу и Тейлору за исследование пульсара PSR 1913+16 (PSR означает пульсар, а цифры относятся к координатам на небесной сфере: прямое восхождение $19^h\ 13^m$, склонение 16°). Исследование свойств излучения этого пульсара показало, что он является компонентой двойной звезды. Иными словами, у него есть компаньон и обе звезды вращаются вокруг общего центра масс. Расстояние между этим пульсаром и его компаньоном составляет всего $1{,}8 \cdot 10^6$ км. Если бы невидимый компаньон был обычной звездой с характерным радиусом $\sim 10^6$ км, то наблюдались бы, очевидно, затмения пульсара. Однако ничего подобного не происходит. Подробный анализ наблюдений показал, что невидимая компонента – это не что иное, как нейтронная звезда.

Существование нейтронных звезд было предсказано теоретически еще в 30-е годы. Они образуются в результате бурного гравитационного сжатия массивных звезд, сопровождающегося взрывом сверхновых. После взрыва давление в оставшемся ядре массивной звезды продолжает нарастать, электроны с протонами сливаются (с испусканием

нейтрино) в нейтроны. Образуется очень плотная звезда с массой, несколько большей массы Солнца, но очень малого размера, порядка 10 – 15 километров, не превышающего размер астероида. Несомненно, наблюдение нейтронных звезд уже само по себе является выдающимся открытием.

Кроме того, тщательное исследование движения этой двойной звезды дало новое подтверждение предсказания ОТО, касающегося незамкнутости эллиптических орбит. Поскольку гравитационные поля в данной системе очень велики, периастр орбиты вращается несравненно быстрее, чем перигелий орбиты Меркурия, он поворачивается на 4,2° в год. Изучение этого и других эффектов позволило также определить с высокой точностью массу пульсара и нейтронной звезды. Они равны соответственно 1,442 и 1,386 массы Солнца. Но и это далеко не все.

Еще в 1918 году Эйнштейн предсказал на основе ОТО существование гравитационного излучения. Хорошо известно, что электрически заряженные частицы, будучи ускоренными, излучают электромагнитные волны. Аналогично, массивные тела, двигаясь с ускорением, излучают гравитационные волны, рябь геометрии пространства, распространяющуюся тоже со скоростью света.

Следует заметить, что аналогия эта неполна (впрочем, как практически и всякая иная). Одно из отличий между электромагнитными и гравитационными волнами, имеющее довольно существенный характер, состоит в следующем. В отличие от случая электромагнитного поля плотность энергии гравитационного поля, гравитационной волны локально, в данной точке, можно всегда обратить в нуль подходящим выбором системы координат. В свое время, лет 60 – 70 назад, это обстоятельство рассматривалось как серьезная трудность теории. Затем, однако, смысл его был прояснен и проблема снята. Тем не менее, по-видимому, стоит остановиться на этом вопросе в данной, по существу научно-популярной, статье по следующей причине. В последние годы в нашей стране в некоторых публикациях, претендующих на серьезный научный характер, а также в научно-популярной литературе появились утверждения о том, что возможность обращения в нуль локальной плотности энергии гравитационного поля является коренным, принципиальным дефектом ОТО.

На самом же деле ничего страшного в этом факте нет. Он прямое следствие принципа эквивалентности. Действительно, как уже упоминалось выше, переходя в систему, связанную со свободно падающим лифтом, мы обращаем в нуль напряженность гравитационного поля. Вполне естественно, что в этой системе равна нулю и плотность энергии гравитационного поля[1].

[1] Это соображение принадлежат С.И. Литерату, учителю средней школы № 130 г. Новосибирска.

Отсюда, однако, отнюдь не следует, что гравитационные волны – всего лишь игра ума, математическая абстракция. Это в принципе наблюдаемое физическое явление. Так, например, стержень, находящийся в поле гравитационной волны, испытывает деформации, меняющиеся с ее частотой. Увы, оговорка “в принципе” отнюдь не случайна: масса любого объекта на Земле настолько мала, а движение его столь медленно, что генерация гравитационного излучения в земных условиях совершенно ничтожна, не видно сколько-нибудь реального способа зарегистрировать такое излучение. Существует ряд проектов создания детекторов гравитационного излучения от космических объектов. Однако и здесь реальных результатов до сих пор нет.

Следует также сказать, что хотя плотность энергии гравитационного поля в любой точке можно по своему желанию обратить в нуль выбором подходящей системы координат, полная энергия этого поля во всем объеме, полный его импульс имеют совершенно реальный физический смысл (конечно, если поле достаточно быстро убывает на бесконечности). Столь же наблюдаемой, хорошо определенной величиной является и потеря энергии системой за счет гравитационного излучения.

Все это имеет самое прямое отношение к пульсару PSR 1913+16. Эта система также должна излучать гравитационные волны. Их энергия в данном случае огромна, она сравнима с полной энергией излучения Солнца. Впрочем, даже этого недостаточно, чтобы непосредственно зарегистрировать эти волны на Земле. Однако энергия гравитационных волн может черпаться здесь только из энергии орбитального движения звезд. Падение последней приводит к уменьшению расстояния между звездами. Так вот, тщательные измерения импульсов радиоизлучения от пульсара PSR 1913+16 показали, что расстояние между компонентами этой двойной звезды уменьшается на несколько метров в год в полном согласии с предсказанием ОТО. Любопытно, что потеря энергии двойной звездой за счет гравитационного излучения была впервые рассчитана Ландау и Лифшицем, они поместили этот расчет в качестве учебной задачи в первое издание своей замечательной книги “Теория поля”, которое вышло в 1941 году.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ И КОРИЧНЕВЫЕ КАРЛИКИ

И наконец, сюжет, еще более свежий, чем пульсар PSR 1913+16. Он тесно связан, однако, с идеей, возникшей еще на заре ОТО. В 1919 году Эддингтон и Лодж независимо заметили, что, поскольку звезда отклоняет световые лучи, она может рассматриваться как своеобразная гравитационная линза. Такая линза смещает видимое изображение звезды-источника по отношению к ее истинному положению.

Первая наивная оценка может привести к выводу о полной безнадежности наблюдения эффекта. Из простых соображений размерности можно было бы заключить, что изображение окажется сдвинутым на угол порядка r_g/d, где r_g – гравитационный радиус линзы, а d – характерное расстояние в задаче. Даже если взять в качестве линзы скопление, состоящее из 10^4 звезд, а для расстояния принять оценку $d \sim 10$ световых лет, то и тогда этот угол составил бы всего 10^{-10} радиан. Разрешение подобных углов практически невозможно.

Однако такая наивная оценка просто неверна. Это следует, в частности, из исследования простейшего случая соосного расположения источника S, линзы L и наблюдателя O (см. рис. 2). Задача эта была рассмотрена в 1924 году Хвольсоном[1] и спустя 12 лет Эйнштейном. Обратимся к ней и мы. Ясно, что для всякого расстояния d_1 между источником и линзой, d – между линзой и наблюдателем и для любого гравитационного радиуса r_g линзы (звезды или скопления звезд) найдется такое минимальное расстояние ρ между лучом из источника и линзой, при котором этот луч попадет в приемник. При этом изображения источника заполняют окружность, которую наблюдатель видит под углом φ. Углы φ и φ_1 малы, так что $\varphi = h/d$, $\varphi_1 = h/d_1$, а, кроме того, $h = \rho$. Отсюда легко находим

$$\theta = \varphi + \varphi_1 = \frac{h(d_1 + d)}{d_1 d}.$$

С другой стороны, для θ справедлива, очевидно, формула (8). Таким образом,

$$h = \sqrt{2r_g \frac{d_1 d}{d_1 + d}}.$$

И наконец, интересующий нас угол составляет

$$\varphi = \sqrt{2r_g \frac{d_1}{(d_1 + d)d}}. \qquad (10)$$

Таким образом, правильный порядок величины угловых размеров изображения не r_g/d, а $\sqrt{r_g/d}$ (мы считаем здесь, что все расстояния по порядку величины одинаковы). Он оказался намного больше первой, наивной оценки, и это радикально меняет ситуацию с возможностью наблюдения эффектов гравитационных линз.

Изображение источника в виде окружности (ее принято называть кольцом Эйнштейна), создаваемое гравитационной линзой при аксиально-симметричном расположении, реально наблюдалось. Сейчас известно несколько источников в радиодиапазоне, которые выглядят именно так, кольцеобразно.

[1] Профессор Петербургского университета, автор пятитомного курса физики, широко известного в начале века.

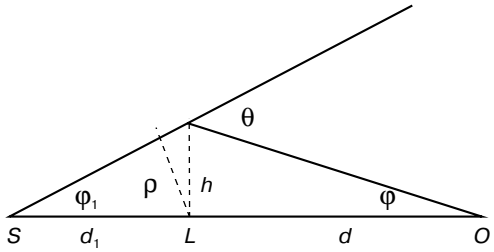


Рис. 2. Гравитационная линза. Осесимметричный случай. S – источник, L – линза, O – наблюдатель.

Если, однако, гравитационная линза не лежит на прямой, соединяющей источник с наблюдателем, картина оказывается иной. В случае сферически-симметричной линзы возникают два изображения (см. рис. 3), одно из которых лежит внутри кольца Эйнштейна, соответствующего осесимметричной картине, а другое – снаружи. Подобные изображения также наблюдались, они выглядят как двойные квазары, как квазары-близнецы.

Если источник движется, то перемещаются и оба изображения. Пока яркости обоих сравнимы с яркостью источника, для оценки углового расстояния между ними можно по-прежнему использовать выражение (10). Если масса звезды, действующей в качестве линзы, невелика, скажем, на два – три порядка величины меньше массы Солнца, то разрешить такой угол между изображениями, ~0,001″, практически немыслимо. Тем не менее обнаружить подобное явление можно. Дело в том, что при сближении изображений их суммарная яркость растет. Явление это, так называемое микролинзирование, имеет достаточно специфический характер: рост яркости и ее последующее падение происходят симметрично во времени, причем изменение яркости происходит одинаково на всех длинах волн (угол отклонения (10) не зависит от длины волны).

Поиски микролинзирования, которые велись на протяжении нескольких лет двумя группами

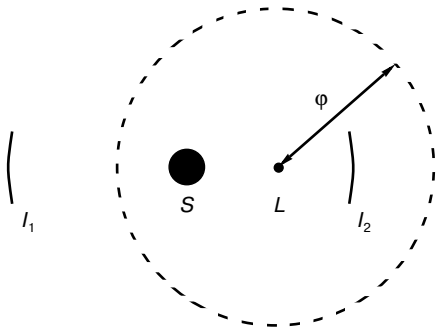


Рис. 3. Гравитационная линза. Общий случай. S – проекция источника на фронтальную плоскость, L – проекция линзы, L_1, L_2 – изображения источника.

астрономов, австралийско-американской и французской, не просто привели к обнаружению эффекта. Таким образом был открыт новый класс небесных тел: слабосветящиеся карликовые звезды, так называемые коричневые карлики, именно они играют роль микролинз. Все это произошло совсем недавно. Если еще в январе 1994 года было известно лишь два – три подобных события, то в настоящее время они уже исчисляются десятками. Поистине первоклассное открытие в астрономии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОТО – завершенная физическая теория. Она завершена в том же смысле, что и классическая механика, классическая электродинамика, квантовая механика. Подобно им, она дает однозначные ответы на физически осмысленные вопросы, дает четкие предсказания для реально осуществимых наблюдений и экспериментов. Однако, как и всякая иная физическая теория, ОТО имеет свою область применимости. Так, вне этой области лежат сверхсильные гравитационные поля, где важны квантовые эффекты. Законченной квантовой теории гравитации не существует.

ОТО – удивительная физическая теория. Она удивительна тем, что в ее основе лежит, по существу, всего один экспериментальный факт, к тому же известный задолго до создания ОТО (все тела падают в поле тяжести с одинаковым ускорением). Удивительна тем, что она создана в большой степени одним человеком. Но прежде всего ОТО удивительна своей необычайной внутренней стройностью, красотой. Не случайно Ландау говорил, что истинного физика-теоретика можно распознать по тому, испытал ли человек восхищение при первом же знакомстве с ОТО.

Примерно до середины 60-х годов ОТО находилась в значительной мере вне основной линии развития физики. Да и развитие самой ОТО отнюдь не было весьма активным, оно сводилось в большой степени к выяснению определенных тонких мест, деталей теории, к решению пусть важных, но достаточно частных задач. И не случайно еще на моей памяти уважаемый физик старшего поколения не советовал молодым теоретикам заниматься ОТО. “Это наука для пожилых людей,” – говорил он.

Вероятно, одна из причин такой ситуации состоит в том, что ОТО возникла в некотором смысле слишком рано, Эйнштейн обогнал время. С другой стороны, уже в его работе 1915 года теория была сформулирована в достаточно завершенном виде. Не менее важно и то обстоятельство, что наблюдательная база ОТО оставалась очень узкой. Соответствующие эксперименты чрезвычайно трудны. Достаточно напомнить, что красное смещение удалось измерить лишь спустя почти 40 лет после того, как было обнаружено отклонение света в поле Солнца.

Однако в настоящее время ОТО – бурно развивающаяся область современной физики. Это результат огромного прогресса наблюдательной астрономии, развития экспериментальной техники, впечатляющего продвижения в теории.

К сожалению, отразить по-настоящему в одной популярной статье достижения ОТО, по-видимому, невозможно. Я затронул в ней всего лишь несколько сюжетов. Их выбор определялся двумя критериями. Во-первых, степенью важности для понимания теории хотя бы в общих чертах. Во-вторых, возможностью изложить вопрос без излишней вульгаризации, оставаясь при этом в рамках школьной физики и математики. Разумеется, даже эти сюжеты удалось затронуть только очень бегло. А сколько отнюдь не менее увлекательных тем осталось вообще за пределами статьи!

ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ЧТЕНИЯ

Тому, кто захочет познакомиться с ОТО более подробно, можно рекомендовать следующие книги, сравнительно доступные для российского читателя:

1. *Нарликар Дж.* Гравитация без формул. Пер. с англ. С.И. Блинникова. М.: Мир, 1985.

Очень популярный рассказ об основах ОТО и ее современных представлениях.

2. *Новиков И.Д.* Энергетика черных дыр. М.: Знание, 1986.

Брошюра сочетает изложение одного из самых увлекательных вопросов ОТО с решением красивых задач, вполне доступных для старшеклассников. Относится к лучшим образцам научно-популярной литературы.

3. *Берков А.В.*, *Кобзарев И.Ю.* Теория тяготения Эйнштейна. Общие принципы и экспериментальные следствия. М.: МИФИ, 1989;

Берков А.В., *Кобзарев И.Ю.* Приложения теории тяготения Эйнштейна к астрофизике и космологии. М.: МИФИ, 1990.

По существу две части одной книги. Книга написана физиками для физиков, содержит необходимый минимум математического аппарата. Лучшее введение в ОТО для студентов.

4. *Ландау Л.Д.*, *Лифшиц Е.М.* Теория поля. М.: Наука, 1988.

Серьезная классическая книга, пользующаяся мировой известностью. В дальнейших рекомендациях не нуждается.

* * *

Иосиф Бенционович Хриплович, доктор физико-математических наук, профессор Новосибирского университета, главный научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера. Область научных интересов: теория элементарных частиц, общая теория относительности, ядерная и атомная физика.