

представляется наиболее перспективным в связи с проблемой обнаружения гравитационных волн. Удивительно хорошее согласие имеет место и для двойного пульсара J0737–3039, для которого удалось выделить оба параметра, r_S и s , определяющих величину задержки Шапиро и, следовательно, проверить уже два независимых параметра

$$\frac{s^{(\text{obs})}}{s^{(\text{th})}} = 0,9999 \pm 0,0005, \quad (163)$$

$$\frac{\dot{P}_b^{(\text{obs})}}{\dot{P}_b^{(\text{th})}} = 1,003 \pm 0,012. \quad (164)$$

Это стало возможным благодаря более удачному расположению плоскости орбиты двойной системы — она видна практически с ребра — что приводит к существенному увеличению эффектов общей теории относительности при прохождении сигнала вблизи самой поверхности звезды-компаньона.

Что же касается двойной системы, содержащей пульсар 1534 + 12, то здесь ситуация оказалась менее тривиальной. Дело в том, что для этой системы также удалось выделить оба параметра, определяющих величину задержки Шапиро. Но если для величины s теория и наблюдения находятся в хорошем согласии:

$$\frac{s^{(\text{obs})}}{s^{(\text{th})}} = 1,010 \pm 0,008, \quad (165)$$

то для скорости изменения орбитального периода предсказание и теория явно не соответствуют друг другу:

$$\frac{\dot{P}_b^{(\text{obs})}}{\dot{P}_b^{(\text{th})}} = 0,87 \pm 0,09. \quad (166)$$

Несмотря на это противоречие, авторы все же не склонны связывать его с возможным нарушением самой теории относительности. Дело в том, что на определение параметров двойной системы должно оказывать заметное влияние ее ускорение относительно Земли, которое, в свою очередь, зависит от взаимного расположения пульсара и солнечной системы в Галактике. Поскольку же точность определения расстояния до радиопульсаров в настоящее время невелика, то не исключено, что именно это обстоятельство и приводит к наблюдаемому рассогласованию.

Отметим, наконец, что возможность использования формулы Эйнштейна для гравитационного излучения реальных объектов также не является очевидной. В частности, изменение орбиталь-

ного периода может быть обусловлено приливными эффектами, возникающими за счет конечного размера звезд (формула Эйнштейна справедлива лишь для точечных масс). Но, как было показано, двойная система, состоящая из двух нейтронных звезд, является все же достаточно «чистой» физической лабораторией, так что нейтронные звезды, благодаря своей компактности, можно рассматривать как точечные.

2.3.3. Гравитационные линзы. Еще одним новым физическим явлением (впрочем, тесно связанным с эффектом отклонения света в поле Солнца), открытым в конце XX века, стало обнаружение линзирования далеких квазаров гравитационным полем более близких галактик. Фактически, здесь речь идет об еще одном следствии уравнения (148). Первым на возможность линзирования гравитационным полем указал в 1924 г. петербургский физик О. Д. Хвольсон (1852–1934). Публикация же Эйнштейна на эту тему относится лишь к 1936 г.. Однако и Хвольсон, и Эйнштейн рассматривали лишь возможность линзирования на звездах. Поэтому они считали, что гравитационное линзирование (т. е. наблюдение второго изображения или же кольца) наблюдаться не может. На возможность наблюдать эффект гравитационного линзирования на далеких галактиках обратил внимание в 1937 г. Ф. Цвикки (1898–1974). Однако потребовалось еще сорок лет, чтобы наблюдение гравитационных линз стало реальностью. Первая гравитационная линза была обнаружена в 1979 г., а сейчас полный каталог содержит уже более сотни таких объектов. Поэтому в табл. 4 мы приводим лишь объекты, открытые за первые десять лет наблюдений.

Таблица 4. Гравитационные линзы, открытые за первое десятилетие их наблюдений

Название	Число изобр.	$\Delta\theta$ угл. секунд	z_l	z_{QSO}	Метод	Год
0957 + 561	2	6,1	0,36	1,41	опт./радио	1979
1115 + 080	4	2,3	0,29	1,72	опт.	1980
2016 + 112	3	3,8	1,01	3,27	опт.	1984
2237 + 0305	4	1,8	0,04	1,41	опт.	1985
0142 + 100	2	2,2	0,49	2,72	опт.	1987
3C324	3	2,0	0,84	1,21	опт./радио	1987
1413 + 117	4	1,1	1,40	2,55	опт./радио	1988
1422 + 231	4	3,1	1,0	2,63	опт./радио	1989

Для определения характерного углового радиуса линзирования следует вновь воспользоваться формулой (148), которая легко позволяет определить угловой радиус кольца Θ_{HE} , возникающего в том случае, если все три тела, источник, линза и Земля, находятся на одной прямой. Поскольку угол отклонения света равен сумме углов θ_1 и θ_2 (см. рис. 22), то угол $\Theta_{\text{HE}} = \theta_1$, определяющий радиус кольцевого изображения, запишется как

$$\Theta_{\text{HE}} = \left[\frac{4GM}{c^2} \frac{D_2}{D_1(D_1 + D_2)} \right]^{1/2}. \quad (167)$$

Здесь D_1 есть расстояние между наблюдателем и линзой а D_2 — между линзой и источником. Это и есть знаменитое выражение для радиуса кольца Хвольсона–Эйнштейна. Для характерных расстояний до квазаров и масс линзирующих галактик угловое расстояние между изображениями должно составлять несколько угловых секунд.

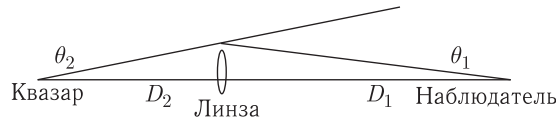


Рис. 22. Определение радиуса Хвольсона–Эйнштейна

В действительности, конечно же, идеально соосный случай никогда не реализуется. Кроме того, сама линзирующая галактика не является точечным объектом. Поэтому обычно изображение далекого квазара представляет собой не кольцо Хвольсона–Эйнштейна, а несколько протяженных образований, число которых зависит от распределения массы в линзе. Характерные изображения показаны на рис. 23. Существует даже теорема, согласно которой для прозрачной неточечной линзы число изображений должно быть нечетным. Однако во всех случаях формула (167) дает правильную оценку расстояния между изображениями.

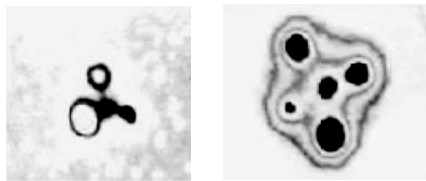


Рис. 23. Гравитационные линзы MG J0414 + 0534 и «крест Эйнштейна» QSO 2237+0305

К сожалению, неопределенность в расстояниях D_1 и D_2 , как и в массе линзирующей галактики, не позволяет использовать гравитационные линзы для проверки общей теории относительности. Вместе с тем, гравитационные линзы позволяют получить другую, часто уникальную информацию. Например, если излучение квазара сильно переменено (а такая переменность на масштабах времени от дней до нескольких лет и является одним из особенностей этого класса объектов), то по временной задержке можно независимо определять расстояния до квазара и линзирующей галактики. Временная задержка при этом должна составлять от нескольких месяцев до года; у нескольких гравитационных линз такая задержка действительно была обнаружена.

2.3.4. Микролинзирование. Качественно теория микролинзирования полностью совпадает с теорией обычных гравитационных линз. Отличие состоит лишь в том, что термин «микролинзирование» используется в том случае, если как источник света, так и линзирующее тело представляют собой обычные звезды. Для средних расстояний между звездами в нашей Галактике угловое расстояние между изображениями должно быть порядка 10^{-6} угловой секунды. Поэтому, как уже говорилось, и Эйнштейн, и Хвольсон считали, что зарегистрировать линзирование на звездах практически невозможно. Лишь в 1970 г. А. В. Бялко показал, что при микролинзировании может существенно изменяться светимость более далекой звезды. В результате становится возможным зарегистрировать событие по непродолжительному усилению ее яркости. Однако вероятность такого события была очень мала, и поэтому казалось, что никакой надежды на прогресс в этой области нет.

Тем не менее, здесь также был достигнут несомненный успех. И заслуга в этом, безусловно, принадлежит Б. Пачиньскому (1940–2007). Он понял, что микролинзирование может быть обнаружено, если одновременно наблюдать большое количество звезд. Оказалось, что при известной плотности звезд в нашей Галактике для регистрирования нескольких событий в год необходимо одновременно наблюдать за 5 миллионами звезд. Причем наблюдать если не ежедневно, то по крайней мере раз в неделю. И, что не менее важно, он также показал, что уровень приемной аппаратуры, достигнутый к концу XX века, позволяет решить эту задачу. Авторитет Б. Пачиньского, известного астрофизика-теоретика, был высок. Задача, поставленная им, чрезвычайно интересна. Игра стоила свеч. Несколько групп организовали наблюдения, и в 1993 г. первые объекты микролинзирования были

обнаружены. А к 2005 г. было зарегистрировано уже несколько десятков таких событий.

На рис. 24 показана характерная кривая блеска при микролинзировании на звездах нашей Галактики. Линия соответствует теоретическому предсказанию. Как мы видим, кривая блеска должна быть полностью симметрична и иметь характерную колоколообразную форму, которая, в свою очередь, не должна зависеть от длины волны. Этим она существенно отличается от переменных звезд, кривые блеска которых всегда асимметричны. Продолжительность же микролинзирования составляет обычно 20–50 суток.

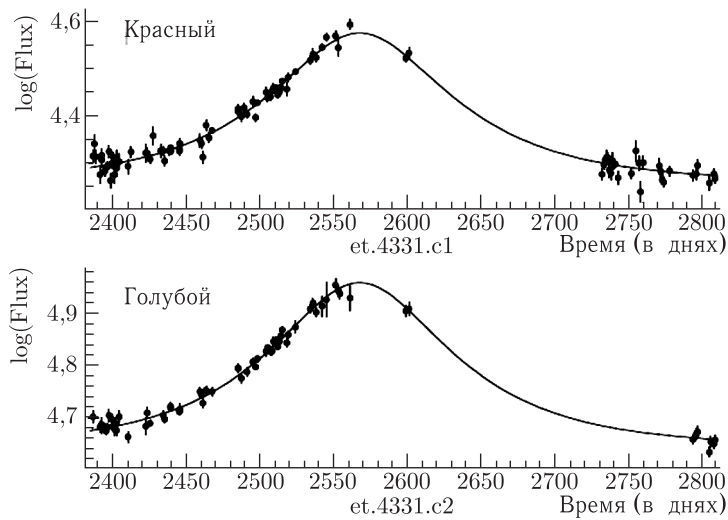


Рис. 24. Характерная кривая блеска при микролинзировании

Как и линзирование на галактиках, микролинзирование не позволяет проводить проверку предсказаний общей теории относительности. С другой стороны, наблюдая объекты микролинзирования можно получить дополнительную информацию как о распределении звезд по массам, так и о свойствах темной материи. Чрезвычайно интересно было бы обнаружить также линзирование на двойных звездах. В этом случае кривая блеска не должна быть гладкой, в отличие от показанной на рис. 24.

2.3.5. Прецессия гироскопов. Наконец, как уже говорилось, еще одним замечательным предсказанием общей теории относительности является прецессия гироскопов. Выше мы рассмотрели прецессию, связанную с дополнительными гравитомаг-

нитными силами, которые возникают за счет движения гравитирующих масс. Понятно, что такая прецессия отсутствует в ньютоновской теории гравитации, ее нет и в метрике Шварцшильда. Однако если гравитирующее тело, например звезда или даже Земля, вращается вокруг своей оси, то согласно общей теории относительности, возникают силы, приводящие к регулярному повороту оси свободно вращающегося тела. Как можно получить из соотношений (141) и (143), угловая частота прецессии на экваторе имеет вид

$$\Omega_g = \frac{1 + \gamma}{2} \frac{GJ_r}{r^3 c^2}, \quad (168)$$

где J_r — момент импульса центрального тела, а r — радиус орбиты. Для Земли скорость поворота оси вращения составляет лишь 0,041 угловых секунды за один год.

Этот эффект, однако, значительно меньше т.н. геодезической прецессии, которая возникает за счет искривления пространства-времени вблизи гравитирующих масс. Иными словами, увеличение длин отрезков приводит не только к вращению эллиптических орбит, но и к повороту оси вращения гироскопа, движущегося по такой орбите. В этом случае угловая скорость прецессии гироскопа должна составлять

$$\Omega_{geo} = \frac{1 + 2\gamma}{2} \frac{GMv}{r^2 c^2}, \quad (169)$$

где v — скорость движения тела по орбите. Для спутника, вращающегося вокруг Земли, угловая частота геодезической прецессии должна быть порядка 6,6 угловых секунды за один год.

Как мы видим, скорость прецессии гироскопов вблизи Земли должна быть чрезвычайно мала. Тем не менее, современный уровень измерений в принципе позволяет выделить подобные эффекты. В 2004 г. был запущен спутник Gravity Probe B, специально спроектированный для обнаружения релятивистской прецессии. После 16 месяцев работы эксперимент был успешно завершен, однако точность обработки данных позволила пока подтвердить лишь наличие геодезической прецессии.

С другой стороны, геодезическая прецессия в тесных двойных системах, содержащих радиопульсары, должна быть значительно больше. Действительно, вращающаяся нейтронная звезда также представляет собой гироскоп, и к ней применимы все формулы, рассмотренные выше. В результате, согласно (169), угловая скорость прецессии нейтронной звезды должна быть порядка одного градуса в год. Следовательно, за несколько лет