

$R \approx 0,6 \cdot 10^8$ 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, в которых эффекты ОТО играют ключевую роль, важны стопроцентно. Это так называемые черные дыры.

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 v , может покинуть поверхность звезды радиусом R и массой M при условии, что кинетическая энергия этого тела $mv^2/2$ превышает энергию притяжения GMm/R , т.е. при $v^2 > 2GM/R$. Применение последнего неравенства к свету (как мы теперь понимаем, совершенно не обоснованное) приводит к выводу: если радиус звезды 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, установ-

ленным 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 (буквы PSR означают пульсар, а цифры относятся к координатам на небесной сфере: прямое восхождение $19^h 13^m$, склонение $+16^\circ$). Исследование свойств излучения этого пульсара показало, что он является компонентом 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 невидимый компонент – 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 км, 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 $4,2^\circ$ в год. Изучение этого и других эффектов позволило также определить с высокой точностью массы 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 ноль 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 была 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 ноль 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 ноль напряженность гравитационного поля. Вполне естественно, что в этой системе равна нулю и плотность энергии гравитационного поля.¹

¹ Это соображение принадлежит С.И. Литерату, учителю средней школы № 130 г. Новосибирска.