

длительное наблюдение внешнего наблюдателя позволяет ему заглянуть только в ограниченный отрезок истории сжимающейся сердцевины и что он обречен навеки остаться без сигналов, отправляемых из сердцевины после того, как горизонт событий уже возник.

17. Гравитационное излучение

Теория тяготения Эйнштейна предсказывает существование гравитационных волн, свойства которых очень сходны со свойствами электромагнитного излучения. Гравитационные волны испускаются телами, обладающими массой и движущимися с ускорением; эти волны распространяются с такой же скоростью, с какой распространяются электромагнитные волны, т. е. со скоростью света. Когда гравитационные волны проходят через весомые тела, они сообщают этим телам ускорение; после того как проходит импульс гравитационного излучения, все частицы изменяют свои скорости. Более того, когда гравитационный импульс прошел через облако частиц, находившихся первоначально в покое относительно друг друга, частицы оказываются уже в относительном движении. Эти относительные движения направлены перпендикулярно распространению гравитационной волны.

Общая теория относительности позволяет подсчитать количество энергии, получаемое при возбуждении гравитационных волн. По сравнению с возбуждением электромагнитных волн движущимися электрическими зарядами интенсивности гравитационных волн оказываются чрезвычайно малыми; в связи с этим перспективы их быстрого экспериментального обнаружения не слишком обнадеживающие, тем не менее уже с конца пятидесятых годов осуществляется целая программа в этом направлении *).

Гравитационные волны *поляризованы*; они вызывают ускорение, направленное перпендикулярно направлению распространения, напоминая в этом отношении электромагнитное излучение. Но электромагнитные и гравитационные волны имеют все же совершенно различные свойства поляризации. Допустим, что в пространстве взвешено неподвижное газообразное облако электрически заряжен-

*) Д. ж. Вебер, Общая теория относительности и гравитационные волны, ИЛ, 1962.

ных частиц; пусть через это облако проходит электромагнитная волна. Все частицы будут смещаться этой волной вперед и назад в одном и том же направлении. Это направление вместе с направлением распространения волны определяет *плоскость поляризации*. Аналогичный эксперимент

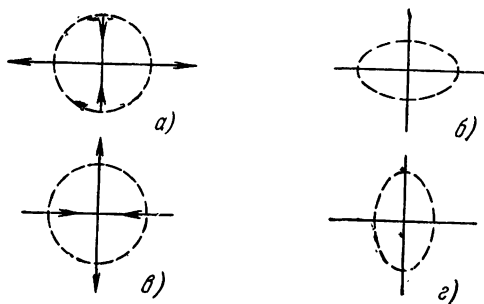


Рис. 60. Гравитационная волна.

с гравитационной волной будет выглядеть так: сначала покоящиеся тяжелые частицы находятся во взвешенном состоянии; проходящая через эти частицы гравитационная волна приводит их в движение относительно друг друга. Если какую-то частицу принять за систему отсчета, частицы справа и слева от нее могут расходиться в противоположные стороны друг от друга, а частицы сверху и снизу могут устремиться друг к другу. В следующий момент времени движение всех частиц изменится на обратное. Частицы, расположенные сверху и снизу по вертикали, будут двигаться наружу, а частицы, расположенные по горизонтали, устремятся внутрь. На рис. 60 видно, как такие частицы, образующие в начальный момент времени круг около произвольно выбранной частицы — системы отсчета, будут двигаться в последующие моменты времени, если на них действует проходящая гравитационная волна. (Предполагается, что волна распространяется в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа.) Все перемещения происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Действие гравитационной волны можно сравнить с действием так называемых *волн сдвига*. Волны сдвига представляют собой один из двух типов акустических волн, которые могут существовать в твердых упругих телах.

Другой тип волн, волны *расширения* (или *сжатия*), распространяются быстрее волн сдвига. Волны обоих типов возникают при землетрясениях. Разница соответствующих времен прибытия волн этих двух типов на различные сейсмические станции служит основой для определения эпицентра землетрясения. Точно так же, как и в волнах сдвига,

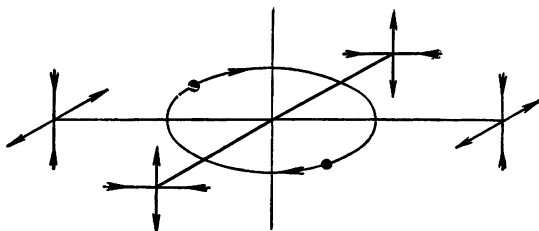


Рис. 61. Поляризация гравитационной волны, излучаемой двойной звездой.

состояние поляризации гравитационной волны не может быть охарактеризовано только одной плоскостью поляризации, а требует задания двух взаимно перпендикулярных направлений, перпендикулярных направлению распространения; по этим направлениям происходит движение частиц наружу и внутрь.

Одним из типов источников гравитационных волн являются двойные звезды. *Двойные звезды* образованы двумя «солнцами», совершающими движение относительно друг друга и около их центра инерции, в точности так же как происходит движение Земли относительно Солнца. Все движение происходит в одной плоскости. Такая система, согласно теории, испускает гравитационное излучение по всем направлениям. В орбитальной плоскости поляризация гравитационного излучения совпадает с орбитальной плоскостью и плоскостью, перпендикулярной к ней. Приемник гравитационных волн, расположенный вдали от двойной звезды, но в орбитальной плоскости двойной звезды, примет гравитационное излучение с той же самой поляризацией, какая возникает, если двойную звезду как целое повернуть на 90° относительно линии, соединяющей двойную звезду с наблюдателем (рис. 61). Чтобы обнаружить гравитационную волну с другой поляризацией приемником,

находящимся в той же точке, следовало бы повернуть двойную звезду на угол 45° относительно той же линии.

Мощность гравитационного излучения можно оценить следующим образом. Система, состоящая из двух звезд, обладает двумя видами энергии. Один из видов энергии — это энергия покоя mc^2 ; она определяется полной массой двойной звезды. Другой вид энергии — это просто механическая энергия, которая рассматривалась уже в ньютоновской физике. По порядку величины механическая энергия определяется выражением mv^2 , где через v обозначена скорость одной компоненты двойной звезды относительно другой. Механическая энергия оказывается отрицательной; если мы захотим из двойной звезды получить две независимые, необходимо затратить работу. Во всяком случае, отношение механической энергии двойной звезды к ее энергии покоя v^2/c^2 , грубо говоря, определяется отношением гравитационного радиуса компонент двойной звезды к расстоянию между компонентами (при таком сравнении множители типа 2 или 0,5 и т. д. просто не учитываются). Время диссипации, т. е. время, за которое на гравитационное излучение будет перерасходована энергия, сравнимая с механической энергией (связывающей компоненты в единую двойную звезду), можно определить как произведение времени, необходимого световому лучу для прохождения расстояния между компонентами, умноженному на куб отношения расстояния между компонентами к их гравитационному радиусу.

Если обозначить время диссипации через T , расстояние между компонентами двойной звезды через d , а гравитационный радиус через R , то

$$T \sim \frac{d}{c} \left(\frac{d}{R} \right)^3.$$

Формула, определяющая время, за которое может быть израсходована на излучение гравитационных волн энергия, равная энергии покоя системы, отличается от приведенного выше выражения тем, что вместо третьей степени отношения (d/R) будет стоять четвертая.

Пусть компоненты двойной звезды обладают массами порядка массы Солнца, а расстояние между ними по порядку величины равно расстоянию между Землей и Солнцем. Если выразить отношение (d/c) через степени десяти,

то для такой системы мы получим величину 10^3 сек, а для отношения (d/R) величину 10^8 . Откуда для времени диссипации T порядок величины оказывается равным 10^{27} сек или 10^{20} лет. Так как «возраст» Вселенной оценивается всего лишь в 10^{10} лет, то скорость диссипации энергии на гравитационное излучение оказывается пренебрежимо малой по сравнению с потерями энергии на излучение света и другие процессы, ведущие к старению звезд.

Однако двойные звезды излучают гравитационные волны все сильнее и сильнее, если уменьшается период их обращения. Оставаясь в разумных пределах значений звездных параметров, можно допустить, что компонентами двойной звезды будут два белых карлика. *Белые карлики* представляют собой звезды, вещество в которых сжато настолько, что для получения плотности белых карликов пришлось бы сжать массу, равную массе Солнца до размеров Земли. Таким образом, если двойная звезда образована двумя белыми карликами, их среднее расстояние друг от друга может достигать до 10 000 км (или 10^9 см), а отношение (d/R) по порядку величины может приблизиться к 10^4 . Для такой системы период обращения может упасть до долей минуты, а для того чтобы свет прошел расстояние от одной компоненты до другой, достаточно даже доли секунды. Время, за которое за счет гравитационного излучения двойная звезда потеряет энергию, равную по порядку величины полной механической энергии системы, уменьшится уже до 10^{11} сек или 10 000 лет; но такой промежуток времени в истории астрономических систем представляется совсем незначительным. Чтобы излучить в виде гравитационных волн всю энергию покоя двойной звезды, потребуется 10^8 лет; но и этот период составляет лишь небольшую часть от того времени, которое теория приписывает существованию большинства звездных объектов. Мощность гравитационного излучения двойной звезды, образованной белыми карликами, в 10^5 раз превосходит мощность электромагнитного излучения нашего Солнца.

Но белые карлики излучают совсем мало света, и поэтому мы ничего не можем сказать об их числе в нашей Галактике; поэтому трудно сказать, насколько вероятно, что более чем одна компонента системы, состоящей из многих звезд, окажется белым карликом. Двойные звез-

ды, одна из компонент которых является белым карликом, известны. Быть может, самым известным примером служит Сириус; вторая его компонента — одна из самых ярких звезд, видимых в северном полушарии. Но если бы даже белые карлики сгруппировались в единую систему, то вовсе не обязательно, чтобы они оказались настолько близко друг к другу, так что период обращения будет необычайно мал, а гравитационное излучение чрезвычайно велико. Вместе с тем белые карлики обладают достаточно малыми размерами и необходимая близость их друг к другу может быть достигнута без столкновения отдельных компонент; что касается их масс, то они достаточно велики, чтобы обеспечить заметное гравитационное излучение.

18. Поиски гравитационных волн

Системы, образованные многими звездами, генерируют гравитационные волны, но, как правило, эти волны несут с собой энергию, весьма незначительную по сравнению с лучистой энергией, испускаемой раскаленными звездами. Кроме того, гравитационные волны, обусловленные системами, состоящими из многих звезд, обладают очень низкими частотами, тесно связанными с периодами обращения в этих системах. Чтобы оценить периоды обращения, с которыми можно встретиться у двойных звезд, можно воспользоваться простым соотношением: период обращения двойных звезд по порядку величины равен времени, за которое свет пересекает орбиту двойной звезды, умноженному на квадратный корень из отношения (d/R). Вернемся снова к случаю двух белых карликов, совершающих орбитальное движение относительно друг друга в тесной близости. В этом случае период обращения будет составлять доли минуты, а частота будет лежать в интервале 0,1—0,01 *гц*. Но все периоды обращения известных астрономических объектов оказываются значительно больше; они равны по меньшей мере нескольким часам (для спутников в нашей солнечной системе) и достигают нескольких недель (у двойных звезд).

Разумеется, скопления звезд вовсе не являются единственными астрономическими объектами, которые могут генерировать гравитационные волны. Нейтральные газовые облака, образованные электрически заряженными