

III. Последние достижения

16. Гравитационный коллапс

В 1939 г. Эйнштейн опубликовал работу, в которой он пытался доказать, что вещество нельзя сконденсировать так, чтобы сфера Шварцшильда оказалась вне гравитирующего тела и тем самым стала физической реальностью. В том же самом году Роберт Оппенгеймер (1904—1967), работавший в то время в Калифорнийском университете, вместе с двумя своими сотрудниками показал, что всякая концентрация вещества, общая масса которого довольно умеренно превышает массу Солнца, не может находиться в состоянии устойчивого равновесия, а будет продолжать конденсироваться, уменьшаясь в своих размерах, за счет гравитационного притяжения; в конечном счете это сжатие перейдет в катаклитический коллапс под шварцшильдовскую сферу. Все случаи — стабильность, нарастающее уплотнение и коллапс очень больших масс — можно найти в природе. В 1963 г. радиоастрономы, сочетая свои методы с методами спектрального анализа, обнаружили астрономические объекты, обладающие, судя по всему, чрезвычайно большими массами. Эти объекты получили название *квазизвездных объектов* или *квазаров*. Это открытие снова привлекло внимание астрономов, специалистов по космологии и общей теории относительности к вопросам, поднятым в свое время Эйнштейном и Оппенгеймером.

Оппенгеймер и его соавторы постулировали возможность существования различных типов конденсированной материи, для которых были предложены различные связи между степенью конденсации вещества и давлением. Такие связи, которые принято называть *уравнениями состояния* вещества, выглядели вполне разумными в свете того, что было известно в то время или предполагалось о сверх-

плотном веществе. Оппенгеймер обнаружил, что ни одно из его предположений не позволяет получить давления, достаточного, чтобы противостоять силам гравитационного сжатия, которые в звездах с большой массой тянут внутрь вещество своих внешних слоев. Согласно релятивистским уравнениям (впрочем, также обстоит дело и в ньютоновской теории) гравитационное притяжение растет с приближением поверхности тела к центру; но с возрастанием плотности возрастает также и давление. У объектов умеренного размера и массы это давление не позволяет уплотнению, обусловленному силами притяжения, идти безгранично далеко. В конце концов достигается равновесие, при котором на любом удалении от центра давления как раз хватает на то, чтобы сдерживать гравитационное притяжение, включающее в себя тяжесть всех внешних по отношению к сфере этого радиуса слоев. Как только такое равновесие установилось, никаких изменений давления или плотности с течением времени уже не происходит; давление и плотность возрастают от нуля на поверхности звезды до некоторого максимального значения в ее центре.

Но если общая масса астрономического объекта превышает некоторое критическое значение, то, согласно Оппенгеймеру, нарастание давления при увеличении плотности уже не в состоянии обеспечить равновесие и коллапс продолжается неограниченно.

Эйнштейн подходил к этому вопросу иначе. Он не хотел использовать какое-нибудь конкретное уравнение состояния, потому что предчувствовал, что при достаточно экзотических значениях плотности и давления релятивистское поведение частиц, образующих вещество, обусловит возникновение новых явлений, которые могут свести на нет теоретические результаты типа результатов Оппенгеймера. Эйнштейн считал, что куда вернее — до тех пор, пока нет достаточно полной теории сильно сконденсированного вещества, построенной на основе основных принципов, — начинать с атомистических моделей, удовлетворяющих всем требованиям относительности, какими бы нереальными или искусственными ни казались эти модели во всех других отношениях. Чтобы не привлекать каких-либо гипотез, касающихся взаимодействия частиц на очень близких расстояниях и при очень высоких энергиях, он моделировал конденсированную массу из частиц, движу-

щихся по плоским круговым орбитам относительно общего центра. Он предположил также, что каждая из таких частиц обладает столь малой массой, что ни одна из частиц не влияет на движение какой-либо другой. В этой модели расстояние любой частицы от общего центра не меняется, но частицы разбросаны по всевозможные расстояния. Если бы было возможно реализовать такое расположение атомов, макроскопический кусок вещества, образованный такими циркулирующими атомами, не испытывал бы давления в радиальном направлении (ни к центру, ни от центра), но давление под прямым углом к радиусу было бы значительным. Такое поперечное давление в каждом слое будет очень своеобразно зависеть от плотности массы в этом слое и от общей массы, находящейся под рассматриваемым слоем.

Когда Эйнштейн стал моделировать конденсированную массу таким способом, слой за слоем, он обнаружил, что если упаковывать частицы достаточно близко друг к другу, они образуют слой, в котором скорости частиц следует уже принять равными скорости света для того, чтобы орбиты частиц остались круговыми уже задолго до того, как будет достигнута сфера Шварцшильда. Световой сигнал, посланный в радиальном направлении из слоя, в котором частицы движутся со скоростью c , дойдет до наблюдателя, расположенного на любом конечном расстоянии от общего центра, а частота светового сигнала испытывает конечное красное смещение. Однако такому же световому сигналу понадобится бесконечное время, чтобы выйти за сферу Шварцшильда, а частота этого сигнала за счет красного смещения обратится в нуль. Световой сигнал, направленный тангенциально по слою, в котором частицы движутся со скоростью c , будет просто двигаться вместе с этими частицами и никогда не выйдет из слоя.

С 1939 г. работы двух американцев, Оппенгеймера и Снайдера (1913—1962), и уроженца России канадца Волкова были существенно усовершенствованы. Когда в 1963 г. были открыты квазизвездные объекты, массы которых оказались намного больше, чем критические массы по оценкам Оппенгеймера (критическая масса по порядку величины близка к массе Солнца), многие всерьез задумались над тем, встречаются ли в природе массы с такой концентрацией, которая не позволяет достичь равновесия при любой форме тела; с другой стороны, возникли подо-

зрения, что были просмотрены какие-то эффекты, которые позволили бы избежать коллапса.

Теоретики раздумывали над тем, не может ли вещество, когда его сжатие дойдет до экстремально большой величины, оказать значительное противодействие, такое, что оно позволит в конце концов притормозить коллапс. Из подробного анализа Джона Арчибальда Уилера и его сотрудников в Пристонском университете *) выяснилось, что этого не может быть, если ограничить возрастание давления таким значением, при котором скорость звука в сжатом веществе не превышает скорости света в пустоте. Расчеты проводились для сферически симметричных тел, у которых нет вращения. Достаточно быстрое вращение может предотвратить коллапс, но если оно будет слишком быстрым, то квазизвездное тело может разорваться на отдельные части. Можно ли с помощью вращения сделать устойчивым произвольно большую массу? — Этот вопрос до конца еще неясен.

Но вне всякого сомнения, — неизбежен коллапс или нет — существуют такие ситуации, при которых достаточно большая масса не может находиться в устойчивом равновесии; другими словами, у этой массы может не быть ни заметного вращения, ни давления, достаточного, чтобы удержать внешние слои от падения внутрь. Такая масса будет безостановочно сокращаться, и в конце концов возникает горизонт событий, который заэкранирует сердцевину от взоров любого внешнего наблюдателя, который не захочет упасть или прыгнуть внутрь звезды. Не увидит внешний наблюдатель также и то, когда захлопнется дверь, как бы пристально он ни вглядывался. Для него вся картина будет выглядеть так: он считает, что звезда по-прежнему прозрачна, но сигналы, идущие из глубины звезды, становятся все слабее и слабее, а частота их все время уменьшается причем никакого определенного конца передачи сигналов нет. Как бы долго ни всматривался внешний наблюдатель в сжимающееся вещество через свой телескоп, его изображение будет постепенно блекнуть, но тем не менее никогда не исчезнет из поля зрения. Образование горизонта события означает лишь то, что бесконечно

*) См., например, Дж. Уилер, Сверхплотные звезды и критическое число нуклонов, в сб. «Гравитация и относительность», «Мир», 1965.

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.