

ГЛАВА 9

ВВЕДЕНИЕ

Переходим теперь непосредственно к рассмотрению небесных тел, для которых существенны эффекты общей теории относительности, т. е. для которых эти эффекты качественно меняют ситуацию по сравнению с ньютоновской теорией.

До 1967 г. астрономы не обнаруживали объектов, для которых эффекты ОТО велики, хотя теория предсказывала существование нейтронных и сколлапсировавших звезд. Открытие пульсаров и интерпретация их как нейтронных звезд решили лишь половину проблемы. Еще не открыты сколлапсировавшие звезды, свойства которых, непохожие на свойства нейтронных звезд, полностью зависят от общей теории относительности. Рассмотрим последовательно сложившуюся ситуацию.

Теория строения звезд, находящихся в состоянии медленной эволюции, разработана в деталях и отлично согласуется с наблюдениями. Полностью рассчитано распределение температуры и плотности в Солнце и других звездах, содержащих достаточный запас водорода (звезды главной последовательности диаграммы Герцшпрунга — Рессела). Рассчитана светимость (общее выделение энергии), радиус, спектр, эволюция звезд. Оказалось, что полученные соотношения подтверждаются наблюдениями*). Это выдающееся достижение последних 20 лет убеждает нас в правильности основных положений теории, касающихся свойств вещества при температуре звездных недр и скорости ядерных реакций в этих условиях.

Но если теория правильна применительно к стационарному состоянию звезды, то необходимо серьезно отнестись и к выводам теории, касающимся конечной судьбы звезд. Общее направление

*) В последние два-три года исследования Дэвиса [см. Дэвис и др. (1968)] показали, что поток нейтрино из недр Солнца по крайней мере в 10 раз меньше предсказанного. Однако не очень существенное изменение «модели» Солнца (непрозрачности, условий конвекции и др.) без изменений основных предположений позволяет согласовать теорию с нейтринными экспериментами. Обзор см. Бакал и Ульрих, 1970.

эволюции заключается в расходовании ядерного горючего, в постепенном повышении температуры и плотности в центре звезды.

Расчитать в деталях поздние стадии эволюции звезды трудно по чисто техническим причинам (даже с помощью счетных машин), и это до сих пор еще не сделано. Поэтому конечное состояние ищут, не прослеживая в деталях всю эволюцию, а пользуясь другим подходом. Зададимся тем, что израсходовано все ядерное горючее (иначе продолжались бы реакции), температура упала до нуля (иначе продолжалось бы излучение энергии наружу) и ищем распределение вещества, удовлетворяющее условию механического равновесия.

Для звезд с массой, меньшей $1,2M_{\odot}$ *), ответ хорошо известен: получается равновесное состояние, в котором электронные оболочки раздавлены, но ядра еще находятся на достаточных расстояниях друг от друга; давление вырожденного электронного газа противостоит тяготению; такие звезды называются белыми карликами **). Наблюдения подтверждают это предсказание теории.

При массе звезды, большей $1,2M_{\odot}$, но меньшей критической $M_{кр} \approx 2M_{\odot}$, равновесное состояние представляет собой нейтронную звезду. Вещество сжато до плотности того же порядка, что и плотность атомного ядра (10^{14} г/см³) ***). Радиус звезды порядка 10 км, потенциал силы тяжести на поверхности порядка $0,1 c^2$. Магнитное поле и вращение нейтронной звезды не очень существенны для ее внутренней структуры, которая определяет такие свойства звезды как плотность, гравитационный потенциал и состав. Для этих свойств не важны также сверхпроводимость, сверхтекучесть и отвердевание вещества в различных частях нейтронной звезды.

Однако магнитное поле и вращение приводят к очень специальному пульсирующему радиоизлучению нейтронных звезд, по

*) С учетом различных поправок эта величина может снизиться до $1M_{\odot}$ (см. далее).

***) Это название исторично. Как было отмечено в § 1 и 7, физики могут называть вещество «холодным», когда его температура не влияет на уравнение состояния. Белые карлики имеют на поверхности температуру $\sim 10^4$ °К, но в указанном смысле могут считаться «холодными». При температуре 10^4 °К эти звезды имеют белый цвет, с чем и связано их название. См. об истории открытия белых карликов в книге Шацмана (1958). Недавно было показано, что при высоких плотностях теплоемкость белых карликов падает, и поэтому уменьшается время охлаждения. Вероятно, старые карлики с массой вблизи чандраскаровского предела ($1,2 M_{\odot}$; см. далее) теперь красные или даже черные. Обзор см. Гринстейн (1969).

****) Нейтронная звезда может иметь массу меньше чем $1,2 M_{\odot}$ (но она должна быть больше чем $\sim 0,1 M_{\odot}$). Однако в интервале $1,2M_{\odot} < M < 2M_{\odot}$ нейтронная звезда представляет собой единственное равновесное состояние холодной материи (см. ниже).

которому они были открыты и за которое названы пульсарами. В молодых пульсарах пульсирующее радиоизлучение сопровождается пульсирующим оптическим и рентгеновским излучением, ускорением релятивистских частиц и инжекцией их в окружающую туманность. Сверхпроводимость, сверхтекучесть и отвердевание также могут быть существенными для некоторых наблюдательных особенностей пульсаров. Никакое тело, кроме нейтронной звезды, не может противостоять такому быстрому вращению, которое соответствует интервалу между импульсами пульсара. Заметим здесь же, что примеры пульсаров в Крабе и Веле подтверждают идею о том, что нейтронные звезды рождаются во взрывах сверхновых. Пульсары, вероятно, являются сильными источниками гравитационных волн [см., например, Острикер и Ган (1969а, б); Шкловский (1969а, б)]. Обо всем этом подробно будет сказано далее. Очевидно, для нейтронных звезд с гравитационным потенциалом, сравнимым с c^2 , становится необходимым учитывать те изменения законов тяготения, которые вытекают из ОТО.

Что же вносит теория относительности в вопрос о судьбе звезды? При массе, меньшей $M_{кр}$, возникают только количественные изменения. Но само существование максимальной критической массы $M_{кр}$ есть результат теории относительности. При этом оказывается, что критическая масса имеется при любом мыслимом уравнении состояния, совместимом с теорией относительности. При массе, большей критической, не существует равновесного решения! Конечной стадией эволюции должно быть неограниченное сжатие.

В этой стадии учет общей теории относительности приводит к парадоксальному, на первый взгляд, выводу: далекий наблюдатель регистрирует лишь асимптотическое приближение звезды к определенному состоянию. Это состояние не является равновесным его можно назвать «застывшим». Никакого парадокса в действительности нет, просто вывод теории неожидан и непривычен. Интервал времени между двумя данными событиями не одинаков для разных наблюдателей, здесь нет ньютоновского универсального времени. Для наблюдателя, находящегося на звезде, сжатие никогда не остановится. Однако закон преобразования временных интервалов в сильном поле тяготения приводит к тому, что удаленный наблюдатель увидит своеобразную остановку сжатия. Это явление можно назвать «релятивистским замедлением хода времени»: данный интервал времени на сжимающейся звезде требует большего интервала времени по часам удаленного наблюдателя; с точки зрения удаленного наблюдателя часы на звезде отстают. Об этом подробно говорилось в гл. 3. Релятивистское замедление течения времени одновременно обозначает стремление к нулю частоты квантов, принимаемых наблюдателем. Происходит

гравитационное самозамыкание звезды, для внешнего наблюдателя она перестает излучать энергию, прекращается поток информации. Итак, теория предсказывает три типа небесных тел в конечном состоянии: 1) белые карлики, 2) нейтронные звезды, 3) «застывшие» звезды; каждый тип может иметь место лишь в определенном интервале масс. Интервалы эти частично перекрываются.

Конфликт между теорией и наблюдениями заключается в том, что застывшие звезды до сих пор не обнаружены. Не наблюдаются именно те тела, для теории которых играет решающую роль ОТО. Вопрос о существовании таких тел имеет большое значение и для космологии; общая кривизна пространства в больших масштабах и замкнутость или бесконечность однородной Метагалактики зависят от плотности всех видов материи, в том числе и от нейтронных и застывших звезд. Первые грубые оценки Хойла, Фаулера, Дж. и Е. Бербиджей (1964) и др. привели к предположению, что общая масса застывших звезд может быть сравнима с массой видимых звезд. Однако эта оценка сильно зависит от сделанных упрощающих предположений.

Каковы возможные пути решения конфликта между теорией и наблюдениями?

С одной стороны, следует учесть трудность наблюдения застывших звезд. Какими свойствами они обладают? Как они должны проявлять себя, находясь в соседстве с другими звездами и межзвездной средой, содержащей пыль, газ, магнитное поле? Может быть, на самом деле в галактиках (и в нашей Галактике) много застывших звезд, но они трудно наблюдаемы? Следует напомнить, что теоретические предсказания свойств нейтронных звезд не сыграли прямой роли в открытии пульсаров, хотя, безусловно, привели к быстрой интерпретации открытого явления.

Следует особо отметить здесь несколько работ [Гинзбург и Озерной (1964); Кардашев (1964); Волчер (1966); Уилер (1966); Пачини (1967, 1968, 1969); и др.], в которых отмечалось, что при сжатии звезды должны усиливаться магнитное поле и вращение.

Более того, было предсказано, что энергия вращения сверхплотной звезды будет проявляться вовне именно благодаря магнитной связи между звездой и окружающей средой. Таким образом, теоретики-астрофизики предугадали важнейшие характеристики пульсаров, кроме (к сожалению!) того свойства, которое оказалось решающим для наблюдений — пульсирующего, периодического характера излучения.

С другой стороны, нужно проанализировать допущения, которые привели к выводу о неизбежности указанного конечного состояния звезды, в частности, возможные способы потери массы, роль вращения звезды и ее магнитного поля. В ходе эволюции массивной звезды рост плотности сопровождается повышением темпе-

ратуры. В определенный момент звезда подходит к границе устойчивости, за которой наступает катастрофическое сжатие. Однако к этому моменту вещество звезды еще содержит запас ядерной энергии *). Освобождение этой энергии может привести к тому, что сжатие сменится расширением и взрывом звезды. Следует, однако, иметь в виду, что наблюдаемая частота взрывов звезд дает величину, во много раз меньшую ожидаемого числа звезд, заканчивающих эволюцию; другими словами, наблюдаемые данные говорят скорее против предположения, что все звезды путем взрыва избегают превращения в нейтронное или застывшее состояние**). Существование белых карликов с $M < M_{\odot}$ подтверждает эту идею: эволюция звезд с $M < M_{\odot}$ к состоянию белого карлика требует времени, превышающего не только возраст галактики, но и возраст Метагалактики. Такие белые карлики должны быть остатками звезд большой массы, которые эволюционируют более быстро и постепенно теряют часть своей массы. Неизвестно, какую долю массы может потерять звезда при квазистационарном гидродинамическом истечении вещества с поверхности.

Во второй половине 1969 г., кажется, появился новый метод исследования заключительных стадий эволюции звезд — экспериментальное изучение космического гравитационного излучения. Вебер (1969а) объявил о вероятном открытии высокочастотных импульсов гравитационного излучения. Полный поток энергии в этих импульсах огромен — больше или порядка 10^5 эрг/см² (см. § 15 гл. 1). По-видимому, только застывшие звезды (в процессе образования или столкновения в центре нашей Галактики) могут дать такой поток гравитационного излучения. Столкновения обычных или нейтронных звезд сопровождаются электромагнитным излучением, которое увидели бы наблюдатели. Информация об экспериментах Вебера еще не достаточно полна, чтобы делать окончательные выводы; однако перед нами открывается яркая перспектива нового типа исследований.

Итак, несоответствие между выводами теории и наблюдениями объективно существует уже давно. Вместе с тем, нельзя отрицать, что открытие квазаров («quasars» в литературе на английском языке) резко обострило ситуацию. Выяснилось, что для теории квазаров существенную роль должны играть, с одной стороны, даже малые поправки на ОТО, с другой стороны, макроскопические движения и магнитное поле, т. е. факторы, не играющие определяющей роли для строения обычных звезд.

*) Этот запас существенно зависит от того, происходило ли перемешивание различных слоев звезды путем конвекции или иным путем

**) Неясно, означает ли это возможность «беззвучного» коллапса без взрыва или плавную потерю массы до наступления коллапса.

В связи с открытием квазаров десятки теоретиков вернулись к теории равновесия и сжатия звезд с учетом общей теории относительности; астрономы вспомнили классические работы Оппенгеймера, Волкова и Снайдера периода 1938—1939 гг. Вместе с тем, по естественному психологическому закону, возникло предположение, что две загадки, связанные между собой, — судьба обычных звезд и сущность квазаров, — может быть, имеют общий ответ.

Сейчас мы думаем, что это не совсем так, хотя, безусловно, обе проблемы имеют перекрывающиеся аспекты, в том числе и связанные с ОТО. Мы не рассматриваем в этой книге проблему квазаров, относящуюся скорее к области космологии.

В этом разделе рассматривается описанный выше круг вопросов, связанных с эволюцией звезд.

Изложение начинается с того, что очень кратко напоминаются сведения о равновесии звезды и ее устойчивости. Затем излагается теория равновесного состояния звезд. После этого рассматривается эволюция звезды, ее переход в конечное состояние. Разумеется, в нашу задачу не входит сколько-нибудь подробное рассмотрение медленной эволюции звезды, что делается в соответствующих монографиях (см. конец параграфа). Мы рассматриваем только общий характер эволюции, ее темп и устойчивость. Это важно для того, чтобы выяснить условия, приводящие в состояние, когда существенны эффекты ОТО, или, наоборот, выяснить причины, из-за которых звезды могут избежать релятивистской стадии.

Затем рассматривается катастрофическое сжатие (коллапс) звезды, потерявшей устойчивость в ходе медленной эволюции, изучаются процессы взрыва сверхновой и др., сопровождающие коллапс, и, наконец, рассматривается финальная стадия коллапса звезды, с $M \geq 2M_{\odot}$ в конце сжатия — релятивистский коллапс, приводящий к состоянию застывшей звезды.

В следующих трех главах рассматриваются вопросы обнаружения наблюдательных проявлений релятивистских стадий эволюции звезд. В порядке той последовательности, в которой развивалась теория, в гл. 12 рассматривается аккреция вещества на звезды. В период 1963—1968 гг. многие астрофизики, в том числе и авторы, полагали, что именно аккреция окажется ключом к обнаружению нейтронных и застывших звезд. Выделение энергии при аккреции на поверхность нейтронной звезды достигает 10—25% mc^2 , т. е. во много раз больше ядерной энергии этого вещества. Амнуэль и Гусейнов (1968) рассматривали возможность пульсации радиосигнала при аккреции на вращающуюся нейтронную звезду с магнитным полем.

Сферически-симметричное падение холодного вещества в гравитационном поле коллапсировавшей звезды, не приводит к заметному выделению энергии. Однако при наличии асим-

метрии, столкновений, вращения, магнитного поля можно и в случае застывшей звезды ожидать выделения энергии того же порядка, что и у нейтронной звезды.

В разреженном межзвездном веществе падающее на звезду количество вещества в единицу времени малб. Предполагалось, что релятивистская звезда, находясь в составе тесной пары с обычной звездой даст большие наблюдаемые эффекты и прежде всего — поток рентгеновского излучения. Сказанное объясняет интерес к аккреции и довольно подробную разработку теории этого явления.

Действительность оказалась и сложнее и интереснее. В 1968 г. были открыты пульсары; феномену пульсаров посвящается гл. 13.

В соответствии с установками предлагаемой монографии, наблюдательный материал дается кратко и обобщенно.

Новые данные поступают часто и не представляется возможным дать детальный обзор, который не устарел бы к моменту выхода книги в свет.

Излагаются свойства нейтронных звезд, в особенности те, которые имеют значение для их функционирования в качестве пульсаров. Рассматривается баланс энергии и электродинамика вращающейся звезды, обладающей магнитным моментом. Обсуждаются различные предложенные механизмы направленного излучения, что необходимо для объяснения наблюдаемой периодичности. Вкратце рассматривается поведение плазмы в поле мощного радиоизлучения, характерного для пульсаров.

Наконец, в последней, 14-й главе, обсуждаются наблюдательные свойства и возможность обнаружения застывших звезд.

Эта глава оказывается краткой в соответствии с тем, что такие звезды до сих пор не открыты. Обсуждаются некоторые астрономические объекты, в состав которых, возможно, входят сколлапсировавшие звезды, и трудности, лежащие на пути уверенного ответа. Отмечается принципиальная возможность существования первичных застывших объектов космологического происхождения, наряду с коллапсарами, возникающими при эволюции массивных звезд.

Изложенные вопросы рассмотрены ранее в обзорах авторов [см. Зельдович, Новиков (1964а; 1965; 1966) и Новиков, Зельдович (1966)]. Ситуация до 1967 г. изложена в книге авторов «Релятивистская астрофизика» (1967).

Приведем здесь также краткий список некоторых монографий и обзоров, в которых затрагиваются обсуждаемые ниже вопросы.

Классическая теория строения звезд и нерелятивистских этапов их эволюции имеется в монографиях Чандрасекара (1939), Е. и Дж. Бербиджей (1958); Шварцшильда (1958); Франк-Каменецкого (1959); в сборнике «Строение звезд» под редакцией Аллера и Мак-Лафлина (1965, русский перевод (1970)); Hand. d. Phys.,

51, 1958; Бааде (1963); Ибена (1967), а также в учебнике Мартынова (1965), в учебнике Клэйтона (1968) и в научно-популярной книге Каплана (1963). С точки зрения теории подобия вопрос рассмотрен Седовым (1967).

Основные выводы работ Оппенгеймера и Волкова и Оппенгеймера и Снайдера изложены в учебниках Ландау и Лифшица (1967; 1964). Вопросы теории сверхплотных конфигураций из холодного вещества рассматриваются Амбарцумяном и Саакяном (1963); в наших обзорах; Уилером, Гаррисоном, Вакано, Торном (1967); в обзоре Камерона (1970).

Принципиальные вопросы влияния малых эффектов ОТО на устойчивость звезды вблизи критического состояния рассмотрены Капланом (1949b); В. Фаулером (1964a, b); Чандрасекаром (1964a, b; 1965) и в наших обзорах.

Вопросы излучения нейтрино изложены в обзорах Пинаева (1963a) и Чиу (1964). В последнем обзоре рассмотрены и другие вопросы релятивистской астрофизики.

Теория взрыва сверхновой изложена в работе Фаулера и Хойла (1964), астрономические аспекты — в монографии Шкловского (1966). В последнее время появился ряд новых работ по теории взрыва сверхновых (см. § 4, гл. 11).

Обзор вопросов, связанных с пульсарами (ветви релятивистской астрофизики, развивающейся особенно быстро), дан в обзоре Гинзбурга (1971).

Разумеется, приведенный список не претендует на полноту.