

НАУКУ — ВСЕМ!



В. М. Липунов

В МИРЕ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД



URSS

ШЕДЕВРЫ
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
• Астрономия •



Ученик академика Я. Б. Зельдовича, профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Области научных интересов — релятивистская астрофизика.

В. М. Липунов — автор идеи «Машины сценариев», специальной компьютерной программы, наиболее полно моделирующей эволюцию двойных звезд, включая эволюцию нейтронных звезд и черных дыр, и воплощенной в «железе» совместно с В. Г. Корниловым в 1983 г. С помощью «Машины сценариев» впервые был рассчитан спектр гравитационно-волнового фона Вселенной, создаваемого двойными звездами; впервые рассчитана частота столкновений нейтронных

звезд и черных дыр во Вселенной; предсказаны некоторые, тогда еще неизвестные стадии эволюции двойных звезд — радиопульсар в паре с голубой звездой; предсказано существование во Вселенной идеальной естественной релятивистской лаборатории — радиопульсар в паре с черной дырой. Также с ее помощью была обнаружена эволюция галактик в рентгеновских лучах, подтвержденная через 15 лет наблюдениями в космосе. Подобные «Машины сценариев» на Западе стали создаваться лишь через 10 лет.

С начала 1990-х гг. отстаивал космологическую природу гамма-всплесков — самых мощных взрывов во Вселенной, для наблюдения которых под его руководством был создан первый российский робот-телескоп «МАСТЕР». Автор более 200 научных статей, монографий, учебников и десятков научно-популярных статей и книг, переведенных за рубежом.

В. М. Липунов — заслуженный работник высшего образования РФ и лауреат Ломоносовской премии.

Наше издательство предлагает следующие книги:



5003 ID 55370

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА



Тел./факс: 7 (499) 135-42-16

Тел./факс: 7 (499) 135-42-46



URSS

E-mail:
URSS@URSS.ruКаталог изданий
в Интернете:<http://URSS.ru>

Любые отзывы о настоящем издании, а также обнаруженные опечатки присылайте по адресу URSS@URSS.ru. Ваши замечания и предложения будут учтены и отражены на web-странице этой книги в нашем интернет-магазине <http://URSS.ru>

В. М. Липунов

**В МИРЕ
ДВОЙНЫХ
ЗВЕЗД**

Издание второе



URSS
МОСКВА

Липунов Владимир Михайлович

В мире двойных звезд. Изд. 2-е. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 256 с. (НАУКУ — ВСЕМ! Шедевры научно-популярной литературы.)

В настоящей книге в популярной форме рассказывается о новых открытиях, идеях и гипотезах в области изучения двойных звезд. Последовательность изложения соответствует последовательным стадиям жизни (эволюции) двойных звезд. Но рассказ о каждой стадии ведется на примере конкретно наблюдаемой двойной системы с описанием живой истории ее открытия и исследования. При этом раскрывается суть основных астрофизических методов исследования двойных систем.

Для всех, кто интересуется астрономией, в том числе школьников, студентов, преподавателей.

Иллюстрации выполнены автором

Издательство «Книжный дом «ЛИБРОКОМ»».

117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 9.


Формат 60×90/16. Печ. л. 16. Зак. № 1753.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-397-00023-9

© Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: URSS@URSS.ru
	Каталог изданий в Интернете
	http://URSS.ru
	Тел /факс 7 (499) 135-42-16
URSS	Тел /факс 7 (499) 135-42-46

5003 ID 55370



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

Оглавление

От автора	6
Глава I. Что такое двойная система?	9
1. Законы Кеплера	13
2. Движение в гравитационной воронке	15
3. Вокруг центра масс	22
4. Кто главнее?	24
5. Определим орбиту двойной	25
6. Пробные частицы в двойной системе	27
7. Фигуры звезд	32
8. Кто же прав?	34
9. Образование двойных звезд	36
Глава II. Парадокс Алголя	41
1. Кто «громче» светит?	44
2. Кривая блеска	45
3. О чем рассказывает алголевская кривая блеска? . .	48
4. Эффект Доплера	50
5. Кривая лучевых скоростей	55
6. Почему звезды разные	60
7. Наконец, парадокс	65
8. Перемена ролей	66

Глава III. Вдвоем в одиночестве	69
1. Всего за 40 минут	71
2. Охлаждаясь, нагревается	75
3. Всего за 30 миллионов лет	76
4. Если бы не квантовая механика	78
5. Ядерная эволюция	80
6. Покидая главную последовательность	83
7. Белые карлики	86
8. Нейтронные звезды	91
9. Черные дыры	96
10. Предки и потомки	98
Глава IV. Первый обмен	101
1. Снова Джон Гудрайк	103
2. Спектр β Лиры	106
3. Гравитационный ветер	107
4. Испорченный прибор	111
5. Закованная в латы	114
6. Вторая загадка β Лиры	116
7. После обмена	117
8. Продолжение следует	121
9. Как считают звезды?	122
Глава V. Массивные рентгеновские двойные	125
1. «Эм с точкой»	127
2. «Ярче тысячи Солнц»	131
3. «Ухуру»	137
4. В звездном ветре	141
5. Как работает рентгеновский пульсар	143
6. Почему нейтронные звезды?	147
7. «Дискология»	149
8. Лебедь X-1 и другие черные дыры	153
9. Вернемся к сценарию	156

Глава VI. Карликовые двойные	159
1. Кис-кис, Геркулес X-1	162
2. Новые и повторные новые звезды	168
3. Звезды типа U Близнецов	175
4. Поляры	180
5. Сверхновые, похожие друг на друга	185
6. Рентгеновские барстеры	188
7. Если бы не общая теория относительности	192
Глава VII. Космическое «чудо»	195
1. На все четыре стороны	199
2. Они должны вернуться	201
3. Почему вдвоем?	204
4. Кинематическая модель	207
5. Хотя что-то знакомое	211
6. Сверхкритическая аккреция	214
7. «Ужасы» второго обмена	220
Глава VIII. Странники	225
1. Беглецы	228
2. «Одиночные» звезды Вольфа—Райе	231
3. Второй взрыв	236
4. Двойные радиопульсары	239
5. Проблема выбора	243
Сияющие вершины	247
1. Итоги	247
2. Эволюция в квадрате	251

В нашей Галактике большая часть звезд — двойные. Автор не решается поставить ударение в слове «большая», так как точное количество двойных звезд и их доля в общем числе звезд неизвестны. Известно только, что их не менее десятка процентов. Некоторые оценки приближаются к 80–90 %. Но это не единственное и даже не главное, что привлекает в двойных звездных системах. Главных причин две.

Первая — чисто практическая. Одиночная звезда — вещь труднопознаваемая. Другое дело, если звезда входит в двойную систему. Двойственность многое делает доступным. Здесь можно, что называется, «попробовать ее на зуб».

Вторая причина состоит в том, что жизнь двойной намного разнообразнее, чем жизнь одиночной звезды. Двойные звезды интереснее. Добавление к одной звезде другой эквивалентно прибавлению еще одного измерения. Жизнь вдвоем настолько же богаче одиночества, насколько плоскость богаче линии, а пространство богаче плоскости.

Двойные звезды исследуются несколько столетий. Но только в последние десятилетия мы начали понимать законы, по которым они живут. Особенно большие сдвиги произошли в последние 30 лет благодаря развитию новой отрасли астрономии — рентгеновской астрономии. В науке о двойных звездах наблюдения и теория постоянно соперничают, подталкивая друг друга к самым неожиданным и смелым открытиям.

Круто изменились наши представления о жизни звезд. Изменилась и мораль. Многое стало дозволено. Разве мог

астроном 50-х годов прошлого века серьезно говорить, например, о таком процессе, как «проглатывание» одной звезды другой? Сейчас же это — одна из серьезнейших проблем, исследуемых наблюдательно и теоретически. Можно ли было представить, что в Галактике есть объекты, которые существуют только потому, что есть гравитационные волны? То, что десятилетиями физики пытаются зарегистрировать, в природе используется самым прозаическим образом.

Особенно привлекает в двойных звездах многообразие протекающих в них физических процессов, для понимания которых необходимо знание практически всех разделов современной физики. Конечно, рассказать обо всем, что нового и интересного произошло в науке о двойных звездах, совершенно невозможно, да и не нужно. Как говорит Незнайка: «Все знать нельзя...»

Автор старался выделить принципиальные идеи, которые определили направление исследований. Там, где не хватало слов, автор брал в руки перо и тушь.

Исследования продолжаются. Уже сейчас видны совершенно новые горизонты. Несомненно, предстоит еще много открытий и интересных событий, свидетелями (а возможно, и участниками) которых станут читатели этой книги уже в ближайшие годы.

Я посвящаю эту книгу памяти моей матери — первой моей (и многих других) учительнице, Липуновой Вере Степановне.

Хочется выразить глубокую благодарность Н. А. Липуновой, оказавшей большую помощь при обсуждении текста и подготовке рукописи к печати. Автор также благодарен Т. А. Бируле за помощь при подготовке рисунков.

I

Что такое двойная система?

1. Законы Кеплера	13
2. Движение в гравитационной воронке	15
3. Вокруг центра масс	22
4. Кто главнее?	24
5. Определим орбиту двойной	25
6. Пробные частицы в двойной системе	27
7. Фигуры звезд	32
8. Кто же прав?	34
9. Образование двойных звезд	36

Что такое двойная система?

Что такое двойная система? Кажется, очень легко ответить на этот вопрос, например так: двойная звездная система — это система, состоящая из двух гравитационно связанных звезд. Но это очень плохое определение. Ведь любые две звезды (да и вообще любые две массы) связаны силами тяготения. Согласно такому определению получается, что все звезды попарно двойные. Такое определение оказалось совершенно бесполезным. Чтобы понять, что подразумевается под двойной системой, нужно сначала упростить ситуацию.

Представим себе, что из Вселенной исчезло все и остались лишь две звезды. В качестве такой Вселенной можно взять чистый лист бумаги и нарисовать на нем две точки, 1 и 2. Пусть это будут звезды с массами M_1 и M_2 (рис. 1). Найдем центр масс звезд — точку O . Чтобы сделать это неформально, нужно на время вернуться в нормальную Вселенную, на Землю. Соединим две массы M_1 и M_2 невесомым стержнем и найдем ту точку на нем, привязав к которой ниточку, мы сможем удерживать подвешенный стержень в го-

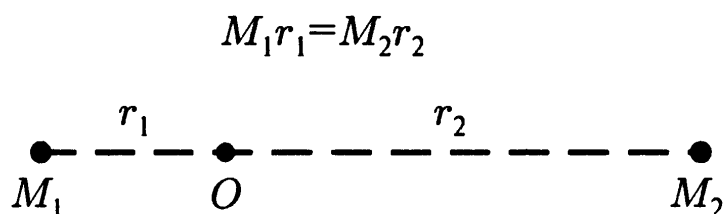


Рис. 1. Расстояния от центра масс до звезд обратно пропорциональны их массам. O — центр масс двойной системы

ризонтальном положении. Это и будет центр масс системы двух звезд. Обозначим его буквой *O*.

Итак, у нас только две звезды, и мы «сидим» в их центре масс. Можно давать определение. Будем считать, что эти две звезды образуют двойную систему, если их движение происходит в некоторой *ограниченной* области. Это чисто кинематическое определение эквивалентно другому, энергетическому определению: двойной называется система, полная энергия которой отрицательна. Ньютоновская механика и теория тяготения устроены так, что требования ограниченности движения и отрицательности энергии взаимозаменяемы.

Чтобы доказать это, вовсе не нужно знать конкретный закон, по которому притягиваются тела. Важно только, чтобы сила притяжения достаточно быстро убывала с увеличением расстояния между телами. Докажем от противного. Пусть полная энергия звезд, состоящая из кинетической и потенциальной, отрицательна. Предположим, что звезды удалились друг от друга на бесконечное расстояние. При этом полная энергия сохранилась, а энергия гравитационного взаимодействия (потенциальная энергия) исчезла. Теперь полная энергия состоит только из кинетической энергии звезд, которая, по крайней мере, не отрицательна. Мы пришли к противоречию. Следовательно, тела не могут разойтись на бесконечное расстояние, если их полная энергия отрицательна.

Но это лишь общее определение, и к тому же до конца пока не понятное. Во-первых, вокруг нас полно звезд. Не окажется ли наше определение слишком далеким от жизни? А во-вторых, интересно знать, как именно движутся звезды в двойной системе.

Первое возражение не страшно. Наша Вселенная, более того, наша Галактика, достаточно просторны. В ней всегда можно найти «пустынный уголок», где две звезды будут достаточно удалены от всего остального содержимого Галактики. А вот о том, по каким законам движутся эти звезды, мы и расскажем в этой главе.

1. Законы Кеплера

Известный немецкий астроном Иоганн Кеплер после окончания Тюбингенской академии распределился профессором математики и «нравственной философии» в одну из гимназий. Так в 1593 году, т. е. за 17 лет до изобретения телескопа, началась его научная карьера. Впоследствии этот человек проявил себя не только великим теоретиком, но и не менее выдающимся экспериментатором. За 6 лет до того, как Галилео Галилей направил свой телескоп на небо, Кеплер написал книгу о применении оптики к астрономии! Наиболее распространенные сейчас системы школьных телескопов, в которых и объектив, и окуляр — увеличительные линзы, изобретены Кеплером в 1611 году.

Но самые поразительные открытия Кеплер сделал, что называется, «на кончике пера». Кеплер не был теоретиком в современном смысле слова. На современном языке ближе к нему подходит определение «интерпретатор». Говорят, что интерпретатор — это человек, который не наблюдает, но и не строит теорий — он приводит в порядок факты, ищет закономерности. Правда, это не очень точно. Кеплер свято верил в великую гармонию природы. Иногда эта вера заводила его слишком далеко, но в то же время он всегда опирался на четкие экспериментальные данные. А в этом смысле ему особенно повезло.

В 1601 году Кеплер оказался «наследником» бесценного состояния. В его руки попал архив наблюдений (дневник наблюдений) великого астронома Тихо Браге. Девять лет потратил Кеплер на анализ наблюдений планеты Марс. В те времена ученые не писали научных статей. Не было и периодически издаваемых научных журналов. Поэтому свои исследования ученые излагали в книгах. Кеплер тоже написал книгу, название которой стоит привести целиком: «Новая астрономия, причинно обусловленная, или физика

неба, изложенная в исследованиях о движении звезды Марс, по наблюдениям благороднейшего мужа Тихо Браге».

Здесь впервые Кеплер доложил, что Марс движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. Напомним, что эллипс — это плоская кривая, представляющая собой геометрическое место точек, сумма расстояний которых от двух других его фиксированных точек постоянна. (Эллипс легко нарисовать. Возьмите две иголки и наколите их на лист бумаги. Места проколов — это фокусы. Привязав к иголкам нитку, натяните ее карандашом. Плавнo передвигая карандаш, получите эллипс. Ведь длина нитки постоянна.)

Одновременно Кеплер подметил, что движение Марса неравномерное — при приближении к Солнцу он ускоряется, а при удалении — замедляется. Но Кеплер везде искал красоту. Оказалось, что площади, описываемые радиус-вектором планеты за одинаковое время, одинаковы (рис. 2).

Через 10 лет Кеплер написал еще одну книгу — «Гармония мира», в которой сообщил, что точно так же, как и Марс, движутся и другие планеты. То есть все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце (первый закон Кеплера), и всегда за одинаковые промежутки времени радиус-вектор планеты описы-

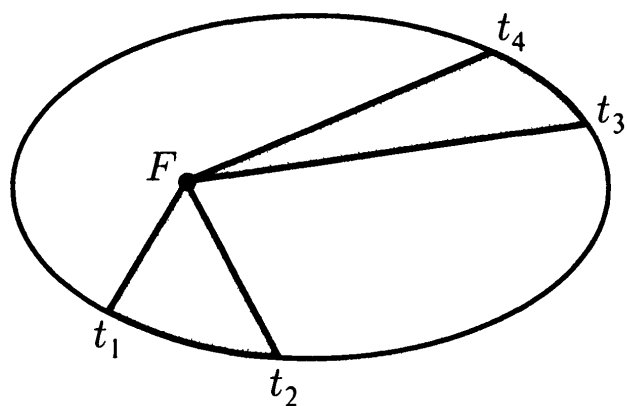


Рис. 2. За равные промежутки времени ($t_2 - t_1 = t_4 - t_3$) радиус-вектор планеты описывает равновеликие площади (закон Кеплера)

вает равновеликие площади (второй закон Кеплера). Читатель может спросить: причем тут красота, гармония? Ну, эллипс, ну, овал — какая разница. А вы нарисуйте эллипс. Он гораздо красивее овала. Вы скажете, что на вкус и цвет товарищей нет. И все же эллипс — уникальная фигура. Потому что эллипс — это тень круга, са-

мой симметричной плоской фигуры. Проекция круга — это не овал, а эллипс. Может быть, поэтому эллипс кажется красивее.

Но есть в законах Кеплера и другая красота, имеющая глубокий физический смысл. Ведь удивительно, почему столь удаленные друг от друга и, казалось бы, совершенно независимые планеты «знают», что им нужно двигаться по эллипсам. Когда мы рисуем эллипс на листке бумаги, все ясно. Есть ниточка, которая держит карандаш. Меняя длину нитки, можно нарисовать много фигур, но все они будут эллипсами. Значит, во Вселенной тоже есть свои «нити». Иоганн Кеплер в этом и видел гармонию и красоту. Он считал, что мир пронизан невидимыми нитями. В этом его убедила третья удивительная закономерность в движении планет. Квадраты периодов обращения планет относятся как кубы их больших полуосей (третий закон Кеплера). Большой полуосью называется половина расстояния между двумя наиболее удаленными друг от друга точками эллипса.

Но что это за невидимые нити? Более или менее это стало понятно лишь в начале прошлого века после работ Альберта Эйнштейна по общей теории относительности. Но еще в XVII веке Исаак Ньютон значительно прояснил дело, заменив три закона Кеплера одним законом — *законом всемирного тяготения*.

2. Движение в гравитационной воронке

Анализируя законы Кеплера, Ньютон пришел к выводу, что сила натяжения невидимых нитей, связывающих удаленные тела, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Эти нити он назвал всемирным тяготением. Закон всемирного тяготения применим к любым телам независимо от цвета, вкуса, запаха и вообще химического состава. Универсальность тяготения объясняет, почему все планеты движутся по одинаковым орбитам.

Кеплеру и Ньютону — вообще человечеству — сильно повезло. Масса Солнца в сотни раз превышает массу всех планет, вместе взятых. Это означает, что обратное влияние планет на Солнце невелико и им можно пренебречь. Поэтому движение планет вокруг Солнца выглядит достаточно просто. Однако на разгадывание эпициклов и деферентов человечеству понадобилось более тысячи лет. Кто-то пошутил, что если бы человечество возникло на планете в двойной звездной системе, где движение планет вообще не поддается формульному описанию, то оно бы никогда не открыло закона всемирного тяготения; следовательно, в таких звездных системах развитых цивилизаций не должно быть.

Совсем другое дело — наша Солнечная система. Движение планет происходит в основном под действием Солнца. Взаимное притяжение планет очень малó. Такое движение удобно рассматривать не на языке сил (школьных знаний не-

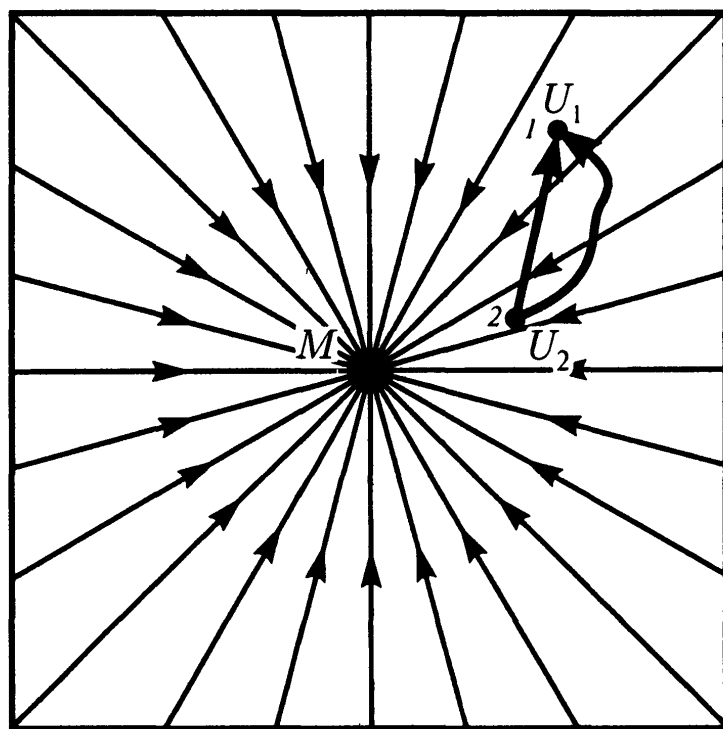


Рис. 3. Работа, которую нужно совершить при перемещении пробной частицы M в гравитационном поле, равна разности потенциалов $U_2 - U_1$ между начальной и конечной точками и не зависит от формы пути перемещения

достаточно, чтобы решить уравнения движения), а на энергетическом языке. Согласно закону Ньютона, тела создают вокруг себя поле тяготения, или гравитационное поле. Это поле характеризует потенциал U , физический смысл которого следующий.

Пусть имеется тело массы M (рис. 3). Чтобы измерить его поле тяготения, необходимы так называемые *пробные частицы* — тела, масса которых настолько мала, что их влияние на тело M невелико. Обычно принимают массу пробных тел равной единице в той системе единиц, в которой вы хотите работать. Итак, возьмем пробную частицу и переместим ее из точки 1 на бесконечность. При этом нам нужно приложить силу и, преодолевая тяготение, совершить работу. Работа, выполняемая таким образом и взятая с обратным знаком, называется *потенциалом* гравитационного поля тела M . Наоборот, если из бесконечности падает частица, то работа, произведенная гравитационным полем, и есть потенциал с обратным знаком, $-U$.

Сила гравитации зависит только от расстояния и направлена всегда по радиусу к телу M . Значит, и потенциал зависит только от расстояния до тела M . Работа, которую нужно совершить, чтобы перенести пробную массу из точки 2 в точку 1, равна разности потенциалов $U_1 - U_2$. При свободном движении пробных частиц сохраняется их полная энергия, т. е. сумма кинетической (K) и потенциальной энергии (U): $K + U = \text{const}$. Потенциал точечного тела массы M имеет вид

$$U = -\frac{GM}{r}, \quad (1)$$

где G — постоянная тяготения, r — расстояние от тела массы M . Значение постоянной тяготения удобнее всего запомнить так: $1/G = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^3$.

На рис. 4 качественно показан потенциал Солнца, имеющий вид гиперболы. Вращая гиперболу вокруг оси U , получим гравитационную воронку. Полезное свойство потенциа-

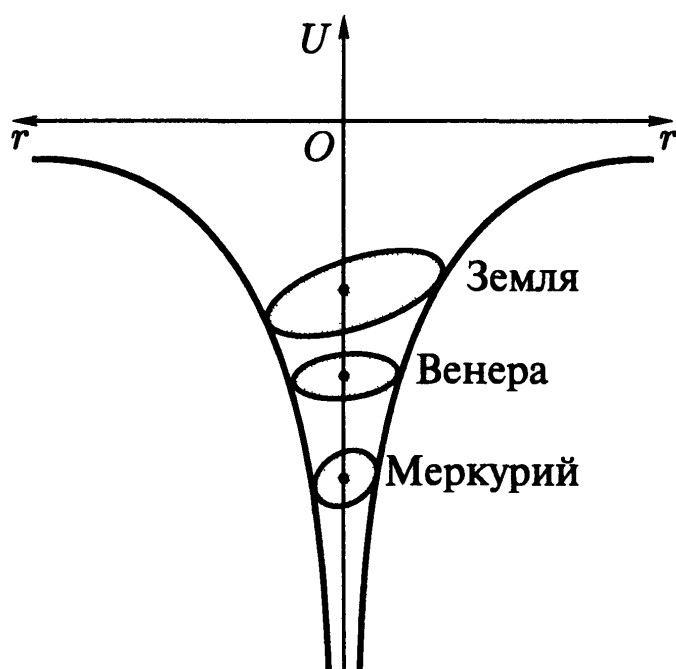


Рис. 4. Гравитационная воронка вокруг Солнца. В координатах U (потенциал) и r (расстояние) орбиты планет изображены овалами

ла состоит в том, что тело, «помещенное» в некоторой точке r , будет «скатываться» в область, где потенциал меньше.

Планеты Солнечной системы — те же пробные частицы. Теперь мы можем сказать, что для Кеплера и Ньютона планеты оказались именно теми пробными частицами, с помощью которых они исследовали свойства гравитационного поля Солнца. (Мы же просто живем на одной из таких пробных частиц под названием Земля.)

Как же происходит движение в гравитационной воронке? В координатах $U(r)$ движение планет изображается кругами (если орбиты круговые) или овалами (не эллипсами!). Возникает вопрос: почему планеты не «скатываются» на дно воронки? Конечно, все дело в том, что они обладают вращательным моментом (угловым моментом, обусловленным орбитальным движением). Движение планет происходит без трения, поэтому их вращательный момент исчезнуть не может. Но это не единственно возможный тип движения в гравитационной воронке. Мы уже говорили о том, что если осторожно положить пробную частицу на склон воронки (а у нее везде склон), то она скатится к центру (упадет на Солнце).

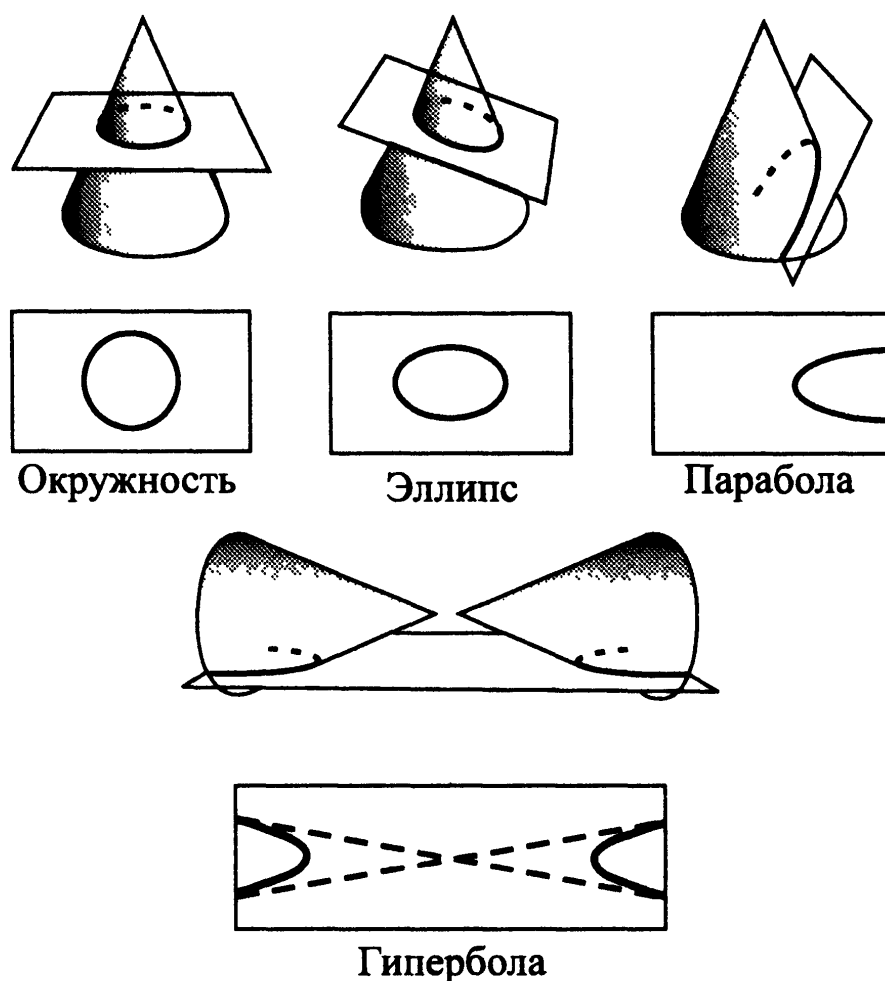


Рис. 5. Разные типы конических сечений

Наоборот, если сильно щелкнуть частичку, то она может вообще улететь бесконечно далеко. В этом случае говорят, что пробная частица получила скорость больше второй космической. Мы наблюдаем движение только по эллипсу потому, что все, что должно было улететь из Солнечной системы, давно улетело, а то, что должно было упасть, давно упало.

Подробный анализ показывает, что все типы траекторий движения в гравитационной воронке можно получить с помощью конуса и плоскости. Пересекая конус плоскостью, получим три типа кривых (рис. 5):

- 1) окружность или эллипс;
- 2) параболу;
- 3) гиперболу.

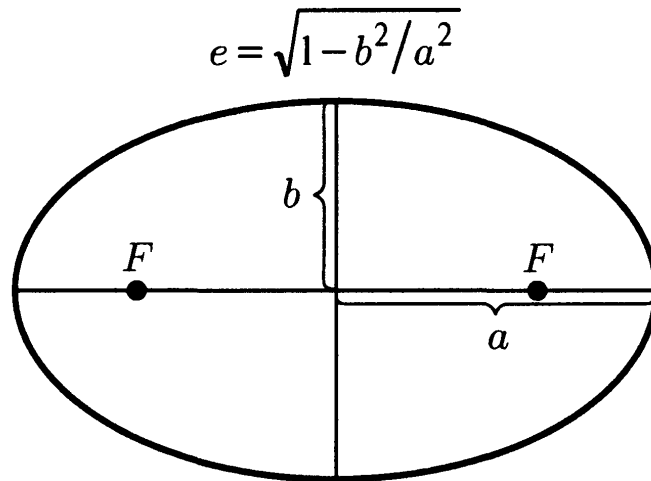


Рис. 6. К определению эксцентриситета эллипса

Кривых четыре, а типов три¹⁾. Это не случайно. Окружность и эллипс соответствуют замкнутому движению, для которого сумма кинетической и потенциальной энергий отрицательна. Парабола соответствует точному равенству этой суммы нулю: $K + U = 0$. Наконец, гипербола соответствует полной положительной энергии. Например, если бы в Солнечную систему прилетел межзвездный корабль, то он двигался бы по гиперболе, пока его обитатели не включили бы двигатели, чтобы выполнилось неравенство $K + U < 0$. Это необходимое условие контакта.

Но вернемся к планетам. Важной характеристикой орбиты планеты — эллипса — является его эксцентриситет, который показывает, насколько сжат эллипс (см. рис. 6). Чем сильнее сжат эллипс, тем больше его эксцентриситет и тем ближе его значение к единице. Наоборот, у окружности (несжатый эллипс) эксцентриситет равен нулю. У орбиты Земли эксцентриситет $e = 0,017$, поэтому она оказывается то ближе (зимой), то дальше (летом) от Солнца. Правда, эта разница расстояний очень невелика и не влияет существенно на смену времен года.

¹⁾ Движение возможно и по прямой линии. Этот вырожденный случай реализуется, если пробная частица не имеет вращательного момента. Полная энергия при этом может иметь любой знак.

Первый закон Кеплера является следствием конкретного вида закона тяготения. Если бы сила тяготения изменялась не по закону обратных квадратов, то орбиты пробных частиц были бы не эллипсами, и более того, они не были бы замкнутыми. Однажды выброшенная из какой-либо точки частица никогда бы не повторила своего пути дважды. Периодичность движения — это уникальное свойство сил, обратно пропорциональных квадрату расстояния²⁾.

Второй закон Кеплера является следствием закона сохранения вращательного момента пробной частицы в поле силы тяжести точечной массы. Действительно, сила тяготения всегда направлена по линии, соединяющей пробную частицу и центральное тело. Вращательный момент определяется компонентой движения, перпендикулярной радиус-вектору, и не может измениться из-за силы тяготения. Это свойство относится не только к тяготению, но и к любому центрально-симметричному полю сил.

Третий закон Кеплера можно записать в виде следующей формулы, обозначив через P период обращения планеты вокруг Солнца:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} M_{\odot}$$

Здесь $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг — масса Солнца, a — большая полуось эллипса. Для круговых орбит этот закон может вывести любой школьник. Нужно только помнить, что для круга большая полуось — это просто его радиус.

Читатель может спросить, почему мы так подробно говорим о движении планет, хотя обещали рассказать о двойных звездных системах. В двойных системах массы звезд могут быть сравнимы, и тогда все это может оказаться неприменимым. Но удивительная вещь — почти все, о чем мы говорили выше, остается справедливым для двойных звезд.

²⁾ Таким свойством обладает еще движение тел в поле сил, прямо пропорциональных расстоянию (вращение грузика на резинке).

3. Вокруг центра масс

Компоненты двойной системы пробными телами не назовешь. Движение одной из них определяется положением другой, и наоборот. Обе они вращаются вокруг друг друга. Но мы знаем, что центр масс замкнутой системы должен покоиться или равномерно двигаться. Влияние других звезд невелико. Обе звезды движутся точно так же, как планеты Солнечной системы, т. е. по эллипсам, в одном из фокусов которых расположен центр масс двойной системы (см. рис. 7). Эти эллипсы называют абсолютными орбитами звезд. Столь высокое название просто подчеркивает, что эти орбиты построены в системе центра масс двойной.

Эллиптичность орбит двойных звезд доказывается прямыми наблюдениями ближайших двойных звезд (см. рис. 8). Правда, астрономам удобнее в этом случае измерять не абсолютную, а относительную орбиту.

Обычно поступают следующим образом. Выбирают одну из звезд, считая ее неподвижной, и относительно нее измеряют положение второй звезды. Видимая орбита есть проекция истинной относительной орбиты на небесную сферу. Она тоже эллипс. (Немного подумав, читатель поймет, что если проекция окружности — эллипс, то и проекция эллипса тоже эллипс.) Однако фокусы видимого и настоя-

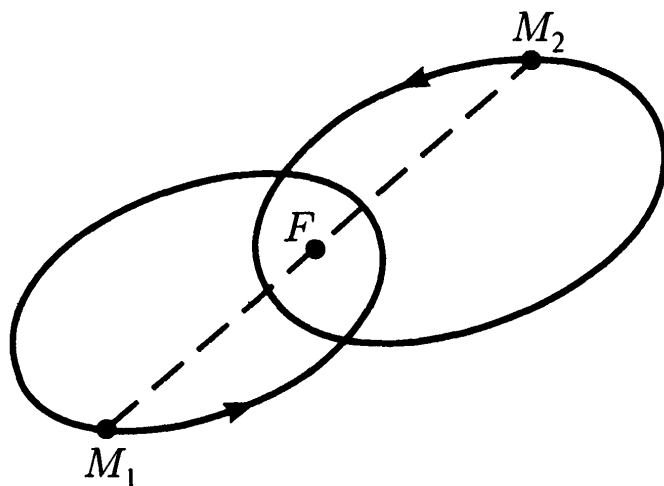


Рис. 7. Абсолютные орбиты звезд в двойной системе

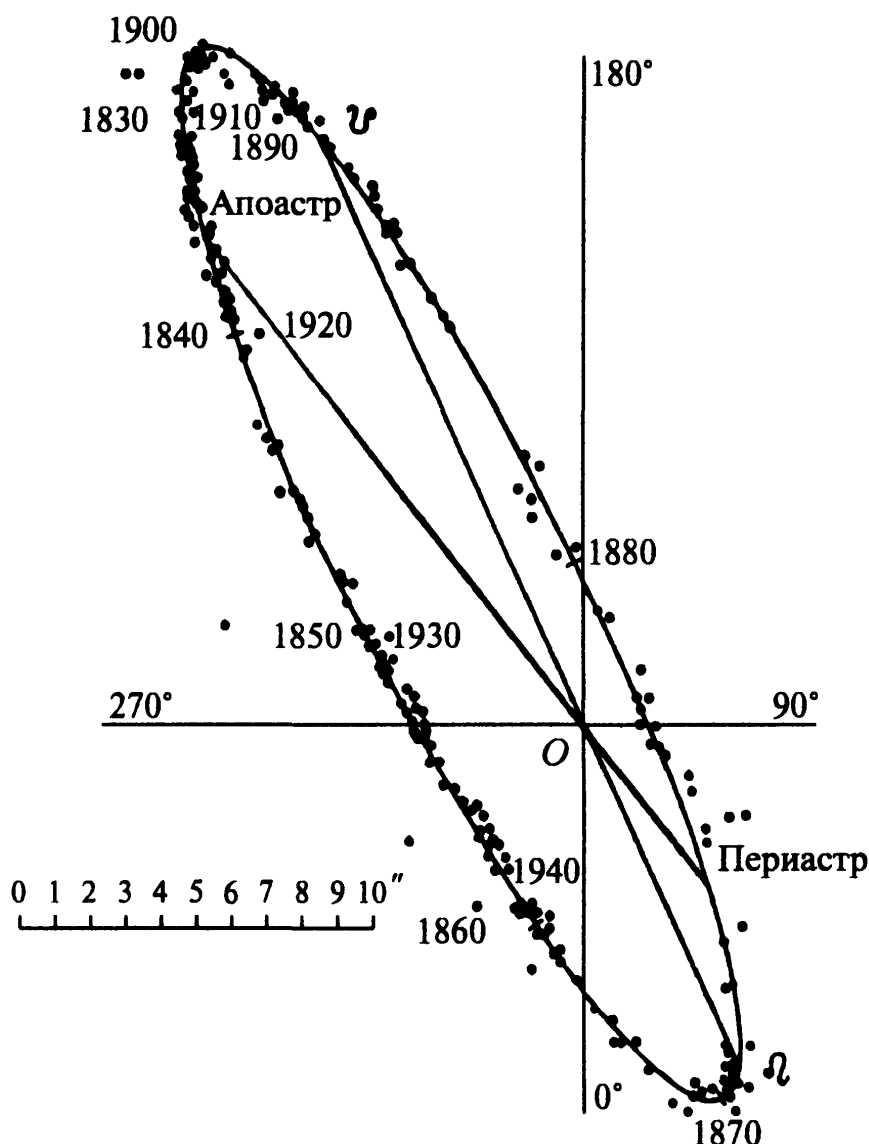


Рис. 8. Видимая орбита одной из звезд в двойной системе звезды α Центавра. Это ближайшая к нам из двойных, поэтому форма орбиты звезды вырисовывается по прямым наблюдениям. Яркая звезда находится в точке O , положения спутника яркой звезды показаны точками. (Наблюдения проводились с 1830 по 1940 гг. Шкала показывает масштаб в угловых секундах)

щего эллипсов не совпадают. Поэтому неподвижная звезда на рис. 8 находится не на оси видимой орбиты.

При движении звезды по эллипсу остается справедливым и второй закон Кеплера. А вот третий закон слегка изменяется. Это ясно. В формулу, связывающую период и размер орбиты, массы звезд должны входить равноправно:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M_1 + M_2). \quad (2)$$

Если M_2 много меньше M_1 ($M_2 \ll M_1$) то M_2 можно просто выбросить из формулы, и мы получим третий закон Кеплера для планет.

Точка орбиты, в которой звезды сходятся на ближайшее расстояние, называется *периастром*, а точка максимального удаления — *апоастром*³⁾. Очевидно, большая ось проходит через эти две точки. Ее иногда называют линией *апсид*⁴⁾.

4. Кто главнее?

Какая из звезд двойной системы играет более важную роль в орбитальном движении? Наивно можно было бы подумать, что, конечно, более массивная звезда «главнее». Для оправдания этого можно было бы даже совершить предельный переход, устремив к нулю массу одной из звезд. На самом деле ответ не так прост, скорее, все наоборот.

Орбитальное движение в системе центра масс характеризуется тремя механическими величинами. Каждая из звезд обладает импульсом: $M_1 v_1$ и $M_2 v_2$ — это раз. Каждая из звезд обладает кинетической энергией: $\frac{M_1 v_1^2}{2}$ и $\frac{M_2 v_2^2}{2}$ — это два. И третья важнейшая величина — момент вращения. Для круговых орбит его подсчитать легко: $M_1 v_1 r_1$ и $M_2 v_2 r_2$, где r_1 и r_2 — расстояния от центра масс двойной до звезд. Все эти величины по-своему важны.

Давайте сравним звезды по этим трем параметрам (см. табл. 1). Пусть $M_1 > M_2$. В системе центра масс общий импульс двойной должен быть равен нулю. Значит, по модулю импульсы звезд одинаковы (у них знак разный). Сравним энергии. Отношение кинетической энергии более мас-

³⁾ Периастр и апоастр образованы от греческих слов peri — «около», апо — «от» и aster — «звезда».

⁴⁾ Линия апсид — линия, соединяющая выделенные точки (absida от лат. «арки», «своды»): ближайшую и наиболее удаленную.

Таблица 1

Физическая величина (по модулю)	Более массивная компонента	Менее массивная компонента	Кто главнее?
Импульс	$M_1 v_1$	$M_2 v_2$	одинаковы
Кинетическая энергия	$\frac{M_1 v_1^2}{2}$	$\frac{M_2 v_2^2}{2}$	менее массивная
Орбитальный момент	$M_1 v_1 r_1$	$M_2 v_2 r_2$	менее массивная

сивной звезды к менее массивной, очевидно, равно отношению их орбитальных скоростей, ведь импульсы звезд равны. Но из равенства импульсов следует, что

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{M_2}{M_1},$$

т. е. кинетическая энергия менее массивной звезды больше!

То же самое и для момента вращения. Разделив момент более массивной звезды на момент менее массивной, получим r_1/r_2 , что равно M_2/M_1 , т. е. тоже меньше единицы. По всему видно, что маленькая звезда «главнее».

5. Определим орбиту двойной

Ясно, что для описания орбиты нужны величины, не зависящие от времени. Здесь на помощь приходят законы сохранения, поскольку именно они определяют величины, сохраняющиеся во времени.

Во-первых, сохраняется энергия двойной — система замкнутая. Во-вторых, сохраняется полный импульс двух звезд. В-третьих, постоянным остается вращательный момент, связанный с орбитальным движением. Заметьте, что нас при

этом не интересуют ни размеры звезд, ни их температуры, светимости и т. п. От этих величин движение по орбите не зависит.

Если орбиты не круговые, появляется еще одна сохраняющаяся величина — направление линии апсид.

Давайте подсчитаем, сколько величин нужно задать, чтобы орбита была определена. Перейдем в систему отсчета, начало которой совпадает с центром масс двойной. Момент вращения двойной — это вектор, перпендикулярный плоскости вращения звезд. Следовательно, задав момент вращения, мы автоматически зададим ориентацию плоскости орбиты. Вектор задается тремя скалярными величинами. Значит, столько же величин определяют плоскость орбиты. Однако если мы зададим только эти три величины, мы все еще будем далеки от полного задания орбиты. Ведь эллипс можно вращать в этой плоскости, меняя направление большой оси (линии апсид). Следовательно, нужно задать еще две величины, определяющие направление линии апсид. Всего теперь будет пять. Задав пять величин, мы зафиксировали орбиту в пространстве, но ничего не сказали ни о ее размерах, ни о ее сжатии. Это еще две величины. Таким образом, всего для полного задания орбиты необходимы семь величин. В качестве таковых, например, можно было бы задать полную энергию двойной (одна величина), полный вращательный момент (еще три величины), вектор в направлении линии апсид (это еще три величины, но из них только две независимые) и эксцентриситет. Однако это не самая удачная комбинация, так как энергия или вращательный момент прямо не наблюдаемы.

На практике пользуются следующими величинами: массами звезд M_1 и M_2 , большой полуосью a или периодом двойной P (они связаны третьим законом Кеплера через массы), эксцентриситетом e , углом наклона i плоскости орбиты к картинной плоскости (т. е. к плоскости, перпендикулярной лучу зрения), углом между линией пересечения

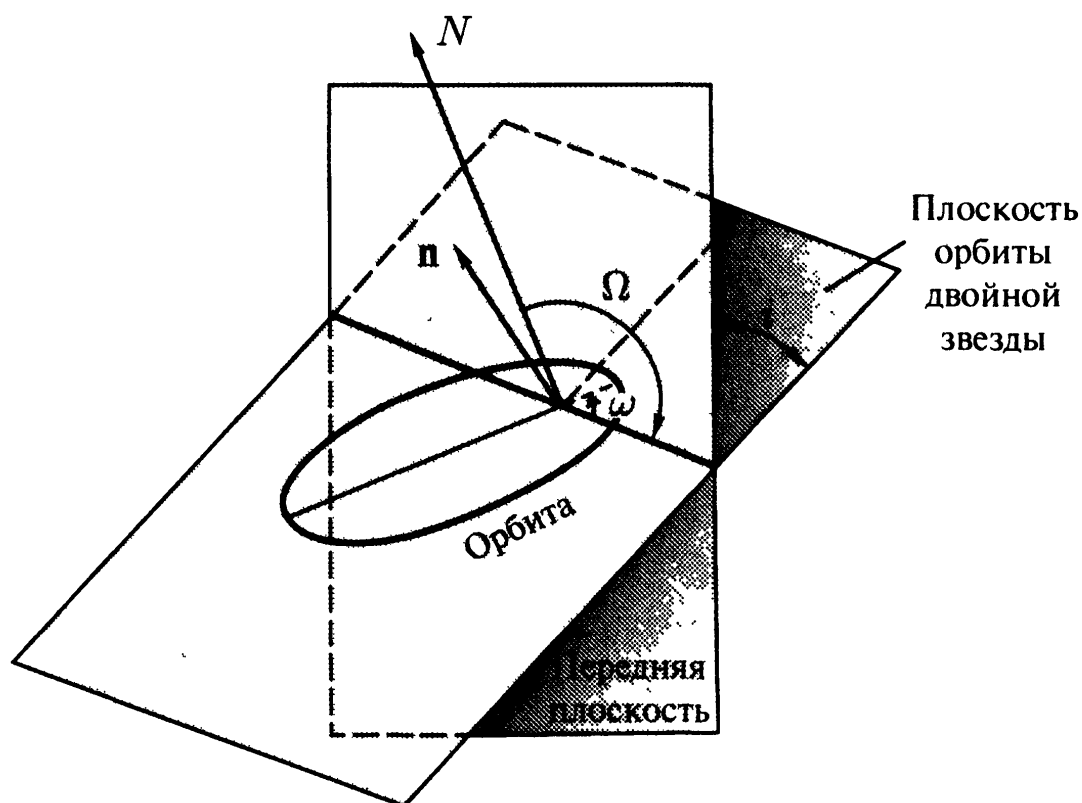


Рис. 9. К определению параметров орбиты звезды в двойной системе (см. текст)

плоскости орбиты с картинной плоскостью (линией узлов) и линией апсид ω и, наконец, так называемым позиционным углом Ω (рис. 9). На рисунке N указывает направление на северный полюс мира, n — вектор нормали к плоскости орбиты. Все эти семь параметров остаются неизменными в ньютоновской механике. Наблюдатели двойных звезд в первую очередь стремятся определить эти семь параметров. Но чтобы описать движение звезд по орбите, нужно еще задать положение звезд в какой-то условный момент.

6. Пробные частицы в двойной системе

Как бы двигались планеты Солнечной системы, если бы рядом с Солнцем находилась вторая звезда сравнимой массы? Теперь появляется уже не одна, а две гравитационные воронки. Ясно, что такая система должна быть гораздо слож-

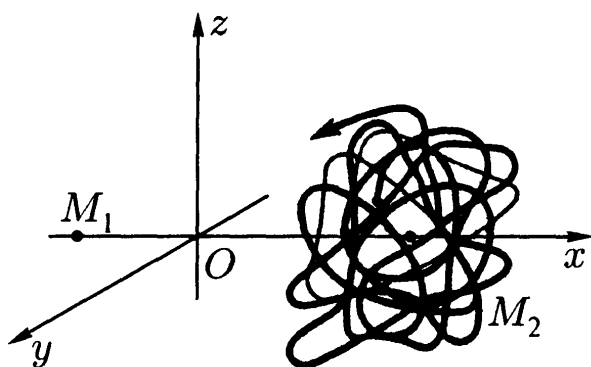


Рис. 10. Движение пробной частицы вокруг одной из звезд

нее. По-видимому, и Кеплеру было бы трудно разобраться в таком движении.

Движение пробных частиц в поле тяжести двойной звезды проще всего исследовать, перейдя в систему отсчета, жестко вращающуюся вместе со звездами. Центр такой системы совмещен с центром масс, ось x

направлена вдоль линии, соединяющей звезды, ось y лежит в плоскости орбиты, а ось z перпендикулярна к ней (рис. 10). Так мы сможем избавиться от вращения. Но избавившись от вращения, мы приобретаем центробежную силу, которая возникает в любой неинерциальной системе отсчета. Но это не страшно. В системах с круговыми орбитами угловая скорость обращения звезд по орбите не меняется со временем: звезды движутся равномерно по окружностям. Силы, действующие на пробную частицу, не зависят от времени, а зависят только от положения частицы. Поэтому можно пользоваться понятием потенциала.

В небесной механике такая задача называется ограниченной задачей трех тел. Ограниченной, потому что третье тело — пробная частица — не влияет на движение двух других. В общем случае траектория частицы может быть определена лишь численно, и по форме она будет напоминать нечто, изображенное на рис. 10. Меняя начальные координаты частицы и ее скорость, можно получить много траекторий такого типа. Число разнообразных вариантов очень велико. Используя самые совершенные вычислительные машины, мы можем сократить время счета, но при этом «утонем» в том огромном количестве бумаг, которые нам будет выдавать машина.

К счастью, нам это не понадобится. Движение пробных частиц можно исследовать качественно. При этом не нужно

следить за траекторией отдельной частицы. Она настолько сложна, что это занятие совершенно бесполезное. Мы будем следить лишь за судьбой частицы. Впервые такое качественное исследование провел американский астроном и математик Джордж Хилл в конце XIX века.

Пусть на пробную частицу действуют три силы: силы притяжения от звезд M_1 и M_2 и центробежная сила. Все эти силы потенциальные и могут быть описаны одним эффективным потенциалом U . Давайте проследим за частицей, движущейся в плоскости орбиты двойной. Все три силы находятся в этой же плоскости, поэтому пробная частица никогда из плоскости не выйдет.

Поведение потенциала U качественно показано на рис. 11. График представляет собой три «утеса», разделенных воронками в том месте, где расположены звезды. Сразу бросаются в глаза три особые точки. Положив осторожно на вершины утесов пробные частички, мы заметим, что они так и будут лежать в равновесии. Хоть неустойчивом, но все же равно-

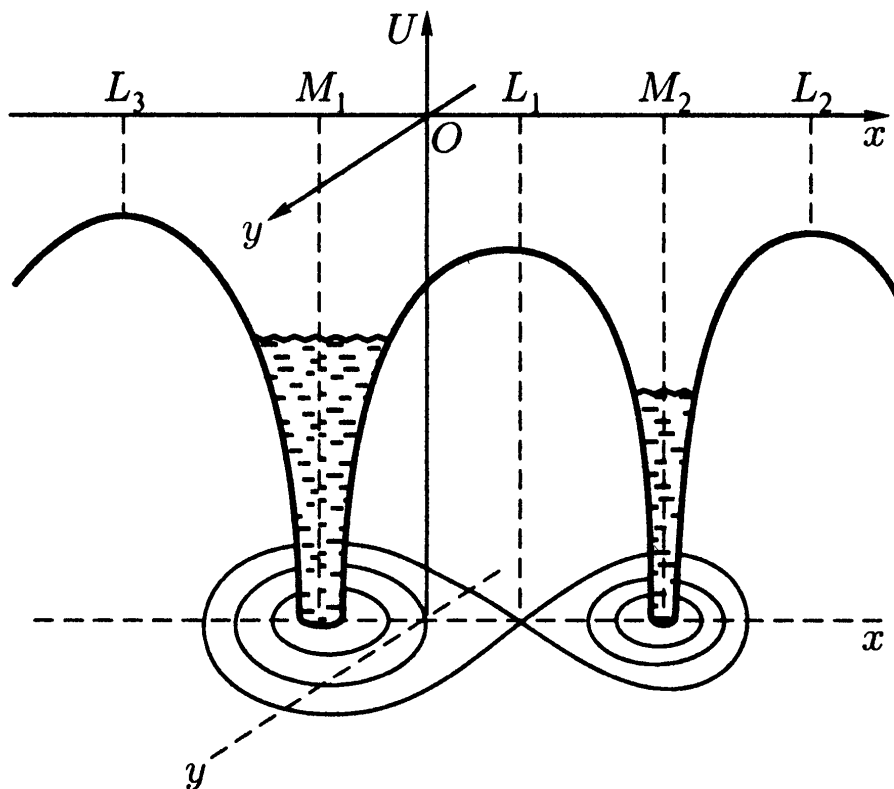


Рис. 11. Поведение эффективного потенциала в двойной системе

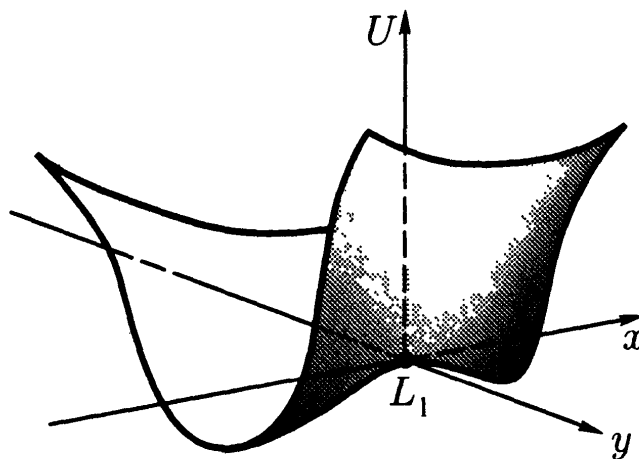


Рис. 12. Поведение потенциала вблизи внутренней точки Лагранжа (седло)

весии! Впервые эти точки обнаружил великий французский ученый Луи Лагранж в 1772 году.

Поверхности равного потенциала называются поверхностями Хилла. Они получаются сечением потенциала плоскостями, параллельными осям x и y (см. рис. 10). А их проекции на плоскость xy показаны на рис. 11. К сожалению, изобразить поведение потенциала в плоскости xy непросто. Нужно иметь в виду, что на самом деле потенциал нарастает при удалении от оси x вдоль оси y . Так что точки L_1 , L_2 и L_3 — это, скорее, не вершины, а перевалы (см. рис. 12). Однако читатель может заметить: если потенциал растет при удалении от точек L_1 , L_2 и L_3 , а на бесконечности он опять мал, значит, где-то есть вершины. Совершенно верно. Эти вершины соответствуют еще двум точкам Лагранжа (иногда их называют точками либрации). Но об этом мы поговорим чуть дальше.

При движении пробной частицы сохраняется ее полная энергия, т. е. сумма кинетической K и потенциальной U энергий частицы:

$$K + U = E = \text{const.}$$

Поставим следующий мысленный эксперимент. Будем запускать частички с одной из звезд. Очевидно, если мы чуть-

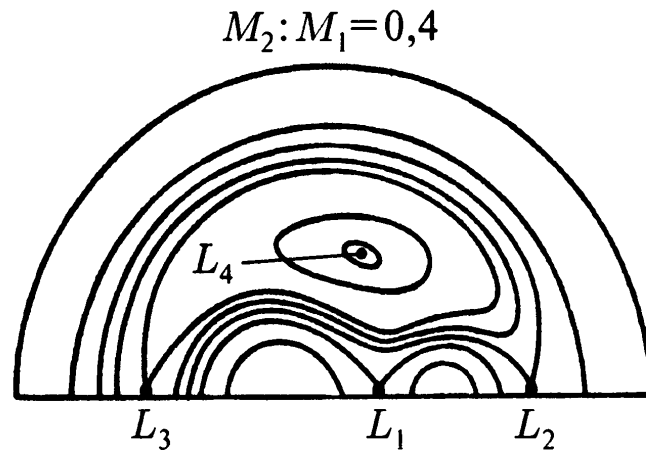


Рис. 13. Линии равного потенциала в плоскости орбиты двойной.
Отношение масс звезд равно 0,4

чуть подтолкнем частичку, то она немного поднимется вверх, а потом опять свалится в воронку. В максимально удаленной от звезды точке частица останавливается и ее кинетическая энергия обращается в нуль: $K = 0$. Значит, в этот момент полная энергия частицы E равна потенциалу в точке поворота. Понятно, что движение частицы возможно только там, где $U \leq E$. Проведя сечение потенциала по линии $U = E$, мы найдем область, внутри которой могут двигаться частицы с энергией E . В трехмерии — это будут не линии, а поверхности равного потенциала (поверхности Хилла). Таким образом, зная энергию частицы, мы можем указать зону ее движения. На рис. 13 показан разрез поверхности Хилла в плоскости орбиты. Пока энергия частицы мала, мала и область возможного движения ее вокруг звезды. «Выстреливая» частицы все с большей и большей скоростью, мы увеличиваем их энергию и область их возможного движения. При некотором значении энергии области смыкаются в точке Лагранжа L_1 , и получается поверхность, похожая на восьмерку. Ее называют критической полостью Роша в честь французского астронома и математика Эдуарда Роша.

Пробная частица, попавшая в точку L_1 , без затрат энергии может попасть на соседнюю звезду. Частицы с очень большими энергиями могут выйти за пределы полости

Роша — они уже не принадлежат какой-то одной звезде. В точках Лагранжа равнодействующая всех сил, действующих на пробную частицу, обращается в нуль. Читатель может легко воспользоваться последним свойством, чтобы найти положение этих точек. Особенно просто выглядит ответ в случае звезд равных масс. Мы предлагаем читателю самому получить ответ к этой задаче.

Для эксцентричных орбит движение пробных частиц уже не описывается потенциальной функцией. И там уже нельзя утверждать, что та или иная частица с определенной энергией обязательно будет двигаться в окрестности одной из звезд. Конечно, можно с помощью ЭВМ просчитать траектории частиц, а вот качественный анализ их движения уже не проходит.

7. Фигуры звезд

В широко распространенном среди астрономов анекдоте рассказывается о том, что на экзамене по теоретической астрофизике студенту достался билет с вопросом о внутреннем строении звезд. Находчивый студент, не зная вопроса, бодро отвечает: «Звезда — это раскаленный газовый шар, а площадь шара равна четыре — пи — эр — квадрат...» и т. д.

Да, действительно, одиночные звезды имеют форму шара. Почему? Энергетически выгодно. Вещество звезды, подобно жидкости, заполняет сосуд, в который его наливают, а поверхность ее совпадает с эквипотенциальной поверхностью. Звезда сама создает поле, в котором ее вещество «разливается». Мы уже говорили, что потенциал точечной массы изменяется с расстоянием как r^{-1} (формула (1)), причем в точке $r = 0$ потенциал уходит в «минус бесконечность». В природе так не бывает, по крайней мере в обычных звездах. Потенциал звезды напоминает рюмку с отбитой ножкой (см. рис. 14). При $r = 0$ потенциал мал, но конечен. На поверхности $r = \text{const}$, т. е. звезда — шар.

А какова форма звезд в двойных системах? Действуя по аналогии с одиночной звездой, мысленно заполним потенциальный рельеф двойной системы (см. рис. 11) жидкостью. Она растечется таким образом, что поверхность звезды будет поверхностью равного потенциала, т. е. поверхностью Хилла. Звезда вытянется вдоль линии, соединяющей компоненты двойной системы.

Видите, как мы легко расправились с этой проблемой. А в XVIII веке вокруг более простой проблемы разгорелся столь сильный спор, что даже была снаряжена специальная арктическая экспедиция. Эту историю пересказывает выдающийся астрофизик Субраманьян Чандрасекар в своей монографии о фигурах звезд.

В 1687 году Исаак Ньютон опубликован свой самый знаменитый труд «Математические начала натуральной философии». Именно здесь он объяснил кеплеровские законы законом всемирного тяготения, решив и много других «частных» проблем. Одной из них была задача о форме Земли. Ньютон утверждал, что из-за вращения Земля у полюсов сплюснута, и форма ее напоминает репу. Он дал остроумное доказательство этого. Предположим, что в Земле прорыты два колодца до ее центра (см. рис. 15): один — вдоль оси вращения, другой — в плоскости экватора. Колодцы заполнены водой. Для того чтобы вода находилась в равновесии и не выплескивалась, необходимо, чтобы вес жидкости в обоих столбах был одинаковым. Но вес тела — это произведение массы на эффективное ускорение, которое есть разность

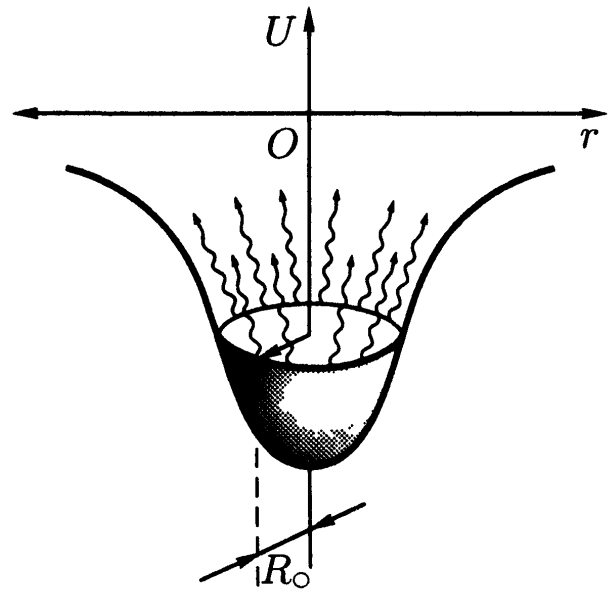


Рис. 14. Гравитационный потенциал звезды не уходит в «минус бесконечность»

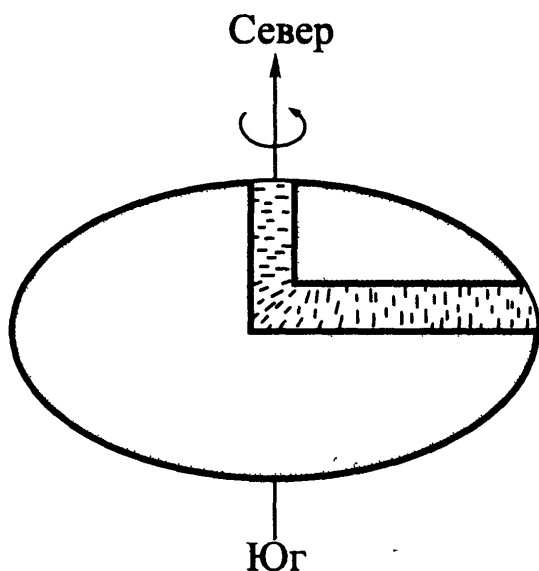


Рис. 15. Мысленный эксперимент Ньютона

между ускорением силы тяжести и ускорением центробежных сил. В экваториальном колодце ускорение силы тяжести слегка ослабляется центробежным ускорением. Чтобы вес воды на экваторе был таким, как и в полярном колодце, уровень воды на экваторе должен быть повыше.

Но этот вывод был в вопиющем противоречии с астрономическими данными того времени! Знаменитый французский астро-

ном Доменико Кассини, проводивший специальные измерения дуги меридиана на территории Франции, считал, что его данные говорят о вытянутости Земли вдоль полюсов. Трудно было не доверять этому человеку, первому директору Парижской обсерватории, открывшему четыре спутника Сатурна и знаменитую щель в кольцах Сатурна.

8. Кто же прав?

Несколько поколений последователей Кассини и Ньютона спорили между собой. Лишь в 1738 году француз Мопертюи снарядил специальную экспедицию в Лапландию. Арктическая экспедиция полностью подтвердила точку зрения Ньютона. Вольтер так отреагировал на это:

«И подтвердили вы среди пустынь теперь
Лишь то, что Ньютон знал, не выходя за дверь».

Для проверки формы звезд не нужно снаряжать специальные экспедиции, нужен телескоп. Подобно Земле, вытягивается и звезда в двойной системе. Качественная картина такая же, но в двойной все усложняется тем, что звезды

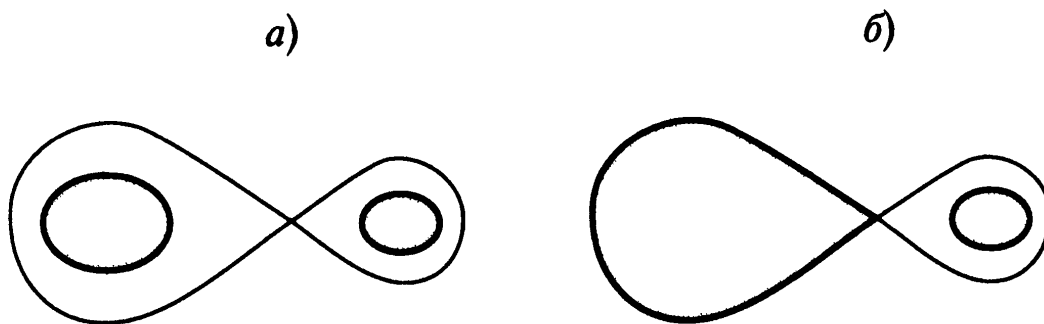


Рис. 16. Формы звезд в двойной системе

вращаются вокруг центра масс, который не совпадает с центрами звезд. К тому же на звезду действует неоднородная сила притяжения со стороны соседки. Мы видели, что поверхность Хилла — это место, где скорость частицы с данной энергией обращается в нуль. Чтобы поверхность совпала с поверхностью Хилла, нужно, чтобы звезда была неподвижна во вращающейся системе отсчета. Это возможно только в том случае, если период вращения звезды равен периоду обращения двойной. В этом случае говорят, что звезда вращается синхронно.

На рис. 16 показана форма звезды в двойной системе. Пока ее размеры малы по сравнению с размерами полости Роша, ее фигура напоминает трехосный эллипсоид, или, попросту, среднеазиатскую дыню (рис. 16 а). Строго говоря, это не точно. На самом деле ее форма несимметрична. Это особенно заметно, когда размеры звезды приближаются к полости Роша.

Звезда, заполняющая полость Роша, напоминает уже совсем другой «фрукт» (см. рис. 16 б). У такой звезды появляется «носик» вблизи внутренней точки Лагранжа. Вещество с «носика» может без дополнительных затрат энергии «перебираться» в полость соседней звезды.

Это самое удивительное и замечательное свойство двойной системы. Правда, на первый взгляд оно кажется довольно абстрактным, вся ситуация представляется надуманной. Почему размеры звезды должны совпадать с размерами по-

лости Роша? Это может произойти чисто случайно. Природа, однако, устроена так, что почти все двойные системы рано или поздно становятся такими «уродами».

9. Образование двойных звезд

Звезды образуются из газа и пыли вследствие гравитационной неустойчивости. В применении к Солнцу эта идея на гуманитарном уровне была высказана еще Иммануилом Кантом в 1755 году и поддержана позднее Лапласом. Образование звезд «окутано туманом», но лишено всякой «чертовщины». «Туман» появляется оттого, что сжимающееся облако газа непрозрачно для электромагнитных волн. Противники этой гипотезы, местами сохранившиеся и по сей день, часто в качестве аргумента высказывают тезис, что, мол, никто никогда не видел сжатия облаков газа, а наоборот, всюду наблюдаются сплошные взрывы. Здесь работает мощный эффект селекции. Звезды образуются в местах, где много газа и пыли. Но именно там видимость особенно плохая.

Что же заставляет сжиматься облака газа? На этот вопрос строгий математический ответ дал английский астроном Джеймс Джинс в начале XX века. Пусть бесконечное пространство заполнено однородным газом. Возмутим слегка параметры газа в какой-нибудь малой области, например слегка сожмем газ. Если бы не было гравитации, сжатие сменилось бы расширением, возмущая соседние участки газа. По газу побежала бы волна возмущений — звук. В межзвездном пространстве размеры облаков велики, и наряду с силами давления большую роль начинают играть силы гравитации. Выделим из межзвездной среды шарообразную область и слегка ее сожмем. Сила, с которой облако притягивает само себя, пропорциональна GM^2/R^2 (M и R — масса и радиус облака). Внешние силы не учитываются, так

как они взаимно компенсируют друг друга. Значит, давление силы гравитации пропорционально⁵⁾ $(\rho R)^2$. А давление одноатомного газа при адиабатическом сжатии зависит от плотности по закону $P \sim \rho^{5/3}$. Отсюда видно, что если мы будем брать все большее и большее облако, то сила гравитации при некотором R станет больше силы давления газа и облако неминуемо начнет сжиматься. Этот процесс называется *джинсовской неустойчивостью*.

Минимальный размер, начиная с которого облако становится неустойчивым по отношению к сжатию, называется *джинсовской длиной волны*. «Волны» — потому что точный ответ получается при решении задачи о распространении волн в самогравитирующем газе. Приблизленно джинсовскую длину можно найти, приравняв давление газа в шаре радиуса R давлению силы гравитации. Давление газа вычисляется по формуле Менделеева—Клапейрона. Давление сил гравитации прикинем мысленно, разделив шар пополам и вычислив силу притяжения двух половинок друг к другу. Итак, получаем равенство

$$\rho \frac{\mathcal{R}T}{\mu} = \frac{GM^2}{4\pi R^4},$$

из которого находим приближенное значение джинсовской длины волны:

$$R_{\text{дж}} \sim \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\mathcal{R}T}{\pi \mu G \rho}}.$$

Здесь T — температура газа, \mathcal{R} — газовая постоянная, μ — молекулярная масса газа.

Конечно, газ в Галактике распределен отнюдь не однородно. Как выяснилось в конце 70-х годов прошлого века, почти весь газ сосредоточен в гигантских молекулярных облаках с массами в сотни тысяч и миллионы масс Солнца.

⁵⁾ Действительно, заметив, что $M = \rho R^3$, получаем для давления силы гравитации $P_{rp} \sim (GM^2/R^2)/R^2 \sim \rho^2 R^2$.

Почему, спрашивается, из одного облака не образуется одна гигантская звезда? Потому что и облака неоднородны: звездообразование идет в самых плотных центральных частях этих облаков. Кроме того, в облаках газ не покоится, а участвует в различных хаотических движениях. Такие движения называются турбулентностью. Отдельные ячейки облака вращаются в различных направлениях. Причем вихри встречаются на всех масштабах — от размера самого облака до самых малых его частей.

Итак, турбулентность, по-видимому, является причиной возникновения двойных систем. Результаты расчетов, проведенных на самых крупных вычислительных машинах, качественно представлены на рис. 17. Облако вначале сжимается по оси вращения, а потом превращается в тор. Тор разбивается на отдельные сгустки, из которых и образуются двойные звезды. На самом деле часто образуются системы не двух, а большего числа звезд (кратные звезды). В Галактике очень много кратных звезд. Наша книга посвящена двойным звездам, хотя звезды, о которых мы будем говорить, могут быть, например, и тройными. Это упрощение вполне оправданно. Нас будет интересовать кратность системы только с точки зрения влияния звезд друг на друга. Природа так устроена, что любая кратная система в этом смысле сводится к двойной. Три звезды не могут устойчиво существовать совместно и равноправно. Система, состоящая из трех звезд, расстояния между которыми сравнимы друг с другом, рано или поздно выбрасывает из себя одну из звезд. Виной этому своеобразный кумулятивный эффект, известный из гидродинамики. Он применялся в годы войны в специальных противотанковых снарядах. Суть его иллюстрируется опытом Покровского.

Возьмите пробирку, наполненную водой. Если вертикально сбросить ее на пол с небольшой высоты (например, несколько дециметров), то из нее вырвется струя воды, направленная вверх, на несколько метров (рис. 18).

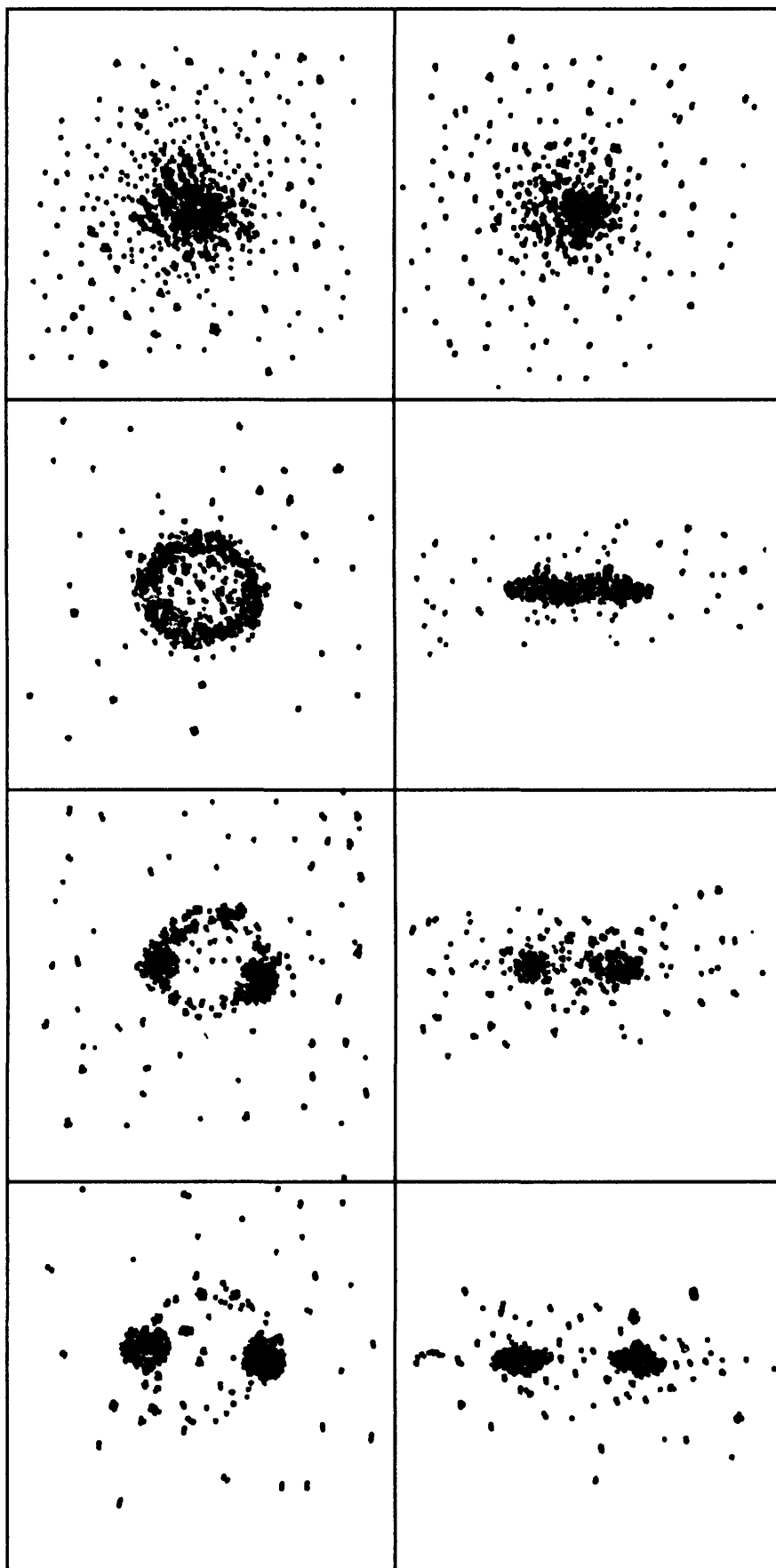


Рис. 17. Возможная картина образования двойной системы из вращающегося облака: вид с полюсов (слева) и с экватора вращения (справа)

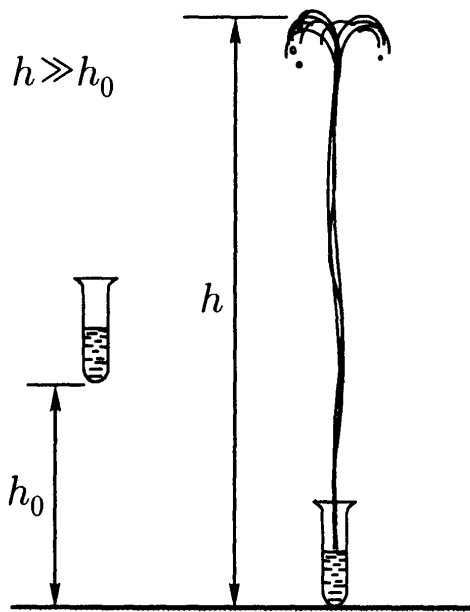


Рис. 18. Опыт Покровского, иллюстрирующий кумулятивный эффект

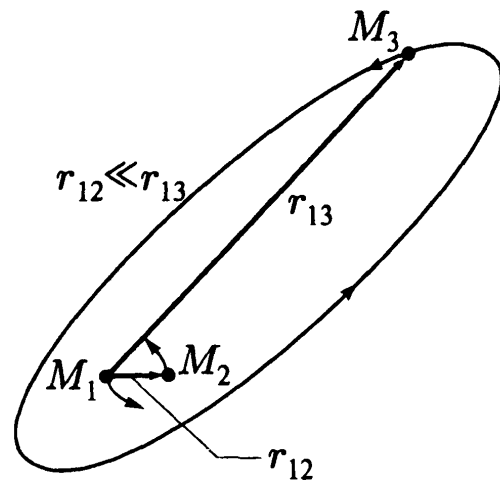


Рис. 19. В тройных системах расстояние между двумя звездами, как правило, много меньше расстояния до третьей

Кажется, не выполняется закон сохранения энергии. В действительности с энергией все в порядке. Просто происходит перераспределение энергии и импульса между частями воды. Большая часть воды остается в пробирке, вообще не выливаясь, а свою кинетическую энергию передает меньшей части воды, которая поднимается на высоту, много бóльшую начальной.

В результате кумулятивного эффекта система либо становится двойной, либо остается тройной, но при этом одна из звезд движется по орбите на расстоянии, мнóго бóльшем, чем расстояние между близкими звездами. Наиболее существенным оказывается притяжение двух близких звезд. Поэтому кратные системы сводятся к двойным (рис. 19).

II

Парадокс Алголя

1. Кто «громче» светит?	44
2. Кривая блеска	45
3. О чем рассказывает алголевская кривая блеска? . .	48
4. Эффект Доплера	50
5. Кривая лучевых скоростей	55
6. Почему звезды разные	60
7. Наконец, парадокс	65
8. Перемена ролей	66

Парадокс Алголя

Мы начнем свой рассказ о том, как живут двойные звезды, со звезды, хорошо известной многим любителям астрономии. Эта звезда находится в созвездии Персея и называется Алголем (не путать с Алголом и т. д.). Другое ее название — β Персея. Переменность блеска этой звезды была открыта итальянским математиком и астрономом Джiovанни Монтанари в 1669 году. Вот уже несколько столетий Алголь является хрестоматийным примером затменно-переменной звезды. Изменения блеска, похожие на алголевские, были найдены у многих сотен других звезд, в связи с чем имя «Алголь» стало нарицательным — короче, стандартная, обычная звезда. Поколения астрономов, наблюдая Алголь, не находили в нем ничего удивительного. И вдруг (в историческом смысле действительно «вдруг») астрономы поняли, что с этой звездой не все ладно, при этом ничего нового в ней не открыв. Просто то, что раньше казалось вполне нормальным, вдруг стало совершенно удивительным и непонятным. Чтобы удивляться, нужно много знать. Лишь разобравшись в законах эволюции звезд, астрономы поняли, что такой звезды, как Алголь, вообще не должно быть — ее существование противоречило этим законам! Как всякий настоящий парадокс, парадокс Алголя оказался весьма продуктивным. Он стал ключиком, который помог открыть тайну эволюции двойных звезд. Для того чтобы читатель прочувствовал это, нужно рассказать все по порядку.

1. Кто «громче» светит?

В астрономии блеск звезд измеряется в безразмерных звездных величинах. Звездная величина вводится следующим образом: выбирается какая-нибудь опорная звезда и ее блеск принимается равным нулевой звездной величине. Записывается это так: $m = 0$. Блеск любой другой звезды можно найти по формуле

$$m = -2,5 \lg \frac{F}{F_0}, \quad (3)$$

где F и F_0 — величины, характеризующие энергетический блеск звезд m -й и нулевой величин, соответственно. Обычно в качестве энергетической характеристики выбирают освещенность, создаваемую звездой, — количество световой энергии, падающей от звезды в единицу времени на поверхность единичной площади. Из определения звездной величины видно, что звезда, например, 5-й величины в 100 раз слабее звезды нулевой величины.

Может возникнуть вопрос: зачем понадобилось вводить звездные величины, если есть такая физическая характеристика, как освещенность? Звездная величина удобна тем, что освещенности, создаваемые звездами, очень сильно отличаются друг от друга. Например, самая яркая звезда (Солнце) и самая слабая звезда, видимая невооруженным глазом, отличаются по блеску более чем в 10^{12} раз. А в звездных величинах это соответствует чуть более 30^m . Такое число произносить гораздо удобнее.

Это обстоятельство учла природа, создавая человеческий глаз. Она поместила внутри нас своеобразную «вычислительную машинку», которая умеет логарифмировать. В физиологии эту «машинку» называют законом Вебера—Фехнера: наши ощущения растут в арифметической прогрессии, когда раздражение нарастает в геометрической прогрессии. Это относится не только к нашим глазам, но и к ушам. Имен-

но благодаря закону Вебера — Фехнера силу звука измеряют в децибелах. Правда, в отличие от звездных величин, в определении децибела перед логарифмом силы звука стоит множитель 10, а не $-2,5$. Но принципиальной разницы между звездными величинами и децибелами нет. Желаящие могли бы измерять силу звука в звездных величинах или яркость звезд — в децибелах. Но так уж повелось (начиная с Гипарха — II век до н. э.), что в астрономии привились звездные величины. Чтобы представить себе блеск звезды нулевой величины, взгляните летом на Вегу. Ее звездная величина близка к стандарту: $m = 0^m,14$. Но вернемся к Алголю.

2. Кривая блеска

В конце XVIII века английский астроном-любитель Джон Гудрайк заметил, что блеск Алголя меняется строго периодически. Через каждые двое суток, 20 часов и 49 минут его блеск воспроизводился до прежнего уровня. Для описания периодических процессов удобно ввести *фазу*. Фаза — это время, выражаемое в долях периода P . На практике фазу вычисляют следующим образом. Выбирают какой-нибудь момент времени за начальный и приписывают ему фазу, равную нулю. При наблюдении звезд, как правило, начальный момент (момент нулевой фазы) совпадает с минимумом блеска звезды. Далее замечают время наблюдения, вычитают из него начальный момент времени и делят на период. Дробный остаток деления и будет фазой. Блеск переменной звезды обычно измеряется по отношению к какой-либо постоянной звезде, находящейся поблизости. График зависимости блеска звезды от фазы называется кривой блеска.

Кривая блеска Алголя, найденная Гудрайком, имела за период два минимума — «глубокий» первичный (главный минимум) на фазе нуль и «мелкий» вторичный на фазе 0,5 (рис. 20). Понять такой характер кривой блеска можно,

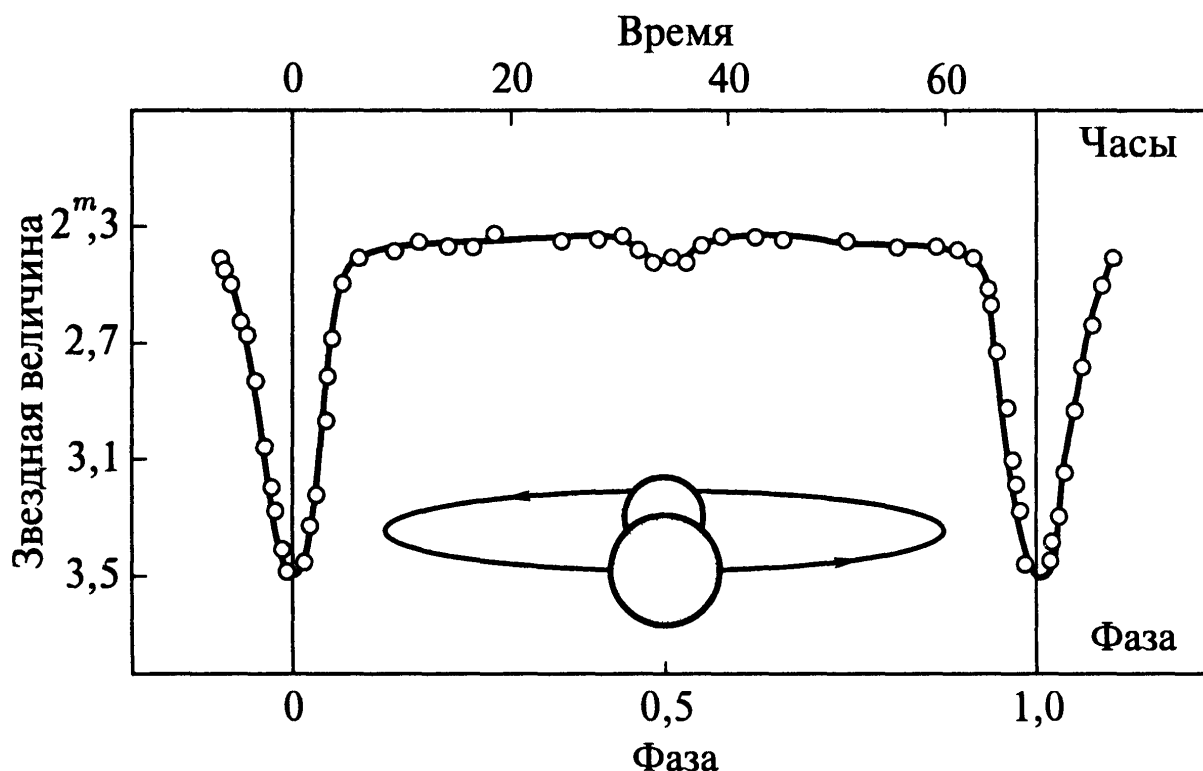


Рис. 20. Кривая блеска Алголя

лишь предположив, что Алголь — это не одна звезда, а две. (Схема явления поясняется рис. 20.) Вращаясь одна вокруг другой с периодом 2,9 дня, звезды попеременно закрывают от нас друг друга. Закрывают, правда, не полностью, а частично. Возникает вопрос: почему один минимум глубокий, а другой мелкий? Ведь каждая из звезд затмевает одинаковую площадь своей соседки (эта площадь попросту равна площади общей части двух пересекающихся кругов). Давайте подумаем: что такое глубина затмения, чем она определяется? Вне затмения мы видим обе звезды одновременно, и блеск системы есть сумма блесков звезд. Когда одна звезда «наползает» в проекции на другую, блеск двойной падает ровно на столько, сколько излучает закрытая часть звезды. Чтобы вычислить количество энергии, излучаемое закрытой частью поверхности звезды, нужно помножить энергию, излучаемую единицей поверхности, на площадь этой самой части поверхности. Отсюда ясно, что разница в глубинах минимумов связана с различиями в количествах энергии, излучаемой единицей поверхности звезд, т. е. в потоках, идущих

от каждой звезды. В первом приближении можно считать, что звезды излучают, как «абсолютно черные» тела. Примером такого «абсолютно черного» тела может быть тело, имеющее постоянную температуру. Для абсолютно черных тел справедлив закон Стефана—Больцмана, согласно которому поток с единицы поверхности пропорционален четвертой степени температуры:

$$F = \sigma T^4.$$

Здесь $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(м² · К⁴ · с) — постоянная Стефана—Больцмана. Собственно, пока этот закон нужен нам лишь для того, чтобы сказать довольно очевидную вещь — чем горячее тело, тем оно ярче. Теперь ясно, что Алголь состоит из звезд с разными температурами, причем на фазе нуля затмевается более горячая звезда.

Кривые блеска типа Алголя очень распространены среди переменных звезд. Сейчас известно несколько тысяч таких звезд. Для всех них характерно наличие двух минимумов с примерно постоянными участками блеска между ними. Постоянство оказывается только примерным. Почему? Ведь между затмениями мы видим обе звезды целиком, а блеск системы есть просто сумма блесков звезд. Постоянство должно быть точным. Но на кривой блеска (рис. 20) хорошо видно, что после первичного минимума блеск системы потихоньку растет к фазе 0,5, и если бы не вторичное затмение, то в этом месте был бы максимум.

Усиление блеска объясняется эффектом отражения. Вспомним, что одна из звезд Алголя горячее другой. Более горячая звезда подсвечивает с одной стороны холодную, поэтому один бок холодной звезды, обращенный к горячей звезде, становится чуть ярче. Горячая звезда как бы отражается в холодной. На самом деле происходит не отражение, а переизлучение, причем переизлучение с изменением длины волны света. Кстати, отражение видимого света в зеркале — это тоже переизлучение. Переизлучают электроны

в тонком слое металла, нанесенного на стекло. Но в зеркале длина волны не меняется, поэтому если вам кажется, что вы в зеркале рыжий, вы и в самом деле рыжий.

Давайте запомним получше фазовую зависимость эффекта отражения. На фазе нуль холодная звезда затмевает горячую, и значит, мы видим тыльную, наиболее холодную часть более темной звезды. По мере орбитального вращения, с увеличением фазы, мы видим все бо́льшую и бо́льшую часть подсвеченной стороны этой звезды — общий блеск системы медленно увеличивается, и к фазе 0,5 холодная звезда разворачивается своей наиболее горячей частью. Эффект отражения становится максимальным. Затем блеск системы симметрично падает к фазе 1. В системе Алголя эффект отражения мал и играет второстепенную роль. Главное — это затмения. Но представьте, что система расположена так, что компоненты не затмевают друг друга, или им нечего и нечем затмевать (такое тоже возможно!). Тогда единственной причиной изменения блеска двойной может быть эффект отражения. Дальше мы еще встретимся с двойными, у которых эффект отражения в десятки раз сильнее, чем у Алголя.

3. О чем рассказывает алголевская кривая блеска?

Какую информацию можно извлечь из кривой блеска алголевского типа, т. е. кривой, состоящей из двух минимумов? Пусть, например, двойная система наблюдается с ребра, т. е. луч зрения лежит в плоскости орбиты (см. рис. 21). Орбиту для простоты примем круговой. В этом случае затмения будут центральными и одна из звезд будет закрываться от нас целиком. Угол наклона плоскости двойной к картинной плоскости $i = 90^\circ$. Затмения при этом будут иметь форму трапеции. Пусть более яркая звезда 1 имеет бо́льшие

размеры. В первичном минимуме затмевается более яркая (и бóльшая по размерам) звезда. Наклонная сторона AB трапеции соответствует постепенному закрытию этой звезды звездой 2. В точке B края звезд 1 и 2 касаются (внутреннее касание), и пока звезда 2 проходит по диску звезды 1, блеск системы не меняется.

На участке CD звезда 1 постепенно выходит из-за звезды 2. Чем больше радиус звезды 2, тем длиннее участок CD . Полная длительность затмения (от A до D) определяется суммой размеров звезд, а длительность постоянного участка (дна) BC — разностью размеров звезд. Два уравнения, два неизвестных. Значит, кривая блеска позволяет найти радиусы звезд. Читатель может удивиться, как это так: измерив время, мы находим расстояние. Ведь нужно знать еще и скорость, а ее из кривой блеска не определишь. Совершенно верно — размеры звезд мы не найдем. Но можно найти размеры звезд в единицах радиуса орбиты двойной (a). Действительно, за период звезда проходит расстояние $2\pi a$. Период нам известен, значит, мы можем узнать, какую часть от полной длины орбиты проходит звезда за время затмения.

Если двойная система видна не с ребра, то длительность затмения и его форма будут определяться не только относительными размерами звезд, но еще и величиной угла i . В этом случае изменится и форма кривой блеска. Если угол таков, что меньшая по размерам звезда не затмевается полностью, то во вторичном затмении не будет плоского «дна». Форма затмения позволяет определить угол наклона двойной. При некотором достаточно малом угле i затмения могут

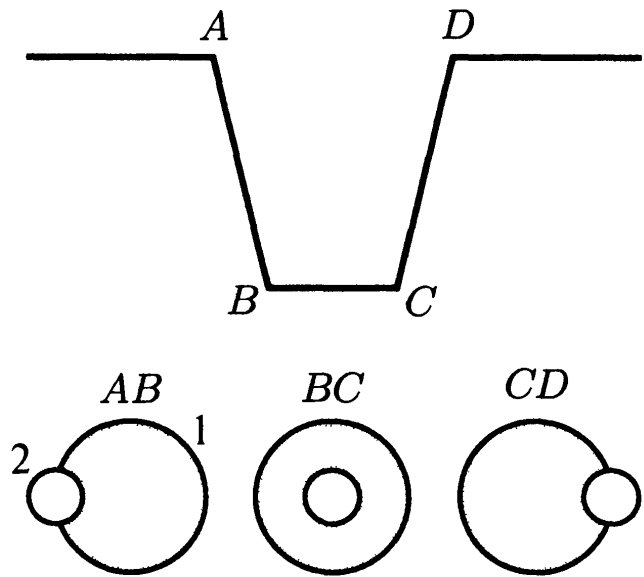


Рис. 21. Центральное затмение

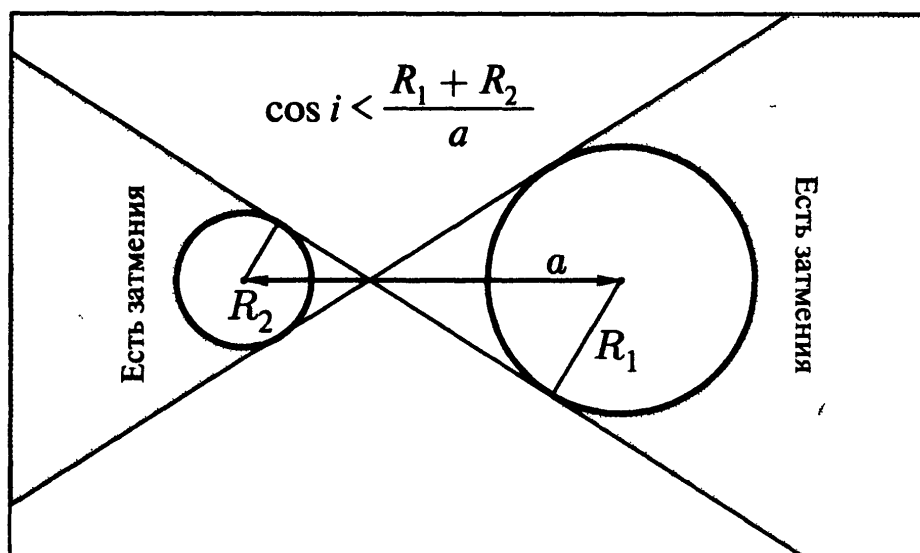


Рис. 22. Есть ли затмения?

вообще не происходить. Минимальное значение угла определяется относительными размерами звезд — компонент двойной системы (см. рис. 22) — из простых геометрических соображений.

Итак, кривые блеска позволяют определить период двойной и относительные радиусы звезд. Но как определить размеры звезд и, главное, как определить массы звезд? Где взять «линейку», с помощью которой можно было бы измерить размер орбиты двойной и радиусы звезд? Природа создала такие стандартные линейки, они существуют в любом атоме, независимо от того, где этот атом находится — на Земле или в далекой звездной системе.

4. Эффект Доплера

Когда рассказывают об эффекте Доплера, часто вспоминают шутку про физика, который проехал перекресток на красный свет. Находчивый нарушитель объяснил полицейскому, что из-за эффекта Доплера красный свет светофора ему показался зеленым. Но полицейский оказался не менее сообразительным человеком и оштрафовал физика за превышение скорости. Этот анекдот, по-видимому, глубоко запал в сознание службы дорожного движения.

Сейчас на обочинах дорог часто можно увидеть милицейскую машину, в которой находится специальный прибор, измеряющий скорость проходящего транспорта. Работа этого прибора основана на эффекте Доплера, который состоит в следующем.

Пусть имеется излучатель периодических импульсов и их приемник. Если излучатель покоится, то приемник будет принимать сигналы с той же периодичностью, с которой они излучаются (пусть, например, период излучателя равен $P_{\text{изл}}$). Теперь пусть излучатель движется в направлении на приемник (или от него) со скоростью v . За время $P_{\text{изл}}$ излучатель пройдет расстояние $vP_{\text{изл}}$. Значит, следующий импульс придет с меньшего (большего) расстояния. Причем импульс придет раньше (позже) на время, за которое сигнал проходит сдвиг излучателя, т. е. $vP_{\text{изл}}/c$, где c — скорость распространения сигналов. Период сигналов, поступающих в приемник, изменится на величину $P = P_{\text{пр}} - P_{\text{изл}} = \Delta P$. Относительное изменение периода и есть эффект Доплера:

$$\frac{\Delta P}{P_{\text{изл}}} = \frac{v}{c}. \quad (4)$$

Если период излучателя известен, то, сравнивая его с принимаемым периодом, можно найти скорость приближения или удаления излучателя. Прибор, измеряющий скорость автомобилей, — одновременно и излучатель, и приемник. Он облучает машины и принимает отраженный сигнал. Следовательно, в этом случае нет проблем с величиной $P_{\text{изл}}$.

Астрономы тоже измеряют скорости с помощью эффекта Доплера. Ведь свет звезд — это электромагнитные волны, особые объекты, состоящие из колеблющихся магнитных и электрических полей. Как правило, здесь работают не с периодами, а с длинами волн. Напомним, что длина волны — это путь, который волна проходит за один период: $\lambda = cP$. Относительное изменение длины волны определяется также отношением скорости движения источника света

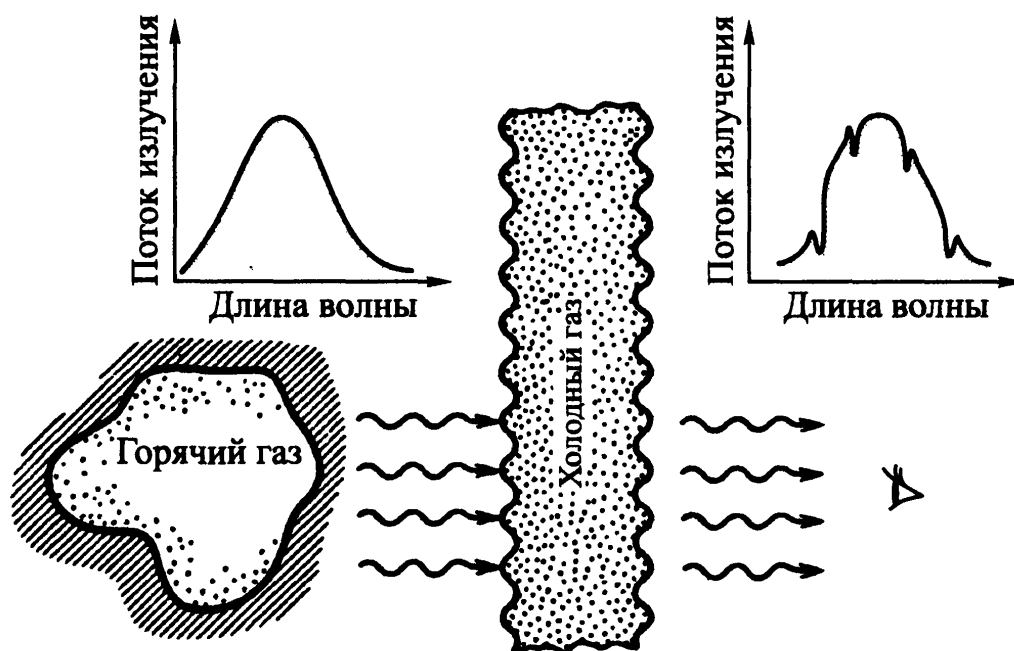


Рис. 23. Возникновение линий поглощения в непрерывном спектре

к скорости света. Ясно, что эффект Доплера зависит только от компоненты скорости, направленной вдоль луча зрения. Эту компоненту называют лучевой скоростью $v_{\text{л}}$:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{изл}}} = \frac{v_{\text{л}}}{c}. \quad (4a)$$

Но возникает вопрос, откуда астроном знает длину волны $\lambda_{\text{изл}}$ света, излученного звездой? В излучении звезд имеется полный набор электромагнитных волн с разными длинами — спектр. Вообще говоря, спектр излучения, выходящего из недр звезды на ее поверхность (фотосферу), — совершенно гладкий и непрерывный: количество энергии, излучаемое звездой в той или иной длине волны, меняется плавно с изменением длины волны (рис. 23).

Мы уже приводили понятие абсолютно черного тела — тела, находящегося в термодинамическом равновесии. Чтобы получить абсолютно черное тело, нужно его окружить со всех сторон тепло- и светонепроницаемыми стенками. Это необходимо для того, чтобы вещество и электромагнитные волны пришли в тепловое равновесие, при котором в среднем энергия не переходит от вещества к излучению, и наоборот.

Так бывает с телами, имеющими одинаковую температуру. В этом смысле говорят о температуре излучения. Спектр абсолютно черного тела описывается формулой, которую на рубеже XIX и XX веков вывел Макс Планк.

Недра звезд столь непрозрачны, что электромагнитные волны очень долго поглощаются и излучаются, прежде чем выйти на поверхность звезды. За это время вещество и излучение приходят в квазиравновесие, поэтому спектр выходящего из фотосферы излучения близок к спектру абсолютно черного тела. На этом спектре нет «ни сучка ни задоринки». Если вы приняли свет с определенной длиной волны, изменившейся из-за движения звезды, то это не поможет вам определить скорость звезды.

К счастью, природа не так совершенна, и потому познаваема. У звезд есть атмосферы. Ведь звезды — «это раскаленные плазменные шары». Внутри они горячие, а вокруг них — космос с температурой -270°C . Как правило, атмосферы звезд холоднее самих звезд. Излучение практически беспрепятственно проходит сквозь атмосферу и потому не успевает прийти в равновесие с ее веществом. Спектр начинает «портиться»; на нем появляются «зазубрины» — спектральные линии.

Вспомним, что свет — не только электромагнитная волна, но и частица. Свет излучается и поглощается порциями — квантами. Каждый атом может излучать кванты только определенной длины волны, соответствующие переходу электрона с одного дискретного уровня на другой (см. рис. 24). Тот же Макс Планк доказал, что энергия каждого кванта определяется только его длиной волны:

$$E = h \frac{c}{\lambda}, \quad (5)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка. Например, квант зеленого цвета имеет энергию, равную приблизительно

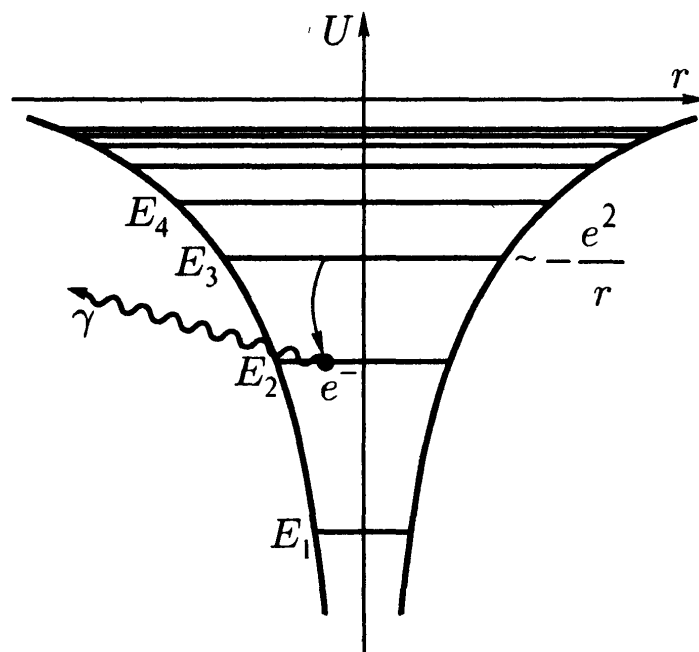


Рис. 24. В электромагнитной воронке вокруг атомного ядра электрон может иметь только дискретные значения энергии

но 2,5 эВ. (1 эВ (электрон-вольт) — это энергия, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов в 1 В.)

Атомы атмосферы звезды, которая более холодная, чем сама звезда, поглощают кванты, соответствующие определенным энергетическим переходам, т. е. определенным длинам волн. В результате в спектре звезды будет недоставать света на определенных длинах волн — появляются темные линии поглощения. Говоря о «холодных атмосферах», мы несколько упрощаем ситуацию. Ведь у звезд нет твердой поверхности, поэтому и нет атмосфер в обычном смысле этого слова. Атмосферой звезды называют тот слой ее вещества, в котором формируются спектральные линии («завульки»). Вид спектральной линии определяется тем, как меняется температура в атмосфере с глубиной. Если температура в слое падает при приближении к наблюдателю, образуются темные линии поглощения. В противном случае могут появляться яркие линии излучения (их называют эмиссионными). У подавляющего большинства звезд температура наружу сначала падает, а потом растет. Рост температуры начинается уже в том месте, где плотность вещества

мала и кванты свободно выходят к наблюдателю. Так что у большинства звезд в оптическом диапазоне видны темные линии поглощения.

Длина волны линии определяется только законами взаимодействия электронов и ядер. Законы эти одинаковы везде во Вселенной. Измерив на Земле длины волн квантов, излучаемых или поглощаемых атомами того или иного химического элемента, мы тем самым решим задачу нахождения $\lambda_{\text{изл}}$. Сравнивая лабораторный спектр со спектром звезды, найдем скорость ее движения.

5. Кривая лучевых скоростей

На практике спектр звезды получают следующим образом. В фокусе телескопа помещают спектрограф — прибор, который работает наподобие призмы, но гораздо лучше.

При получении спектра телескоп нужен для того, чтобы собрать как можно больше света от слабой звезды. При этом спектр либо снимают на фотопластинку, либо записывают через преобразователь в ЭВМ. Полученный спектр звезды сравнивают с лабораторным спектром какого-либо химического элемента.

Снимая спектр в различные моменты времени, на разных орбитальных фазах, можно определить скорость движения двойных звезд. Зависимость скорости от фазы называют кривой лучевых скоростей. При движении звезды по орбите периодически меняется проекция скорости звезды на луч зрения. Заметьте, что у компонент двойной эти изменения происходят строго в противофазе. На спектрах видно, как линии компонент «ходят» в противофазе (рис. 25).

Рассмотрим простой случай круговых орбит. Пусть луч зрения находится в плоскости двойной (рис. 25). Пусть звезда 1 и более горячая, и более массивная. В момент первичного минимума проекция орбитальной скорости каждой

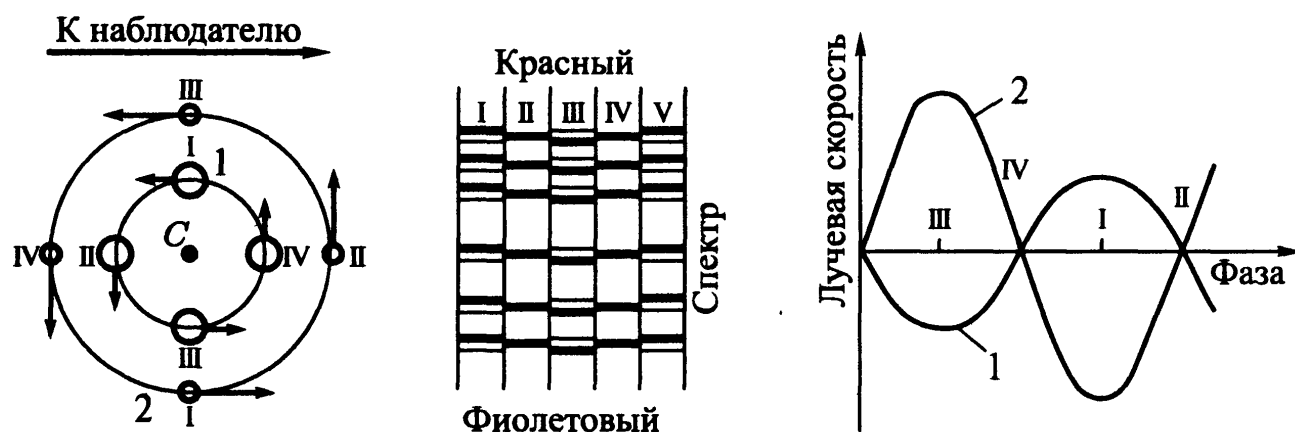


Рис. 25. Периодическое хождение линий в спектре двойной (римскими цифрами показано соответствие положений звезд и спектральных линий)

звезды на луч зрения равна нулю. Затем звезда 1 начинает приближаться, а звезда 2, наоборот, удаляться от нас. Приближение характеризуется отрицательной скоростью, а удаление — положительной. Кривые лучевых скоростей представляют собой две синусоиды в противофазе. Амплитуды синусоид равны орбитальным скоростям. Но иногда синусоиды пересекаются не на оси абсцисс.

Все дело в том, что система движется относительно нас как целое. Скорость, при которой пересекаются кривые лучевых скоростей компонент, называется гамма-скоростью. Ясно, что гамма-скорость — это проекция скорости центра масс двойной на луч зрения.

Что можно сказать о параметрах двойной, зная кривую лучевых скоростей? Прежде всего, она позволяет определить абсолютные размеры орбиты двойной — ведь нам известны скорость движения по орбите и период двойной. Можно сказать, что длина волны квантов света, излучаемых атомами, оказалась той самой линейкой, с помощью которой удалось измерить размер двойной системы. Зная размер большой полуоси и период, с помощью третьего закона Кеплера (формула (2)) можно найти сумму масс двойной. А можно ли найти массы звезд по отдельности? Можно. Вспомним, что отношение орбитальных скоростей звезд равно обратному отноше-

нию их масс. Значит, зная отношение амплитуд кривых лучевых скоростей, мы сможем узнать отношение масс звезд.

Итак, анализируя кривые лучевых скоростей и кривые блеска, можно найти не только размеры орбиты двойной, но и массы и размеры звезд. Конечно, это возможно при условии, что в спектре видны линии обеих звезд и что двойная система видна с ребра. В противном случае обычно привлекают дополнительную (косвенную) информацию и все же оценивают параметры звезд, входящих в двойную систему.

Среди двойных звезд часто бывает так, что в спектре видны линии лишь одной из звезд — более яркой. В этом случае мы имеем только одну кривую лучевых скоростей, а именно кривую лучевых скоростей более яркой звезды. По одной кривой отношение масс звезд не определишь. Приходится довольствоваться тем, что есть.

Что же можно узнать, имея в руках одну кривую лучевой скорости? Давайте вначале решим простенькую систему четырех уравнений. Предположим, что орбиты звезд двойной круговые. Очевидно, сумма радиусов орбит звезд равна большой полуоси двойной системы. Это первое уравнение:

$$r_1 + r_2 = a.$$

В качестве второго уравнения возьмем условие, определяющее расстояние от центра масс двойной до каждой из звезд:

$$M_1 r_1 = M_2 r_2.$$

Третий закон Кеплера (2) будет третьим нашим уравнением:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2).$$

Построив кривую лучевых скоростей звезды 1, мы можем определить размах синусоиды (амплитуду). Разделим его пополам и обозначим K_1 . Эта величина называется полуамплитудой. Каков ее физический смысл? Так как, согласно

эффекту Доплера, сдвиг длины волны пропорционален проекции скорости движения звезды на луч зрения (лучевой скорости), то ясно, что K_1 — проекция орбитальной скорости звезды 1 на луч зрения. При круговом равномерном движении орбитальная скорость равна длине окружности, деленной на период. Значит,

$$K_1 = \frac{2\pi a}{P} \sin i.$$

Это и есть наше четвертое уравнение. Подставляя последовательно одно уравнение в другое, избавляясь от r_1 , r_2 и a , получим одно уравнение, содержащее пять величин: массы звезд, угол наклона двойной системы, период ее обращения и полуамплитуду кривой лучевых скоростей. «Причешем» это уравнение так, чтобы в правой его части остались известные или измеряемые прямо величины. Все остальное пусть остается в левой части. Эту левую часть называют функцией масс. Вот как она выглядит:

$$f_1(M) = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{PK_1^3}{2\pi G}. \quad (6)$$

Точнее, $f_1(M)$ — это функция масс, определенная по линиям первой звезды. Из соображений симметрии ясно, что если заменить индекс 1 на индекс 2, мы получили бы такую же комбинацию, только M_2 нужно заменить на M_1 . Это была бы функция масс, определенная по спектральным линиям звезды 2. Но вернемся к формуле (6). Обратите внимание, функция масс имеет размерность массы. Обычно ее измеряют в массах Солнца. Чтобы почувствовать «физику», давайте проанализируем зависимость функции масс от полуамплитуды кривой лучевых скоростей. Пусть период двойной не меняется. Будем мысленно увеличивать полуамплитуду K_1 . Что это значит? Звезда 1 движется все быстрее и быстрее. Но движется-то она в гравитационном поле звезды 2. Значит, должна расти ее масса. Поэтому в формуле (6)

в числителе стоит куб массы второй звезды. На самом деле, конечно, полуамплитуда K_1 есть величина постоянная. Наш мысленный эксперимент моделирует перебор разных двойных с одним орбитальным периодом и углом наклона. Этот эксперимент показывает, что функция масс содержит в себе информацию (правда, в скрытом виде) о массе звезды 2.

Заметьте, что функция масс определяется спектроскопически. Зная функцию масс, конечно, не найдешь массы звезд по отдельности и угол наклона i . Нужна дополнительная информация, получаемая, например, из кривой блеска. Почему же мы уделили ей так много внимания?

Функция масс обладает очень важным свойством. Разделим $f_1(M)$ на массу второй звезды:

$$\frac{f_1(M)}{M_2} = \left(\frac{M_2}{M_1 + M_2} \right)^2 \sin^2 i.$$

Легко убедиться, что правая часть последнего равенства меньше или равна единице. Значит, справедливо неравенство

$$M_2 \geq f_1(M).$$

Это неравенство имеет большую практическую ценность. Представьте себе такую ситуацию. Вы астроном. В одну прекрасную ночь вам удалось снять спектр весьма загадочной звезды. Собственно, сначала в ней не было ничего загадочного. Вы отсняли спектр, проявили фотопластинку (после того, как выпались) и внимательно ее рассмотрели. На пластинке оказался обычный спектр одиночной звезды. Но вы так просто не сдаетесь, и на следующую ночь, благо она тоже оказалась прекрасной, снимаете спектр звезды еще раз. Повторяете все снова. Теперь у вас два спектра одной и той же звезды. Вы начинаете их сравнивать и вдруг замечаете: все линии второго спектра сдвинулись по отношению к линиям спектра, полученного в первую ночь. Дело ясное: вы открыли двойную звезду. Ни в одном каталоге эта звезда не значится

как двойная. А каждый астроном, прежде чем наблюдать какую-то звезду, просматривает каталоги и статьи: нет ли чего о ней?!

Итак, звезда двойная. Однако возникает вопрос: почему в спектре не видны линии второй звезды? Ответ для вас ясен: вторая звезда слабее и спектр ее не заметен на фоне первой звезды. Но от этого вторая звезда становится еще загадочнее. Вам хочется что-нибудь узнать о невидимке. Вы тратите еще месяц, и у вас в руках кривая блеска — чистая синусоида с периодом 1,2 дня. Полуамплитуда оказалась равной $K_1 = 400$ км/с. Подставив эти значения в формулу (6), нашли функцию масс $f_1(M) = 8M_\odot$. Теперь вы знаете, что каким бы ни был наклон двойной, какова бы ни была масса видимой звезды M_1 , масса невидимки заведомо больше 8 масс Солнца. Иногда такая информация оказывается крайне важной. В гл. VII мы убедимся в этом.

6. Почему звезды разные

Чтобы воочию убедиться в том, насколько звезды разные, взгляните с помощью небольшого телескопа на двойную β Лебеда (Альбирео). Это одно из самых поразительных зрелищ, которое доступно любителям астрономии. В поле зрения телескопа вы увидите рядом две звезды — голубого и оранжевого цвета. Почему столь разные цвета? Предметы, окружающие нас, тоже имеют разные цвета. Как правило, это связано с различиями в их химическом составе, свойствах поверхности и т. д. Значит, причиной различий в цвете может быть химический состав. Но мы знаем, что цвет тела зависит еще от температуры. Например, нагревая металл, мы увидим, что сначала он раскаляется докрасна, а потом добела. Так почему же цвет звезд разный? Из-за различий в температуре или в химическом составе?

Ответить на этот вопрос нам поможет спектральный анализ. Нужно снять спектр звезды, затем определить, каким

химическим элементам принадлежат спектральные линии. Оказалось, что в спектрах звезд разного цвета наблюдаются линии разных химических элементов. В видимом спектре Солнца самыми сильными линиями являются линии кальция. У голубых звезд линии кальция не наблюдаются, и главными оказываются линии водорода, а у белых — преобладают линии гелия. Значит, звезды выглядят по-разному из-за различия в химическом составе.

Это совсем не так. Дело в том, что мощность спектральных линий того или иного химического элемента в спектре звезды определяется в основном температурой атмосферы звезды. У желтых звезд типа Солнца самыми сильными линиями в видимом спектре являются линии однажды ионизованного кальция (однажды — значит, что у него оторван только один электрон). Но в спектрах голубых звезд линии кальция исчезают, потому что эти звезды горячее. В их атмосферах весь кальций почти полностью ионизован (от него оторван не один, а практически все электроны). При нагревании в первую очередь распадаются (ионизируются) атомы со слабой энергией связи. Поэтому линии таких атомов не наблюдаются в спектрах очень голубых звезд, хотя химический состав примерно одинаков почти у всех звезд. По массе на 70 % звезды состоят из водорода, 29 % — гелия, а остальное приходится на более тяжелые элементы.

Для характеристики цвета (или температуры) звезды астрономы используют спектральную классификацию. Каждой звезде в зависимости от ее спектра приписывается одна из букв следующего ряда:

OBAFGKM.

Классы располагаются в порядке убывания температур звезд, от горячих с температурами в несколько десятков тысяч градусов (звезды O–B) до холодных с температурами в несколько тысяч градусов (звезды типа K–M). Для запоминания спектральных классов было придумано несколь-

ко вариантов шуточных фраз. Есть русский вариант: «Один Бритый Американец Финики Жевал Как Морковь». Желающие могут воспользоваться английским вариантом: “O, Be A Fine Girl, Kiss Me!”⁶⁾.

Поначалу вполне хватало семи букв, но потом оказалось, что различия между звездами тоньше. Пришлось каждый спектральный класс разбить на 10 подклассов, обозначая каждый класс одной из семи букв и цифрой от 0 до 9 в таком порядке: ...B9, A0, A1, A2, ..., A9, ... Солнце имеет спектральный класс G4. Таких звезд в нашей Галактике миллионы.

Звезды отличаются по температуре в десятки раз — от нескольких десятков тысяч градусов до тысяч градусов. Спектральная классификация позволяет определять температуру поверхности звезд. Но еще сильнее звезды отличаются по светимости. Напомним, что светимостью L звезды называется количество энергии, которое она излучает в единицу времени. Фактически светимость — это мощность, выделяемая в виде света. Светимость Солнца равна $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26}$ Вт. Есть звезды в миллион раз мощнее и в тысячи раз слабее Солнца, следовательно, Солнце по своей светимости — ничем не примечательная звезда.

Для характеристики светимости звезды пользуются абсолютными звездными величинами. Если бы мы поместили все звезды на расстояние 32,6 световых лет (10 парсеков), то их видимые величины и равнялись бы абсолютным. Солнце имеет абсолютную величину 4,7. Но звезды находятся на разных расстояниях от нас, и по их видимому блеску ничего нельзя сказать об их светимости или абсолютной звездной величине. Как же удалось установить, что звезды имеют разную светимость?

Во-первых, для этого можно воспользоваться двойными системами — ведь обе звезды двойной заведомо находятся

⁶⁾ О, будь хорошей девочкой, поцелуй меня.

от нас на одинаковом расстоянии. Поэтому если нам кажется, что одна из них ярче другой, это значит, что она мощнее.

В двойной системе мы можем сравнивать только две звезды, а в звездных скоплениях — тысячи. Ближайшие к нам скопления звезд — это Плеяды и Гиады. В каждом скоплении сотни звезд, и все они находятся примерно на одном и том же расстоянии от нас. Прекрасная возможность исследовать различия в светимости между звездами! Этой возможностью впервые воспользовался датский астроном Эйна́р Герцшпру́нг в начале XX века. Для звезд скоплений Плеяды и Гиады он построил две одинаковые диаграммы — зависимость видимой звездной величины от температур звезд (реально он пользовался не температурой, а прямо наблюдаемой степенью голубизны звезд).

Через несколько лет, независимо от Герцшпрунга, американский астроном Генри Рессел начал строить аналогичные диаграммы для звезд, находящихся на известных расстояниях. Теперь эти диаграммы называются диаграммами Герцшпрунга—Рессела. Среди сотен различных типов диаграмм, построенных астрономами за последние 100 лет, самой знаменательной оказалась диаграмма Герцшпрунга—Рессела (рис. 26).

Уже на первых диаграммах, построенных Ресселом и Герцшпрунгом, было заметно, что звезды не «разбредаются» по диаграмме, а собираются «стадами» вдоль некоторых линий. Подавляющее число звезд вытянулось вдоль диагональной линии, называемой главной последовательностью. Туда же, кстати, «прибилось» и наше Солнце. От главной последовательности отделяется горизонтальная ветвь звезд гигантской светимости. Звезды образовали искаженную букву «у». «Стадный инстинкт» явно указывал на то, что между спектральным классом и светимостью звезды существует определенная — хотя и не однозначная — зависимость.

Таинственная диаграмма стала ясной лишь после того, как была построена теория внутреннего строения и эволю-

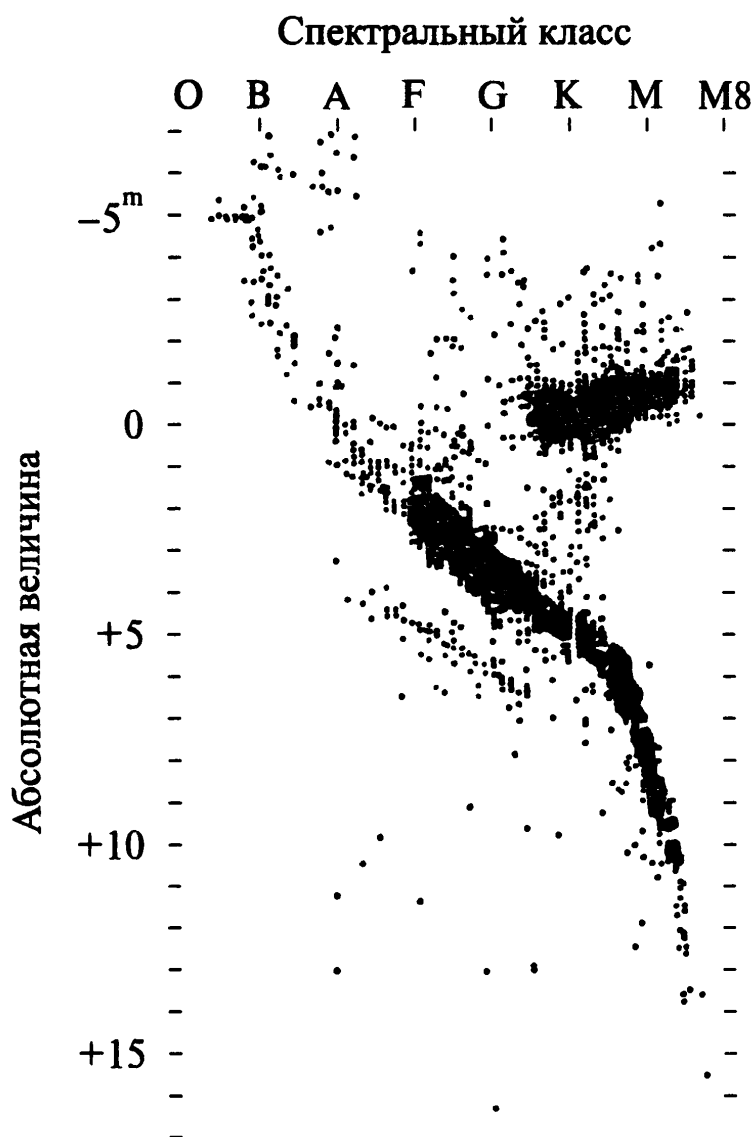


Рис. 26. Диаграмма Герцшпрунга—Рессела

ции звезд. Эта теория (о ней подробно рассказывается в следующей главе) объяснила, почему большинство звезд группируются на главной последовательности и почему вообще существует главная последовательность. Главная последовательность представляет собой геометрическое место точек, в которых звезды проводят наибольшее время. Чем меньше масса звезды, тем она холоднее и тем меньше ее светимость. Но звезды не вечно «сидят» на главной последовательности. Рано или поздно они сходят с нее сначала в область субгигантов, потом — гигантов и т. д.

Теория эволюции звезд показывает, что чем больше масса звезды, тем меньшее время она проводит на главной последовательности. Звезды типа Солнца живут на главной по-

следовательности миллиарды лет, а голубые О–В звезды — в сотни раз меньше. Другими словами, чем массивнее звезда, тем быстрее она сгорает. А сама главная последовательность соответствует последовательности звезд равной массы (массы голубых звезд больше, чем красных). Массы самых холодных звезд примерно в 10 раз меньше M_{\odot} , а горячих — в десятки раз больше M_{\odot} . Значит, для подавляющего числа звезд в Галактике их различия обусловлены различиями в массах.

7. Наконец, парадокс

Теория внутреннего строения и эволюции звезд получила прекрасное подтверждение, когда были измерены массы звезд. Мы уже видели, как в двойной системе можно «взвесить» звезды, используя кривые лучевых скоростей. Были проведены многие сотни измерений, и все они показывали, что более массивная компонента двойной всегда имеет более голубой цвет. Полный триумф теории.

Но в 50-х годах XX века астрономы стали замечать, что безмятежное согласие теории и наблюдений начинает давать трещины. Эти трещины поползли от самой что ни на есть стандартной двойной звезды — Алголя. Советские астрономы А. Г. Масевич и П. П. Паренаго обратили внимание на парадокс Алголя. Совместный анализ кривой блеска и кривой лучевых скоростей показывал, что в этой системе более массивная звезда находится на главной последовательности, а менее массивная компонента уже покинула главную последовательность и превратилась в субгигант. Однако очевидно, что обе звезды родились одновременно. Как объяснить этот парадокс?

Теория была настолько прекрасной, что не ясно было, стоило ли отказываться от нее ради одной звезды. Но позднее выяснилось, что парадокс Алголя оказался очень распространенным в двойных системах — он, что называется,

«лез во все дыры». Отсюда следовал только один вывод — принять, что звезды в двойных системах эволюционируют не совсем так, как одиночные звезды, для которых и была построена вся теория внутреннего строения и эволюции звезд.

Разрешить парадокс Алголя можно было только предположив, что в двойной системе масса звезды есть величина переменная. Представьте себе, что менее массивная звезда в Алголе раньше была более массивной. Она раньше ушла с главной последовательности, потом по какой-то причине потеряла массу и стала легче соседки. Так разрешился бы парадокс Алголя. Но почему звезда вдруг начинает терять массу? Ответ на этот вопрос дал американский астрофизик Д. Кроуфорд, который предложил сценарий эволюции двойной с переменной ролей.

8. Перемена ролей

Теория эволюции одиночных звезд утверждает, что, уходя с главной последовательности, звезда расширяется. Это свойство позволяет понять, почему в двойной системе одна из звезд начинает терять массу. Представим себе двойную систему, состоящую из звезд, находящихся на главной последовательности. Пусть масса звезды 1 больше массы звезды 2. Вначале звезды живут, не замечая друг друга (рис. 27 а). Звезда 1 раньше сойдет с главной последовательности и начнет расширяться. В некоторый момент первая звезда заполнит свою полость Роша. Далее вещество звезды 1 через горловину (в окрестности внутренней точки Лагранжа) будет перетекать на звезду 2 (рис. 27 б). Представьте себе, что перетекло так много вещества, что остаток звезды 1 по массе стал меньше звезды 2, увеличив массу этой звезды. Звезды поменялись ролями: ранее менее массивная звезда стала более массивной, и наоборот. Получилась система, в которой более массивная звезда все еще находится на главной

последовательности, а менее массивная уже расширилась до размеров субгиганта. Так, по-видимому, и обстоит дело в системе Алголя.

Общие черты этого сценария прояснились к середине 60-х годов прошлого века. Но тогда еще никто не замечал, что в этом сценарии была «заложена мина замедленного действия». Оказалось, что благодаря перемене ролей во Вселенной существуют объекты совершенно необычной природы. Именно их открытие и изучение в 70-е годы прошлого века привело к появлению совершенно новой науки — рентгеновской астрономии.

Двойные системы, у которых в процессе эволюции происходит обмен массой, называются тесными. Исследование законов эволюции тесных двойных звезд далеко еще от своего полного завершения. Особенно неясными остаются заключительные этапы эволюции двойных звезд. Ситуация здесь очень интересна. Полнота наших знаний о том, как живут звезды, убывает по мере перехода от ранних этапов эволюции двойной к более поздним. Почему так? На поздних этапах появляются совершенно новые, экзотические объекты, о существовании которых ученые раньше и не подозревали и которые только недавно стали наблюдаемыми.

Автор предлагает читателю совершить вместе с ним путешествие от самых ранних до самых поздних стадий эволюции двойных звезд. По мере сил автор будет стараться объяснить все. Но кое-что придется принять на веру.

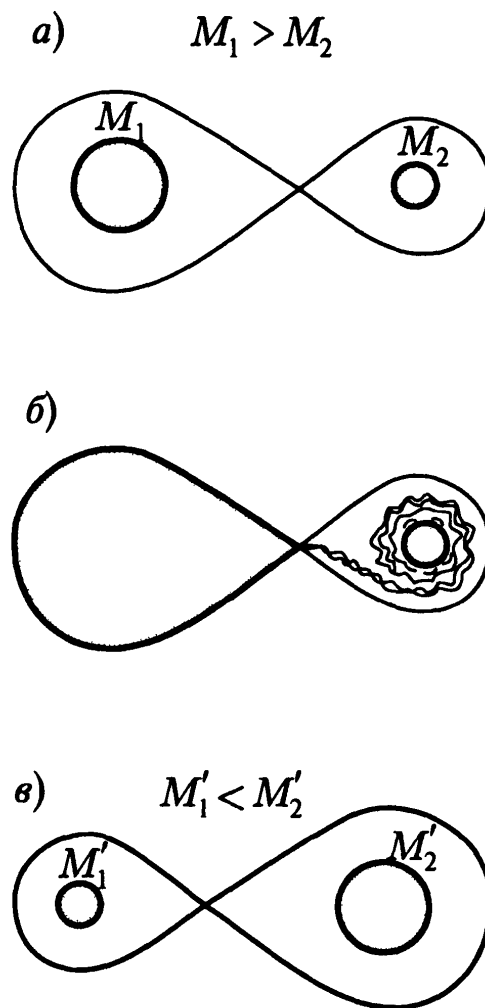


Рис. 27. Перемена ролей

III

Вдвоем в одиночестве

1. Всего за 40 минут	71
2. Охлаждаясь, нагревается	75
3. Всего за 30 миллионов лет	76
4. Если бы не квантовая механика	78
5. Ядерная эволюция	80
6. Покидая главную последовательность	83
7. Белые карлики	86
8. Нейтронные звезды	91
9. Черные дыры	96
10. Предки и потомки	98

Вдвоем в одиночестве

Путешествие во времени, по ступеням эволюции двойных систем, мы начнем с самого первого этапа. Сразу после образования двойной системы размеры звезд много меньше расстояния между ними. Это означает, что они глубоко «сидят» в своих полостях Роша и не влияют друг на друга. Каждая из звезд развивается точно так же, как если бы они были одиночными звездами. Вот и получается, что живут вроде бы вдвоем, но поодиночке. Изучая эволюцию таких начальных этапов, мы фактически узнаем о том, как устроены и как живут одиночные звезды.

1. Всего за 40 минут

Солнце, несмотря на свой огромный размер (его радиус $R_{\odot} = 700\,000$ км), создает на поверхности гравитационный потенциал, в 3600 раз больший, чем потенциал на поверхности Земли. Вспомним формулу (1) для потенциала точечного тела. Эта формула остается справедливой вне сферического тела произвольного размера. Потенциал имеет размерность энергии на единицу массы. Такую же размерность имеет и квадрат скорости. Потенциал (конечно, по модулю) попросту равен кинетической энергии пробной частицы, имеющей нулевую полную энергию. Частицы с нулевой энергией — это частицы, свободно падающие из бесконечности.

Тело, свободно падающее на Землю, имело бы скорость, равную 11 км/с на ее поверхности, а на Солнце — 617 км/с. Квадрат их отношения примерно и равен 3600. Превосходство Солнца достигается за счет его массы (масса Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг; масса Земли $M_{\oplus} = 6 \cdot 10^{24}$ кг).

Мощные гравитационные силы стремятся сжать Солнце. Несмотря на это Солнце не сжимается, так как гравитационные силы уравниваются силами давления газа. Это равновесие поддерживается с огромной точностью. Если бы в какой-то момент вдруг исчезла сила газового давления, то через 40 минут Солнце схлопнулось бы в точку. Однако Солнце светит уже миллиарды лет, не меняя при этом существенно своих размеров. Время схлопывания Солнца, и вообще любой звезды, называют динамическим временем. Оно примерно равно отношению радиуса звезды к второй космической скорости на ее поверхности:

$$t \approx \frac{R_{\odot}}{v_{II}}. \quad (7)$$

Это число (40 минут) можно получить точно. Представим себе, что сила давления внутри Солнца действительно исчезла, и оно начнет падать «само на себя». Как долго это будет длиться? Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что гравитационное поле вне шара совпадает с гравитационным полем точки той же массы, расположенной в центре шара. Тогда наша задача эквивалентна следующей: вычислить, за какое время пробная частица упадет на точку массы, равной массе Солнца, с расстояния, равного радиусу Солнца. Движение такой частицы называют свободным движением в «гравитационной воронке». Значит, оно описывается законами Кеплера. Это движение (движение по прямой) можно представить как движение по эллипсу, эксцентриситет которого равен единице, а большая полуось равна половине радиуса Солнца.

Очевидно, искомое время равно четверти периода обращения по вырожденному эллипсу, определяемого третьим законом Кеплера (формула (2)). Подставляя в нее $M_1 = M_\odot$ и $M_2 = 0$, $a = R_\odot/2$, получим

$$t_d = \frac{P}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{R_\odot}{2GM_\odot}} \approx 40 \text{ мин.}$$

Как видим, приближенная оценка (7) не сильно отличается от точного ответа. Точность, с которой в Солнце уравновешены силы гравитации и давления, определяется отношением динамического времени к возрасту Солнца, т. е. равна $\sim 10^{14}$. Создается впечатление хрупкости Солнца. Представьте себе, что силы давления и гравитации разбалансировались на несколько процентов, — Солнце схлопнется через несколько часов. Но этого не происходит. Почему?

Равновесие Солнца и звезд устойчиво. Мы знаем, что устойчивое равновесие всегда соответствует минимуму энергии системы. Из чего состоит энергия звезды? Она складывается из потенциальной гравитационной энергии и кинетической энергии частиц — ионов и электронов. Вся кинетическая энергия большинства звезд сосредоточена в хаотическом движении частиц (вращение, например, Солнца, как целого дает очень малый вклад в кинетическую энергию частиц, его составляющих — поэтому Солнце и круглое). Хаотическое движение частиц — это тепловое движение, следовательно, кинетическая энергия Солнца — это его тепловая энергия. Полная энергия Солнца E равна сумме тепловой K и потенциальной U энергий:

$$E = K + U.$$

Чтобы проверить устойчивость звезды, давайте немного ее сожмем. На рис. 28 показана зависимость полной энергии звезды от изменения ее радиуса. Если сжимать звезду, то тепловая энергия будет расти быстрее, чем гравитационная

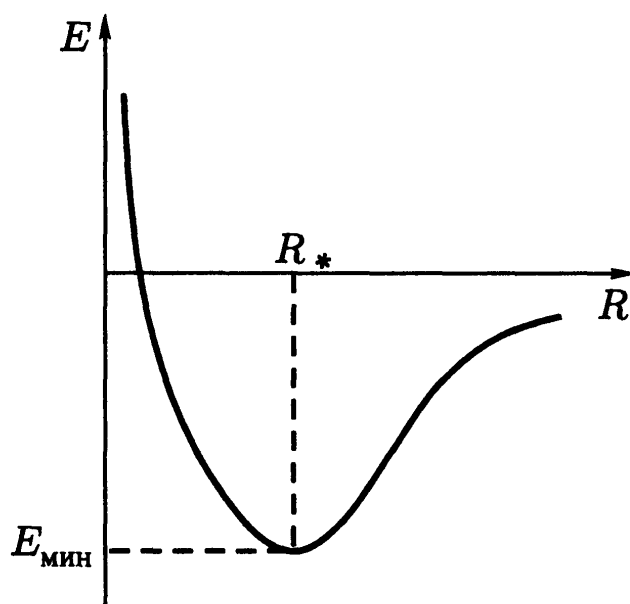


Рис. 28. Изменение энергии звезды при сжатии и расширении

падать (см. рис. 28). Действительно, полная тепловая энергия звезды K пропорциональна произведению массы звезды на ее температуру: $K \sim \mathcal{R}MT$ (\mathcal{R} — газовая постоянная). Будем считать, что сжатие звезды происходит достаточно быстро, так что она не успевает отдать тепло. Такое сжатие называется адиабатическим. При адиабатическом сжатии одноатомного газа температура связана с объемом зависимостью $T \sim V^{-2/3}$. Но объем звезды $V \sim R^3$, поэтому $T \sim R^{-2}$. И тепловая энергия при сжатии звезды растет как $1/R^2$. А вот гравитационная энергия звезды пропорциональна потенциалу, т. е. изменяется как $1/R$ (см. формулу (1)). График, изображенный на рис. 28, представляет собой сумму двух гипербол: положительной квадратичной и отрицательной первого порядка. Минимум энергии ($E_{\text{мин}}$) и соответствует равновесному радиусу звезды R_* .

Как уже отмечалось, при сжатии звезды ее тепловая энергия растет быстрее, чем гравитационная, следовательно, быстрее растут и силы давления, т. е. звезда стремится расшириться. Подобно пружине, звезда начнет колебаться вблизи равновесного значения, причем период колебаний будет порядка ее динамического времени. Для большинства звезд это время измеряется десятками минут или часами.

2. Охлаждаясь, нагревается

В равновесии энергия звезды, как и полная энергия двойной системы, отрицательна. Это общее свойство любых гравитационно связанных систем. Тепловая энергия K в равновесии всегда оказывается одного порядка с гравитационной (взятой с обратным знаком). Это обстоятельство приводит к удивительному свойству звезд — отрицательной теплоемкости. У окружающих нас предметов при нагревании (при увеличении их энергии) температура повышается — их теплоемкость положительна. А у звезды все наоборот. При увеличении полной энергии звезды (при ее нагревании) тепловая энергия уменьшается, т. е. понижается средняя температура. Действительно, если увеличить энергию звезды (нагреть), то она расширится и перейдет в новое равновесное состояние. Но при этом уменьшится по абсолютной величине гравитационная энергия (возрос радиус), а следовательно, уменьшится и тепловая энергия. Звезда остынет! Причина этого состоит в том, что после увеличения энергии звезда расширилась и совершила работу против сил гравитации. Вот она и остыла.

Здесь нет нарушения законов термодинамики. Это выглядит для нас непривычно, потому что на Земле мы сталкиваемся с предметами, равновесие которых обеспечивается короткодействующими силами. Как правило, это силы молекулярного притяжения (в сущности, это обычные электрические силы, действующие между поляризованными, но в среднем нейтральными системами зарядов — молекулами). Рассматривая некоторый малый элемент тела, мы пренебрегаем его взаимодействием с другими, непосредственно не соприкасающимися частями. Мы можем так делать потому, что в природе есть электрические заряды обоих знаков, которые экранируют друг друга. А вот гравитационные заряды — массы — всегда одного знака (нет антигравитации).

Поэтому гравитационная сила остается далекодействующей. Любой элемент звезды «чувствует» притяжение не только своего соседа, но и всех остальных участков звезды. Общее гравитационное поле создает резерв отрицательной энергии. При расширении звезды это, скорее, не резерв, а наоборот, ненасытный потребитель. А вот при охлаждении и сжатии звезды это уже резерв, повышающий ее температуру. Звезды светят — значит, они должны сжиматься, теряя свою энергию.

3. Всего за 30 миллионов лет

Полный запас тепловой энергии в звезде примерно равен ее гравитационной энергии с обратным знаком, т. е. порядка GM^2/R . Для Солнца тепловая энергия равна $4 \cdot 10^{41}$ Дж. Каждую секунду Солнце теряет $4 \cdot 10^{26}$ Дж. Запаса его тепловой энергии хватит на 30 миллионов лет. Характерное время, за которое звезда теряет свою тепловую энергию, называется тепловым:

$$t_{\text{т}} = \frac{K}{L}. \quad (8)$$

Однако Земля и Солнце существуют почти в неизменном виде несколько миллиардов лет. Значит, внутри Солнца должен существовать источник энергии, который пополняет потери на излучение. Мы видели, что в звезде есть гигантский резервуар гравитационной энергии. Но черпать из него энергию безнаказанно нельзя. Нужно, чтобы Солнце сжималось, причем оно должно уменьшаться в 2 раза каждые 30 миллионов лет. Нужно искать другой источник энергии.

Его нашел английский астроном, создатель современной теории внутреннего строения звезд Артур Эддингтон, который работал в том же Кембриджском университете, что и Ньютон, но 200 годами позже. Эддингтон предположил, что внутри Солнца выделяется ядерная энергия вещества.

Эта идея была высказана задолго до создания термоядерной бомбы.

Откуда берется ядерная энергия? Ядра атомов представляют собой смесь нейтронов и протонов (нуклонов). Полная энергия ядра состоит из потенциальной энергии ядерного взаимодействия, электрического отталкивания протонов и кинетического движения всех частиц. На рис. 29 показан график зависимости энергии одного нуклона от атомного номера химического элемента. Средняя энергия одного нуклона в ядре, взятая с обратным знаком, показывает, насколько сильно связаны частицы в ядре (насколько глубока потенциальная яма, в которую они попали). Глядя на этот график, мы видим, что наибольшей связью обладают элементы, группирующиеся вблизи железа. У более легких элементов нуклонов в ядре мало. Ведь энергия ядерного взаимодействия пропорциональна квадрату числа частиц (каждая частица взаимодействует с каждой! Кстати, по этой же причине и гравитационная энергия пропорциональна квадрату массы.). Энергия, приходящаяся на одну частицу, растет с ростом числа частиц в ядре. Но это справедливо только до тех пор, пока ядра не очень велики. Ядерные силы очень короткодействующие; они действуют на расстояниях 10^{-13} см, а при увеличении расстояния уменьшаются до нуля. Поэтому в ядрах с большим количеством частиц нуклоны взаимодействуют только с ближайшими соседями. А вот электрическое отталкивание, энергия которого положительна, из-за дальнего действия растет все время пропорционально квадрату числа нуклонов (числа протонов и нейтронов в ядрах примерно пропорциональны). Поэтому у ядер элементов, более тяжелых, чем железо, энергия связи начинает падать. График показывает, что легким элементам энергетически выгоднее превратиться в более тяжелые, а сверхтяжелым — наоборот, распасться. (Распад сверхтяжелых элементов используется в атомных электростанциях.)

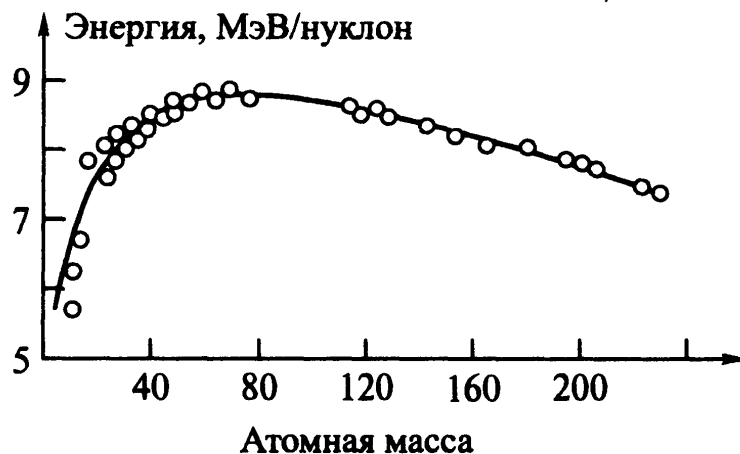


Рис. 29. Средняя энергия связи одного нуклона в ядрах разных химических элементов

Синтез — объединение легких элементов — сопровождается гигантским энерговыделением. Например, четыре ядра атома водорода (протона) имеют массу $6,69 \cdot 10^{-27}$ кг, а ядро гелия — $6,65 \cdot 10^{-27}$ кг. Дефект массы объясняется теорией относительности. По формуле Эйнштейна полная энергия тела связана с массой соотношением

$$E = Mc^2. \quad (9)$$

Энергия связи в гелии на один нуклон больше, значит, глубже его потенциальная яма и меньше его полная энергия. Если каким-то образом из 1 кг водорода синтезировать гелий, выделится энергия, равная $6 \cdot 10^{14}$ Дж. Это примерно 1 % полной энергии затраченного топлива. Вот вам и резервуар энергии.

А в то время, когда Эддингтон выдвинул идею о ядерной природе звездной энергии, ей (идее) был нанесен «смертельный» удар.

4. Если бы не квантовая механика

Скептики, действуя в рамках существующих законов, «доказали» полную несостоятельность термоядерного синтеза в центре Солнца. На рис. 30 показан график зависимости энергии взаимодействия двух протонов от расстояния

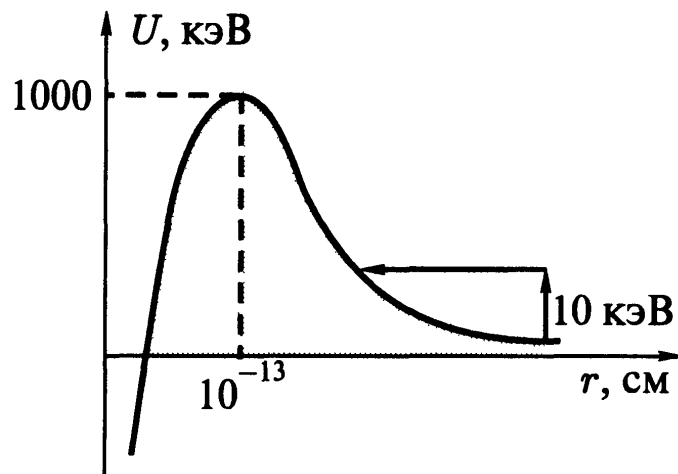


Рис. 30. График зависимости энергии взаимодействия двух протонов от расстояния между ними

между ними. Вдали взаимодействие определяется электрическим отталкиванием двух положительно заряженных частиц. Энергия взаимодействия положительна и растет по мере сближения частиц как $1/R$. В максимуме энергия примерно равна 1000 кэВ. Затем, на расстоянии $\sim 10^{-13}$ см, в силу вступает ядерное взаимодействие и появляется область с отрицательными энергиями, соответствующая связанному состоянию. Но чтобы проникнуть в область с отрицательной энергией, нужно преодолеть барьер в 1000 кэВ.

Температура в центре Солнца оценивается из условия примерного равенства тепловой и гравитационной энергии ($\mathcal{R}MT \approx GM^2/R$) и оказывается равной 10 миллионам градусов. Средняя энергия протонов при такой температуре около 1 кэВ, т. е. в тысячу раз меньше, чем энергия, необходимая для синтеза гелия. В центре Солнца слишком холодно, говорили скептики. Но сэр Артур Эддингтон упрямо заявлял: «Поищите-ка место погорячее!» Тогда это расценивалось как упрямство, теперь — как интуиция.

На помощь пришла квантовая механика. Открытая в 1926 году, она очень быстро проникла в астрономию. Оказалось, что микромир обладает совершенно удивительными свойствами. Одно из них — туннельный эффект, просачивание частиц под потенциальным барьером. Элементарные

частицы могут просачиваться под барьер, даже если их энергия много меньше этого барьера. Если бы прыгун в высоту проскочил под планкой, ему не засчитали бы взятие высоты. Законы природы не так «строги».

Получается, что самый зримый квантовый эффект — это свечение звезд. А если бы не квантовая механика?..

5. Ядерная эволюция

Перегорание водорода в гелий — необратимый процесс. Запасы водорода в звезде ограничены. Термоядерные реакции могут идти только при достаточно высокой температуре и плотности. В центре Солнца плотность вещества достигает 100 г/см^3 . Реально в качестве топлива для звезд может служить только центральная их часть с массой, составляющей 10 % полной массы. Подсчитаем, на сколько времени хватит Солнцу ядерного топлива.

Полная энергия Солнца $M_{\odot}c^2 = 10^{47}$ Дж, ядерная энергия ($E_{\text{яд}}$) составляет примерно 1 %, т. е. 10^{45} Дж, и с учетом того, что не все вещество может сгореть, получится 10^{44} Дж. Разделив эту величину на светимость Солнца $L = 4 \cdot 10^{26}$ Дж/с, получим, что его ядерной энергии хватит на 10 миллиардов лет. Этого вполне достаточно, чтобы не вступать в противоречие с геологическими данными о возрасте Земли. Но, с другой стороны, это означает, что звезды не вечны: они эволюционируют. Постепенное выгорание легких элементов в звездах определяет их ядерную эволюцию. А время выгорания называют ядерным временем; оно определяется как

$$t_{\text{яд}} \approx \frac{E_{\text{яд}}}{L} \approx 10^{10} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2} \text{ лет.} \quad (10)$$

Зависимость ядерного времени от массы звезды может быть получена, если учесть, что ядерная энергия звезды $E_{\text{яд}} \sim Mc^2$, а светимость ведет себя примерно как $L \sim M^3$.

Подчеркнем, что правая часть формулы (10) — это лишь грубое приближение. Чем больше звезда, тем быстрее она себя сжигает!

Вспомним теперь диаграмму Герцшпрунга—Рессела. Большинство звезд группируется вдоль главной последовательности. Это звезды, в центре которых происходит ядерное горение водорода. Именно водорода. Загорание более тяжелых элементов происходит при более высокой температуре (для них больше потенциальный барьер) и сопровождается уходом звезды с главной последовательности.

Сравним ядерное время звезды с ее тепловым временем (см. формулу (8)). Приблизительно тепловое время зависит от массы звезды так:

$$t_{\text{т}} \approx 3 \cdot 10^7 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2 \text{ лет.} \quad (11)$$

Соотношение трех характерных времен — динамического, теплового и ядерного — определяет характер эволюции звезды. То, что динамическое время много меньше теплового и ядерного, означает, что звезда всегда успевает прийти в гидростатическое равновесие. А то, что тепловое время меньше ядерного, — что звезда успевает прийти и в тепловое равновесие, т. е. в равновесие между количеством энергии, выделяемым в центре в единицу времени, и количеством энергии, излучаемым поверхностью звезды (светимостью звезды). В Солнце каждые 30 миллионов лет обновляется запас тепловой энергии. Но энергия в Солнце переносится излучением. Значит, фотонами. Фотон, рожденный в термоядерной реакции в центре, на поверхности появляется через тепловое время, ~ 30 миллионов лет⁷⁾. Если бы источники термоядерной энергии «выключились» сегодня, то Солнце продолжало бы светить еще миллионы лет.

⁷⁾ Конечно, это будет уже совсем другой фотон (см. дальше).

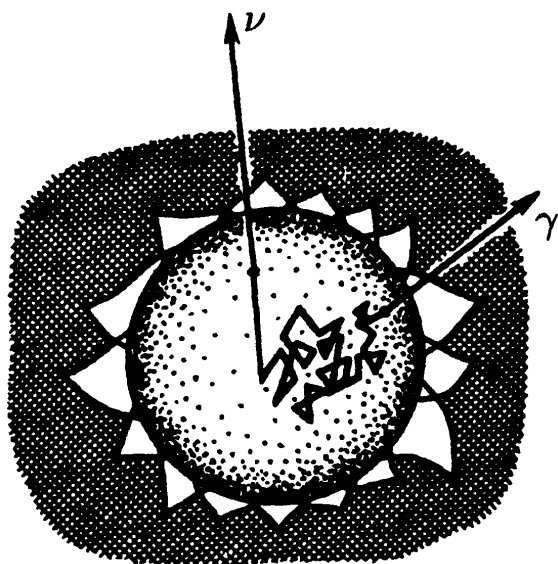


Рис. 31. Траектории фотона (γ) и нейтрино (ν), вылетевших из центра Солнца

При горении водорода рождаются не только фотоны, но и нейтрино. Нейтрино беспрепятственно выходят из Солнца со скоростью света за время, равное $700\,000\text{ км} : 300\,000\text{ км/с} = 2,3\text{ с}$ (радиус Солнца в световых секундах). Но ведь фотон тоже движется со скоростью света, а затрачивает 30 миллионов лет?! Конечно, все дело в том, что фотон, постоянно поглощаясь и переизлучаясь, сильно запутывает свою траекторию, так что ее

длина становится равной 30 миллионам световых лет (расстояние до далеких галактик) (см. рис. 31). За такое большое время излучение успевает прийти в тепловое равновесие с веществом, по которому оно движется. Поэтому спектр звезд и близок к спектру черного тела. Теория внутреннего строения звезд главной последовательности, построенная к началу 30-х годов прошлого века Эддингтоном, полностью объяснила их наблюдаемые свойства.

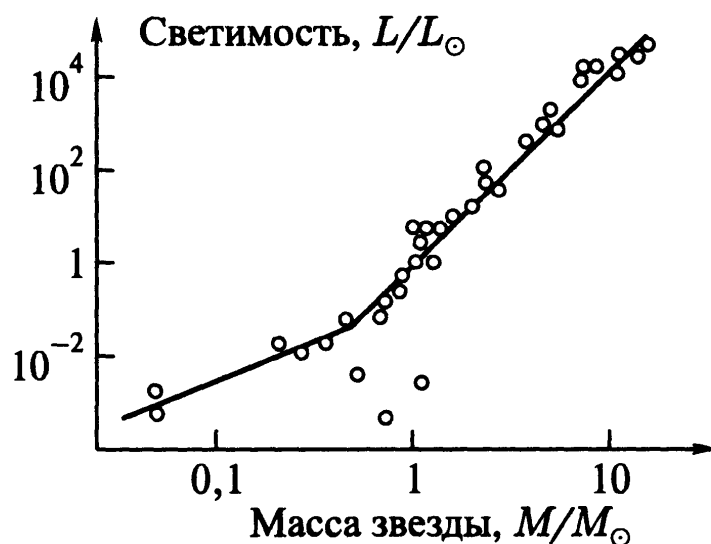


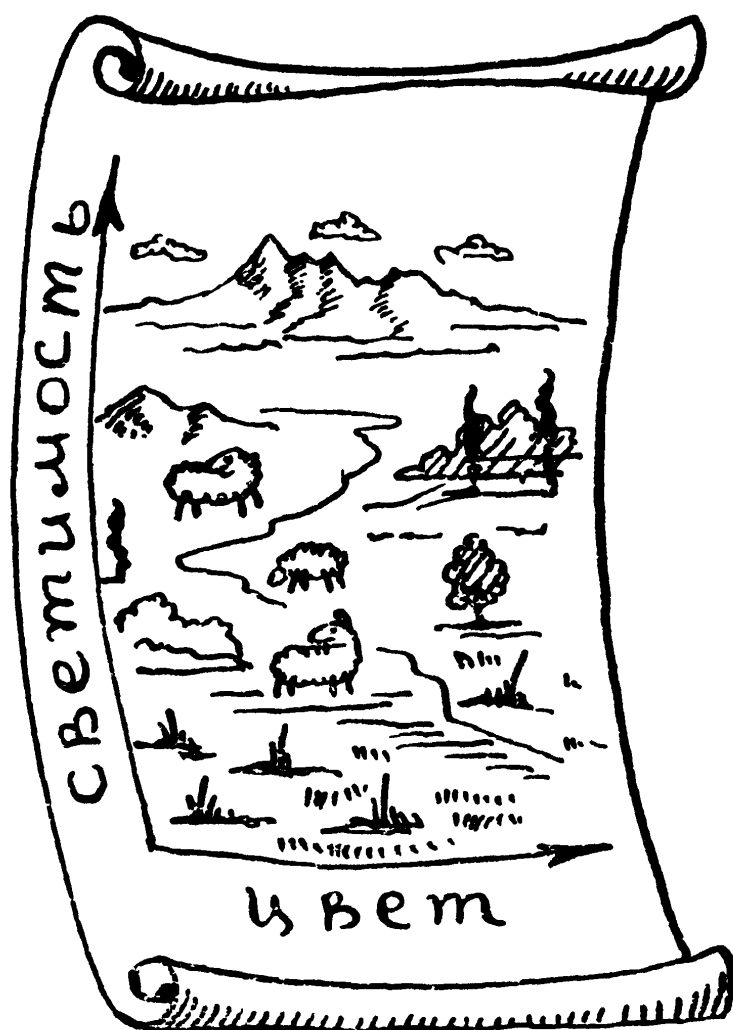
Рис. 32. По наблюдениям двойных удалось построить зависимость «масса — светимость» звезд главной последовательности

Но на диаграмме Герцшпрунга—Рессела строятся величины «светимость — спектр», которые являются функцией масс звезд. Значит, для окончательного подтверждения теории необходимо было взвесить звезды. Здесь на помощь пришли двойные системы. Используя результаты фотометрических и спектральных наблюдений двойных, удалось определить массы многих сотен звезд и связь их со светимостью (см. рис. 32). Эта связь оказалась в прекрасном согласии с теорией. Но почему некоторые звезды на диаграмме Герцшпрунга—Рессела не подчиняются главной последовательности?

6. Покидая главную последовательность

Линия, вдоль которой движется звезда на диаграмме Герцшпрунга—Рессела, называется эволюционным треком. Первым, кто включил в расчеты внутреннего строения звезд ядерные реакции, был американский астроном Мартин Шварцшильд. Эти расчеты дали ответ на вопрос к следующему шуточному рисунку.

Вначале звезда немного «проползает» вверх по главной последовательности. Изменения ее светимости и температуры при этом связаны с медленным изменением химического состава ядра звезды — водород превращается в гелий. Постепенно весь водород выгорает. Сначала это происходит в центре звезды, где плотность и температура максимальны. Образуется гелиевое ядро. Температура в ядре недостаточна для загорания гелия, но вокруг ядра водород продолжает гореть в шаровом слое. Такой режим называется горением в слоевом источнике. Гелиевое ядро оказывается внутри источника энергии, и в нем устанавливается постоянная температура. Поэтому такое ядро называют изотермическим. Образование слоевого источника вызывает увеличение потока энергии от центра. Оболочка звезды вокруг слоевого источника начинает бурлить наподобие кипящего чайника.



*О, эти звездные стада,
Кто гонит их туда-сюда?*

Аналогия с кипением довольно глубокая. В чайнике в определенный момент начинается бурление (или, по-научному, конвекция), потому что теплопроводность оказывается недостаточной для переноса тепла, поступающего со дна. Динамически конвекция наступает следующим образом. Горячая вода начинает всплывать со дна под действием силы Архимеда — ведь она легче холодной. Неустойчивость тяжелой жидкости, находящейся над легкой, называется неустойчивостью Рэлея—Тейлора.

Образование слоевого источника приводит к образованию конвективной оболочки. Звезда при этом расширяется. На диаграмме Герцшпрунга—Рессела это выглядит как уход с главной последовательности в направлении гигантов и сверхгигантов (рис. 33).

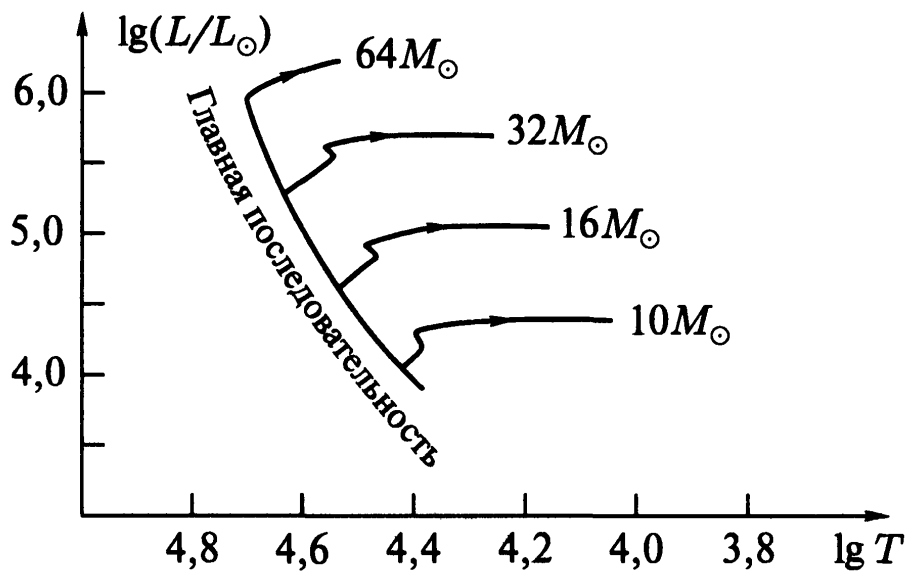


Рис. 33. Уход с главной последовательности звезд разной массы

Видели ли вы, как горит торф на болотах? Огня не видно, только легкий дым. Торф горит в небольшом кольцевом слое. Слой постепенно расширяется, оставляя внутри себя все увеличивающееся и увеличивающееся желтое пятно жухлой травы.

Так и в звезде. По мере горения масса гелиевого ядра все увеличивается и увеличивается. Ядро становится настолько большим, что не в состоянии уже сдержать свою массу и начинает сжиматься. Дальнейшая судьба звезды зависит от ее массы. У звезд большой массы температура в гелиевом ядре поднимается настолько, что начинается синтез гелия в углерод. Эта реакция идет путем тройного объединения трех ядер атомов гелия (α -частиц), поэтому ее иногда называют 3α -реакцией.

У звезды могут быть два, три и более слоевых источников. У звезд с массой больше $10M_{\odot}$ ядерный синтез доходит до элементов группы железа. Внешне такая звезда выглядит как голубой сверхгигант. При этом радиус звезды увеличивается в 100 раз и достигает в некоторых случаях тысяч радиусов Солнца. Чтобы почувствовать эти размеры, можно сказать, что если бы такую звезду поместить вместо Солнца, Земля очутилась бы глубоко внутри нее (расстояние от Земли

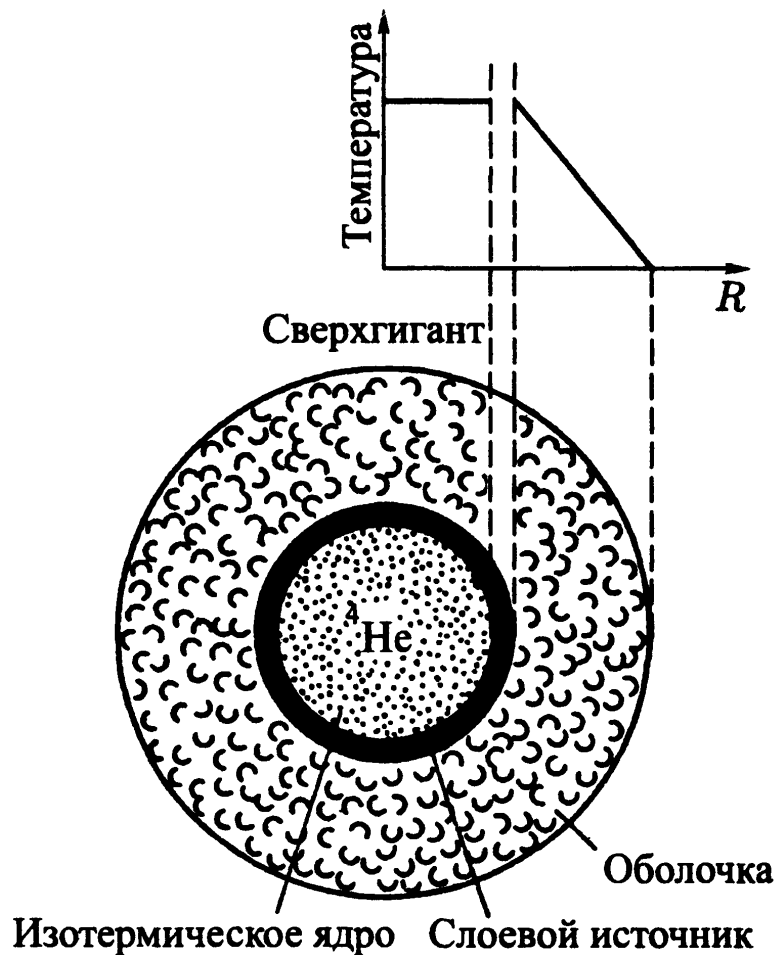


Рис. 34. Строение сверхгиганта

до Солнца равно 214 радиусам Солнца). Какова же дальнейшая судьба звезды?

7. Белые карлики

Теория Эддингтона великолепно объясняла положения звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рессела. Задавая массу звезды и ее химический состав, можно было получить все наблюдаемые характеристики: светимость, радиус, температуру поверхности и т. д. Но всю эту прекрасную картину портила одна невзрачная звездочка 40 Эридана В. На диаграмме Герцшпрунга—Рессела она располагалась значительно ниже и левее звезд главной последовательности. Для своей высокой температуры она имела слишком маленькую светимость, а следовательно, и слишком малые размеры. Это никак не укладывалось в теорию Эддингтона.

Выход был найден английским физиком Р. Фаулером в 1926 году. Это было время удивительных физических открытий. В 1925–1927 годах немецкие физики Вернер Гейзенберг и Эрвин Шрёдингер создали квантовую механику. В 1927 году Гейзенберг сформулировал принцип неопределенности, гласящий, что мы не можем абсолютно точно и одновременно знать значения координаты и скорости элементарной частицы. Вольфганг Паули в эти же годы формулирует принцип запрета, согласно которому два электрона не могут находиться в одном квантовом состоянии. Энрико Ферми и Поль Дирак исследуют фундаментальные свойства материи с учетом квантово-механических принципов. Эти новые открытия показали, что при определенных условиях вещество перестает вести себя обычным образом.

Теория Эддингтона предполагает, что вещество звезды — это идеальный газ, т. е. газ, подчиняющийся уравнению

$$P = \rho \frac{\mathcal{R}T}{\mu}, \quad (12)$$

где P и ρ — давление и плотность вещества соответственно, μ — молекулярная масса. Молекулярная масса — это средняя масса одной частицы, выраженная в массах атома водорода. В таком виде определение годится и для плазмы, в которой нет и в помине никаких молекул. У полностью ионизированной водородной плазмы молекулярная масса с большой точностью равна 0,5. На каждые две частицы (электрон и протон) приходится только масса протона (масса электрона в 1800 раз меньше).

Классическое условие идеальности газа состоит в том, чтобы размеры частиц были много меньше длины свободного пробега. Задумывались ли вы когда-нибудь, почему окружающие нас предметы имеют плотности, близкие к 1 г/см^3 ? Плотность воды, например, просто равна 1 г/см^3 . Давайте попытаемся ответить на этот вопрос.

Если охлаждать окружающие нас тела, то плотность их практически не изменится. Это означает только одно, а именно то, что эти вещества уже настолько охладились, что частицы, их составляющие, пришли в соприкосновение и дальнейшее охлаждение не приводит больше к сжатию. Да, в таком холодном мире мы живем. Плотность окружающих нас тел — это плотность атомов, из которых они состоят. Атом водорода имеет массу 10^{-24} г, а его размер — 10^{-8} см. Разделим массу на куб размера, получим 1 г/см^3 ! Значит, в твердых и жидких телах атомы и молекулы упакованы настолько плотно, что ни о какой идеальности не может быть и речи. Найдем среднюю плотность Солнца. Разделив массу Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г) на объем $\frac{4}{3} \pi (7 \cdot 10^{10})^3 \text{ см}^3$, получим $1,4 \text{ г/см}^3$. Вещество Солнца плотнее воды, однако его с большим запасом можно считать идеальным газом. Почему?

Вспомним определение идеальности. Длина свободного пробега должна быть много больше размеров частиц. Длина свободного пробега равна произведению среднего промежутка времени между последовательными столкновениями на скорость частицы. С увеличением плотности время между столкновениями уменьшается, из-за этого уменьшается и длина свободного пробега. Но если с увеличением плотности увеличивать и скорость частиц, то длина свободного пробега может не только уменьшаться, но даже расти. Мы знаем: скорость движения растет при увеличении температуры. В этом-то все и дело! Вещество Солнца нагрето настолько, что даже при плотности более 1 г/см^3 оно остается идеальным газом (точнее, плазмой). Однако ясно, что если мы начнем мысленно сжимать Солнце, не сильно повышая его температуру, условие идеальности рано или поздно нарушится.

При сжатии условие идеальности нарушится гораздо раньше еще и по другой причине. Интересно, что в самом конце XIX века К. Э. Циолковский высказал идею о том,



Рис. 35. Планетарная туманность в созвездии Водолея

что при сжатии Солнца его вещество может перейти в новое состояние, не описываемое уравнением идеального газа. Рассматривая сжатие звезд в результате излучения, он предположил, что при определенной плотности сжатие может остановиться за счет отклонения от идеальности. Но, конечно, он не мог предвидеть, что причиной этого станут законы квантовой механики. Как впервые отметил Р. Фаулер, при сжатии звезды всего лишь в $10-100$ раз важную роль начинает играть расталкивание электронов за счет принципа запрета Паули. При плотности 10^5-10^8 г/см³ протоны и ионы настолько близко находятся друг от друга, что их атомные уровни объединяются. При этом объединяются электроны, образуя своеобразный газ, который называют вырожденным. Применяв уравнение состояния вырожденного электронного газа, Р. Фаулер нашел, что размеры таких звезд должны быть порядка $5000-10\,000$ км, т. е. порядка размеров планет. Так было объяснено противоречие у звезды

40 Эридана В и других звезд такого типа. Эти звезды называли белыми карликами.

В центре звезд с массой меньше $3M_{\odot}$ «вызревает» гелиевое ядро, которое, сжимаясь, превращается в гелиевый белый карлик. При сжатии выделяется гравитационная энергия, она нагревает оболочку, и та охлаждается, т. е. расширяется и рассеивается в виде кольцеобразной туманности. Возможно, именно так образуются планетарные туманности (см. рис. 35). В центре их, как правило, находят очень горячую и компактную звездочку (остывающее гелиевое ядро?).

У звезд больших масс температура в центре достаточна для термоядерного синтеза более тяжелых элементов. Если масса звезды меньше $8M_{\odot}$ (цифра примерная), то в ней «вызревает» ядро, состоящее из углерода и кислорода. Сжатие такого углеродно-кислородного ядра, если его масса близка к чандрасекаровскому пределу, происходит не столь безобидно, как если бы оно состояло из гелия. В центре звезды поджигается углерод, и по звезде медленно распространяется волна горения. Этот процесс хорошо известен специалистам по взрывчатым веществам. Он называется дефлаграцией. В некоторый момент нарушается гидростатическое равновесие, звезда начинает пульсировать со все возрастающей амплитудой. Такая раскачка может привести к взрыву и полному разлету белого карлика. Энергия этого взрыва сравнима с энергией вспышки сверхновой. Разорвавшаяся звезда снабжает межзвездный газ тяжелыми химическими элементами, которые потом войдут в состав новых звезд, новых планетных систем, где, возможно, возникнет разумная жизнь.

Наконец, в звездах с массами $(8-10) M_{\odot}$ углерод полностью выгорает и образуется ядро, состоящее из целого набора элементов — кислорода, неона, магния. Впоследствии эти ядра остывают и превращаются в белые карлики. Лишнее вещество «тихо» рассеивается в виде планетарной туманности.

8. Нейтронные звезды

Вырожденный газ обладает удивительным свойством: его давление не зависит от температуры а определяется только плотностью: $P \sim \rho^{5/3}$. Как бы ни остывал белый карлик, он никогда не сожмется. Уравнение состояния белого карлика приводит к необычной зависимости его радиуса от массы. Эту зависимость легко получить.

Давление сил гравитации определяется как

$$P_{\text{гр}} \approx \frac{GM^2}{R^2 \cdot 4\pi R^2} \approx \frac{M^2}{R^4},$$

а давление газа — как

$$P \sim \rho^{5/3} \sim \left(\frac{M}{R^3} \right)^{5/3} \sim \frac{M^{5/3}}{R^5}.$$

В равновесии оба давления должны быть равны, значит, $R \sim M^{-1/3}$: чем больше масса карлика, тем меньше его радиус и тем больше его плотность. Но при возрастании плотности возрастает энергия электронов. Как известно, электроны в атоме стремятся занять самые нижние уровни. Так же и в электронном газе. Но в вырожденном электронном газе все нижние уровни заняты, а на занятый уровень электрону нельзя попасть из-за принципа Паули. Если мысленно увеличивать массу белого карлика, то будет расти его плотность. Электроны будут «упаковываться» все плотнее, но нижние полки заняты, и им приходится занимать самые верхние, где энергия велика. Постепенно энергия электронов становится сравнимой с их энергией покоя $m_e c^2$. Электронный газ становится релятивистским. А сжимаемость релятивистского газа гораздо лучше, чем нерелятивистского. Для него давление $P \sim \rho^{4/3}$, т. е.

$$P \sim \left(\frac{M}{R^3} \right)^{4/3} \sim \frac{M^{4/3}}{R^4}.$$

Газовое давление при сжатии растет так же, как и давление сил гравитации. Это означает, что равновесие белого

карлика возможно лишь при одном и только одном значении массы. Критическое значение массы, равное примерно $1,5M_{\odot}$, называют пределом Чандрасекара. Оно было получено двадцатилетним индийским физиком С. Чандрасекаром в 1931 году. В 1983 году за цикл работ по теории белых карликов С. Чандрасекар был удостоен Нобелевской премии по физике.

При массе больше чандрасекаровского предела давление электронного газа не способно противостоять силам гравитации, и белый карлик сжимается. Независимо от Чандрасекара этот предел был получен советскими физиками Я. И. Френкелем и Л. Д. Ландау. Л. Д. Ландау в своей работе 1932 года предположил, что звезды с массой больше критического предела сжимаются до тех пор, пока их ядра не придут в соприкосновение и не образуется одно гигантское ядро. Когда Ландау писал свою работу, за год до открытия нейтрона, физики не знали, что при слиянии протонов и электронов образуются нейтроны. А буквально через год американские астрономы Вальтер Бааде и Фред Цвикки выдвинули гипотезу о том, что вспышка сверхновой звезды есть результат схлопывания обычной звезды в звезду, состоящую из одних нейтронов. Такие звезды были названы нейтронными звездами. Плотность нейтронов в них близка к ядерной, $10^{13} - 10^{15}$ г/см³. Это означает, что размер нейтронной звезды, где все нейтроны плотно прижаты друг к другу, в $(10^{15}/1)^{1/3}$ раз меньше размера Солнца, средняя плотность которого близка к единице. Радиус нейтронной звезды получается порядка 10 км. При этом ее масса больше массы Солнца.

Нейтронные звезды рождаются в конце эволюции звезд с первоначальной массой более $10M_{\odot}$. Большая масса нужна звезде для того, чтобы по мере выгорания легких элементов хватило температуры для поджигания более тяжелых элементов. В этих звездах сгорает все дотла, т. е. до железа. Дальнейший синтез ядер уже не выделяет, а наоборот, по-

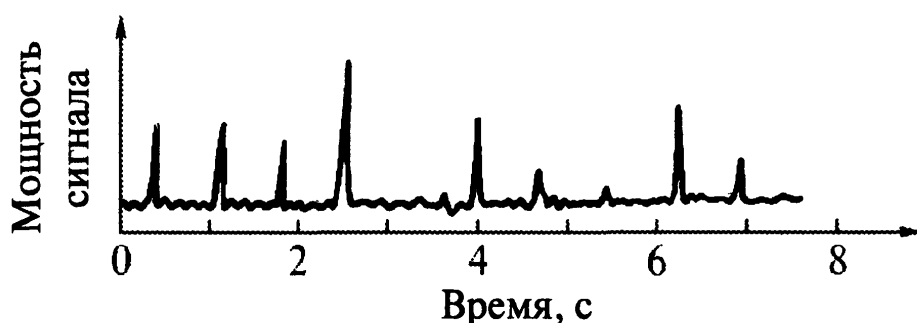


Рис. 36. Запись радиосигнала от открытого одним из первых пульсара PSR 0329+54

глощает энергию. Поэтому, начав сжиматься, железное ядро уже не может остановиться.

Выделяющаяся гравитационная энергия расходуется на синтез более тяжелых элементов, и сжатие звезды становится катастрофическим. Такой процесс называется коллапсом. Во время коллапса выделяется столь большая энергия, что вся массивная оболочка сбрасывается со скоростью в несколько десятков тысяч километров в секунду. Это, по-видимому, и наблюдается как взрыв сверхновой. Гипотеза Бааде и Цвикки была великолепно подтверждена в 1968 году, когда в Крабовидной туманности (остатке вспышки сверхновой) был обнаружен радиопульсар.

Излучение радиопульсара приходит к нам в виде строго периодической последовательности узких импульсов. Кривая блеска радиопульсара напоминает старую расческу с редкими зубьями (см. рис. 36). Зубья (импульсы) могут следовать один за другим, а могут и пропадать, но появляются они только в строго определенных местах (в определенные моменты времени). В расческе такое «фатальное поведение» — результат технологии ее производства (машина штампует зубья, равноотстоящие друг от друга). А вот что поддерживает строгую периодичность пульсара? Оказывается, вращение нейтронной звезды. Но вращаться с периодом 0,033 с может только нейтронная звезда. Любую другую звезду разорвут гигантские центробежные силы.

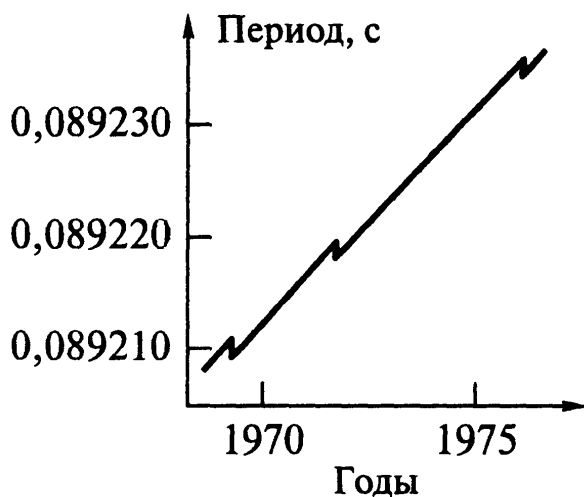


Рис. 37. Изменение периода радиопульсара в созвездии Парусов

Американский астрофизик Томас Голд первым понял, что радиопульсары — это нейтронные звезды, в которых источником энергии излучения является их вращение, а магнитное поле нейтронной звезды является тем передаточным ремнем, который «выуживает» эту энергию из нейтронной звезды. Магнитное поле нейтронной звезды, подобно полю Зем-

ли, имеет дипольный характер. Это означает, что в нем есть выделенная линия, проходящая через магнитные полюса. Вдоль этой линии выбрасываются потоки релятивистских частиц и излучения. Пульсар, подобно вращающемуся прожектору, «освещает» космос. Периодически луч «чиркает» по Земле, и тогда мы воспринимаем импульс излучения. Но излучая, пульсар должен замедлять свое вращение — это и наблюдается. Периоды радиопульсаров постепенно увеличиваются (см. рис. 37). Но почему нейтронные звезды столь быстро вращаются и обладают столь мощными магнитными полями?

Быстрое вращение и мощные магнитные поля — это такой же след («родимое пятно») процесса рождения нейтронных звезд, как и Крабовидная и подобные ей туманности. Разница только в том, что туманность рассеивается и перестает быть видимой за несколько десятков тысяч лет, а вращение и магнитное поле сохраняются многие миллионы лет!

Удивительные свойства пульсаров не оставляют сомнений в том, что нейтронные звезды рождаются при схлопывании обычных звезд. Точнее, железных ядер звезд. Железное ядро, вызревшее в центре массивной звезды, может иметь массу больше чандрасекаровского предела. Оно коллапсирует, выделяя гигантскую энергию за счет работы сил

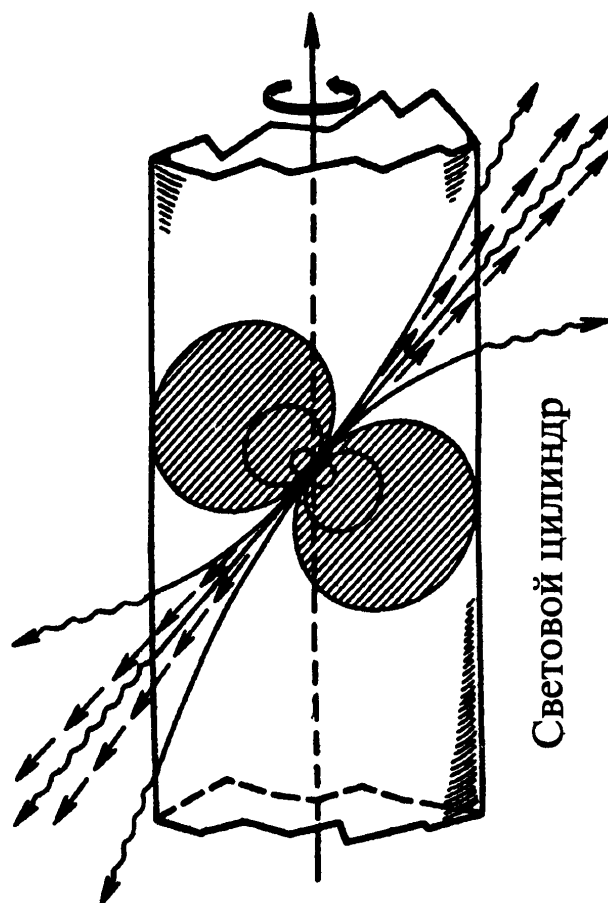
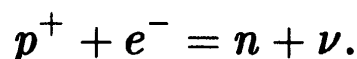


Рис. 38. Магнитосфера радиопульсара

тяготения. Этой энергии хватает и на сброс массивной оболочки звезды (образование туманности — остатка сверхновой), и на усиление ее магнитного поля, и на ускорение ее вращения.

Самой трудной здесь остается проблема сброса оболочки звезды. При сжатии железного ядра звезды ядра атомов вдавливаются друг в друга и идет процесс нейтронизации вещества, протон p^+ соединяется с электроном e^- , образуя нейтрон n :



При этом выделяются нейтрино ν . Они-то и уносят энергию. Плотность здесь так велика, что даже нейтрино с их всепроникающей способностью не могут прямо выйти из звезды. Нейтрино начинают поглощаться (например, в обратных реакциях), отдавая свой импульс. Возникает мощное нейтринное давление. Астрофизики полагают, что именно

в результате этого давления и сбрасывается оболочка звезды. Существование же нейтронных звезд подтверждает эту картину.

Но в определенных случаях оболочка не сбрасывается. Ну и что, скажет читатель, образуется массивная нейтронная звезда. Но в том-то и дело, что массивных нейтронных звезд не бывает.

9. Черные дыры

Точно так же, как белые карлики не могут иметь массу больше чандрасекаровского предела, так и нейтронные звезды не могут быть сколь угодно большими. Впервые это поняли в 1939 году американские физики Оппенгеймер и Волков. К сожалению, точное значение предела Оппенгеймера—Волкова до сих пор не определено. Связано это с тем, что мы не знаем точно, как ведет себя вещество при плотностях, больших ядерной. Приблизленно этот предел сейчас оценивается как $(2 \div 3)M_{\odot}$. В звезде с большей массой никакое давление не сможет противостоять силам гравитации. Она коллапсирует, образуя черную дыру.

В прошлом веке великий французский ученый Пьер Лаплас на основе теории тяготения Ньютона выдумал «черные дыры». Название, правда, появилось лишь в наше время. Рассуждения Лапласа были крайне просты, но результат их был совершенно неожиданным.

Чтобы в свободном полете покинуть поверхность притягивающего тела, нужно развить начальную скорость, равную второй космической скорости:

$$v = \sqrt{2 \frac{GM}{R}}.$$

Для Земли она равна 11,2 км/с, для Солнца — 600 км/с. Но давайте мысленно сжимать тело. Вторая космическая

скорость будет расти. При некотором радиусе она достигнет скорости света. Этот критический радиус (сейчас его называют гравитационным радиусом) равен

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}. \quad (13)$$

Для Солнца R_g получается равным 3 км. Тело, имеющее такой радиус, не может светить — свет не способен покинуть его поверхность.

На самом деле расчет, проведенный нами, не верен. При размере тела порядка гравитационного радиуса ньютоновская теория описывает явление неточно. Чтобы точно решить задачу о гравитационном поле такого тела, нужно решить уравнения общей теории относительности. Это в 1916 году сделал немецкий астроном Карл Шварцшильд (отец Мартина Шварцшильда, проделавшего первые расчеты ядерной эволюции звезд). Интересно, что в точном решении появляется величина размерности расстояния и формула для нее совпадает с формулой (13). На этом аналогия с ньютоновской теорией кончается. В точном решении Шварцшильда на расстоянии, равном гравитационному радиусу, происходит нечто большее, чем просто выравнивание скорости света и второй космической скорости.

Чтобы покинуть тело, вовсе не нужно развивать вторую космическую скорость. Это требование необходимо при свободном движении. Землю можно покинуть со скоростью черепахи. Нужен невыключающийся двигатель. Так же и лапласовскую черную дыру можно было бы покинуть, например, по веревочной лестнице.

А вот уйти из-под гравитационного радиуса нельзя вообще никогда. Не помогут никакие сверхсильные двигатели, потому что сила гравитации становится бесконечно большой. Путь в черную дыру — это как анизотропное шоссе из романа братьев Стругацких «Трудно быть богом». По нему можно двигаться только в одну сторону.

Но на этом парадоксы теории относительности не заканчиваются. Оказывается, для нас, удаленных наблюдателей, черная дыра полностью никогда не образуется! Ей на это не хватает времени. В сильном поле тяжести время замедляется. Если мы будем следить за ходом часов, установленных на коллапсирующей звезде, то заметим, что они идут медленнее наших (лабораторных) часов. При приближении к гравитационному радиусу замедление времени становится бесконечно большим. Для нас звезда будет бесконечно долго сжиматься до размеров, равных гравитационному радиусу. Поэтому черные дыры иногда называют застывшими звездами.

Другое дело, если нам не повезло и мы находимся на поверхности сжимающейся звезды. За время, меньшее нескольких секунд, мы достигнем гравитационного радиуса. Ничего страшного при этом не произойдет (если до этого нас не раздавят приливные силы). Но, перейдя гравитационный радиус, мы окажемся безвозвратно потерянными для всей нашей Вселенной. Сигналы, посылаемые нами, будут падать вместе с нами в черную дыру. Именно поэтому поверхность радиуса R_g называется горизонтом событий.

10. Предки и потомки

Подытожим полученную информацию. Судьба звезды зависит от ее начальной массы. Звезды малых масс (меньше 2–3 масс Солнца) рожают гелиевые белые карлики (см. рис. 39). Чем больше масса звезды, тем более тяжелое ядро она рождает (тяжелое и в смысле массы, и в смысле атомного номера химических элементов). Из звезд с массами $(8 \div 10)M_{\odot}$ образуются белые карлики, состоящие из углерода, кислорода и т. д. Массы белых карликов меньше чандрасекаровского предела ($\sim 1,5M_{\odot}$). Интересно, что в углеродном ядре с массой, близкой к чандрасекаровскому пределу,

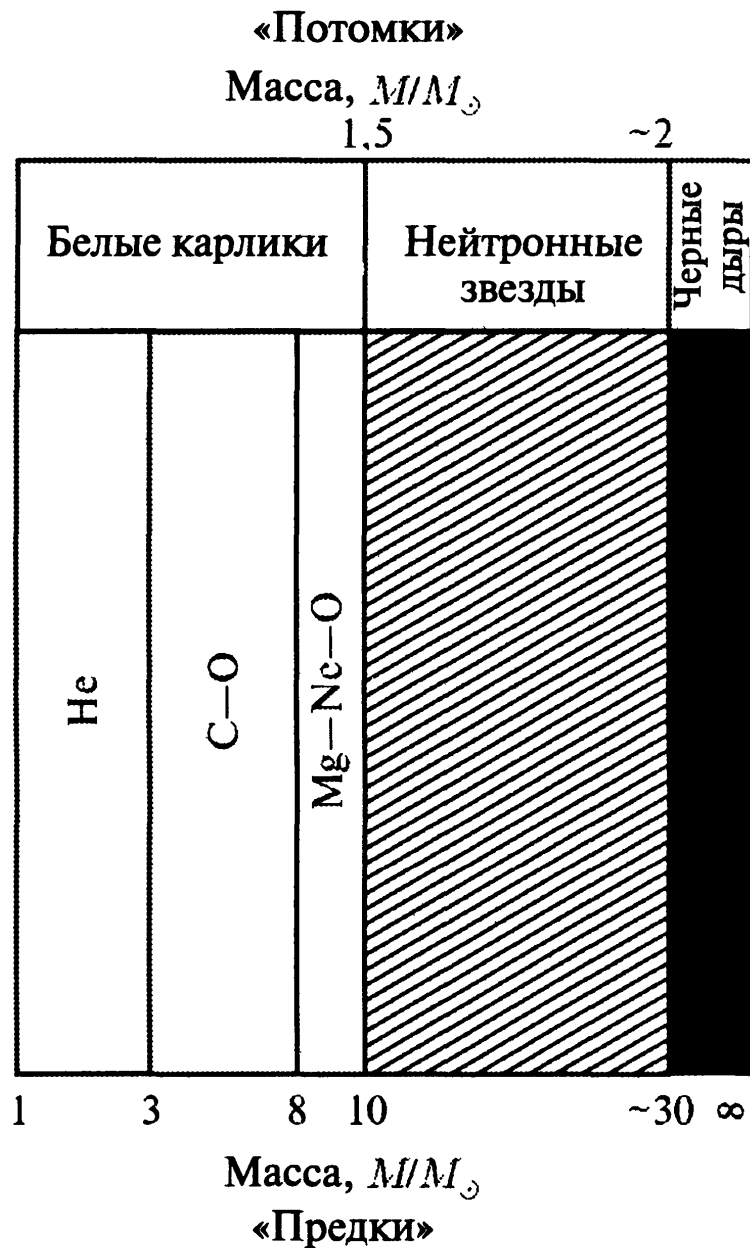


Рис. 39. «Предки» и «потомки»

огромное выделение энергии может привести к полному разлету ядра, и тогда от звезды ничего не останется — только вспышка сверхновой и диффузная туманность.

В звездах с массами более $10M_{\odot}$ вызревают железные ядра. Коллапсируя, они дают нейтронные звезды. Масса нейтронной звезды не может быть больше предела Оппенгеймера — Волкова $((2 \div 3)M_{\odot})$. Наконец, в особенно массивных звездах возможно образование черных дыр.

Поэтому звезды делят на два класса: массивные звезды ($\geq 10M_{\odot}$), которые рожают нейтронные звезды и черные дыры, и маломассивные, рожающие белые карлики.

Так живут одиночные звезды или двойные системы с большими расстояниями между компонентами. А что происходит в тесных двойных системах? В системах, где возможен перенос массы? Очевидно, все, о чем мы здесь говорили, остается справедливым до тех пор, пока одна из звезд не заполнит свою полость Роша и не начнется обмен массой. Потеряв свою массу, звезда может превратиться из массивной в немассивную. Однако к началу обмена звезда уже «знает», какое у нее будет потомство. Тип компактной звезды определяется начальной массой звезды. Эту звезду и принято называть предком.

Обмен массой в массивной двойной системе спасает ее от распада. Но обмен массой не происходит мгновенно. Значит, в Галактике должны быть двойные, в которых обмен массой происходит сейчас. Обнаружение таких систем было бы лучшим подтверждением сценария с переменной ролей.

IV

Первый обмен

1. Снова Джон Гудрайк	103
2. Спектр β Лирь	106
3. Гравитационный ветер	107
4. Испорченный прибор	111
5. Закованная в латы	114
6. Вторая загадка β Лирь	116
7. После обмена	117
8. Продолжение следует	121
9. Как считают звезды?	122

Парадокс Алголя показывает, что массы звезд в двойных системах сильно меняются. Теперь это кажется вполне естественным. Согласно законам звездной эволюции звезда расширяется, а согласно законам небесной механики вещество, вышедшее за полость Роша, теряется звездой. Совместив оба этих факта, мы неминуемо приходим к идее перетекания массы от одной звезды к другой.

Однако парадокс Алголя и теоретические соображения еще не доказывают факт перетекания вещества. Нужны улики — достоверные доказательства обмена массой. И такие улики нашлись. Астрономы, можно сказать, «поймали с поличным» одну из таких звезд в процессе обмена.

1. Снова Джон Гудрайк

10 сентября 1784 года Джон Гудрайк открыл вторую затменно-переменную звезду — β Лир. Эта звезда, подобно Алголю, стала знаменитой благодаря своей кривой блеска. В отличие от Алголя β Лир не имеет даже примерно постоянных участков блеска. (На ней, как говорится, нет «живого места», см. рис. 40.) Между двумя затмениями звезда не выходит на постоянный уровень блеска, а, достигая максимума на фазах 0,25 и 0,75, сразу же начинает спуск. Напомним, что постоянный участок блеска соответствует тем моментам времени, когда мы видим обе звезды вместе. Блеск систе-

мы — это сумма блесков звезд (точнее, их энергетических потоков). Период изменения блеска β Лиры равен 12,9

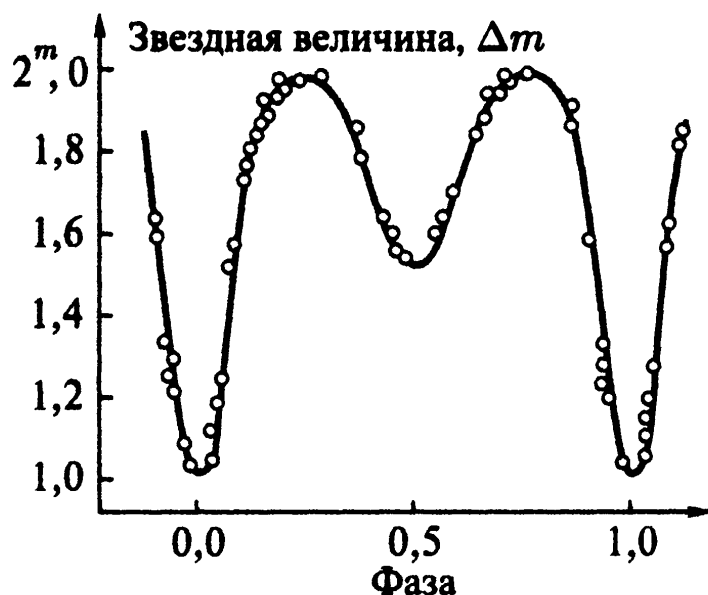


Рис. 40. Кривая блеска β Лиры, полученная на Тянь-Шаньской станции Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга

дня, т. е. более чем в четыре раза больше периода Алголя. Казалось бы, что эта система должна быть шире Алголя и затмение в ней должно быть уже. Но все дело в том, что звезды β Лиры массивнее и больше по размерам.

Помните спор Кассини и Ньютона о форме Земли (см. гл. I)? Вращение вокруг оси сплющивает одиночную звезду у полюсов. Вращение же в

двойной системе приводит к вытягиванию звезд вдоль линии, их соединяющей, поэтому звезды по форме напоминают дыни (точнее, трехосные эллипсоиды). В результате орбитального движения звезды поворачиваются то одним, то другим боком к наблюдателю, поэтому и меняется блеск двойной системы. Это явление называется эффектом эллипсоидальности. В чистом виде такой эффект можно получить, рассмотрев двойную, в которой только одна из звезд «дыня», а вторая имеет очень малые размеры (рис. 41).

Для простоты положим угол наклона $i = 90^\circ$. На фазе 0 мы видим звезду с торца, и блеск ее минимален (при этом лучевая компонента скорости звезды равна нулю). Затем звезда поворачивается, и видимая площадь плавно возрастает. Блеск системы повышается и достигает максимума на фазе 0,25. В этот момент звезда видна сбоку; скорость ее максимальна и направлена от нас. Через четверть орбитального периода блеск звезды опять достигает минимума. Дальше все

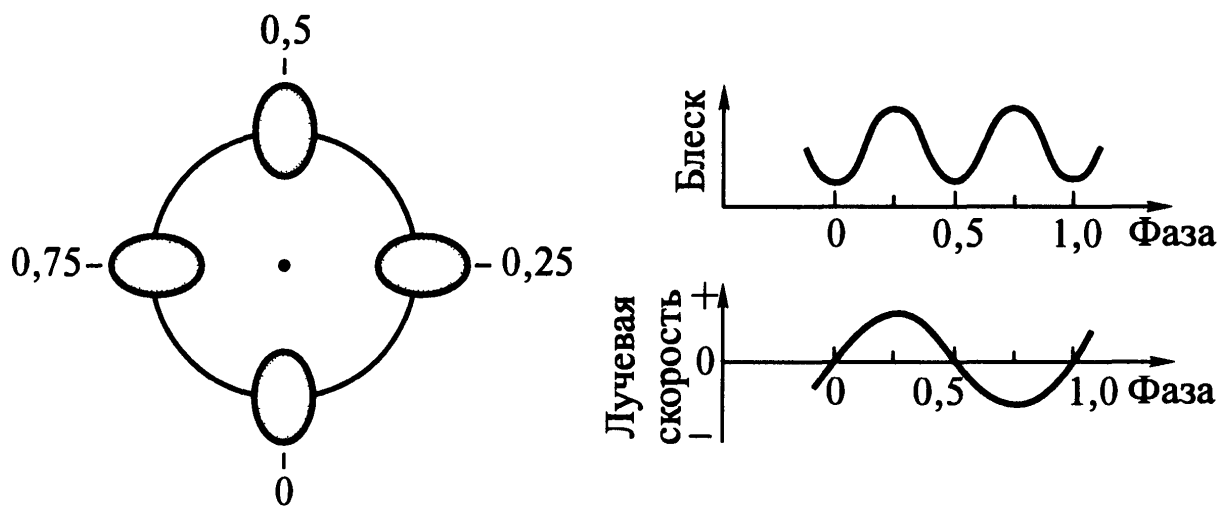


Рис. 41. Изменение блеска звезды вследствие эффекта эллипсоидальности

повторяется. За один период блеск звезды достигает максимума (и минимума) дважды. Поэтому такую кривую блеска называют двойной волной.

Вспомним: эффект отражения приводит к одной волне за период и максимуму блеска на фазе 0,5. Эффект эллипсоидальности дает двойную волну и максимумы на фазах 0,25 и 0,75.

Однако модельная кривая, изображенная на рис. 41, все же отличается от наблюдаемой кривой (см. рис. 40). Особенно заметно отличие в глубинах минимумов. В главном минимуме блеск двойной падает до $4^m,2$, а во вторичном — до $3^m,9$. Но это легко объясняется частичным затмением компоненты двойной. Итак, кривая β Лир — это сумма двух эффектов — затмений и эффекта эллипсоидальности. Величина эффекта эллипсоидальности ограничена степенью сплюснутости звезд в двойной системе. Максимальная вытянутость достигается тогда, когда звезда заполняет полость Роша целиком. Поэтому изменение блеска двойной из-за эффекта эллипсоидальности не превосходит нескольких десятых звездной величины.

В гл. I мы уже отмечали, что реальная форма звезды в двойной соответствует форме поверхности Хилла. Если размер звезды приближается к размерам полости Роша, то ее форма уже напоминает не дыню, а, скорее, грушу. Сторона,

повернутая к соседке, по форме отличается от обратной стороны. Это приводит к различиям в яркости противоположных сторон. Носик звезды (область вблизи внутренней точки Лагранжа) холоднее, чем другие части поверхности. Поэтому минимумы на кривой эффекта эллипсоидальности всегда разные (а максимумы?).

Измерение амплитуды эффекта эллипсоидальности позволяет определить степень заполнения полости Роша звездой в двойной системе. Попросту — найти относительные размеры звезды. Анализ кривой блеска β Лиры показывает, что более яркая компонента имеет размеры, близкие (а может быть, и равные) к размерам своей полости Роша. Это позволило заподозрить ее в перетекании на другую звезду. Подозрение перерастает в уверенность, если познакомиться со спектром β Лиры.

2. Спектр β Лиры

У подавляющего большинства звезд, как и у Солнца, в спектрах наблюдаются темные линии поглощения. Рассказывая об эффекте Доплера, мы объясняли их появление в спектре существованием у звезд тонких холодных атмосфер. Такие линии наблюдаются и в спектре β Лиры. Но кроме них, в спектре видны и яркие линии различных химических элементов. Светлые линии называют еще эмиссионными. Яркие и темные линии периодически «ходят» по спектру с тем же периодом — 12,9 дня, — с каким меняется и блеск двойной. Это вполне понятно. Однако нелогично другое. Эмиссионные линии разных химических элементов «ходят» в разных фазах. Причем таких фаз не одна, и не две. Создается впечатление, что это не двойная система, а целый рой звезд. Но этого, конечно, не может быть. Ведь тогда невозможно понять, как им всем удастся вращаться с одинаковой частотой.

Совсем другое дело — линии поглощения. Все они «ходят» в одной фазе, и примечательно то, что в момент главного минимума лучевая скорость звезды переходит через нуль. Причем скорость меняет при этом знак с положительного на отрицательный. Значит, звезда, которой принадлежат линии, до главного минимума удалялась от нас, а потом начала приближаться, т. е. она затмевается. Это вполне естественно, так как в главном минимуме затмевается более яркая звезда, линии которой должны быть видны. А вот линии второй звезды никому не удавалось обнаружить до самого последнего времени.

По линиям поглощения удалось определить спектральный класс яркой компоненты β Лиры. Компонента оказалась звездой спектрального класса В8. Используя зависимость «светимость — масса» (см. рис. 32) для звезд главной последовательности, удалось оценить массу яркой звезды. Она примерно равна $3M_{\odot}$. А функция масс, определенная по кривой лучевых скоростей, была на удивление большой — примерно $12M_{\odot}$. Вспомним замечательное свойство функции масс (гл. II): масса второй звезды не может быть меньше функции масс. Значит, вторая звезда значительно массивнее. Налицо парадокс. Вторая звезда почти в 4 раза больше первой, и тем не менее в спектре двойной нет ни одной ее линии! Итак, весь комплекс наблюдательных данных приводил к противоречивой картине, в которой выделялись два наиболее важных вопроса:

- 1) каково происхождение эмиссионных линий?
- 2) почему звезда, намного превосходящая соседку по своей массе, не дает никаких спектральных линий?

3. Гравитационный ветер

Рассказывая об измерении лучевых скоростей звезд (гл. II), мы выяснили, как в спектре звезды образуются линии поглощения. Мы видели, что если между нами и горячим телом,

дающим планковский спектр, поместить холодный полупрозрачный газ, то на спектре появятся «щербинки» — линии поглощения (см. рис. 23).

Рассмотрим другой мысленный эксперимент. Будем постепенно нагревать газ, закрывающий от нас звезду. При нагревании увеличивается частота и сила соударений атомов газа. Атомы будут взаимно возбуждаться — кинетическая энергия переходит при столкновениях в энергию электронов. Электроны, получившие энергию, будут «забрасываться» на верхние энергетические уровни. Но долго там они не могут находиться и очень быстро (через время $\sim 10^{-8}$ с) свалятся в потенциальную яму электрического поля ядра, излучив квант света. Так как газ не очень плотный, то квант света сразу покинет его, унося энергию, т. е. охлаждая газ. Но мы продолжим нагревать газ, компенсируя его охлаждение. Что при этом будет происходить?

Нагретый газ, согласно законам квантовой механики, излучает только в линиях, в тех самых линиях, в которых он поглощал излучение звезды. Теперь понятно, что при нагревании газа «щербинки» (линии поглощения) будут заполняться излучением и становиться менее глубокими. Если увеличить приход тепла и поднять температуру газа, можно добиться того, чтобы «щербинки» заполнялись целиком и получился спектр без линий.

Теперь уберем звезду. Непрерывное излучение исчезнет, а спектр превратится в частокол ярких эмиссионных линий, находящихся в тех же местах, где раньше были линии поглощения. Итак, прозрачный газ, нагретый до температуры, при которой еще существуют нейтральные атомы (10 000 К), излучает спектр, почти полностью состоящий из частокولا линий. Конечно, при температуре 10 000 К есть и свободные электроны. Свободный электрон (электрон вне атома) может излучить квант любой частоты. Но при температуре 10 000 К энергия электрона столь мала, что, чуть приблизившись к иону, он захватывается (рекомбинирует), а затем всю

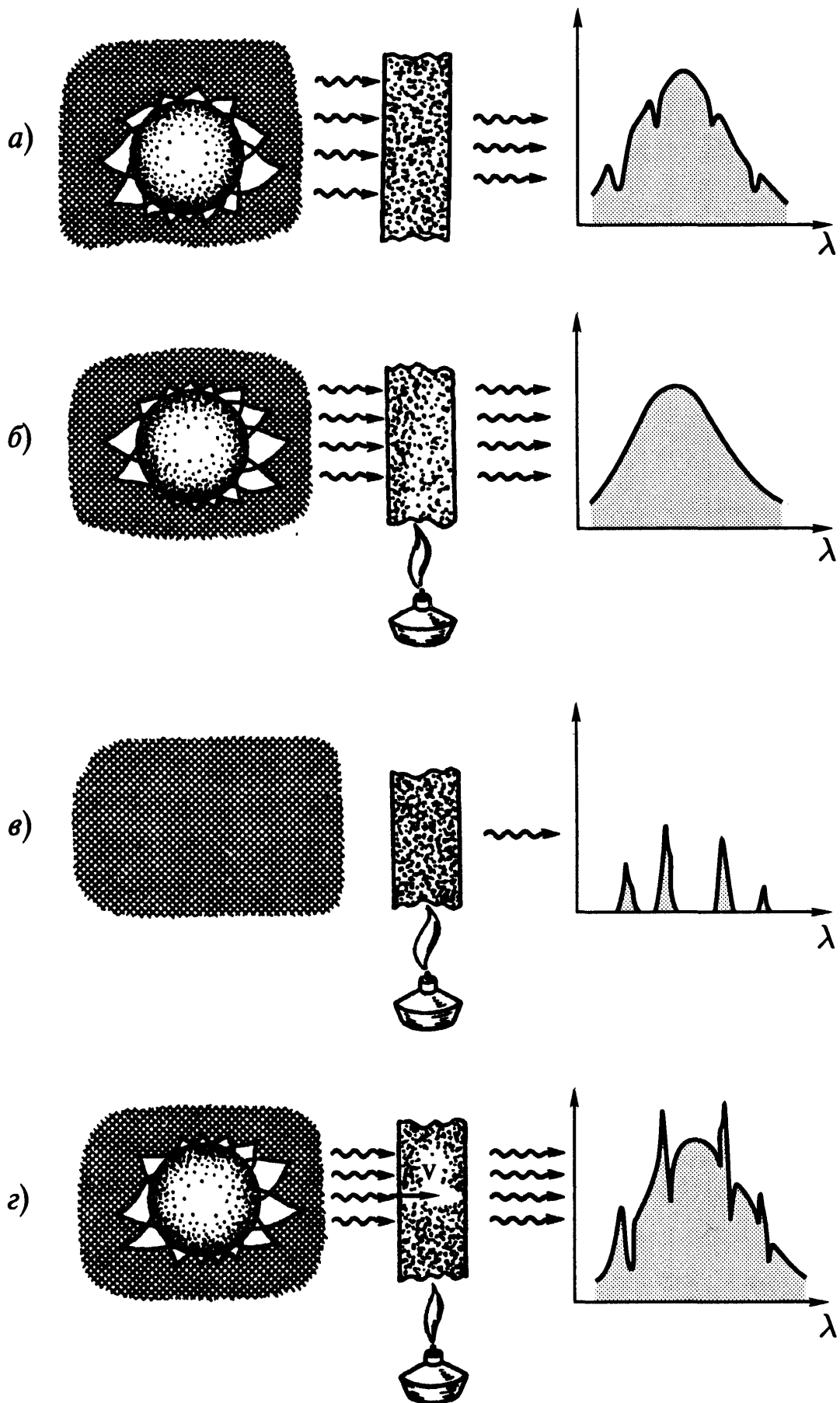


Рис. 42. Возникновение эмиссионных линий в спектре звезды

свою энергию излучает на частотах линий. Поэтому вклад непрерывного спектра будет мал (рис. 42 в).

Конечно, такой спектр очень сильно отличается от планковского спектра абсолютно черного тела. Это и понятно. Газ, который мы рассматриваем, — оптически тонкий. Фотон, излучившись и испытав лишь несколько рассеяний и поглощений, покидает газ. Излучение не успевает приобрести температуру газа. Поэтому его спектр становится похожим на «частокол».

Сделаем еще один мысленный эксперимент (рис. 42 г). Вернем звезду обратно, но заставим газ двигаться относительно звезды. Пусть, например, горячий газ приближается к нам. Из-за эффекта Доплера все эмиссионные линии, излучаемые газом, сдвинутся по спектру в фиолетовую сторону, а линии поглощения останутся на том же месте, что и в случае рис. 42 а. Так одновременно в спектре звезды появятся и эмиссионные линии, и линии поглощения, соответствующие одному и тому же атомному переходу. Если заставить двигаться горячий газ по кругу, то мы увидим, как в спектре происходит периодическое «хождение» линий излучения относительно линий поглощения.

Именно такое «хождение» и наблюдается в спектре β Лиры. Только линии излучения разных элементов перемещаются по-разному в зависимости от фазы. При этом амплитуды на кривой лучевых скоростей у разных линий меняются от 80 до 360 км/с, что можно объяснить присутствием нескольких потоков оптически тонкого газа с разной температурой. Линии легко возбуждаемых элементов формируются в более холодных потоках, а в более горячих — линии элементов, для возбуждения которых требуется бóльшая энергия. В принципе это может быть и один поток, в котором переменны скорость и температура.

Откуда берутся потоки газа? Вспомним, что кривая β Лиры показывает, что более яркая звезда близка к полости Роша, а может быть, полностью ее заполняет. Тогда все

встает на свои места. Вещество яркой звезды, расположенное вблизи носика звезды (внутренней точки Лагранжа), захватывается гравитационным полем темной звезды. Поток газа, все ускоряясь, вытягивается в виде струи и устремляется к темной звезде. Это можно назвать гравитационным ветром. Ведь что такое ветер? Это упорядоченный поток газа. Обычно ветер на Земле возникает из-за разности давлений. А в двойной системе поток газа движется под действием сил притяжения. По-видимому, именно такой гравитационный ветер «дует» в двойной системе β Лиры.

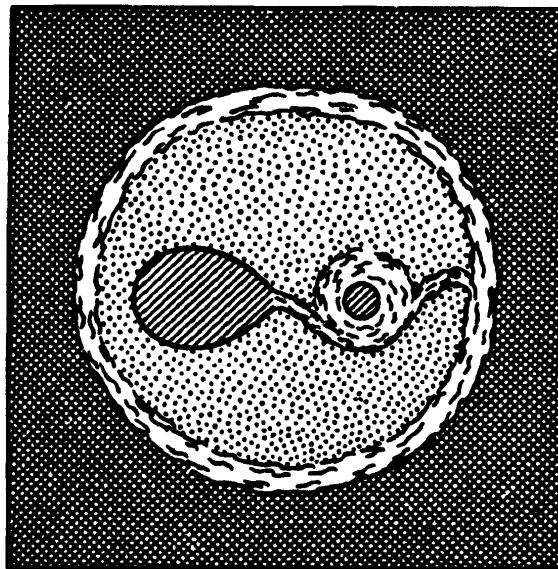


Рис. 43. Газовые потоки
в системе β Лиры

Так давно знакомая переменная звезда, открытая (как переменная) еще в конце XVIII века Джоном Гудрайком, помогла астрономам убедиться, что перенос массы — реальное явление в мире двойных звезд. Если парадокс Алголя лишь «намекнул» на обмен массой, то эмиссионные линии β Лиры засвидетельствовали этот обмен. Еще один яркий пример бурного обмена массой демонстрирует двойная звезда RX Кассиопеи, подробно изученная одним из пионеров советской школы изучения двойных звезд Д. Я. Мартыновым. Этот список можно было бы и продолжить.

4. Испорченный прибор

Известно, что уровень жидкости в сообщающихся сосудах одинаков. Для демонстрации этого явления стеклодувы выдувают специальный лабораторный прибор — две колбы, соединенные перемычкой. Для удобства перемычку необходимо расположить у дна сосуда (в этом случае «сообщаемость» не зависит от количества воды, используемой

в эксперименте). Но представьте, что по ошибке или специально (исходя из своих эстетических вкусов) стеклодув припаял перемычку сверху, а не снизу. Такой «опыт» дизайнера можно было бы смело заносить в коллекцию курьезных изобретений. Но не спешите этого делать. У вас в руках отличное приспособление, демонстрирующее обмен массой в двойной звездной системе. Хорошо еще, чтобы высота сосудов была разная. Сосуд с меньшим сечением должен быть немного выше (рис. 44). Перемычка играет роль горловины вблизи внутренней точки Лагранжа. А верхние края сосудов заменяют внешние точки Лагранжа (L_2 и L_3 , см. рис. 13). Напомним, что точка L_2 лежит ближе к менее массивной звезде и уровень потенциала в ней ниже, чем в точке L_3 . Налив воду в левый (см. рис. 44) сосуд, можно моделировать ядерную эволюцию звезды. Пока вода ниже перемычки, сосуды никак не связаны и уровни в них разные. Постепенное повышение уровня жидкости в левом сосуде моделирует расширение более массивной звезды в ходе ядерной эволюции. Вторая звезда имеет меньшую массу и остается практически неизменной. Когда вода дошла до перемычки (заполнилась полость Роша), сосуд обрел свойство сообщаемости и уровни в обеих колбах начали выравниваться. Если не прекращать притока воды, то сначала уровни станут одинаковыми, а потом наступит момент, когда правая колба заполнится до краев (она ниже) и вода начнет проливаться на стол (вещество покидает двойную систему). Конечно, двумя колбами, даже очень искусно сделанными, не заменишь двойной системы. Обмен масс — это сложный, до конца еще не ясный газодинамический процесс. Лабораторный прибор дает правильное представление о направлении процессов. Детали же их гораздо сложнее.

Пусть звезда заполняет свою полость Роша. Если слегка подтолкнуть частичку вблизи точки Лагранжа, она скатится в полость Роша другой звезды. Напомним, что в точке Лагранжа равнодействующая трех сил равна нулю (трех,

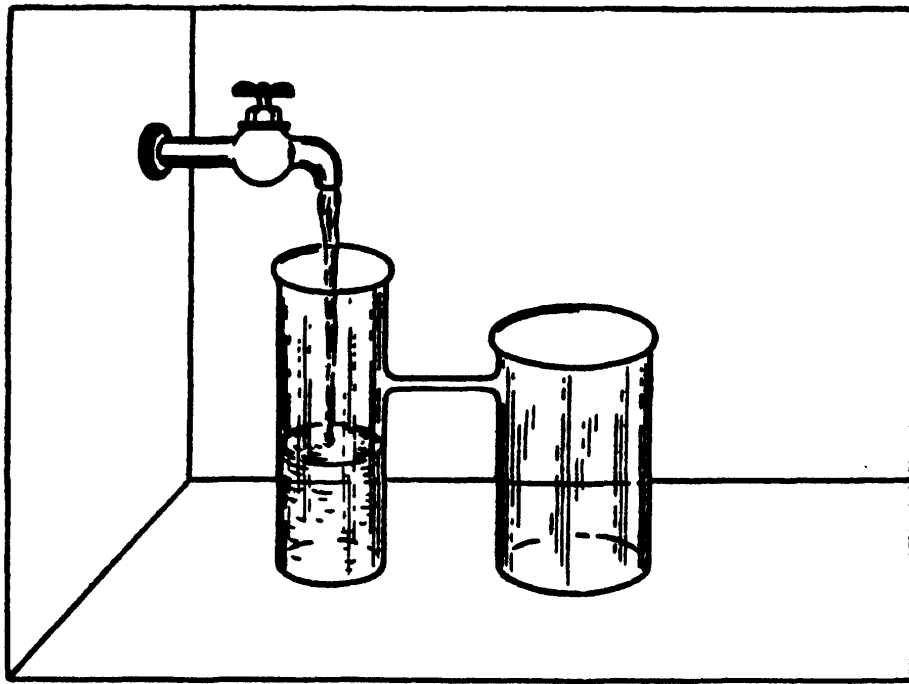


Рис. 44. Опыт для демонстрации перетекания вещества в двойной

а не двух!). Две силы — это силы притяжения звезд, а третья — центробежная сила (мы находимся во вращающейся системе координат). Если бы частицы скатывались из точки Лагранжа, не взаимодействуя друг с другом, то каждая двигалась бы по своей сильно запутанной траектории (см. рис. 10). Но вещество звезды представляет собой газ, частицы которого сталкиваются. Случайные движения усредняются при столкновениях и исчезают (переходят в тепло). Остается лишь то, что объединяет частицы — движение от одной звезды к другой. Возникает газовый поток («гравитационный ветер») в виде струи газа. Чтобы струя была достаточно плотной, звезда должна чуть-чуть переполнять свою полость Роша (уровень в левой колбе должен быть чуть выше перемычки).

Какова будет дальнейшая судьба струи? Качественная картина движения такова. Струя газа с толщиной порядка $0,1$ радиуса истекающей звезды не может прямо попасть на вторую звезду. Это легко понять, если перейти в систему отсчета, связанную со второй звездой. Истекающая звезда, а вместе с ней и струя газа вращаются вокруг нас с пери-

одом обращения двойной. Значит, вещество струи обладает относительно нас моментом вращения — она бьет мимо нас! Падение вещества под действием силы тяжести называется аккрецией, а звезда, на которую падает вещество, называется аккрецирующей. Струя газа заворачивается гравитационным полем аккрецирующей звезды. Если вторая звезда далека от заполнения своей полости Роша, струя газа не может столкнуться с ней «в лоб», а закручивается вокруг нее в виде газового кольца (дискообразной оболочки). Вращение в оболочке происходит с разной угловой скоростью на разных расстояниях. Такое вращение называется дифференциальным. Между соседними слоями возникает трение, приводящее к обмену вращательными моментами между ними. Кольцо расплзается в диск. Внутренние слои, отдавая свой вращательный момент внешним, приближаются к аккрецирующей звезде. В конце концов вещество «оседает» на поверхность звезды (рис. 43).

5. Закованная в латы

В режиме истечения звезда близка к полости Роша. В масштабах звезды можно сказать, что ее поверхность и есть поверхность полости Роша. Кажется, что такое положение должно вскоре нарушиться. Действительно, потеряв часть своей массы и став меньше, звезда должна уменьшить свои размеры, чтобы сохранилось гидростатическое равновесие. Чем меньше масса невырожденной звезды, тем меньше ее радиус. Подстройка звезды под новую массу происходит практически мгновенно (для Солнца это всего 20 минут). Кажется бы, перетекание должно прекратиться.

Не обязательно. Ведь при потере массы звездой меняется отношение масс компонент двойной и меняются размеры полости Роша. Кроме того, не будем забывать, что в звезде продолжается ядерная эволюция, сопровождающаяся увеличением радиуса звезды, — ведь именно благодаря

ей звезда и заполнила полость Роша. Игра этих трех процессов и определяет скорость и продолжительность перетекания вещества.

Как изменится размер полости Роша? Для простоты будем считать, что вещество с одной звезды целиком перетекает на другую, оседая на ней. Такое упрощение позволяет решить задачу без высшей математики. Достаточно воспользоваться законом сохранения орбитального момента двойной (ведь двойная не теряет массу). Если при обмене массой вещество не покидает двойную, то такой обмен называют консервативным.

Пусть для определенности вещество перетекает с большей (по массе) звезды на меньшую. Возьмем мысленно 1 г вещества с большей звезды и осторожно положим его на меньшую. Меньшая звезда обладает бóльшим орбитальным моментом. Она «главнее» (см. гл. I). При таком переносе мы уменьшим средний (на единицу массы) орбитальный момент менее массивной звезды — она чуть подвинется к большей. Следовательно, при перетекании с большей звезды на меньшую расстояние между звездами уменьшается! Двойная «съезжается», и соответственно уменьшаются размеры полости Роша. Но звезда, потерявшая массу, вышла из теплового равновесия. Она излучает энергию, не соответствующую ее массе. Тепловое равновесие устанавливается гораздо медленнее, чем гидродинамическое, но все же быстрее ядерной эволюции звезды (см. формулы (7), (10), (11)).

Итак, уменьшение размеров звезды компенсируется уменьшением полости Роша. Звезда истекает в тепловой шкале времени, оставаясь все время «закованной в латы» полости Роша. Для массивных звезд это время составляет $\sim 10^4 \div 10^5$ лет. Темпы обмена массой в таких системах достигают $\sim 10^{-3} \div 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$. Это в 10 миллиардов раз больше темпа уменьшения массы Солнца из-за солнечного ветра. «Гравитационный ветер» по сравнению с ним просто ураган.

Пусть теперь менее массивная звезда заполняет свою полость Роша. В этом случае вещество с бóльшим вращательным моментом оседает на звезде с меньшим вращательным моментом и увеличивает ее средний момент. Двойная система «расползается», полость Роша увеличивается. Если перетекание будет очень интенсивным, то полость Роша «оторвется» от звезды и обмен прекратится. Перетекание возобновится только через ядерное время, когда звезда, расширившись, опять заполнит полость Роша. На самом деле процесс перетекания может идти не так бурно, сохраняя размеры звезды равными размерам полости Роша. Звезда опять оказывается «закованной» в поверхность Роша. Но теперь обмен уже идет не в тепловой, а в ядерной шкале времени (см. формулу (10)).

6. Вторая загадка β Лир

Вернемся снова к системе β Лир. Загадка эмиссионных линий убедила нас в реальности обмена массой. А как быть со второй загадкой: почему более массивная звезда в этой системе не проявляет себя в спектре двойной? Линии поглощения в этой системе принадлежат менее массивной горячей звезде спектрального класса В8. Функция масс, определенная по этим линиям, накладывает ограничение «снизу» на массу невидимого спутника: $12M_{\odot}$. Это почти в четыре раза больше массы звезды В8. Совершенно невероятно, чтобы звезда с такой массой ничем не проявляла себя в спектре. Вспомним, что для нормальных звезд светимость примерно пропорциональна кубу массы (см. гл. III). При отношении масс 4 : 1 отношение светимостей должно быть 64 : 1 в пользу более массивной звезды!

Как разрешить этот парадокс? Парадокс Алголя привел к идее перемены ролей. А к чему ведет парадокс β Лир? Самые отчаянные головы готовы были поверить, что более

массивная звезда в этой системе — черная дыра! Она ведь черная — вот и не видна. Но это совершенно неверно. Как мы увидим дальше, черная дыра, помещенная в такую двойную систему, оказывается значительно ярче многих «белых» звезд.

Возможным выходом из этого парадокса была бы следующая гипотеза. Соотношение «масса — светимость» применимо к звездам главной последовательности, т. е. к звездам, находящимся в гидростатическом и тепловом равновесии. Не случилось ли так, что вторая, темная звезда в системе β Лиры еще не «пришла в себя» после бурного перетекания на нее вещества? Ведь до начала обмена массой она была менее массивной и излучала мало. Теперь же масса ее возросла, возросло энерговыделение в центре, но мы об этом узнаем только через миллион лет (тепловое время). Вот вам и темный массивный спутник! Звезда напоминает динозавра, которому откусили хвост, а он, ни о чем не догадываясь, пытается почесать себя хвостом за ухом.

7. После обмена

Звезда, заполнившая полость Роша, живет в режиме быстрой потери массы. Расчеты эволюции таких звезд начаты еще в 60-е годы прошлого века, и их результаты показаны в виде эволюционных треков на диаграмме Герцшпрунга—Рессела на рис. 45. По мере потери массы звездой оголяются все более и более глубокие внутренние ее слои. Чем дольше звезда прожила до заполнения полости Роша и чем больше масса звезды, тем дальше зашла ядерная эволюция, тем более тяжелые химические элементы успели перегореть внутри звезды. Обмен масс в двойной системе снимает верхнюю, неперегоревшую водородную оболочку. Остается звезда с аномальным химическим составом, состоящая почти целиком из более тяжелых элементов. Обмен массой заканчивается в момент сгорания в центре водорода и загорания

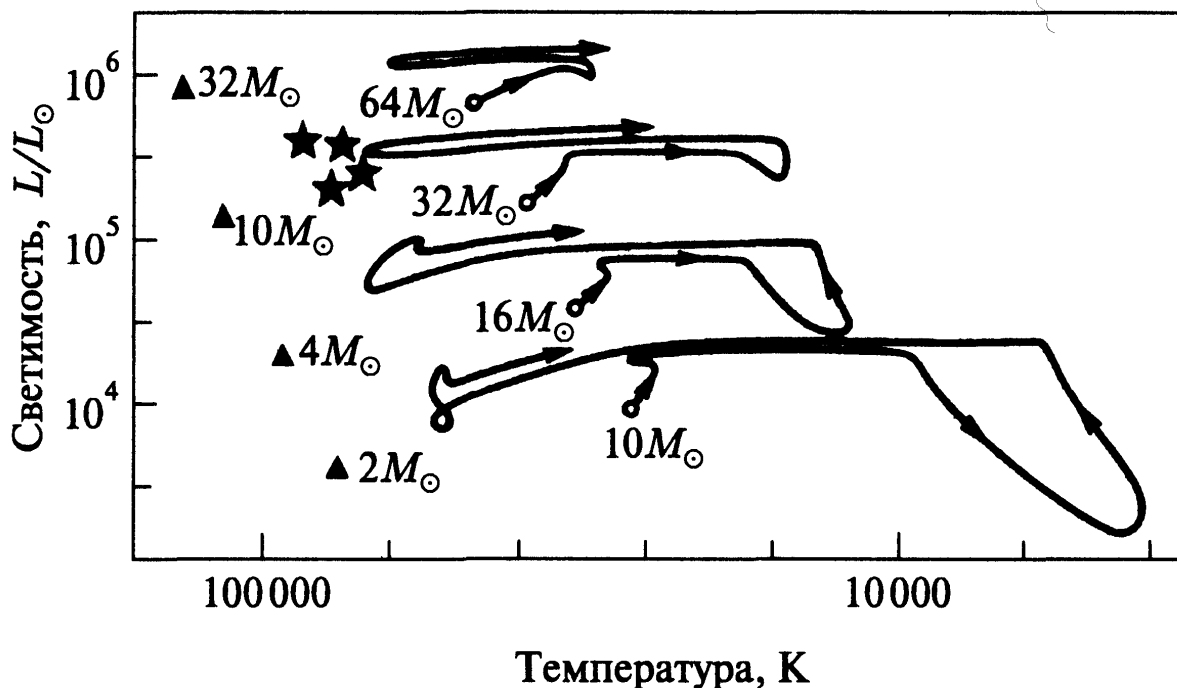


Рис. 45. Эволюция звезд с сильной потерей массы (★ — начальные положения звезд на главной последовательности, ▲ — положения чисто гелиевых звезд)

гелия. Радиус звезды резко уменьшается, и звезда отрывается от полости Роша. Так образуются гелиевые звезды.

Возможно, именно так образуются звезды, открытые более 100 лет назад немецким астрономом М. Вольфом и французским астрономом Г. Райе. Поразителен спектр этих звезд (см. рис. 46). Это не частокол, а целый лес линий излучения гелия и других тяжелых элементов. Ширины линий достигают нескольких нанометров. Это соответствует скоростям расширения в несколько тысяч километров в секунду.

Еще в начале 20-х годов прошлого века английский астроном Карлайл Билс предположил, что свойства звезд Вольфа—Райе объясняются мощным изотропным истечением вещества с поверхности звезды (см. рис. 47). Из-за эффекта Доплера линии расширяются по спектру. При этом свет самой звезды с трудом пробивается через истекающее вещество. В спектрах звезд Вольфа—Райе нет линий водорода.

Отвечая на вопрос, почему звезды разные (гл. II), мы подчеркивали, что это связано в основном с разной их тем-

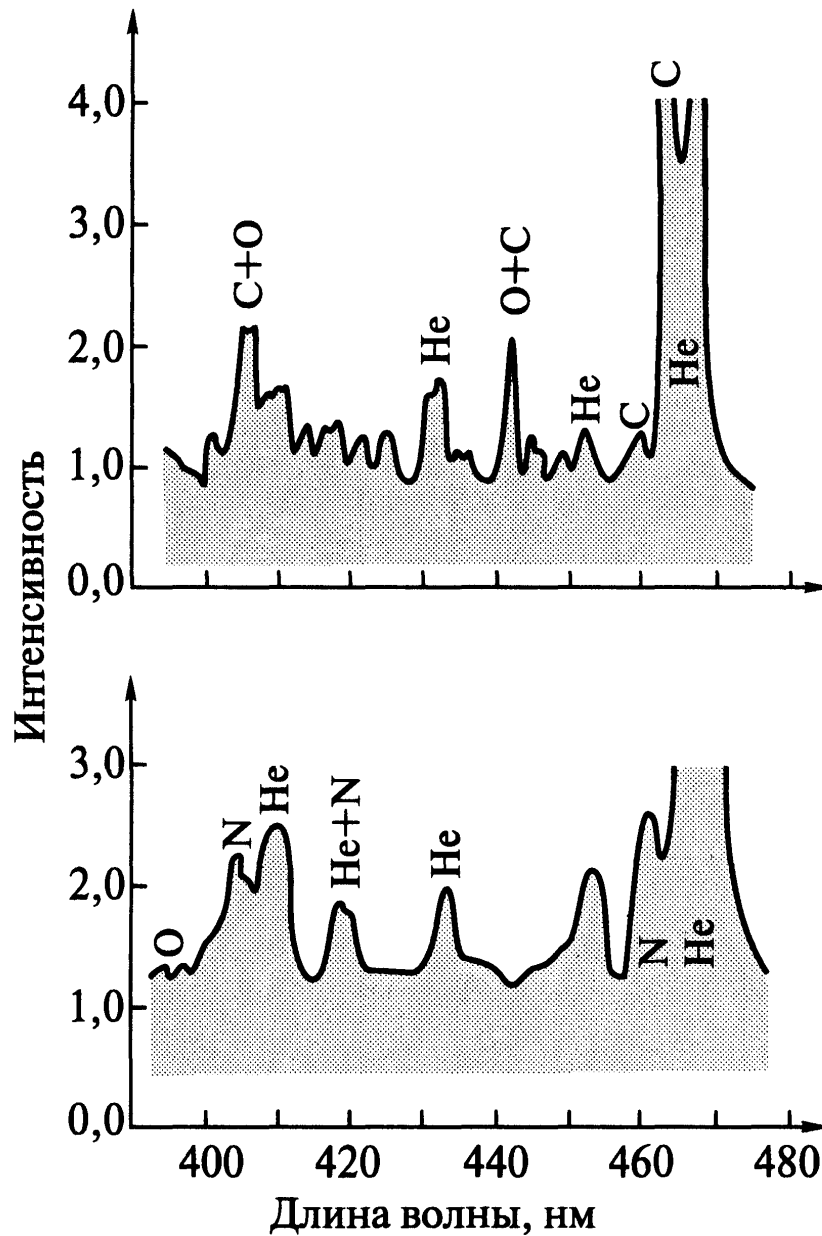


Рис. 46. Два типичных спектра звезд Вольфа—Райе

пературой, а не различиями в химическом составе их атмосфер. Следуя этому правилу, мы должны были бы объяснить отсутствие линий водорода в звездах Вольфа—Райе неблагоприятными условиями для возбуждения этих линий. А вдруг в случае звезд Вольфа—Райе мы столкнулись с исключением из правила? Может быть, линий водорода нет потому, что нет водорода?

Гелиевая звезда при одинаковой массе с водородной значительно меньше ее по размерам. Гелиевая звезда с массой $10M_{\odot}$ должна иметь радиус $(2 \div 3)R_{\odot}$ — примерно в 3–5 раз меньше водородных звезд. Но как определить радиус звезды?

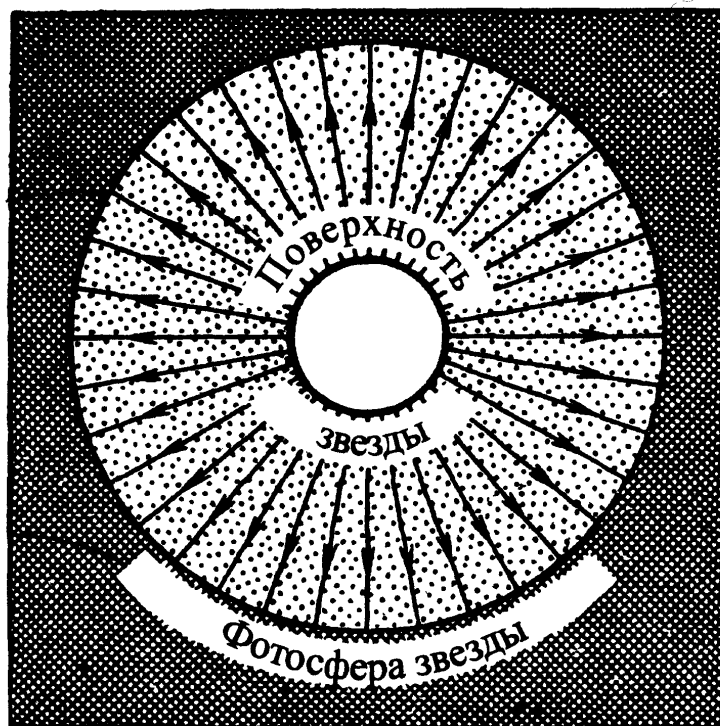


Рис. 47. Поверхность звезды Вольфа—Райе, видимая в линиях, много больше самой звезды

Ведь ее поверхности мы практически не видим. По ее спектру тоже ничего не скажешь — уж очень сильно он отличается от спектра черного тела. Вот если бы звезда Вольфа—Райе была членом затменно-переменной системы, тогда по кривой блеска можно было бы найти размеры дисков звезд.

К счастью, несколько таких затменно-двойных систем наблюдается. Из них лучше всего изучена звезда V444 Лебедя (буква V означает, что звезда переменная). Кривая блеска ее показана на рис. 48.

Из-за того что звезда Вольфа—Райе обладает обширной полупрозрачной оболочкой, к ней обычные методы «выуживания» размеров звезд из кривой блеска невозможно применить. В начале 70-х годов прошлого века советские астрофизики, применив новый метод, восстановили по кривой блеска параметры звезд в системе V444 Лебедя. Радиус звезды Вольфа—Райе оказался равным $(2 \div 3)R_{\odot}$. Это означает, что звезды Вольфа—Райе — гелиевые звезды. В последующие годы были исследованы еще три затменных двойных

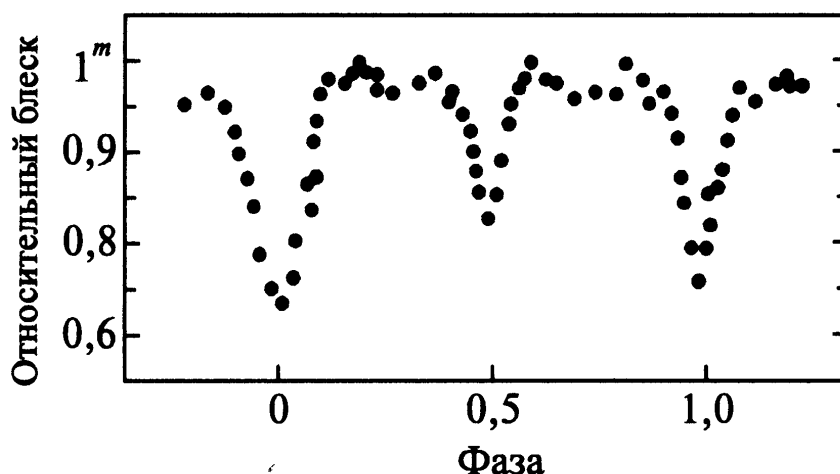


Рис. 48. Кривая блеска V444 Лебедя

со звездами Вольфа—Райе. Эти исследования подтвердили гелиевую гипотезу.

По мере выгорания тяжелых элементов эволюция звезды все ускоряется и ускоряется. Время жизни гелиевых звезд, исчисляемое ядерным временем для гелия, примерно в 100 раз короче ядерного времени для водорода. Вторая же звезда, хотя и стала массивнее первой (перемена ролей), по-прежнему еще «сидит» на водороде и не может догнать первую. Через несколько сотен тысяч лет в массивных двойных системах гелиевая звезда взрывается, рождая нейтронную звезду или черную дыру. В маломассивных двойных системах происходит «тихое» образование белых карликов.

8. Продолжение следует

В конце гл. II мы говорили о том, что механизм перемены ролей подобен mine замедленного действия. Он играет принципиальную роль в эволюции двойной системы. Представим себе, что не было обмена массой и первоначально более массивная звезда так и осталась более массивной. При коллапсе ее ядра из двойной системы будет выброшена практически вся ее масса. Ведь масса нейтронных звезд в 10–20 раз меньше массы массивной звезды. Система заведомо потеряет больше половины своей массы и распадется.

Итак, без перемены ролей система погибнет как двойная. Совсем другое дело, если произошел обмен и в результате взрывается менее массивная звезда (а она никак не может сбросить больше половины полной массы двойной). Возникает принципиально новый тип двойных звезд — звезд, содержащих наряду с нормальными звездами нейтронные звезды и, может быть, черные дыры. Причем любая массивная система, которая живет по сценарию с переменной ролей, должна дать такой экзотический симбиоз. Сколько таких звезд должно быть в Галактике? Есть ли надежда их обнаружить? Эти вопросы волновали ученых в конце 60-х годов прошлого века. И мало кто подозревал, что у них над головой просто мириады таких звезд.

9. Как считают звезды?

Представьте себе, что вы стоите в очереди в музей на очень интересную выставку. Очередь большая и продвигается медленно. Стоять холодно и скучно. Вам приходят в голову разные мысли, но все они крутятся вокруг выставки. Например, вы спрашиваете себя: сколько человек находится в музее одновременно? Как можно решить эту задачу? Стоите вы уже давно, так что ситуация стабилизировалась. Стабилизировалась — это значит, что в среднем количество людей, входящих в музей, равняется количеству людей выходящих. Если это требование не будет выполняться, то либо музей опустеет, либо начнется столпотворение.

Сколько же людей (этих счастливиц) в музее? Можно было бы просто дождаться своей очереди, зайти в музей и быстро сосчитать всех посетителей. Но это, во-первых, технически трудно исполнить, а во-вторых, не затем вы пришли в музей.

Другой реальный путь состоит в следующем. Вы засекаете время и находите средний поток входящих людей. Допу-

стим, оказалось, что за час входят 100 человек (это число «согревает» вас). Но осталось еще много времени, и вы отправляетесь к выходу из музея. Здесь вы производите небольшой «социальный опрос», задавая выходящим один и тот же вопрос: «Как долго вы находились в музее?». Усреднив ответы, вы получите, например, 4 часа. Этой информации уже достаточно, чтобы найти число людей, находящихся в музее. Оно равно произведению потока на время пребывания внутри:

$$100 \text{ человек/ч} \times 4 \text{ ч} = 400 \text{ человек.}$$

Как видите, при таком решении музей так и остался «черным ящиком», структура которого оказалась не важна. Единственное, но очень важное допущение, которое мы использовали, — это то, что просмотр выставки стабилизировался. Это называется требованием стационарности процесса.

Такой метод подсчета широко применяется в астрономии. Допустим, вы знаете, сколько звезд данной массы рождается в Галактике в единицу времени. Эту величину можно назвать темпом (скоростью) рождения звезд. Она зависит от массы звезд, и эта зависимость называется функцией Солпитера. Эдвин Солпитер впервые определил ее в 50-е годы прошлого века, статистически обработав большое число наблюдений. Для нашей Галактики число рождающихся (новых) звезд $N(M)$ с массой больше M равно

$$N(M) = 0,7 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1,35} \text{ звезд/год.} \quad (14)$$

По этой формуле число звезд с массой больше $10M_{\odot}$, рождающихся ежегодно, равно 0,03, т. е. 1 звезда за 30 лет, а звезд с массой больше M_{\odot} — 0,7 звезды в год. Это показывает, что скорость рождения сильно уменьшается с ростом массы звезды.

Теперь легко подсчитать, сколько звезд в Галактике с определенной массой присутствует одновременно. Допустим,

нас интересуют звезды главной последовательности с массой больше $10M_{\odot}$. Время жизни на главной последовательности определяется ядерным временем для водорода (формула (10)). Для звезд с массой $\sim 10M_{\odot}$ оно равно 10 миллионам лет. Умножая на скорость рождения звезд ($0,03 \text{ год}^{-1}$), получаем, что в Галактике примерно 300 000 таких звезд.

Легко вычислить также количество сверхгигантов. Их масса больше $10M_{\odot}$, а время жизни в среднем в 100 раз меньше ядерного. Значит, в Галактике примерно 3000 О–В сверхгигантов (т. е. сверхгигантов спектральных классов О и В). Конечно, при таком расчете мы предполагаем, что ситуация в Галактике стабилизировалась.

Теперь мы можем ответить на вопрос, сколько в Галактике двойных систем с релятивистскими звездами (нейтронными звездами и черными дырами). Из-за перемены ролей практически любая тесная двойная рождает такую пару. Сколько времени живет такая пара? Не вдаваясь в детали, можно предвидеть, что живет она по крайней мере до тех пор, пока нормальная звезда находится на «главной последовательности». Так как после обмена масса нормальной звезды увеличивается и из $10M_{\odot}$ в среднем становится равной $20M_{\odot}$, то нужно брать ядерное время именно для $20M_{\odot}$, т. е. примерно $5 \cdot 10^6$ лет.

В Галактике такие звезды рождаются один раз в 30 лет, из них половина двойных. Но так как звезд две, то нужно разделить 30 еще пополам. Окончательно получается, что подходящая двойная рождается один раз в 50–100 лет. Умножим частоту рождения на $5 \cdot 10^6$ и найдем, что в Галактике должно быть 50–100 тысяч массивных звезд с релятивистскими компонентами.

Значит, продолжение действительно следует.

V

**Массивные
рентгеновские двойные**

1. «Эм с точкой»	127
2. «Ярче тысячи Солнц»	131
3. «Ухуру»	137
4. В звездном ветре	141
5. Как работает рентгеновский пульсар	143
6. Почему нейтронные звезды?	147
7. «Дискология»	149
8. Лебедь X-1 и другие черные дыры	153
9. Вернемся к сценарию	156

Массивные рентгеновские двойные

Звездная эволюция идет в одном направлении — к исчерпанию ядерных источников энергии. Неизбежным следствием этого должно быть образование компактных звезд — белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр. Нейтронные звезды и черные дыры образуются в результате эволюции достаточно массивных звезд, с массой не меньше $10M_{\odot}$. Эти компактные звезды можно назвать релятивистскими. Их полная энергия (с учетом массы покоя) Mc^2 сравнима с гравитационной энергией GM^2/R . У черных дыр почти вся энергия сосредоточена в гравитационном поле, а у нейтронных звезд доля гравитационной энергии достигает 10–30 %.

Возможность существования нейтронных звезд и черных дыр выяснилась еще в 30-е годы прошлого века. Но в течение 20–30 лет (вплоть до начала 60-х годов прошлого века) после этого предсказания вопрос об экспериментальном их обнаружении вообще не ставился. С чем это связано? И что изменилось в 60-е годы?

1. «Эм с точкой»

Все дело в размерах нейтронных звезд и черных дыр. При звездной массе их радиус измеряется всего лишь десятками километров.

Светимость нагретого тела пропорциональна площади излучающей поверхности и четвертой степени температу-

ры (по закону Стефана—Больцмана). Площадь поверхности нейтронной звезды, имеющей радиус 10 км, в $(700\,000/10)^2 \approx 5$ миллиардов раз меньше солнечной. Значит, при одинаковой с Солнцем температуре нейтронная звезда была бы в 5 миллиардов раз слабее. Такое различие в яркости соответствует 24 звездным величинам (см. формулу (3)). Абсолютная звездная величина (звездная величина с расстояния 32,6 световых лет = 10 парсеков) была бы равна 29^m . А даже лучшие современные телескопы имеют предел 23^m . Нужно было быть большим оптимистом, чтобы искать столь слабые звезды. Что уж говорить о черных дырах, которые не только не излучают, а наоборот, все поглощают вокруг себя. Никто не хотел заниматься столь безнадежным делом. Можно пересчитать по пальцам все работы, написанные во всем мире по нейтронным звездам и черным дырам до 1960 года. Удивительно, как вообще такие работы появлялись. Например, в 1949 году советский астрофизик С. А. Каплан написал работу, посвященную анализу движения пробных частиц в поле тяготения черной дыры. Интересно, что тогда он работал в обсерватории Львовского университета, телескопы которой значительно уступали лучшим зарубежным образцам.

Ситуация резко изменилась в начале 60-х годов прошлого века, когда были открыты квазары и первые рентгеновские источники. Квазары — квазизвездные объекты — выглядят в видимой области спектра, как звезды. Поражает их гигантская светимость: в 10^{13} – 10^{15} раз больше светимости Солнца и в сотни и тысячи раз больше, чем светимость галактик. Галактики светят за счет ядерных источников энергии в звездах, а по размерам значительно превосходят квазары. Значит, в квазарах «работают» какие-то другие, более эффективные источники энергии.

В 1964 году советский физик Я. Б. Зельдович и независимо американский астрофизик Эдвин Солпитер нашли источник энергии, который в сотни раз эффективнее термоядерных реакций. Для того чтобы реализовать этот способ

добычи энергии, необходима релятивистская звезда (гравитационное поле которой совершает работу) и окружающее ее вещество («топливо»).

Пусть на поверхность звезды свободно падает окружающее ее вещество. Двигаясь так же, как и пробные частицы с нулевой энергией (см. гл. I), это вещество будет попадать на поверхность со второй космической скоростью. Кинетическая энергия частиц вещества с единичной массой при этом равна

$$\frac{v^2}{2} = \frac{GM}{R}.$$

Предположим, что вся кинетическая энергия при ударе о поверхность переходит в тепло, а потом излучается в окружающее пространство. Падение вещества под действием гравитации — аккрецию — удобно характеризовать количеством вещества, выпадающего на поверхность звезды в единицу времени. Эту величину называют темпом аккреции. Она показывает, как быстро изменяется с течением времени масса звезды. Скорость изменения какой-нибудь величины называется производной этой величины. Чтобы отличать ее от самой величины, над ее обозначением ставят точку. (Это обозначение, как и само понятие производной, придумал Исаак Ньютон.) Например, производная расстояния X обозначается \dot{X} («икс с точкой»). Это просто скорость движения. А скорость увеличения (или уменьшения) массы звезды обозначают \dot{M} («эм с точкой»). Это обозначение настолько прикилось, что не хочется от него отказываться, даже в популярной книге. Оно не потребует каких-то особых знаний. Для нас достаточно понимать, что эта буква с пометкой (меченая буква) означает скорость изменения массы.

Итак, каждую секунду на поверхность звезды выпадает \dot{M} кг вещества. Каждый килограмм имеет кинетическую энергию GM/R_* (R_* — радиус звезды). Если вся эта энер-

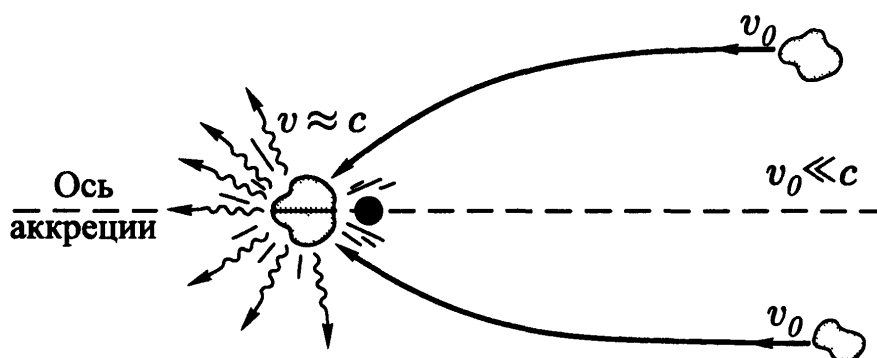


Рис. 49. Гравитационный «ускоритель». Сталкиваясь с релятивистской звездой, облака высвечивают до 10 % их полной энергии

гия переходит в излучение, светимость звезды будет равна

$$L = \dot{M} \frac{GM}{R_*}. \quad (15)$$

Для нейтронных звезд $GM/R_* \approx (0,1 \div 0,3)c^2$, значит, для них $L \approx (0,1 \div 0,3)\dot{M}c^2$. Из полной энергии покоя горючего выделяется 10–30 % энергии в виде излучения. Это примерно в 100 раз больше, чем та доля массы покоя, которая выделяется при сжигании водорода в гелий.

Но как быть с черной дырой, у которой нет никакой твердой поверхности? Падающему веществу не с чем сталкиваться. Выход из этого трудного положения был найден Я. Б. Зельдовичем. Нужно «заставить» вещество сталкиваться с самим собой! Представьте себе, что две частицы симметрично падают на черную дыру (рис. 49), ускоряются в ее гравитационном поле и сталкиваются на некоторой оси (эту ось называют осью аккреции). Столкновение нужно устроить поближе к черной дыре. Тогда скорости сталкивающихся частиц приблизятся к скорости света. При столкновении выделится 10 % энергии покоя частиц. Слишком близко к черной дыре подбираться не стоит. Выигрыш в энергии столкновения скомпенсируется тем, что дыра захватит на себя большую часть излучения.

В своей работе 1964 года Я. Б. Зельдович подчеркивал, что особенно мощный источник энергии может быть в двой-

ной системе, где вторая звезда способна поставлять необходимое топливо для гравитационной машины.

Совмещение идеи аккреции релятивистской звездой с идеей двойственности привело к взрыву теоретической и экспериментальной мысли.

2. «Ярче тысячи Солнц»

Все обычные звезды теряют вещество независимо от того, входят они в двойную систему или нет. Первые космические полеты показали, что от Солнца непрерывно истекает поток заряженных частиц со скоростью в несколько сотен километров в секунду. Этот поток плазмы был назван солнечным ветром.

Для характеристики мощности этого потока можно применить ту же величину \dot{M} . Темп истечения вещества из Солнца примерно равен $10^{-14} M_{\odot}/\text{год}$. Из-за истечения масса Солнца уменьшается вдвое за время, равное 10^{14} лет, что много больше его возраста. Значит, солнечный ветер не оказывает никакого влияния на эволюцию Солнца. Такие же ветры наблюдаются у других звезд. Причем замечено, что чем ярче звезда, тем мощнее ее звездный ветер. У голубых сверхгигантов темп истечения достигает $10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, а у звезд Вольфа—Райе — примерно $10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$. Много это или мало?

Посчитаем, какова будет мощность гравитационной машины, если ее к. п. д. равен 10 % :

$$L = 0,1 \dot{M} c^2 \approx 15\,000 L_{\odot} \frac{\dot{M}}{10^{-8} M_{\odot}/\text{год}}. \quad (16)$$

Получается, что если всего лишь $1/1000$ часть вещества звездного ветра, истекающего с голубого сверхгиганта, попадет на релятивистскую звезду, вспыхнет источник «ярче тысячи Солнц».

Но как крошечная по площади нейтронная звезда может излучать такое огромное количество энергии? Очевидно, только за счет высокой температуры. Мы прикидывали, что площадь нейтронной звезды в 5 миллиардов раз меньше площади Солнца. Для того чтобы иметь светимость в 1000 раз большую, чем у Солнца, согласно закону Стефана—Больцмана необходимо иметь температуру в $\sqrt[4]{5 \cdot 10^9 \cdot 1000} \approx 1500$ раз выше, чем у Солнца. Температура нейтронной звезды должна составлять десятки миллионов градусов. Фотоны, излученные телом, нагретым до такой температуры, имеют энергию ~ 1000 эВ. А это уже рентгеновский диапазон спектра. Кванты с такой энергией не проходят сквозь атмосферу Земли. Атмосфера состоит из нейтральных атомов. Нейтральные атомы могут поглощать свет только в узких линиях спектра, при переходе с уровня на уровень. Но это справедливо только до тех пор, пока энергия влетевшего в атмосферу Земли кванта недостаточна для ионизации атомов. Энергия ионизации различных атомов составляет десятки электрон-вольт. А рентгеновский квант имеет энергию в сотни раз бóльшую. Рентгеновское излучение, проходя через воздух, ионизует его атомы и полностью им поглощается. Поэтому для регистрации рентгеновского излучения нужно выйти за плотные слои атмосферы.

В 1962 году группа американских астрофизиков, возглавляемая Риккардо Джиаккони, запустила на ракете «Аэроб-150» специальную аппаратуру для наблюдения рентгеновского излучения. «Специальная» аппаратура состояла из трех счетчиков Гейгера, способных принимать фотоны с энергией от 1600 до 6200 эВ⁸⁾.

История рентгеновской астрономии тесно переплетается — как в теоретическом, так и в аппаратном плане — с историей атомной физики. Счетчик Гейгера немногим слож-

⁸⁾ Рентгеновское излучение Солнца было открыто еще раньше, в 1948 г., с помощью ракеты, поднявшейся на высоту 200 км.

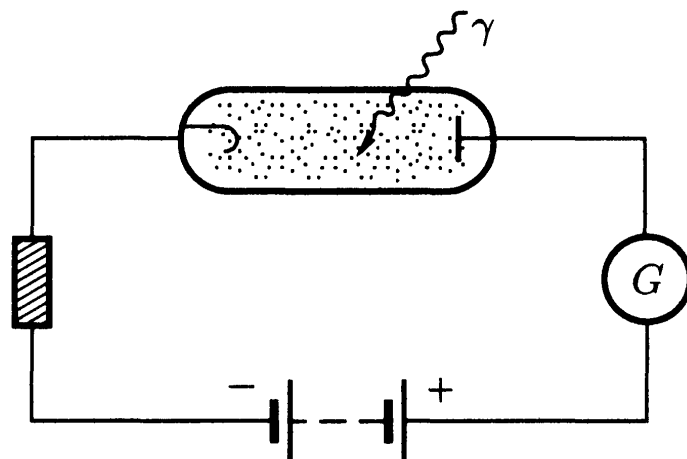


Рис. 50. Схема счетчика Гейгера

нее электрометра, с помощью которого были открыты космические лучи. Принцип работы счетчика Гейгера основан на способности рентгеновских фотонов ионизовать газ.

Представьте, что между двумя электродами, подключенными к источнику высокого напряжения, поглотился рентгеновский квант (рис. 50). Энергия кванта ушла на ионизацию атома. Освободившийся (затравочный) электрон ускоряется в электрическом поле и ионизует другие атомы, рождая целую лавину электронов, — возникает ток. Такой счетчик называют пропорциональным газоразрядным счетчиком. Пропорциональным — потому что ток на выходе пропорционален энергии поглощенного фотона (чем больше энергия фотона, тем больше количество затравочных электронов). Чтобы сделать счетчик направленным, его помещают в защитный кожух с окошечком.

Как только ракета с аппаратурой вышла за плотные слои земной атмосферы, с ее борта начали поступать сигналы, показавшие, что счетчики регистрируют переменное рентгеновское излучение. Период рентгеновского потока в точности равнялся периоду вращения ракеты вокруг своей оси. Вращение ракеты позволяло найти (хотя и грубо) направление на источник. Оказалось, что рентгеновское излучение приходит из созвездия Скорпиона. Так был открыт первый рентгеновский источник вне Солнечной системы — Скорпи-

он X-1 (X (икс) — от англ. X-ray — «рентгеновские лучи»). Рентгеновский поток был столь велик, что долгое время ученые боялись «отодвинуть» источник за пределы Солнечной системы. Так, например, если положить расстояние до него равным 1000 световых лет, то его светимость в десятки тысяч раз будет превосходить светимость Солнца.

В 1967 году Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков и независимо И. С. Шкловский предположили, что Скорпион X-1 — это двойная система, в которой нейтронная звезда перехватывает вещество, истекающее с нормальной звезды, и излучает в рентгеновском диапазоне. Но это была гипотеза, а строгих доказательств не было.

Пока рентгеновская астрономия делала первые, но обдуманные шаги, радиоастрономы случайно открыли нейтронные звезды (мы рассказывали об открытии радиопульсаров в гл. III). Это открытие подхлестнуло работу теоретиков. С 1967 по 1971 год в Советском Союзе целая группа молодых астрофизиков под руководством Я. Б. Зельдовича повела широкое наступление на проблему исследования аккрецирующих релятивистских звезд.

В 1969 году впервые было рассмотрено формирование спектра аккрецирующей нейтронной звезды. Расчеты доказывали, что нейтронные звезды должны быть источником рентгеновского излучения. Как первое приближение была рассмотрена нейтронная звезда без магнитного поля. Однако явление радиопульсаров прямо показывает, что магнитные поля у нейтронных звезд есть и они могут играть важную роль при аккреции вещества на их поверхность.

Аккрецируемое вещество в двойной системе — это плазма, прекрасно проводящая электрический ток. При характерном для двойных систем темпе аккреции магнитные поля начинают влиять на движение вещества на расстояниях в несколько тысяч километров, т. е. на расстояниях, в сотни раз превосходящих размеры самой нейтронной звезды. Вещество под действием поля начинает двигаться анизотропно.

Значит, и излучать нейтронная звезда будет анизотропно. Вращение звезды делает излучение пульсирующим!

Примерно в это же время В. Ф. Шварцман, ученик Я. Б. Зельдовича, выдвинул смелую идею о необходимости существования рентгеновских пульсаров в тесных двойных системах. Он рассуждал следующим образом. Поместим мысленно какой-нибудь радиопульсар, например радиопульсар в Крабовидной туманности, в двойную систему. Такой пульсар излучает (эжектирует) мощные потоки электромагнитных волн и релятивистских частиц. Давление эжектируемых потоков настолько велико, что все вещество звездного ветра «выметается» из двойной системы и аккреция невозможна.

Но вечно так продолжаться не может. Ведь пульсар теряет энергию вращения — значит, замедляется. По мере замедления падают его светимость и давление, отбрасывающее звездный ветер. Обязательно наступит момент, когда радиопульсар настолько «пожухнет», что аккрецирующее вещество под действием притяжения устремится к нейтронной звезде. Излучение пульсара затухло, но аккреция еще невозможна. Ей мешает быстро вращающееся магнитное поле нейтронной звезды. Оно, подобно гигантскому пропеллеру, разбрасывает вещество, не давая ему упасть. Этот эффект позже был назван А. Ф. Илларионовым и Р. А. Сюняевым эффектом пропеллера. Отбрасывая вещество, пульсар продолжает тормозиться, и наконец, аккреция становится возможной. Вещество устремляется на магнитные полюса нейтронной звезды, где выделяется гигантская энергия. Вспыхивает рентгеновский пульсар, источник энергии которого — аккреция.

Этот сценарий казался слишком смелым и многими специалистами был воспринят весьма пессимистично. Одновременно молодой астрофизик Н. И. Шакура рассмотрел дисковую аккрецию на черную дыру и доказал, что черная дыра в двойной системе должна быть источником рентгеновского излучения. Буквально через год все эти результаты были

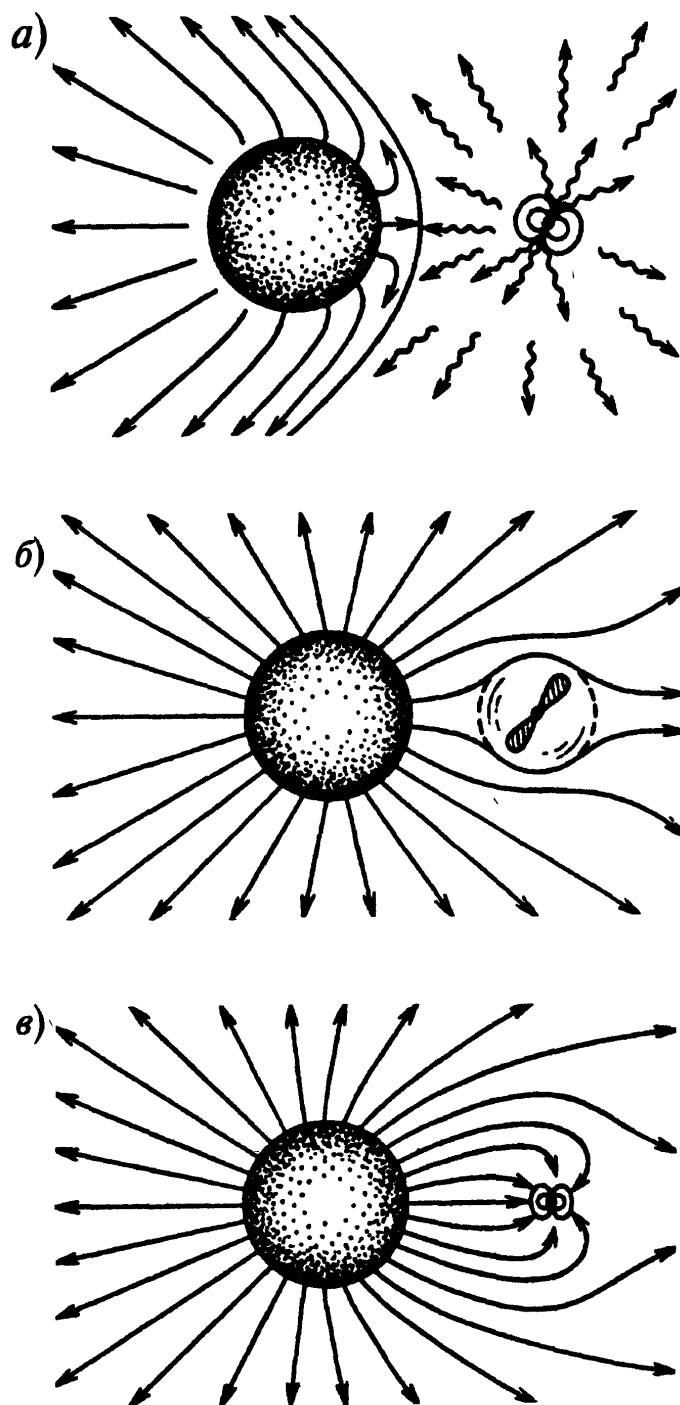


Рис. 51. Три состояния нейтронной звезды в двойной системе: а — эжектирующий пульсар; б — «пропеллер»; в — аккрецирующая нейтронная звезда

великолепно подтверждены наблюдениями с борта американского рентгеновского спутника «Ухуру».

Работы, выполненные советскими астрофизиками до запуска «Ухуру», объясняли практически все основные черты и свойства рентгеновских источников, открытых в 70-е годы прошлого века. Чтобы дать почувствовать вклад советских

ученых, достаточно сказать, что все работы, посвященные аккрецирующим нейтронным звездам до запуска «Ухуру», были выполнены в СССР.

3. «Ухуру»

12 декабря 1970 года с территории Кении был запущен первый специализированный рентгеновский спутник «Ухуру». Ухуру на языке суахили означает «свобода». На этом спутнике были установлены рентгеновские счетчики, которые могли зафиксировать источник в 10 000 раз слабее Скорпиона X-1. Можно сказать, что с запуском этого спутника человечество стало видеть в рентгеновском диапазоне.

За несколько лет наблюдений с помощью этого спутника было открыто более 300 рентгеновских источников.

Особое внимание привлекли к себе наиболее яркие рентгеновские источники. Некоторые из них, как и предсказывали советские астрофизики, пульсировали. Одним из первых был открыт рентгеновский пульсар Центавр X-3. Его период оказался равным 4,8 секунды. Кривая блеска рентгеновского пульсара (см. рис. 52) сильно отличается от кривой блеска радиопулсара. Кривые блеска радиопулсаров (напоминающие старую расческу) имели очень тонкие импульсы. Импульсы рентгеновского пульсара менее выражены, и их кривая блеска, скорее, похожа на края мехов гармошки. Это означает, что луч «прожектора» рентгеновского пульсара значительно шире, чем у радиопулсара.

Вскоре было замечено, что импульсы от пульсара приходят то чаще, то реже. Как будто кто-то играет на гармошке, периодически сжимая и разжимая меха. Эта «игра» с периодом 2,087 дня была легко разгадана. Излучение пульсара — процесс периодический, и как всякий периодический процесс, он подвержен эффекту Доплера. Когда пульсар приближается к нам, период пульсаций уменьшается (гармошка

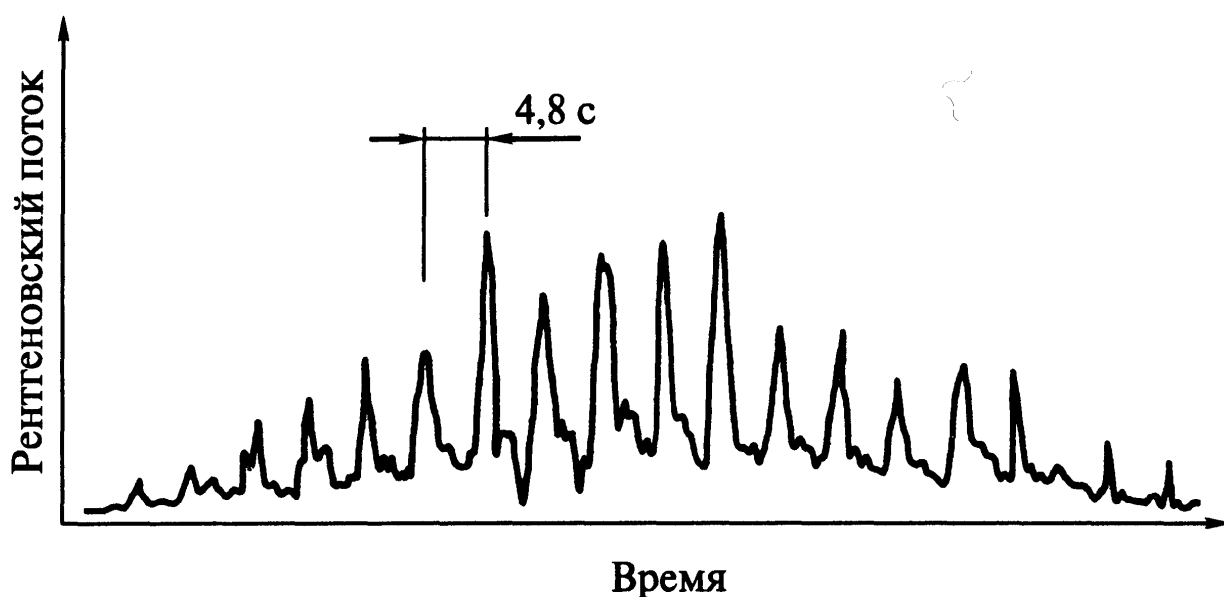


Рис. 52. Запись рентгеновских импульсов от пульсара Центавр X-3 (модуляция обусловлена вращением приемника)

сжимается), и наоборот, при удалении его импульсы приходят реже.

Так была доказана двойственность рентгеновского пульсара. Выяснилось также, что рентгеновское излучение каждые 2,087 дня исчезает. Сравнение рентгеновской кривой блеска и кривой лучевых скоростей пульсара не оставляло сомнений, что пульсар периодически затмевается второй, большей звездой (рис. 53).

Рентгеновская аппаратура не позволяет точно определять координаты источника, а лишь дает некоторую область (квадрат ошибок), внутри которой этот источник должен находиться. Вскоре вблизи квадрата ошибок Центавра X-3 была найдена звезда, которая меняла свой блеск с периодом 2,096 дня. Небольшое расхождение можно было объяснить неточностями в определении оптической кривой блеска. Такое объяснение и было принято поначалу. Однако по мере накопления наблюдательных данных разница в рентгеновском и оптическом периодах не уменьшалась. Теоретикам пришлось бы много попотеть над этой проблемой, если бы не польский астроном Войцех Кшемминский. В 1974 году поодаль от квадрата ошибок, даваемого «Ухуру», бы-

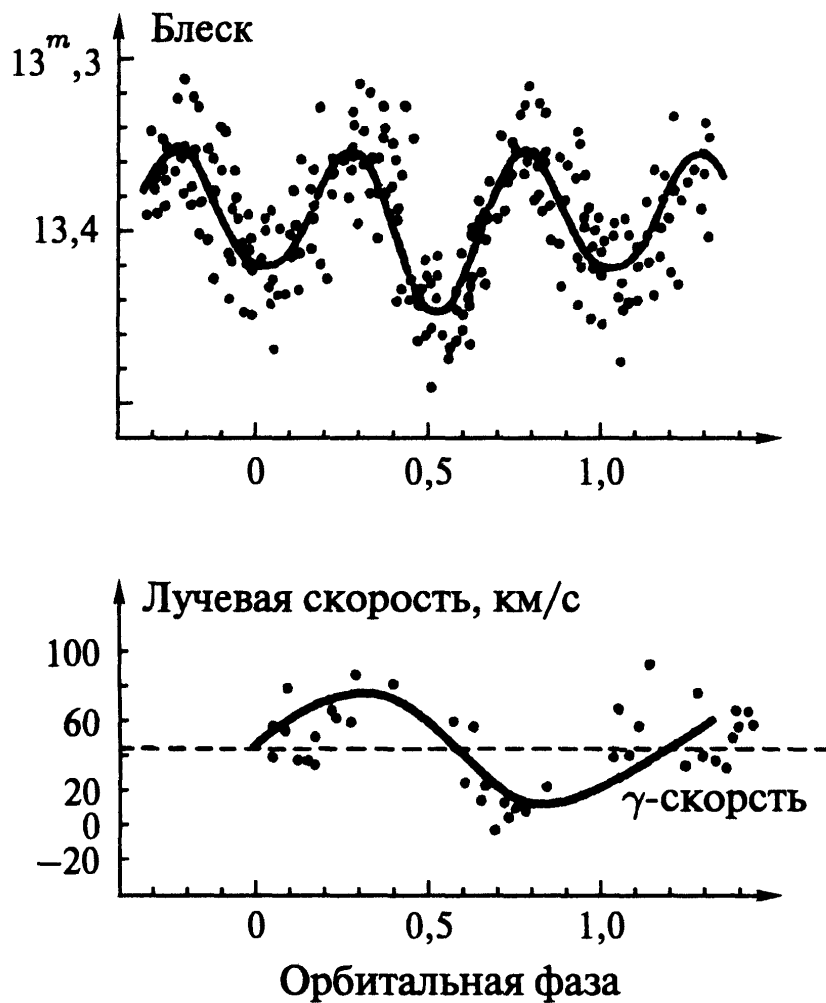


Рис. 53. Кривые блеска и лучевых скоростей
оптической компоненты Центавра X-3

ла найдена звезда, которая меняла свой блеск в точности с тем же периодом, что и рентгеновский пульсар. Соседом пульсара оказался голубой сверхгигант с массой примерно $20M_{\odot}$. Прекрасное подтверждение всей теории: массивная двойная, голубой сверхгигант с интенсивным звездным ветром и нейтронная звезда — пульсар. К настоящему времени (1984 г.) открыто около 20 рентгеновских пульсаров, большая часть которых входит в состав массивных двойных систем (см. табл. 2).

Когда были открыты первые рентгеновские пульсары, сами открыватели еще сомневались в выборе принципа их действия. Многие находились под впечатлением радиопульсаров. Но вскоре сомнения развеялись. Периоды рентгеновских пульсаров не увеличивались, как у радиопульса-

Таблица 2

Рентгеновские пульсары

Название	Период пульсаций, с	Орбитальный период, дни	Нормальная компонента	Характерное время ускорения, годы	Светимость, L/L_{\odot}
A 0538-66	0,069	16,66	Be		200 000
SMC X-1	0,71	3,892	BO I	1400	150 000
Her X-1	1,24	1,7	HZ Her	340 000	2500
H 0850-42	1,8				
4U 0115 + 63	3,61	24,31	B	30 000	2500
V 0332 + 53	4,4	34	Be	200	
Cen X-3	4,84	2,087	O6 II-III	3400	12 000
IE 2259 + 59	6,98	0,03			2000
4U 1627-67	7,68	0,0288	KZ Tra	5000	2000
2S 1553-54	9,26	30,07 (?)			
LMC X-4	13,5	1,408		>1000	88 000
2S 1417-62	17,6	>15			$\lesssim 10 000$
OA0 1653-40	38,2			200	>100
A 0535 + 26	104	111 (?)	O9,7 IJe	1000	5000
GX 1 + 4	122	>15	M6 IIIe	47	10 000
4U 1230-61	191				
GX 304-1	272	135 (?)	B0-B5		500
Vela X-1	283	8,965	O-B	3000	350
4U 1145-61	292	187 (?)		>1000	75
IE 1145,1-614	297	>12	HE N 715	>300	750
A 1118-61	405		Мирида		1200
4U 1907 + 09	438	8,4	O-B		
4U 1538-52	529	3,73	BO I	≥ 500	1200
GX 301-2	696	41	A 977	≥ 100	2500
X Per	835	580 (?)	O9	1400	2,5

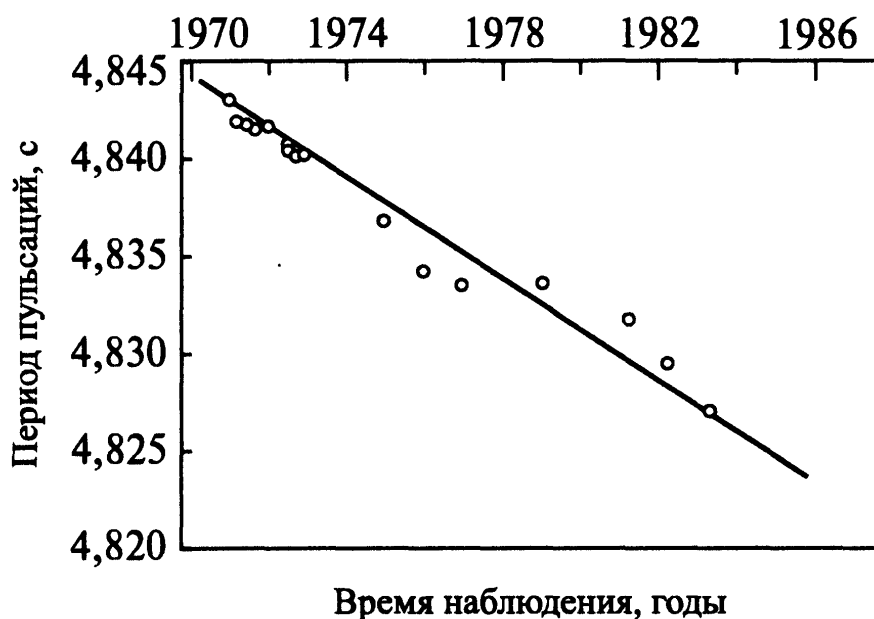


Рис. 54. Изменение периода рентгеновского пульсара Центавр X-3

ров, а уменьшались (см. рис. 54). Единственным механизмом, способным объяснить свечение рентгеновских пульсаров, оказалась аккреция.

4. В звездном ветре

Оптическая кривая блеска звезды Кшеминского (рис. 53) представляет собой двойную волну с амплитудой $\sim 0^m,1$. Это — эффект эллипсоидальности плюс слабое затмение. Но маленькая нейтронная звезда не может затмевать сверхгигант. А так как сама нейтронная звезда практически не излучает в оптическом диапазоне, то такая система не может быть затменной в видимом свете. Однако слабое затмение наблюдается: вторичный минимум глубже первичного. Нормальная звезда, по-видимому, затмевается полупрозрачным аккреционным потоком вокруг нейтронной звезды. Используя видимую и рентгеновскую кривые блеска, а также кривые лучевых скоростей, найденные по спектральным линиям оптической звезды и по изменению периода рентгеновского пульсара, удалось довольно точно определить многие параметры двойной. Схема ее показана на рис. 55.

Оптическая звезда очень близка к полости Роша, но не заполняет ее. Такое явление наблюдается еще у нескольких рентгеновских пульсаров. Казалось, это прямо свидетельствует о том, что здесь происходит перетекание вещества через внутреннюю точку Лагранжа («гравитационный ветер»). По видимому, это не так.

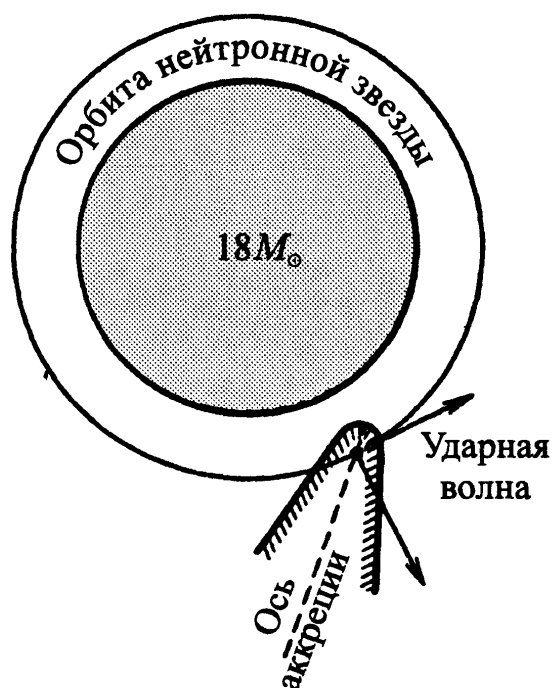


Рис. 55. Двойная система рентгеновского пульсара Центавр X-3

Впоследствии были открыты двойные системы с яркими рентгеновскими пульсарами, в которых оптические звезды далеко не заполняют полости Роша. Вероятно, главную роль во всех этих системах играет звездный ветер. Нейтронная звезда захватывает своим гравитационным полем часть вещества из звездного ветра (см. рис. 55). Мы

уже убедились в том, что для обеспечения наблюдаемой светимости пульсаров — несколько тысяч светимостей Солнца — достаточно, чтобы нейтронная звезда захватывала всего лишь тысячную или десятитысячную долю истекающего от нормальной звезды вещества. Возможно, в некоторых случаях к звездному ветру добавляется слабый «гравитационный сквознячок».

Что происходит дальше с захваченным веществом? Вооружившись воображаемым всеволновым телескопом, будем рассматривать такую двойную под все бóльшим и бóльшим увеличением. Размер двойной системы, т. е. размер орбиты нейтронной звезды в такой системе — порядка 10 миллионов километров. Того же порядка и размер нормальной звезды. Размер «паруса», которым нейтронная звезда захватывает звездный ветер, примерно в 100 раз меньше, но все же достигает нескольких сотен тысяч километров. С подветрен-

ной стороны нейтронной звезды образуется конусообразная ударная волна. Ударные волны возникают при сильных возмущениях жидкости или газа. Представим себе тело, движущееся в газе. На границе тела газ слегка уплотнен. Это уплотнение начинает распространяться по газу со скоростью звука. Если тело движется со сверхзвуковой скоростью, то оно будет обгонять «возмущения», которые сосредоточены вдоль конуса с вершиной вблизи поверхности тела. Вне конуса газ покоится — ведь он еще ничего «не знает» о теле. Внутри конуса газ увлечен телом. Следовательно, на стенках конуса происходит резкий скачок скорости, а значит, и плотности газа. Проходя стенку конуса, газ как бы испытывает удар. Так как нейтронная звезда еще и сама движется, кильватерный след поворачивается вдоль вектора разности скоростей нейтронной звезды и звездного ветра. Захваченное нейтронной звездой вещество устремляется к ней. Однако прямо оно не падает. Ему мешает вращательный момент, вызванный орбитальным движением. В некоторых случаях вращательный момент оказывается столь велик, что вокруг нейтронной звезды образуется аккреционный диск. В других же случаях траектория аккрецируемого вещества лишь слегка подкручивается.

5. Как работает рентгеновский пульсар

Аккрецируемое вещество представляет собой хорошо проводящую электрический ток плазму. Идеальный проводник обладает свойством не пропускать в себя внешние магнитные поля — это свойство называется диамагнетизмом. Диамагнетизм плазмы можно понять следующим образом. Допустим, внешнее магнитное поле проникло внутрь плазмы (см. рис. 56). В плазме много свободных электронов. Под действием силы Лоренца они начинают вращаться в магнитном

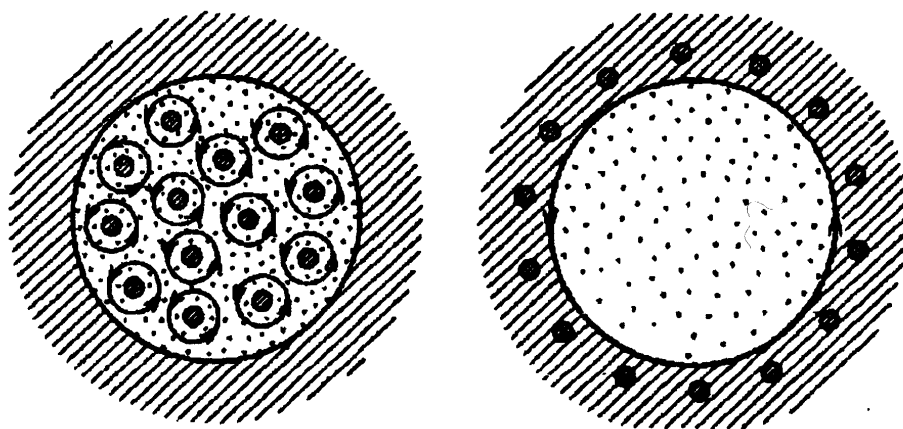


Рис. 56. Диамагнетизм плазмы

поле, причем все в одном направлении. Каждый такой электрон создает маленький кольцевой ток. Складываясь с соседним, он взаимно компенсируется. Некомпенсированным остается только поверхностный ток. Этот ток внутри плазмы создает магнитное поле, равное по значению и противоположное по направлению к внешнему полю. Суммарное поле внутри обращается в нуль. Получается, как будто плазма вытолкнула из себя силовые линии магнитного поля.

Для аккрецируемой плазмы «внешним» оказывается магнитное поле нейтронной звезды, но при этом оно находится внутри! Плазма, падая на нейтронную звезду, сжимает ее магнитное поле (см. рис. 57). Но поле сопротивляется сжатию. Собственное давление магнитного поля очень быстро нарастает при приближении к нейтронной звезде. На расстояниях порядка нескольких тысяч километров сила давления магнитного поля сравнивается с силой гравитации нейтронной звезды. Здесь формируется магнитосфера нейтронной звезды.

Но как же вещество проникает на поверхность нейтронной звезды? Происходит это благодаря различным гидромагнитным неустойчивостям. Плазма не может пройти через силовые линии, но она может их раздвинуть. Если аккреционный диск не образовался, плазма скапливается на магнитосфере нейтронной звезды. Магнитное поле во многом напоминает упругую «жидкость», на которой в поле тяжести

нейтронной звезды «лежит» другая «жидкость» — плазма. Остывая, плазма уплотняется и становится «тяжелой». Тут срабатывает та же неустойчивость, что и в чайнике, и в конвективной оболочке звезды — неустойчивость Рэлея—Тейлора. Тяжелая жидкость (плазма) стремится поменяться местами с магнитным полем. Плазма в виде гигантских капель (размер их достигает сотен километров), раздвигая силовые линии, просачивается внутрь магнитосферы нейтронной звезды. Дальше капли дробятся на более мелкие. Распыление приводит к тому, что электроны и ионы начинают чувствовать магнитное поле. Поперек поля они двигаться не могут. Им остается только одно — скатываться по силовым линиям на магнитные полюса нейтронной звезды. Там, ударяясь о твердую поверхность нейтронной звезды со скоростью 100 000 км/с, плазма нагревается до гигантской температуры в миллиарды градусов. (Вот вам и место «погорячее»!) На маленьком пятачке размером менее одного квадратного километра выделяется вся энергия рентгеновского пульсара (точнее, ее половина, ведь полюсов два) — тысячи светимостей Солнца.

Если вокруг нейтронной звезды образуется диск, неустойчивость Рэлея—Тейлора не «работает». Вещество, вращающееся вокруг звезд, ничего не весит! Но возникает другая, магнитогидродинамическая неустойчивость. Тонкий аккреционный диск «пережимает» магнитное поле, как показано на рис. 58. Особенно сильно возрастает напряженность магнитного поля у внутреннего края диска. Силовые линии стремятся распрямиться. Это возможно только в том случае,

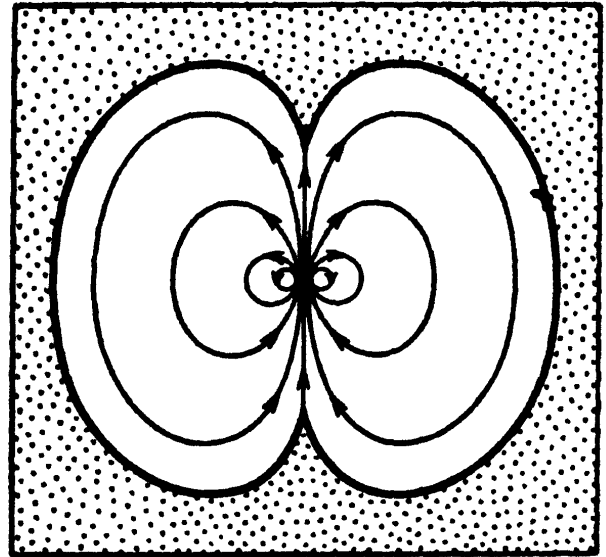


Рис. 57. Магнитосфера нейтронной звезды в случае радиальной аккреции

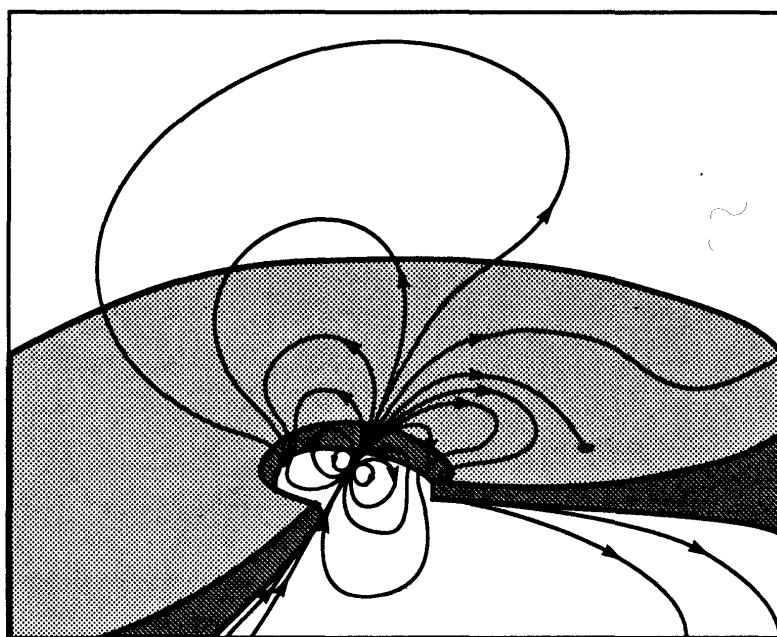


Рис. 58. Структура магнитного поля в случае дисковой аккреции

если плазма и поле поменяются местами. Вследствие такой перестановочной неустойчивости плазма небольшими сгустками поступает в магнитосферу нейтронной звезды, дробится и «вмораживается» в силовые линии магнитного поля. Как по рельсам, плазма скатывается на магнитные полюса нейтронной звезды.

Поверхность диска покрыта волнами. Их происхождение связано с так называемой неустойчивостью Кельвина—Гельмгольца. С этой неустойчивостью мы сталкиваемся каждый день. Благодаря ей возникают волны на воде, развеваются паруса, флаги и занавески на окнах. Возникновение неустойчивости легко понять. Пусть имеются две жидкости — одна неподвижна, а другая течет параллельно их плоской границе (тяжести нет). Граница неподвижна — все силы уравновешены. Изогнем слегка границу. Давление в покоящейся жидкости не изменится, следовательно, не изменится и сила, действующая со стороны неподвижной жидкости на границу раздела. А вот сила давления со стороны текущей жидкости уменьшится. На обтекающую выступ жидкость начинает действовать центробежная сила. Выступ увеличивается — значит, граница неустойчива. На реке роль теку-

щей жидкости играет ветер. Поверхность реки покрывается рябью. Высота волн ограничена силой тяжести.

На поверхности аккреционного диска роль «ветра» выполняет быстро вращающееся магнитное поле нейтронной звезды. «Волны» поднимаются на высоту в десятки километров. Брызги плазмы смешиваются с магнитным полем. В общем, возникает картина в духе Айвазовского.

Основная доля энергии пульсара выделяется на магнитных полюсах нейтронной звезды в сильном магнитном поле порядка 10^{12} – 10^{13} Гс. Напомним, что напряженность магнитного поля у Земли примерно 1 Гс. Излучение в столь сильном поле анизотропно. Нейтронная звезда двумя рентгеновскими лучами, подобно гигантскому вращающемуся прожектору, освещает Вселенную. Периодически луч попадает на Землю, и тогда мы видим пульсар.

6. Почему нейтронные звезды?

Большинство рентгеновских пульсаров имеют периоды более 100 секунд. Почему мы уверены, что это нейтронные звезды? Конечно, никакая нормальная звезда не может столь быстро вращаться. При таком быстром вращении центробежные силы попросту разорвут огромную звезду. Но существуют белые карлики, размеры которых (всего несколько тысяч километров) позволяют им вращаться с периодом вплоть до нескольких секунд.

Первое время наивно предполагали, что рентгеновское излучение характерно лишь для черных дыр и нейтронных звезд. Но в середине 70-х годов прошлого века было открыто пульсирующее излучение от белых карликов в системах типа АМ Геркулеса — полярах (о них мы будем говорить в следующей главе). Следовательно, ни скорость вращения, ни наличие рентгеновского излучения еще не являются свидетельством того, что мы имеем дело с нейтронной звездой.

И все же надежный критерий существует.

На помощь здесь приходит то обстоятельство, что пульсары ускоряются. Именно это свойство «угробило» радиопульсарную модель извлечения энергии. Мы уже неоднократно говорили, что вещество, захваченное аккрецирующей звездой в двойной системе, обладает относительно нее вращательным моментом. Падая на звезду, вещество ускоряет ее вращение. Именно поэтому пульсары и ускоряются. Точное значение ускоряющего момента сил зависит от многих заранее неизвестных параметров. Например, от магнитного поля нейтронной звезды. Но существует ограничение на ускоряющее действие падающего вещества, не зависящее ни от каких предположений о деталях процессов, а зависящее только от периода вращения звезды и темпа аккреции. Качественно это понятно. Если бы вещество обладало неограниченно большим вращательным моментом, оно не падало бы на поверхность нейтронной звезды и не отдавало бы ей свой момент. Период пульсара известен, а темп аккре-

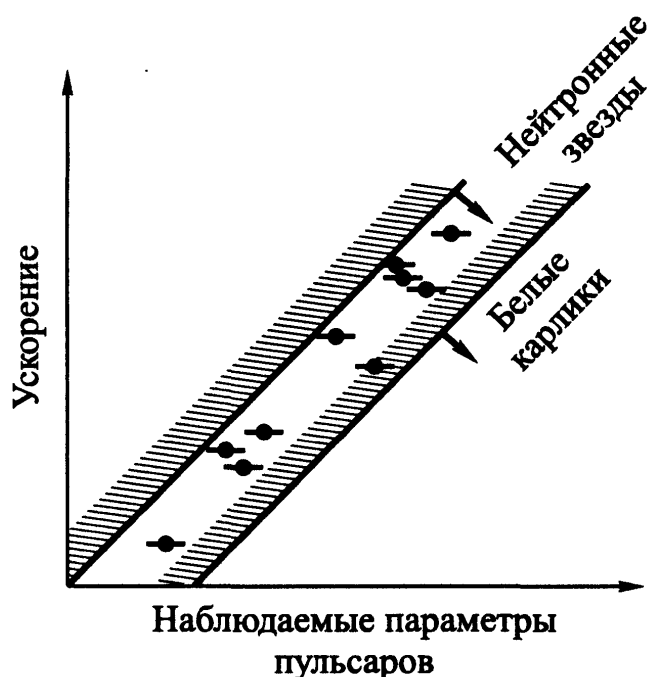


Рис. 59. Значение ускорения вращения рентгеновских пульсаров доказывает, что они являются нейтронными звездами

ции можно найти по его светимости, используя формулу (14). Но чем меньше размер звезды, тем быстрее она ускоряется при данном ускоряющем моменте. Нейтронные звезды в сотни раз меньше белых карликов. Значит, для нейтронных звезд предельное ускорение намного выше, чем для белых карликов.

В качестве меры ускорения вращения пульсара обычно принимают величину, показывающую, насколько меняется его период за год. Ко-

гда сравнили наблюдаемое у пульсаров ускорение с максимальным пределом для нейтронных звезд и белых карликов, ответ оказался однозначным (для тех пульсаров, у которых измерено ускорение) — все они ускоряются быстрее, чем положено белым карликам (рис. 59). Это не оставляет сомнений в том, что здесь мы имеем дело именно с нейтронными звездами.

7. «Дискология»

Одним из важнейших следствий общей теории относительности Эйнштейна является возможность существования черных дыр. До искусственного получения черных дыр в лаборатории еще далеко, поэтому ученые ищут естественные черные дыры. Но как их искать? По какому признаку? Положим, отличить черную дыру от нормальной звезды нетрудно (и то не всегда! См. гл. VII.). А вот как ее отличить от белого карлика или от нейтронной звезды? Последняя особенно «неприятна» в этом смысле. Размеры нейтронных звезд составляют всего лишь 2–3 гравитационных радиуса. На этих расстояниях гравитационное поле нейтронной звезды ничем не отличается от поля черной дыры. Можно было бы сказать, что вот, мол, у черной дыры есть горизонт событий, за который все безвозвратно проваливается. Но вспомним, что для нас (удаленных наблюдателей) коллапсирующая звезда никогда не уходит за горизонт! Действует замедление времени в гравитационном поле.

По какому же признаку искать черную дыру? Единственным надежным отличием черной дыры является ее масса. Мы знаем, что масса нейтронной звезды не может быть больше предела Оппенгеймера—Волкова. А масса черной дыры может быть любой. Ситуация омрачается тем, что до сих пор неизвестно точное значение предела Оппенгеймера—Волкова. «Адвокаты дьявола» доводят его до $8M_{\odot}$. Но, по-

видимому, наиболее вероятное его значение лежит в пределах от $1,5$ до $3M_{\odot}$.

Еще в середине 60-х годов прошлого века советские астрофизики предложили искать черные дыры по признаку их массы. Звезды можно «взвешивать» только в двойных системах. Если вы найдете темный (не излучающий) спутник с большой массой, это может быть черная дыра. Такой метод последовательного перебора требует больших затрат. Остап Бендер и его друзья искали бриллианты, последовательно перебирая все стулья, но стульев было всего 12 и вероятность от стула к стулу росла! (По крайней мере, Бендер в это верил.)

Ясно, что искать черные дыры нужно было по какому-то яркому признаку. В 1972 году вышла работа Н. И. Шакуры, в которой он показал, что аккреционный диск вокруг черной дыры должен быть источником рентгеновского излучения. В диске идея о столкновении вещества самого с собой реализуется следующим образом. Вещество диска участвует в трех движениях. Первое — это мелкое хаотическое запутанное движение, называемое турбулентностью. Турбулентность возникает при быстрых перемещениях жидкости и газа. Хорошо известен пример — турбулентный кильватерный след за катером на реке. Но в диске эти движения усредняются. Вещество как целое вращается вокруг тяготеющего тела по кеплеровским законам, т. е. дифференциально. Это второе движение. Эти два движения рожают третье. Соседние кольца вращаются с разной угловой скоростью. Турбулентные вихри соседних колец сталкиваются друг с другом, обмениваясь импульсом. Другими словами, трутся друг о друга. Внутренние кольца отдают вращательный момент внешним. Для частиц внутреннего кольца нарушается второй закон Кеплера, и они потихоньку приближаются к центру диска. Но «щель Кассини» не образуется, на место «съехавшего» к центру вещества подходит новое, отдавая свой вращательный момент еще более далекому от центра кольцу. Появля-

ется общее радиальное движение вещества к центру, сопровождающееся переносом вращательного момента наружу.

Такие турбулентные диски впервые рассмотрел немецкий физик Карл Вейцекер еще в 1944 году в связи с проблемой образования Солнечной системы. В 1964 году советский астрофизик В. Г. Горбацкий исследовал турбулентные дискообразные оболочки в двойных системах с обменом массы. Английский астрофизик Дональд Линден-Белл впервые рассмотрел дисковую аккрецию на черную дыру гигантской массы — порядка $10^6 M_{\odot}$.

Так зародилась новая наука — наука об аккреционных дисках. Ее (пока в шутку) называют дискологией. Долгое время камнем преткновения для всей дискологии был вопрос турбулентности, о ее величине и характере, от которого зависит очень многое и о котором ничего нельзя было сказать. Вообще проблема турбулентности — это один из труднейших вопросов физики. Физики открыли общую теорию относительности, релятивистскую квантовую теорию, изобретают теорию «великого объединения» всех физических полей. А ответить на вопрос, как при некоторой скорости движения возникает турбулентность в жидкости и газе, до конца не могут.

Плохое знание турбулентности очень мешало развитию дискологии. Возможно, она бы так и оставалась в зачаточном состоянии, если бы Н. И. Шакура в 1972 году не обошел эту трудность, включив все наше незнание турбулентности в один неизвестный параметр — некоторое безразмерное число α . (Поэтому модель дисковой аккреции иногда называют α -моделью.) В 1973 году Н. И. Шакура и Р. А. Сюняев, используя это упрощение, решили уравнения дисковой аккреции, после чего в дискологии начался настоящий бум. С этого времени каждый год выходят сотни работ, в которых так или иначе обсуждаются аккреционные диски. Сейчас даже есть попытка объяснить образование Солнечной системы в рамках стандартной теории дисковой аккреции.

Как выглядит аккреционный диск вокруг черной дыры? Вещество по сильно закрученной спирали приближается к его центру. По мере приближения к черной дыре нарастает не только частота вращения (кстати, строго по третьему закону Кеплера), но и различие в скорости вращения соседних колец диска. Трение нарастает, а от трения вещество нагревается. На расстоянии нескольких десятков гравитационных радиусов температура поднимается до ста миллионов градусов (см. формулу (12)). В этой зоне и выделяется почти вся энергия аккреционного диска. Когда мы потираем руки, выделяется мышечная энергия. А в аккреционном диске работу совершает сила гравитации черной дыры. Внутренняя граница диска расположена на расстоянии трех (а не одного) гравитационных радиусов. В случае нейтронной звезды диск разрушается магнитным полем, а что разрушает диск вокруг черной дыры, да еще так далеко от самой черной дыры?

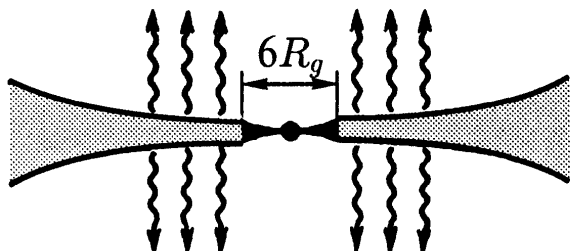


Рис. 60. Аккреционный диск вокруг черной дыры

Строго говоря, на расстоянии $3R_g$ диск не разрушается. Просто вещество, начиная с этого расстояния, свободно (т. е. без трения) падает в черную дыру. Оказывается, что устойчивых круговых орбит не существует на расстояниях ближе

трех гравитационных радиусов. На близких расстояниях сила притяжения черной дыры растет гораздо быстрее, чем по закону $1/R^2$, и центробежная сила не в состоянии противостать ей. Поэтому, достигая расстояния трех гравитационных радиусов, вещество без трения отрывается от диска и, уже не нагреваясь и не успевая ничего излучить, падает в черную дыру.

Внутренние части диска очень неустойчивы. Диск разбивается на отдельные горячие области — пятна. Пятна с гигантской скоростью вращаются вокруг черной дыры. Характерное время обращения — 1 миллисекунда. Эти пятна,

появляясь и исчезая, для наблюдателя должны создавать картину беспорядочной хаотической переменности рентгеновского излучения. Именно такое явление было открыто у рентгеновского источника Лебедь X-1.

8. Лебедь X-1 и другие черные дыры

Источник Лебедь X-1, как и рентгеновские пульсары, является одним из наиболее ярких рентгеновских источников в Галактике. Но в отличие от рентгеновских пульсаров излучение Лебеда X-1 не пульсирует, а хаотически меняется на очень коротких временах ($\sim 10^{-3}$ с). Эта переменность наблюдалась американскими астрофизиками в начале 70-х годов прошлого века (см. рис. 61). Ясно было, что столь мощный рентгеновский источник может быть только в двойной системе. Но установить двойственность по рентгеновскому излучению не удавалось — в системе не было рентгеновских затмений. Нам не повезло: по-видимому, угол наклона i системы слишком мал. Астрономы начали искать в квадрате ошибок какую-нибудь подходящую оптическую звезду — вторую компоненту двойной системы. Их внимание привлекла переменная звезда, сверхгигант класса В0 — V1357 Лебеда. Американские астрономы нашли, что эмиссионные линии в спектре этой звезды «ходят» с периодом



Рис. 61. Запись рентгеновского потока от источника Лебедь X-1

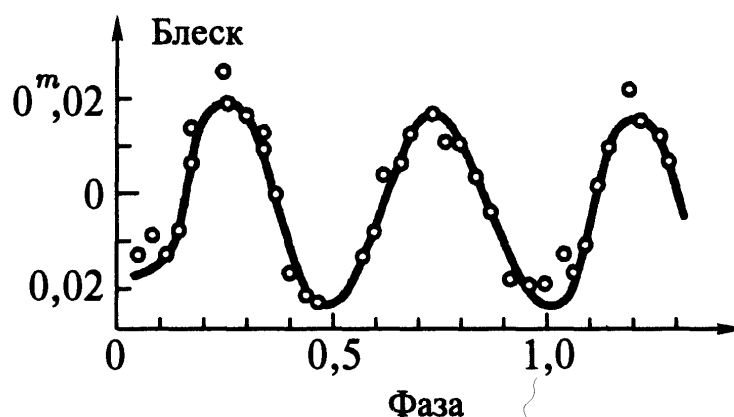


Рис. 62. Оптическая кривая блеска звезды V1357 Лебедя

5,6 дня. Вскоре советский астроном В. М. Лютый установил, что V1357 Лебедя меняет свой блеск с тем же периодом. Кривая блеска этой переменной показана на рис. 62 и представляет собой «двойную волну». Она напоминает кривую β Лиры, но с той разницей, что у V1357 оба минимума одинаковы. Это — чистый эффект эллипсоидальности. Придя к такому выводу, советские астрофизики посчитали, что для объяснения наблюдаемой вытянутости нужно, чтобы масса второй звезды была не меньше $5M_{\odot}$. Напомним, что эффект эллипсоидальности позволяет оценить отношение масс. Однако масса сверхгиганта ($\sim 20M_{\odot}$) была найдена по спектру.

Вскоре удалось уточнить кривую лучевых скоростей. Оказалось, что функция масс в этой системе равна

$$\frac{M_x^3 \sin^3 i}{(M_0 + M_x)^2} = 0,2M_{\odot}.$$

Подставляя сюда массу сверхгиганта $M_0 = 20M_{\odot}$, найдем, что минимальная масса (при угле наклона $i = 90^\circ$) невидимого спутника равна⁹⁾ $5M_{\odot}$. Но угол заведомо меньше, ведь

⁹⁾ Трудно решить такое трансцендентное уравнение. Но здесь помогает метод Ньютона (метод последовательных приближений). Преобразуйте формулу к виду $M_x = [0,2(M_0 + M_x)^2]^{1/3}$. Далее подставьте в правую часть $M_x = 0$, найдите с помощью микрокалькулятора M_x и найденное значение опять подставьте в правую часть. Повторив это несколько раз, вы получите ответ с точностью до последнего разряда вашего калькулятора.

рентгеновских затмений нет. С учетом этого масса рентгеновской звезды оказывается равной $\sim (12 \div 15)M_{\odot}$.

Вспомнив историю с поисками оптической компоненты рентгеновского пульсара Центавр X-3, можно понять, почему астрономов иногда терзают сомнения: а вдруг этот голубой сверхгигант случайно проектируется на рентгеновский источник Лебедь X-1? Это усугубляется тем, что долгое время Лебедь X-1 был единственным надежным кандидатом в черные дыры. Время от времени появлялись другие кандидаты, но либо вдруг у них обнаруживалось строго пульсирующее рентгеновское излучение, либо оказывалось неправильным оптическое отождествление.

В 1983 году появился второй надежный кандидат в черные дыры — LMC X-3. Он был найден в спутнике нашей Галактики — Большом Магеллановом Облаке (Large Magellanic Cloud — LMC (*англ.*)). Сам рентгеновский источник был зарегистрирован еще спутником «Ухуру». Источник LMC X-3 очень нестабильный; он то «включается», то «выключается». Рентгеновские затмения, как и у Лебеда X-1, не обнаружены. В 1983 году американские астрономы заметили колебания лучевой скорости у вероятной оптической компоненты, звезды типа В3, с периодом 1,7 дня. Полуамплитуда колебаний лучевой скорости составляет около 235 км/с, что соответствует функции масс $2,3M_{\odot}$. Если учесть, что масса оптической звезды не менее $3M_{\odot}$, то масса невидимой компоненты должна быть не меньше $(3 \div 4)M_{\odot}$, что уже превышает вероятный предел Оппенгеймера—Волкова.

Остаются, правда, сомнения в правильности оптического отождествления. Хотя из 10 звезд, попадающих в квадрат ошибок рентгеновского источника, лишь звезда В3 принадлежит Большому Магелланову Облаку (БМО), ниоткуда не следует, что сам рентгеновский источник принадлежит БМО. Исследования продолжаются.

9. Вернемся к сценарию

Еще в начале 70-х годов прошлого века советские астрофизики А. В. Тутуков и Л. Р. Юнгельсон и независимо голландский астрофизик Эдвин Ван ден Хёвел связали массивные рентгеновские двойные с особой стадией эволюции тесной двойной системы. Сразу после образования релятивистской звезды в двойной системе нормальная звезда еще находится на главной последовательности (см. рис. 63 а). Звездный ветер такой звезды еще слаб, поэтому слаб темп аккреции на релятивистскую звезду и невелико ее рентгеновское излучение. Лишь с уходом звезды с главной последовательности к голубым сверхгигантам резко возрастает мощность звездного ветра (до значений $\sim 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$). В этот момент и вспыхивает яркий рентгеновский источник со светимостью, равной тысячам светимостей Солнца (см. рис. 63 б).

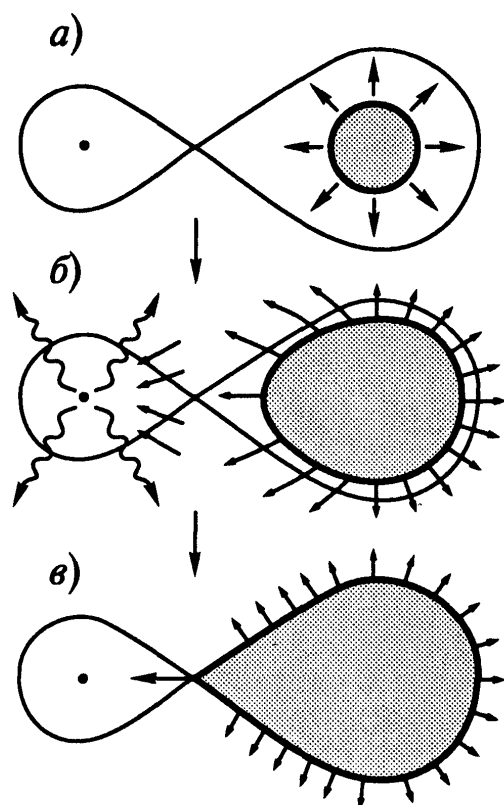


Рис. 63. Три стадии эволюции двойной системы после первого взрыва

Такая картина неплохо согласуется с наблюдениями рентгеновских систем. Многие компоненты рентгеновских источников — звезды, сошедшие с главной последовательности.

Но есть массивные двойные, где нормальная звезда — не сверхгигант, и тем не менее рентгеновский источник очень яркий. Это системы типа пульсара A0535+26 (в названии первой стоит буква «А», потому что источник наблюдался с европейского спутника «Ариэль», а дальше следуют координаты источника на небесной сфере: $\alpha = 05^{\text{h}}35^{\text{m}}$, $\delta = +26^{\circ}$). Но оптические звезды в этих системах все же не-

обычны. Все они принадлежат к классу быстро вращающихся Ве-звезд¹⁰⁾. Истечение этих звезд резко нестационарно и анизотропно. Вещество неоднородными сгустками срывается с экватора быстро вращающейся звезды и захватывается гравитационным полем релятивистского спутника. Эти источники работают временами. Поэтому их называют «временными», а еще — на английский манер — транзиентными (от англ. transient — приходящий, временный, транзитный).

Окончательное место в теории эволюции двойных эти звезды еще не заняли. Не исключено, что быстрое вращение Ве-звезды приобретают при первом обмене масс. При этом первом обмене нормальная звезда, на которую перетекает вещество, ускоряется подобно рентгеновскому пульсару. После коллапса релятивистская звезда «забирает» обратно свое вещество, когда-то «одолженное» соседке. По-видимому, это может происходить в виде звездного ветра и в виде истекающего с экватора потока.

Но есть еще один путь — второй обмен массой через внутреннюю точку Лагранжа. Рано или поздно вторая звезда тоже должна заполнить полость Роша (рис. 63 в). При этом вещество будет перетекать в тепловой шкале времени (перетекание идет с большей звезды на меньшую). Темп аккреции на релятивистскую звезду будет равен (см. формулу (11))

$$\dot{M} = 3 \cdot 10^{-8} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^3 M_{\odot}/\text{год}. \quad (17)$$

При массе оптической звезды $M = 20M_{\odot}$ темп перетекания достигнет $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$. Если все это вещество упадет на релятивистскую звезду, то, согласно формуле (16), она станет источником со светимостью в миллиард светимостей

¹⁰⁾ Ве — обозначение звезды спектрального класса В с эмиссионными линиями (от англ. emission — излучение, испускание).

Солнца. Заранее скажем, что это совершенно невозможно, но об этом подробнее мы расскажем в гл. VII.

А сейчас обратим внимание на следующее. В немассивных двойных темп перетекания не столь высок и светимость релятивистской звезды не превышает 10 000 светимостей Солнца. Значит, в маломассивных двойных стадия яркого рентгеновского источника возникает в тот момент, когда нормальная звезда заполнит полость Роша и начнется второй обмен массой. Похоже на то, что это единственная возможность для маломассивной системы стать ярким рентгеновским источником. Звездный ветер у звезд малой массы в тысячи раз слабее, чем у сверхгигантов. Лишь только в системах с красным гигантом (гигантом по размерам) возможна мощная аккреция из звездного ветра — наподобие той, которая наблюдается у массивных рентгеновских систем.

VI

Карликовые двойные

1. Кис-кис, Геркулес X-1	162
2. Новые и повторные новые звезды	168
3. Звезды типа U Близнецов	175
4. Поляры	180
5. Сверхновые, похожие друг на друга	185
6. Рентгеновские барстеры	188
7. Если бы не общая теория относительности	192

Карликовые двойные

Нейтронные звезды имеют массивных предков. Звезды с массой менее $10M_{\odot}$ превращаются в белые карлики. Об этом мы рассказывали в гл. III. Если с этим согласиться, то мы сразу же приходим к выводу, что в консервативном сценарии (первый обмен идет без потери массы двойной) в процессе эволюции маломассивной двойной нейтронная звезда не может появиться. Однако такого правила в природе нет. В маломассивных двойных наряду с белыми карликами довольно часто встречаются нейтронные звезды.

Вернемся мысленно к концу 60-х годов прошлого века. Удивительная картина царила тогда в науке о переменных звездах. Статьи, книги, каталоги кишели ужасающим теоретика многообразием типов переменных звезд. Здесь были новые звезды, новоподобные, повторные новые и карликовые новые, вспыхивающие, катаклизмические, эруптивные и др. Некоторые из них назывались просто неправильными (!) переменными. Зачастую один и тот же тип звезд проходил под разными названиями. Казалось, нет никакой надежды разобраться со всем этим «зоопарком».

Сейчас мы знаем, что является основной причиной столь странного поведения звезд. Конечно, не всех звезд. Загадки остаются, но многое уже прояснилось.

1. Кис-кис, Геркулес X-1

Одним из наиболее полно изученных рентгеновских источников является рентгеновский пульсар Геркулес X-1. Особый интерес вызывает то, что рентгеновское излучение этого пульсара переменное с тремя разными периодами. За это свойство Геркулес X-1 иногда называют удивительными часами. Во-первых, излучение пульсирует с периодом 1,24 секунды. Кривая рентгеновского блеска, свернутая с этим периодом, показана на рис. 64. Во-вторых, излучение меняется с периодом 1,7 дня. Эта кривая блеска имеет один П-образный минимум.

Физиологи утверждают, что коты спят 18 часов в сутки, т. е. 75 % всей своей жизни коты проводят во сне. Геркулес X-1 подобен коту. Из каждых 35 дней Геркулес «работает» лишь 11 дней, а остальные 24 дня рентгеновское излучение на Землю не поступает. Это и есть третья периодическая закономерность у Геркулеса X-1.

Самый короткий период — 1,24 секунды — это период вращения нейтронной звезды вокруг своей оси. Импульс пульсара состоит из двух максимумов.

Период 1,7 дня, без сомнения, представляет собой орбитальный период двойной. С этим же периодом изменяется короткий период 1,24 с (эффект Доплера). Изменение рентгеновского блеска с периодичностью 1,7 дня — это эффект затмения рентгеновского источника нормальной звездой. Обратите внимание на форму затмения. Затмение начинается очень резко. Вспомним, что длительность спадающего участка пропорциональна размерам затмеваемой звезды (см. рис. 21). Значит, затмевается практически точечный объект.

Звезда, которая периодически затмевает рентгеновский пульсар, была найдена советским астрономом Н. Е. Курочкиным. Среди звезд, попавших в квадрат ошибок рентгеновских детекторов, была переменная звезда 12-й величины

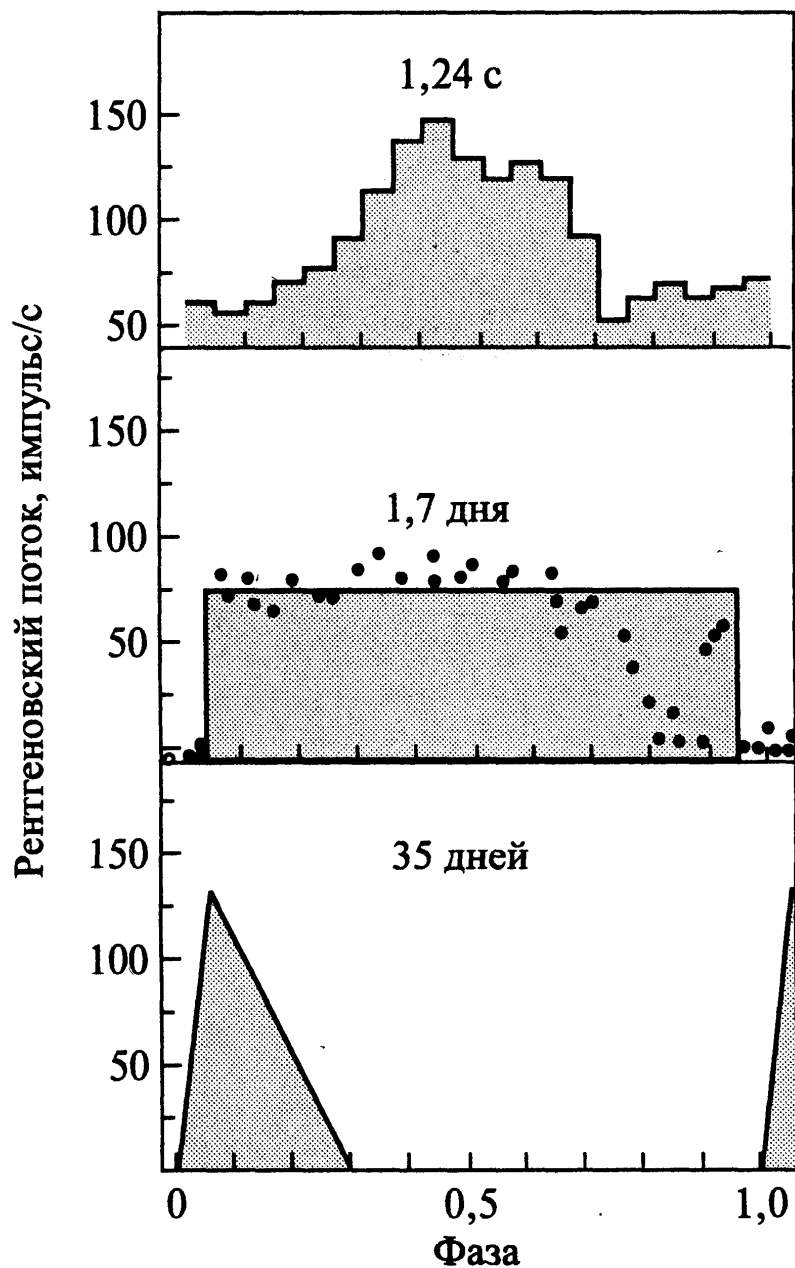


Рис. 64. Три периодичности рентгеновского излучения Геркулеса X-1

HZ Геркулеса. До открытия Геркулеса X-1 она классифицировалась как неправильная переменная. Это означало, что блеск ее меняется хаотически. По-видимому, никто серьезно не интересовался переменностью этой звезды. Когда же обработали старые фотопластинки, которые хранятся в Государственном астрономическом институте им П. К. Штернберга, обнаружилось, что блеск звезды HZ Геркулеса плавно меняется с рентгеновским периодом 1,7 дня (см. рис. 65). Оптический блеск HZ Геркулеса менялся в 13 раз ($\sim 2^m,8$). Причем в момент рентгеновского затмения оптический блеск

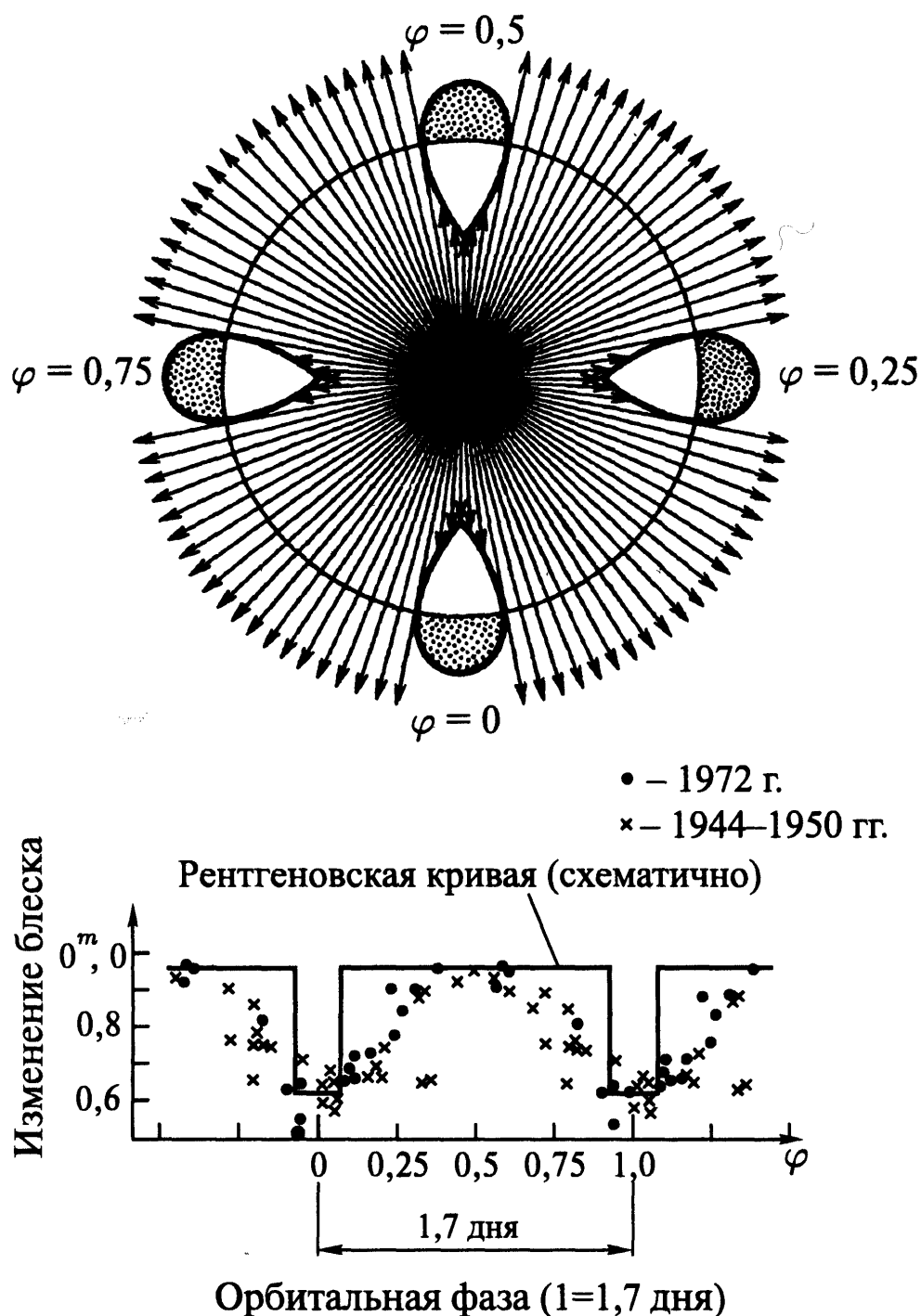


Рис. 65. Изменение блеска звезды HZ Геркулеса

системы спадал до минимума. Кривая блеска, как и у β Лир, не имела постоянных участков, но в отличие от β Лир представляла собой не двойную, а «одинарную» волну с максимумом на фазе 0,5. Вспомним, что с таким явлением мы столкнулись у другой классической звезды — Алголя. Помните слабое повышение блеска к фазе 0,5? Не оставалось сомнений, что вся кривая блеска HZ Геркулеса — это следствие эффекта отражения.

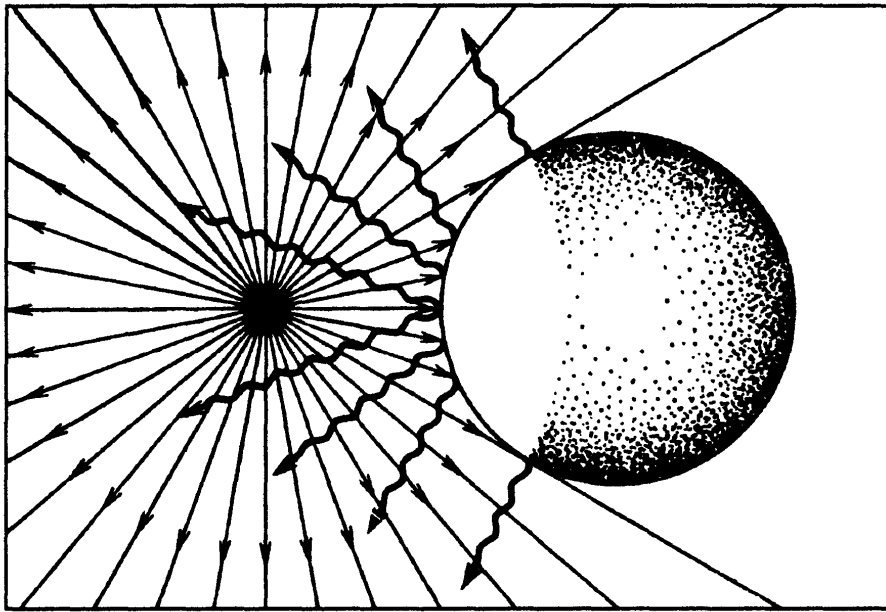


Рис. 66. Переработка рентгеновского излучения нормальной звездой

Еще в 1967 году И. С. Шкловский подчеркивал, что в двойных рентгеновских системах должен проявляться очень сильный эффект отражения. Суть этого явления та же, что и в случае двух нормальных звезд. Отличие лишь в том, что в рентгеновской двойной системе звезда подогревается за счет перехвата жесткого рентгеновского излучения пульсара (см. рис. 66). Рентгеновская светимость пульсара Геркулес X-1 примерно в 100 раз больше, чем полная оптическая светимость нормальной звезды, HZ Геркулеса. Перехватывая даже часть всего излучения, сторона HZ Геркулеса, обращенная к пульсару, становится в 6 раз ярче противоположной стороны.

Это видно в спектре звезды. В минимуме HZ Геркулеса — звезда спектрального класса F, а в максимуме — A0. Оценка массы оптической звезды по соотношению «масса — светимость» дает значение $(2 \div 2,5)M_{\odot}$. По длительности рентгеновского затмения удастся определить размер HZ Геркулеса — звезда очень близка к размерам полости Роша. По-видимому, в этой системе наступила стадия второго обмена массой: нормальная звезда заполнила свою полость Роша и в виде «гравитационного ветра» перетекает через окрестность внутренней точки Лагранжа. Струя газа образует во-

круг нейтронной звезды аккреционный диск. Представим себе картину, которую увидел бы наблюдатель, находящийся вблизи аккреционного диска. На «горизонте» видна оптическая компонента — звезда HZ Геркулеса и струя истекающего с нее газа. Поверхность диска при приближении к нейтронной звезде под действием магнитных сил начинает изгибаться и покрывается «барашками» из-за неустойчивости Кельвина—Гельмгольца. На расстоянии в несколько тысяч километров диск разрушается магнитными силами. Вещество «вмораживается» в магнитное поле и стекает на магнитные полюса нейтронной звезды, откуда в виде двух лучей «бьет» рентгеновское излучение.

Главной загадкой Геркулеса X-1 остается его «кошачий характер». Хотя для нас, землян, излучение каждые 35 дней исчезает на 24 дня, это не означает, что пульсар вообще перестает «работать». Оптическая кривая блеска практически не меняется в момент «выключения» пульсара — эффект отражения не исчезает. Такое впечатление, будто что-то закрывает от нас нейтронную звезду, но это «что-то» не в состоянии заэкранировать все рентгеновское излучение, падающее на соседнюю звезду HZ Геркулеса. Экраном, по-видимому, является аккреционный диск вокруг нейтронной звезды. Так как луч зрения лежит практически в плоскости двойной, то, слегка качаясь относительно этой плоскости, диск будет на время закрывать от нас пульсар. Тень от аккреционного диска, падающая на соседнюю звезду, невелика и не меняет эффекта отражения.

Система HZ Геркулеса — Геркулес X-1 — это маломассивная двойная. Возникает вопрос, каким образом в такую маломассивную систему пробралась нейтронная звезда, предок которой должен иметь массу не менее $10M_{\odot}$. Возможный выход из этой проблемы был предложен Э. Ван ден Хёвелом в 1977 году. Суть его предложения состоит в отказе от условия консервативности при первом обмене массой.

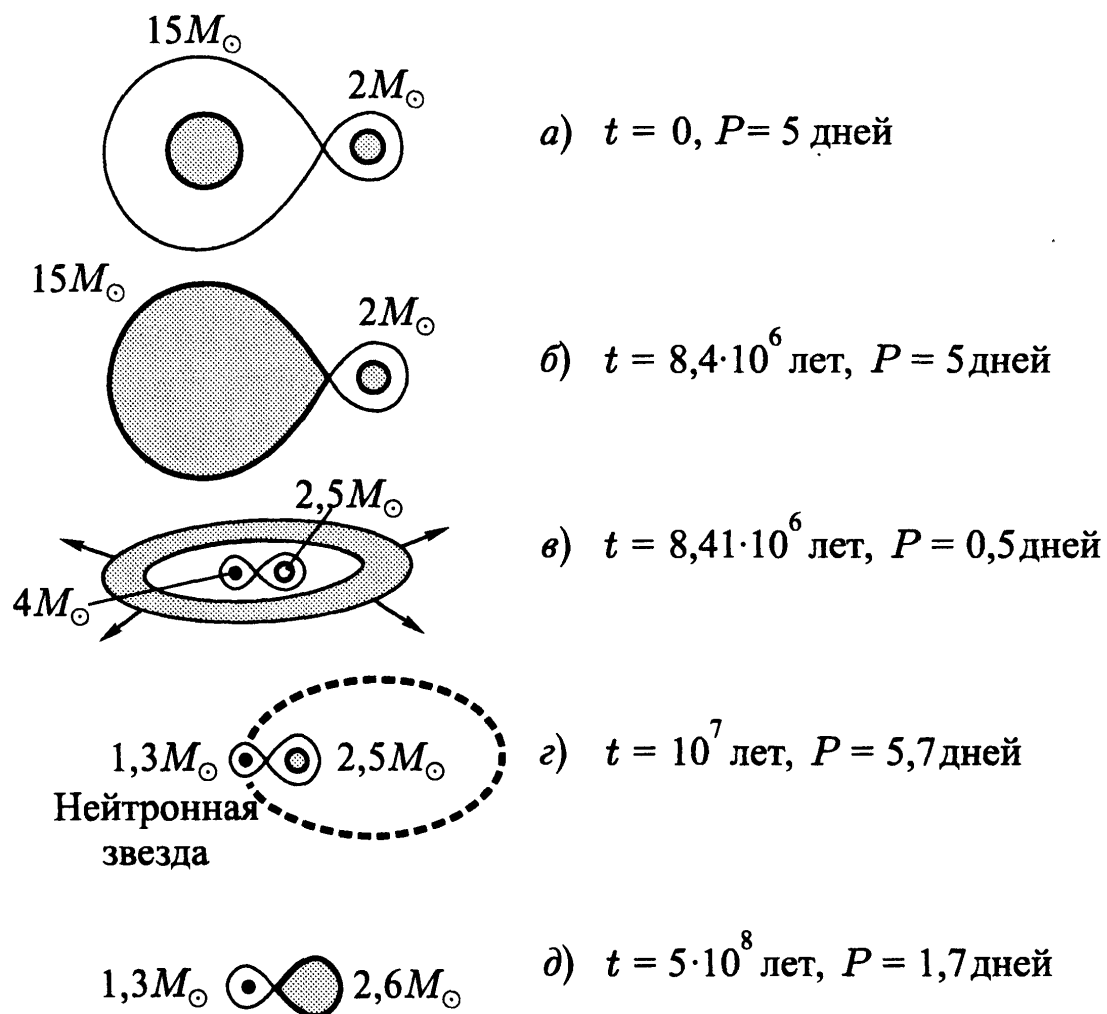


Рис. 67. Сценарий эволюции первоначально массивной двойной, приведший к образованию систем типа HZ Геркулеса — Геркулес X-1

Причиной сильной потери массы системой является большое начальное отношение масс компонент. Вспомним, что перетекание с большей звезды на меньшую идет в тепловой шкале времени звезд. Из-за большого различия масс тепловое время меньшей звезды в десятки и сотни раз больше теплового времени более массивной. Аккрецируемое вещество не успевает прийти в тепловое равновесие и «осесть» на звезду. Предположим, что такое бурное перетекание кончается образованием общей оболочки, истекающей из двойной системы. В результате происходит не обмен массой, а практически полная потеря массы системой. Менее массивная звезда так и остается маломассивной, а более массивная звезда после коллапса рождает нейтронную звезду. Общая масса системы не превышает $(3 \div 4)M_{\odot}$. В процессе сброса оболоч-

ки двойная теряет не только вещество, но и вращательный момент — звезды «съезжаются» друг к другу.

Наконец, из-за ядерной эволюции маломассивная оптическая компонента заполнит полость Роша и начнется второй обмен, во время которого и вспыхнет яркий рентгеновский пульсар. Так, согласно Ван ден Хёвелу, могла образоваться система типа HZ Геркулеса — Геркулес X-1.

Сейчас известно несколько систем типа HZ Геркулеса. Их не так много. Это связано с тем, что в двойных системах массы звезд в момент образования, как правило, близки друг к другу. Образование двойной с большим отношением масс — событие очень редкое. Сценарий Ван ден Хёвела показывает «контрабандный путь» провоза нейтронных звезд в маломассивные двойные системы. Законными же потомками этих систем являются белые карлики.

2. Новые и повторные новые звезды

Явление новой звезды не менее эффектно, чем вспышка сверхновой. За несколько дней на небе, где раньше «ничего не было», возникает яркая звезда, видимая невооруженным глазом. Воображение человека, привыкшего к неизменному виду небесной сферы, изредка пересекаемой искусственными спутниками Земли, начинает будоражиться при появлении новой звезды. Это, в общем, интересное физическое явление приобретает еще и «многозначительную» психологическую окраску. Например, поэт Андрей Вознесенский так откликнулся на вспышку Новой звезды 1975 года в созвездии Лебедя:

«...Ты Новая Лебедь, не быть тебе старой...

Из кружки полейте на руки Пилату.

Прощай, моя флейта!

Прощай, моя лживая слава.

Ты мне надоела. Ступай к аспиранту».

Уже после вспышки новой, просматривая старые фотопластинки, астрономы заметили, что еще до вспышки на месте новой находилась звезда на 10–12 звездных величин слабее. По какой-то причине светимость звезды внезапно увеличилась в десятки тысяч раз. Напомним, что при взрыве сверхновой светимость достигает мощности миллиарда звезд. Явление новой значительно скромнее по своим масштабам, а выглядит оно столь же ярко в том случае, когда вспышка происходит гораздо ближе к нам. Блеск новой звезды после достижения максимума медленно, в течение нескольких месяцев, падает до прежнего уровня. Через несколько лет на месте вспышки появляется туманное пятнышко. Это показывает, что появление новой сопровождается выбросом вещества (см. рис. 68).

Астрономы давно заметили, что некоторые звезды вспыхивают по несколько раз. Правда, такие вспышки послабее, чем новые. В табл. 3, взятой нами из книги известного советского исследователя переменных звезд В. П. Цесевича, приводятся характеристики вспышек новых звезд. Вспышки повторных новых значительно слабее вспышек новых. Промежутки между вспышками исчисляются десятками лет.

Одной из наиболее широко исследованных новых является звезда

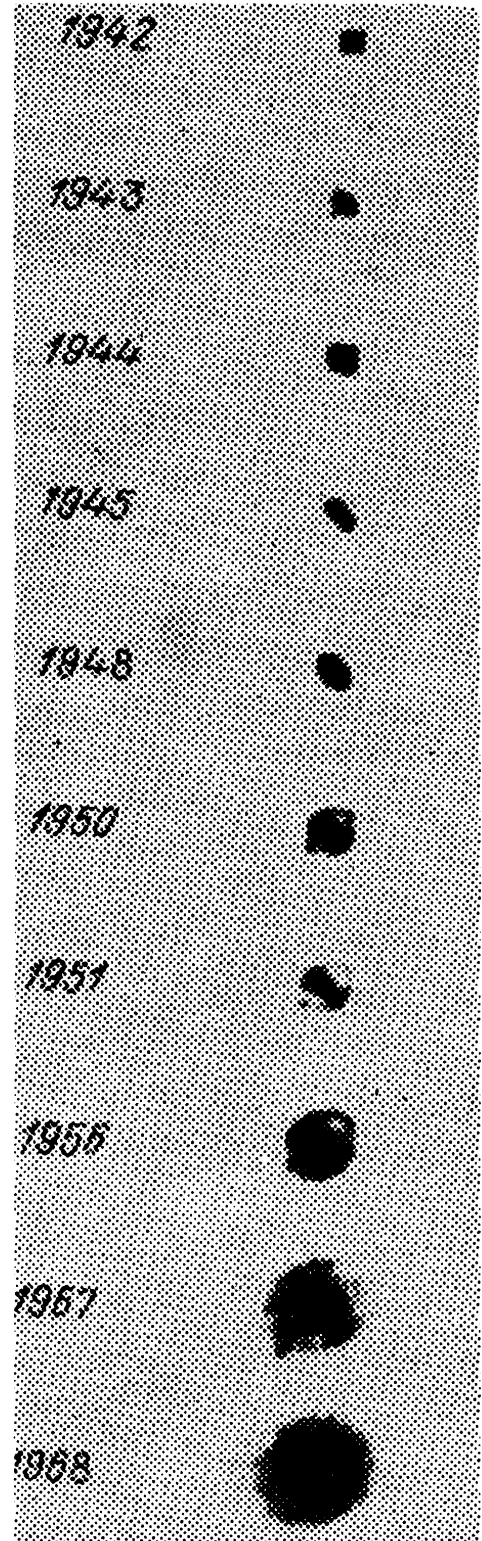


Рис. 68. Оболочка, сброшенная при взрыве новой звезды

Таблица 3

Новые звезды

Название	Год откры- тия	Звездная величина в макси- муме	Орбитальный период, дни	Светимость до и после вспышки, L/L_{\odot}	
GK Персея	1901	$0^m,2$	0,685	1,2	251 000
DN Близнецов	1912	3,6	?	3,3	100 000
V603 Орла	1918	-1,1	0,138	8,3	480 000
V476 Лебедя	1920	2,0	?	1,6	690 000
RR Живописца	1925	1,2	0,145	1,3	91 200
DQ Геркулеса	1934	1,3	0,194	0,06	17 400
CP Ящерицы	1936	2,1	?	2,8	525 000
CP Кормы	1942	0,5	?	0,06	440 000
V1500 Лебедя	1975	1,8	0,14		250 000

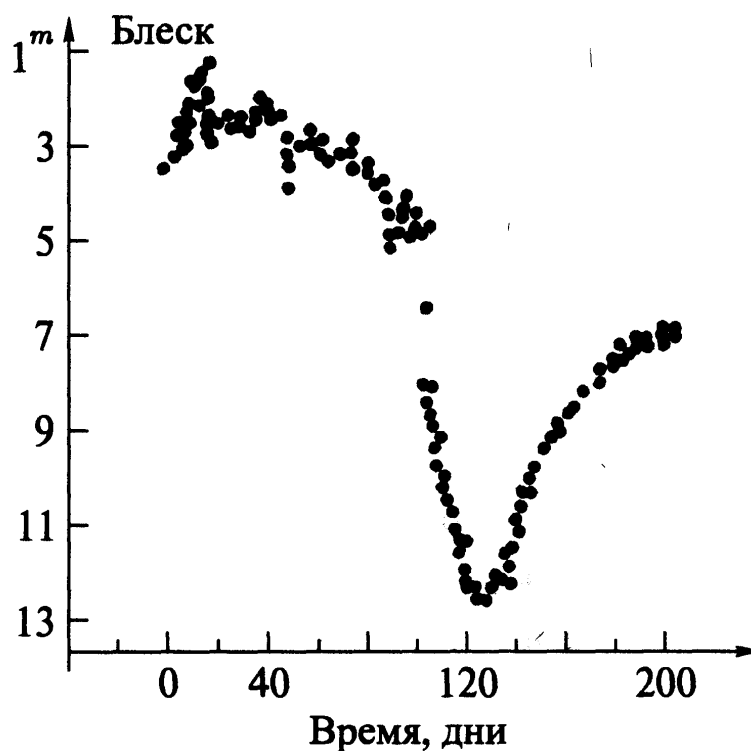


Рис. 69. Изменение блеска Новой DQ Геркулеса, вспыхнувшей в декабре 1934 г.

DQ Геркулеса. Новая DQ Геркулеса вспыхнула в 1934 году. В максимуме блеска она была одной из наиболее ярких звезд северной части неба. На старых фотопластинках на месте новой была обнаружена звезда 15-й величины. После максимума блеск упал, но потом начал внезапно расти в течение 100 дней, а после этого медленно уменьшился до 15-й величины (рис. 69).

В 1954 году американский астроном Мерли Уокер (Ликская обсерватория) сделал открытие, которое пролило свет на природу новых звезд. Тщательно наблюдая DQ Геркулеса, он нашел, что ее блеск меняется с периодом 4 часа 39 минут (0,194 дня). Кривая блеска (см. рис. 70) доказывала, что DQ Геркулеса — затменно-переменная звезда. В спектре звезды наблюдались яркие линии излучения водорода и гелия. Анализируя кривую блеска и кривую лучевых скоростей, астрономы установили, что полная масса двойной меньше массы Солнца! Это маломассивная система, состоящая из холодно-

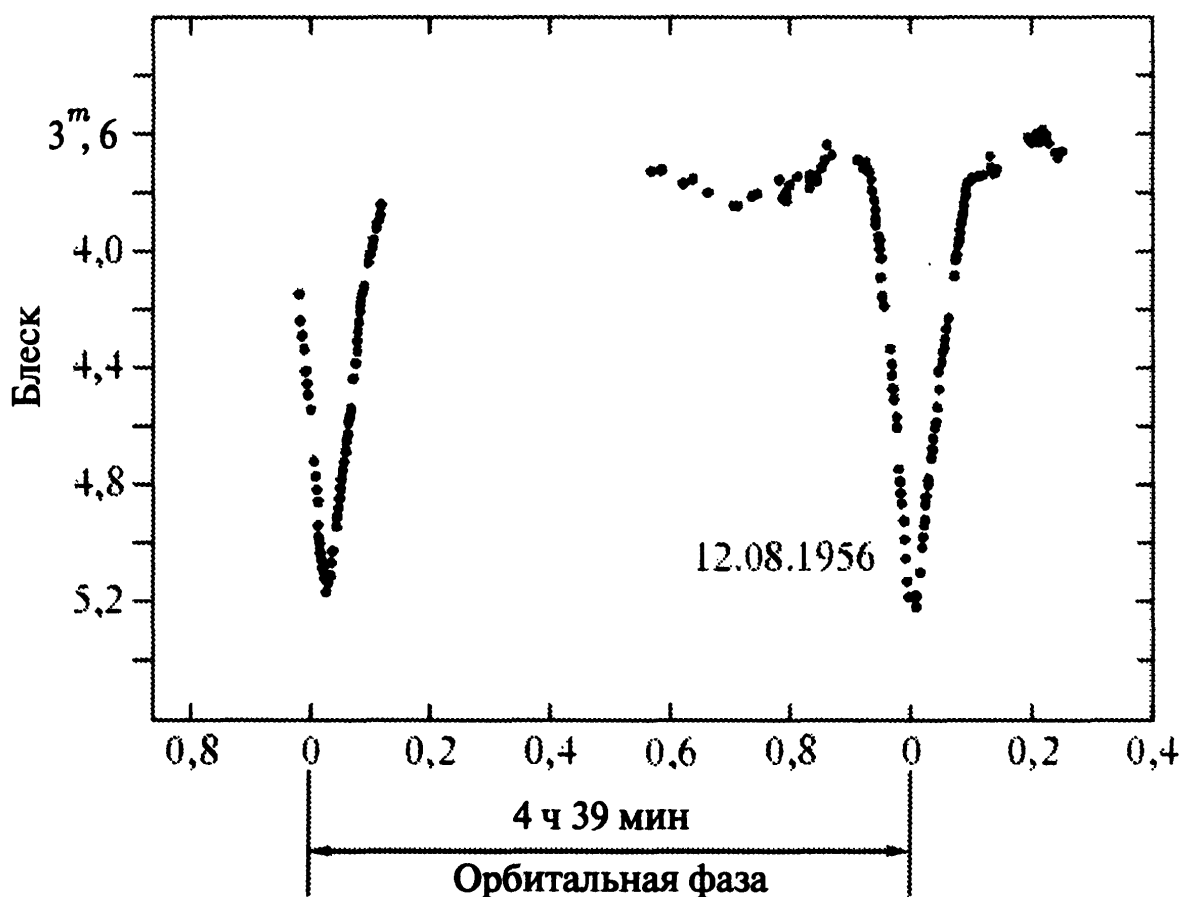


Рис. 70. Кривая блеска DQ Геркулеса

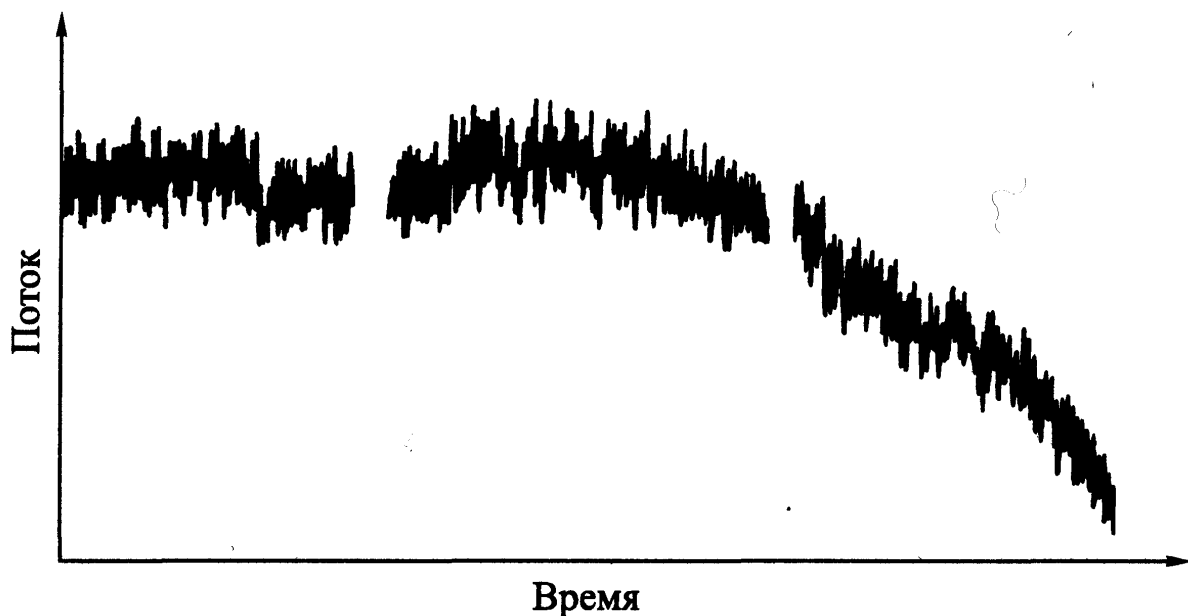


Рис. 71. Подрагивание блеска звезды DQ Геркулеса с периодом, равным 71 с, открытое М. Уокером еще в 1956 г. (до открытия радиопульсаров)

го красного карлика и компактной горячей звезды. Линии излучения «гуляли» по спектру с орбитальным периодом, но по фазе не совпадали ни с одной из звезд. Это доказывало, что в системе есть сильные газовые потоки.

В 1956 году тот же Уокер сделал еще одно важное открытие. Блеск системы строго периодически «подрагивал» на несколько процентов (см. рис. 71). Период «подрагиваний» равен 71 секунде. Так был открыт первый пульсар. Но пульсар не на нейтронной звезде, а на белом карлике!

Столь быстро может вращаться только белый карлик или нейтронная звезда. Нейтронная звезда не проходит «по совокупности». Масса пульсара в этой системе много меньше чандрасекаровского предела. Это делает гипотезу нейтронной звезды маловероятной, но не невозможной. Л. Д. Ландау еще в 1937 году показал, что минимально возможная масса нейтронной звезды много меньше чандрасекаровского предела. Другое дело, что при малой массе звезде энергетически более выгодно быть белым карликом, а не нейтронной звездой. Такую нейтронную звезду нужно специально «приготавливать», создавая особые условия. Весь комплекс наблюдательных данных свидетельствует в пользу белого карлика.

Газовые потоки в двойной возникают из-за заполнения карликовой красной звездой своей полости Роша. Картина здесь очень похожа на ту, что мы видели в системе HZ Геркулеса, только нейтронную звезду нужно заменить на белый карлик.

Белый карлик почти в 1000 раз больше нейтронной звезды. Это делает механизм аккреции в 1000 раз менее эффективным. При аккреции на белый карлик выделяется не 10 % массы покоя, а всего 0,01 %, т. е. меньше, чем при термоядерных реакциях. Но в белом карлике нет других источников энергии, поэтому аккреция оказывается важной. Кстати, эти цифры показывают, что при одинаковом темпе аккреции нейтронная звезда должна быть примерно в 1000 раз ярче белого карлика. Это и наблюдается: светимость систем типа DQ Геркулеса равна примерно нескольким светимостям Солнца, т. е. примерно в 1000 раз меньше светимости систем типа HZ Геркулеса — Геркулес X-1.

Чем же объясняется вспышка новой или повторной новой? Вспомним, что белые карлики образуются из звезд не очень больших масс. Масса звезды определяет максимальную температуру в ее центре. Наступает момент, когда в центре выгорают элементы, способные в принципе гореть при данной температуре и плотности. Изотермическое ядро сжимается и образуется белый карлик, внутри которого ядерные реакции невозможны.

Жизнь одиночного белого карлика состоит в монотонном остывании без всяких катаклизмов. Другое дело — двойная система. Соседняя звезда перетекает на белый карлик, обогащая его поверхность свежим, еще не перегоревшим топливом. С другой стороны, из-за удара о поверхность белого карлика аккрецируемое вещество разогревается. Для возникновения термоядерного горения необходимо, чтобы плотность и температура вещества превышали определенные критические значения. Температура в натекающем слое

определяется притоком энергии, который в первом приближении постоянен. Поэтому постоянна и температура. А вот плотность медленно нарастает — ведь масса слоя постоянно повышается. Достигнув критических значений, этот слой взрывается. Вещество приобретает большие скорости и начинает разлетаться во все стороны. С увеличением площади резко возрастает оптическая светимость. Это мы и видим как вспышку новой.

Различие между новыми и повторными новыми, по-видимому, состоит в том, что в первом случае взрывается гелий, а во втором — водород. Для загорания гелия необходима бóльшая плотность, поэтому нужно дольше ждать, пока он взорвется. Зато и вспышка будет гораздо мощнее, так как взрывается большее количество вещества.

Идея ядерного горения в тонком слое на белом карлике обсуждалась учеными еще в 40-е годы прошлого века. Но связь с аккрецией в тесных двойных системах выяснилась лишь в последнее десятилетие. Можно грубо прикинуть, как часто вспыхивают новые — очевидно, они тоже должны быть «повторными».

Анализ вспышек новых звезд показывает, что при вспышке новой выбрасывается $M_{об} = 10^{-5} M_{\odot}$. Если темп аккреции принять равным стандартному значению $\dot{M} = 10^{-10} M_{\odot}/\text{год}$, то масса, выброшенная при вспышке, возместится через время $t \approx M/\dot{M} = 10^5$ лет. С другой стороны, водород вспыхивает при более мягких условиях, и значит, чаще.

Следует воспринимать такие оценки как приближенные — детальная картина пока еще не ясна. Например, белые карлики обладают сильными магнитными полями. Ведь DQ Геркулеса — пульсар. Напряженность магнитного поля у этого карлика ($\sim 10^5 - 10^6$ Гс) достаточна для того, чтобы заставить вещество падать на полюса. От значения магнитного поля и темпа аккреции зависит площадь, на которую выпадет вещество, а следовательно, и температура. Картина осложняется еще тем, что в разных двойных системах

истекает вещество с различным химическим составом, к тому же и белые карлики разные. Такое разнообразие условий и определяет наблюдаемое многообразие характеристик новых и повторных звезд. Поведение же между вспышками полностью определяется характером аккреции, которая тоже протекает очень разнообразно.

3. Звезды типа U Близнецов

Пользуясь военной терминологией, можно сказать, что новые и повторные новые — это тяжелая артиллерия, а вот вспышки звезд типа U Близнецов подобны пулеметной очереди. Промежутки между вспышками длятся всего несколько месяцев. Строгой периодичности нет, но есть довольно строго выдерживающийся цикл повторений. В табл. 4 приведены характеристики некоторых звезд типа U Близнецов. Сейчас известно более 300 таких звезд.

Польский астроном Войцех Кшеминский (тот самый, который правильно отождествил рентгеновский пульсар Цен-

Таблица 4

Звезды типа U Близнецов

Звезда	Продолжительность цикла, дни	Орбитальный период, дни
U Близнецов	103	0,177
SS Возничего	57	0,180
EX Гидры	558	0,068
SS Лебедя	50	0,276
RU Пегаса	68	0,371
Z Хамелеона	104	0,0745

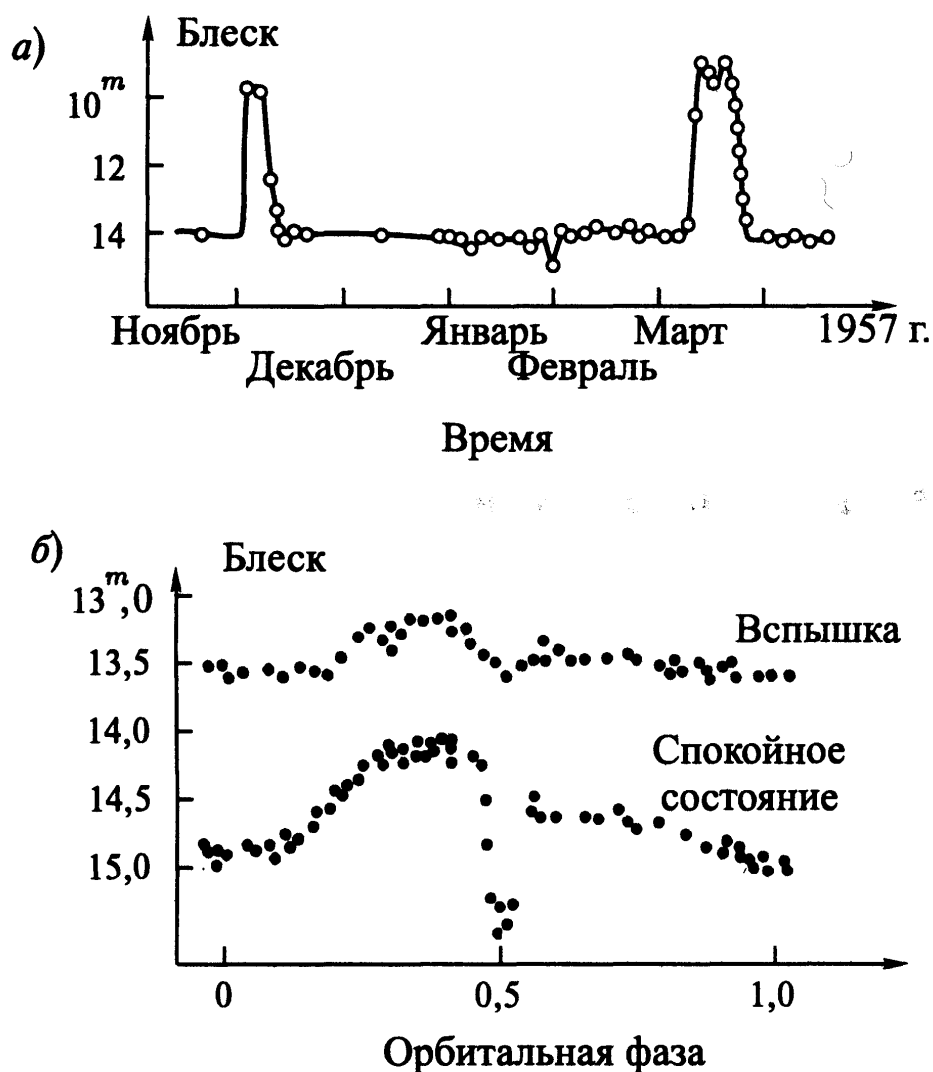


Рис. 72. Изменение блеска звезды U Близнецов:
а — долговременное; б — орбитальное

тавр X-3) рассчитал, что блеск звезды U Близнецов между вспышками меняется с периодом 4 часа 14 минут (0,177 дня). Кривая блеска (рис. 72) неустойчива и меняет свою форму. Но от цикла к циклу она частично или полностью восстанавливает свои характерные изгибы.

С такой необычной кривой блеска мы еще не сталкивались. «Распутать» ее поможет кривая лучевых скоростей. На фазе главного минимума ($\varphi = 0,5$) лучевая скорость обращается в нуль. Это, безусловно, означает, что линии связаны с затмением горячей яркой области. Изменения блеска схематично представлены на рис. 73.

Необычная особенность кривой блеска состоит в том, что форма минимума не симметрична. Звезда вначале посте-

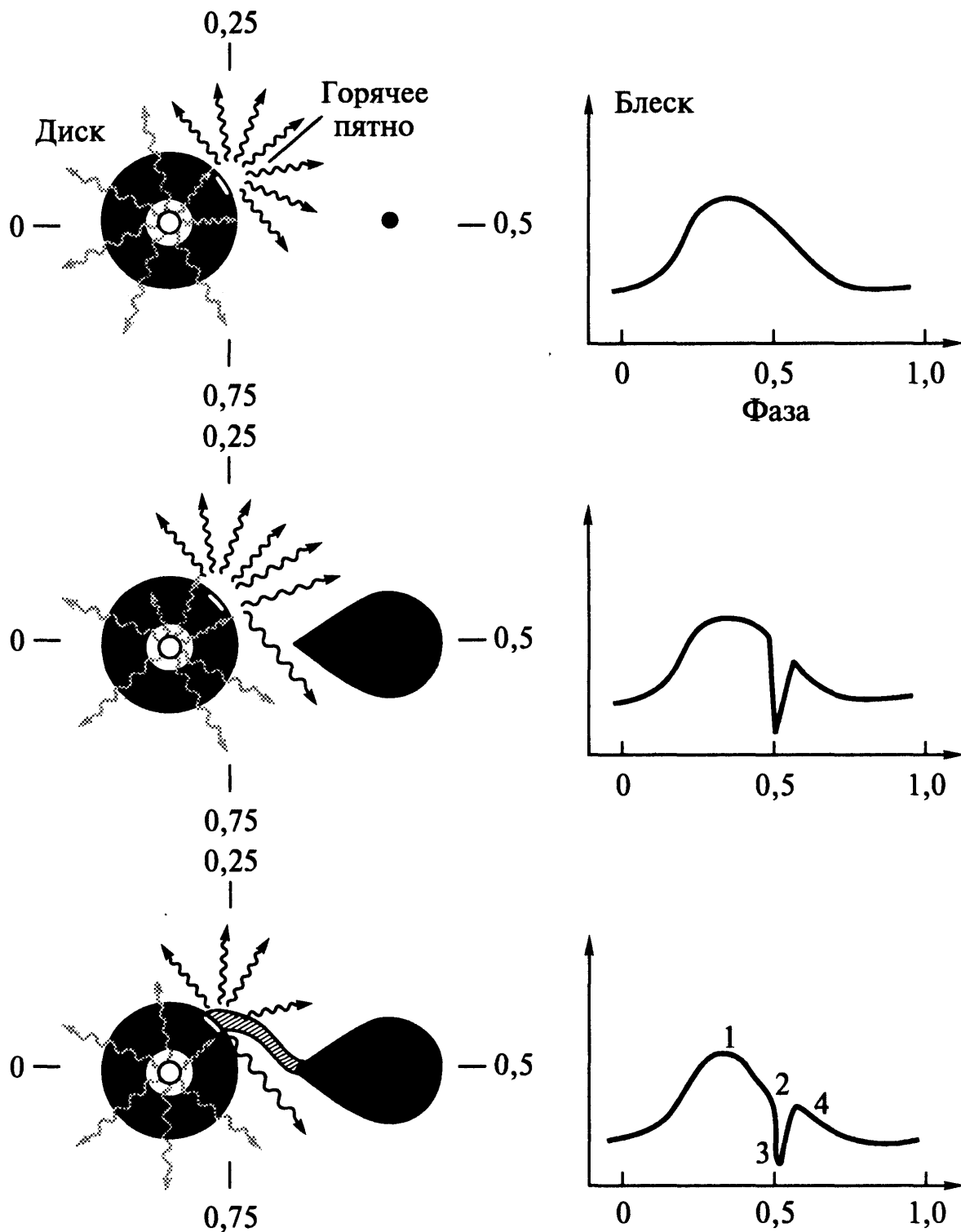


Рис. 73. Синтез кривой блеска звезды типа U Близнецов. На верхнем рисунке показана кривая блеска горячего пятна на диске. В течение полупериода пятно видно на фазах 0,12–0,62, а на других фазах оно закрыто аккреционным диском. На среднем рисунке показано, как изменится кривая блеска, если учитывать затмение соседней звездой — появляется минимум на фазе 0,5. И наконец, на нижнем рисунке учитывается затмение полупрозрачной струей газа; ее влияние приводит к понижению блеска на участке 1–2

пенно входит в минимум. На определенной фазе происходит излом, и вход в затмение становится более крутым. Создается впечатление, что яркую область вначале затмевает одно тело, а потом другое. Интересно еще и то, что форма начального участка затмения зависит от того, на какой длине волны мы наблюдаем. Это можно объяснить только тем, что начало минимума (участок 1–2) соответствует затмению полупрозрачным телом. А дальше (участки 2–3, 3–4) наступает затмение абсолютно непрозрачным телом (см. рис. 73).

Эти особенности очень просто объяснить следующим образом. Представьте, что система состоит из двух звезд, одна из которых окружена диском. Пусть на диске имеется яркое горячее пятно, слегка сдвинутое относительно линии, соединяющей звезды. Пятно настолько яркое, что оно полностью определяет блеск системы. Если бы было одно такое пятно и диск, то кривая блеска представляла бы собой «колокол», вершина которого сдвинута относительно фазы 0,5 влево. В максимуме мы видели бы полностью пятно (анфас). Но пятно находится чуть сбоку от линии, соединяющей звезды, поэтому и фаза чуть сдвинута. Теперь добавим соседнюю звезду. Появится затмение строго на фазе 0,5. Остался последний штрих. Пусть от темной звезды к диску бьет струя полупрозрачного газа. Появится излом (участок 1–2). Сначала пятно затмевается струей, а потом — звездой. Поэтому и минимум не симметричный.

Анализ спектров показывает, что системы типа U Близнецов состоят из красного карлика (масса — несколько десятых массы Солнца) и белого карлика, окруженного аккреционным диском. Но в отличие от систем типа DQ Геркулеса аккреционный диск и белый карлик почти ничего не излучают. Причины этого пока еще точно не установлены.

Более или менее понятно образование горячего пятна. Струя газа, которая течет от красного карлика, заполняющего свою полость Роша, не плавно «навивается» на диск,

а «врезается» в него под некоторым углом. Угол атаки может быть достаточно велик, и в месте столкновения возникает ударная волна — узкая область, внутри которой резко уменьшается скорость струи и возрастает температура газа. Кинетическая энергия струи переходит в потенциальную.

Легко оценить светимость такого пятна. Если скорость струи по отношению к диску равна v , то кинетическая энергия единицы массы газа в струе равна $v^2/2$. При ударе почти вся энергия переходит в тепло и излучение, поэтому каждый килограмм газа в пятне излучает примерно $v^2/2$ джоулей. Так как каждую секунду в струе переносится M килограммов, то полная светимость пятна равна

$$L_{\text{пятна}} = \dot{M} \frac{v^2}{2}. \quad (18)$$

Скорость движения вещества в струе в таких карликовых системах может достигать нескольких сотен километров в секунду, а темп перетекания — $10^{-7} \div 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$. Светимость пятна может быть сравнима со светимостью такой звезды, как Солнце. А ведь звезды в этих системах светят в десятки и сотни раз слабее. Поэтому не удивительно, что пятно может быть ярче звезд.

Удивительно другое. Почему белый карлик, который окружен аккрецирующим диском, ничего не излучает между вспышками? Может быть, аккреции между вспышками нет? Можно было бы предположить, что в дисках таких систем нет трения, поэтому они не аккрецируют, медленно увеличивая свою массу. Когда плотность в диске достигает определенного критического значения, в его веществе резко возрастает турбулентность и начинается аккреция на белый карлик, что и воспринимается нами как вспышка. Диск «стекает» на белый карлик, в нем опять исчезает трение и все повторяется сначала. Но по каким причинам так происходит? Пока неизвестно.

Но, возможно, отсутствие аккреции между вспышками объясняется эффектом «пропеллера». Если белый карлик вращается быстро, то его магнитное поле будет препятствовать падению вещества на его поверхность.

Вещество будет накапливаться в диске, что приведет к возрастанию в нем давления, и внутренняя граница диска будет потихоньку приближаться к белому карлику. Скорость движения силовых линий магнитного поля уменьшается по мере приближения к белому карлику (силовые линии вращаются твердотельно с белым карликом). В определенный момент эффект пропеллера исчезает и вещество падает на поверхность белого карлика. Происходит вспышка. Затем все повторяется, как и раньше.

Из расчетов действительно следует, что белые карлики в этих системах должны вращаться очень быстро, с периодами от нескольких секунд до нескольких сотен секунд.

Вообще говоря, у систем типа U Близнецов наблюдается еще один вид вспышек, гораздо более мощных и резких. Это явление, по-видимому, связано с термоядерным взрывом богатого водородом вещества, натекшего на поверхность белого карлика.

У одной из звезд этого типа, звезды SS Лебеда, была зарегистрирована вспышка рентгеновского излучения, причем рентгеновское излучение пульсировало с периодом около 8 секунд. Именно таким периодом вращения и должен обладать белый карлик в подобной системе.

4. Поляры

В середине 70-х годов прошлого века появился еще один класс карликовых двойных систем — поляры. Родоначальницей нового класса систем стала звездочка AM Геркулеса (это уже третья, вслед за HZ и DQ, замечательная звезда из созвездия Геркулеса).

Эта звезда научила астрономов многому, но самое главное, тому, что аккрецирующие белые карлики могут быть источниками довольно жесткого рентгеновского излучения. Правда, еще в 1967 году американские астрофизики обращали внимание на то, что при аккреции на белые карлики ощутимое количество энергии может излучаться в рентгеновском диапазоне. Но, как говорилось в предыдущей главе, долгое время считалось догмой, что белые карлики не могут быть источниками рентгеновского излучения. От этой догмы пришлось отказаться еще в 1976 году, когда на спутнике SAS-3¹¹⁾ американские ученые обнаружили изменение рентгеновского потока с периодом 0,129 дня (примерно 3 часа) от АМ Геркулеса. Точно с таким же периодом, в пределах от 12-й до 13-й величины, меняется блеск звезды АМ Геркулеса.

Эмиссионные линии в спектре звезды показывали присутствие сильных газовых потоков. Полуамплитуда лучевой скорости равнялась 240 км/с. Столь большая скорость движения достигается не за счет большой массы звезд, а за счет компактности системы. Период всего 3 часа!

Приведем следующий пример, который позволит представить ситуацию в этой двойной системе. Если бы мы запустили искусственный спутник вокруг Солнца на малой высоте над его поверхностью, то один оборот он бы совершал за 2 ч 40 мин. Масса звезд в системе АМ Геркулеса меньше массы Солнца, и размер двойной оказывается меньше радиуса Солнца.

Но самым неожиданным было то, что оптический свет АМ Геркулеса оказался сильно поляризован. Поэтому звезды типа АМ Геркулеса и называют полярами.

Напомним, что видимый свет — это набор электромагнитных волн. Каждая волна представляет собой колеблющиеся скрещенные магнитное и электрическое поля (см. рис. 74).

¹¹⁾ SAS — сокращенно от англ. “Small Astronomical Satellite” — малый астрономический спутник.

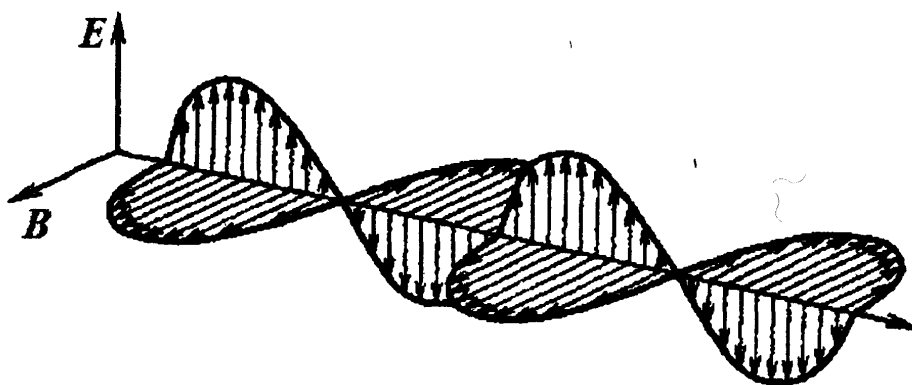


Рис. 74. В электромагнитной волне электрический вектор E колеблется в плоскости, перпендикулярной плоскости колебаний вектора магнитной индукции B

У отдельной волны плоскость колебаний электрического (или магнитного) вектора строго фиксирована. Если плоскости колебаний электрических векторов разных волн не совпадают друг с другом, то такой набор волн называют неполяризованным светом. И наоборот, если есть преимущественная плоскость, вдоль которой колеблется большая часть волн, то свет называют поляризованным. В обычных веществах, например в стекле, световые волны распространяются одинаково хорошо, независимо от положения плоскости поляризации. Но в природе есть вещества (поляроиды), которые могут пропускать свет только в том случае, если плоскость его поляризации направлена определенным образом. Это связано с тем, что кристаллы, из которых состоят поляроиды, имеют выделенные направления (границы).

Работа поляроида и эффект поляризации хорошо иллюстрируются примером из окружающей нас действительности. Чтобы пройти в метро, необходимо соблюдение двух условий: нужно иметь магнитный билет и нужно расположить билет так, чтобы плоскость его совпала с направлением щели автомата. Пока мы не зашли в метро, билеты в наших карманах лежат как попало (они не поляризованы), а при входе в метро все они поляризуются. Автомат выполняет роль поляризатора.

Этот полушуточный пример дает рецепт определения, поляризован свет звезды или нет. В фокусе телескопа ставят поляроид. Он пропускает только те волны, плоскость которых совпадает с направлением «щели». Вращая «щель» вокруг оси телескопа, мы следим за тем, как меняется блеск звезды. Если он не меняется, значит, свет не поляризован. Так почти всегда и происходит. Блеск подавляющего числа звезд не поляризован.

А вот у звезды AM Геркулеса блеск при вращении поляризатора меняется более чем на 10 %. Причем величина поляризации меняется с тем же периодом 3 часа (см. рис. 75). Из анализа кривой блеска и спектра звезды следует, что главный вклад в светимость системы дает белый карлик. Вторая звезда — красный карлик — практически не видна. Почему же свет, излучаемый белым карликом, столь сильно поляризован? Оказалось, что свет этой звезды — не обычное излучение плазмы, а в основном излучение электронов, движущихся в сильном магнитном поле. Такое излучение называется циклотронным. Оно возникает у поверхности белого карлика, обладающего аномально сильным магнитным полем — порядка 10^8 Гс (примерно в 100 раз больше, чем у белого карлика в системе DQ Геркулеса). Аккрецируемое белым карликом вещество разогревается при

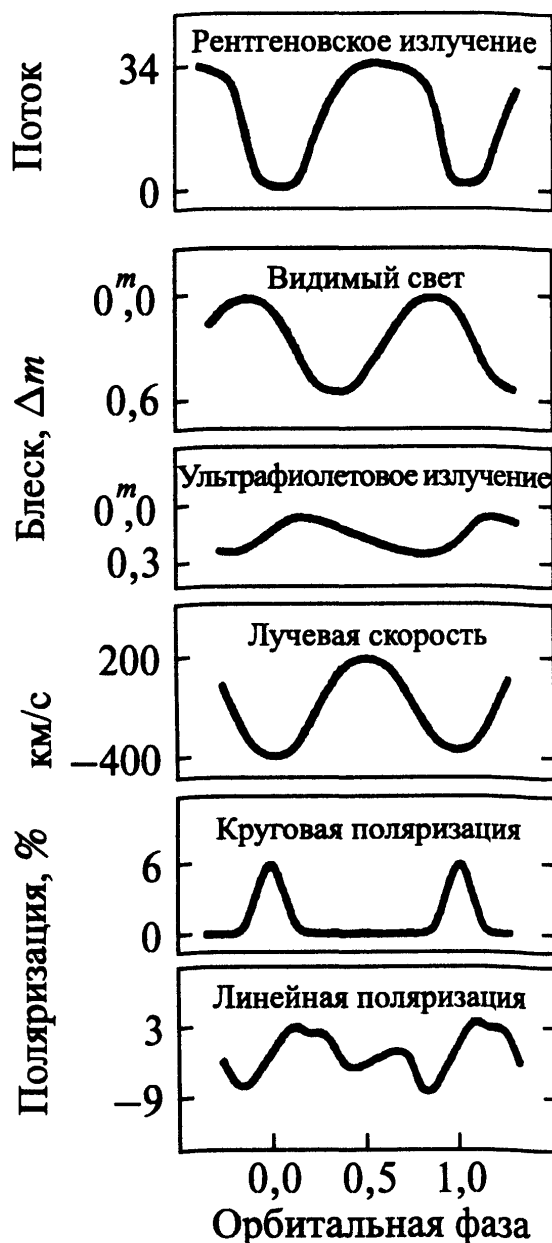


Рис. 75. Изменение различных характеристик излучения звезды AM Геркулеса с орбитальным периодом

ударе о его поверхность. При этом часть энергии излучается как обычно — при пролете электронов мимо ионов (свободно-свободное излучение), в виде рентгеновского излучения. А остальная часть энергии излучается при вращении электронов в мощном магнитном поле белого карлика. При этом циклотронное излучение¹²⁾ имеет оптическую длину волны — т. е. является видимым светом.

Очень необычно выглядит перетекание в такой системе. Как впервые отметили советские астрофизики, если белый карлик действительно обладает столь сильным полем, то магнитные силы начинают управлять движением вещества еще в тот момент, когда оно только покидает красный карлик. Фактически красный карлик погружен внутрь магнитосферы белого карлика (рис. 76).

То, что рентгеновское и оптическое излучения колеблются с орбитальным периодом, означает, что белый карлик повернут всегда одной и той же стороной к красному карли-

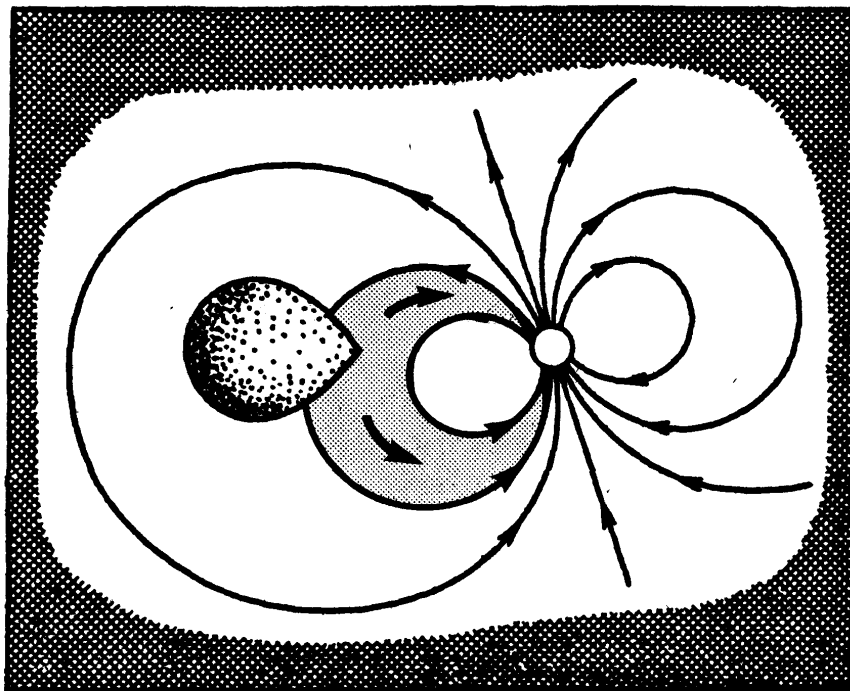


Рис. 76. Перетекание вещества в двойных типа AM Геркулеса

¹²⁾ Это излучение называют циклотронным потому, что впервые с ним столкнулись в циклотронах — ускорителях заряженных частиц.

ку (как Луна к Земле). Это вполне понятно. Как показали расчеты, мощные магнитные поля создают столь жесткое зацепление звезд, что они очень быстро синхронизируют свое вращение. Сейчас известно около десяти систем такого типа.

Особенности этих систем далеко не исчерпываются высокой степенью поляризации. Они обладают очень характерными изменениями оптического блеска. Каждые несколько месяцев такая система переходит из яркого состояния в очень слабое, когда блеск уменьшается в десятки раз.

Искусный наблюдатель, измеряя блеск системы, может сказать, является эта система полярной или нет. Так, молодой советский астроном С. Ю. Шугаров вскоре после сообщения об открытии АМ Геркулеса предложил еще одного кандидата в полярные — звезду АН Большой Медведицы. При этом он руководствовался только характерными изменениями блеска звезды. Не прошло и нескольких месяцев, как было открыто рентгеновское излучение этой звезды.

5. Сверхновые, похожие друг на друга

Вслед за В. Бааде и Ф. Цвикки мы могли бы связать вспышки всех сверхновых с образованием нейтронных звезд (а возможно, и черных дыр). Теория звездной эволюции говорит о том, что предки нейтронных звезд — массивные звезды. Астрономы давно обратили внимание на такой парадоксальный факт: сверхновые часто вспыхивают в так называемых эллиптических галактиках, где массивных звезд нет вообще. Разрешить это противоречие можно, лишь предположив, что взрываются не одиночные, а двойные звезды. Сверхновые, вспыхивающие в эллиптических галактиках, обладают интересным свойством — они очень похожи друг на друга. Это обстоятельство даже позволило выделить их в отдельный класс — сверхновые I типа. Для них характерно быстрое спадание блеска после максимума. В течение

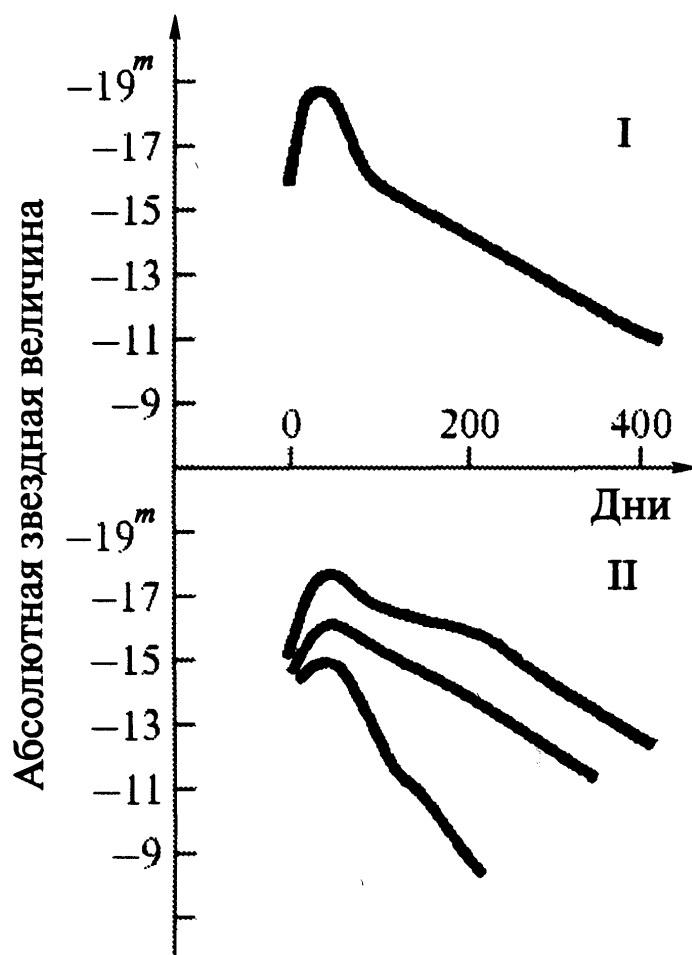


Рис. 77. Характерные кривые блеска сверхновых I и II типов

нескольких недель блеск падает примерно в 6–8 раз, после чего идет более медленный, линейный спад в течение сотен дней.

Часто выделяют еще сверхновые II типа. Кривые блеска этих вспышек после максимума выходят на постоянный уровень, который длится несколько месяцев, и лишь потом блеск начинает резко уменьшаться. Сверхновые II типа более разнообразны, но объединяет их то, что они вспыхивают только в спиральных галактиках. Причем, как правило, внутри спиральных

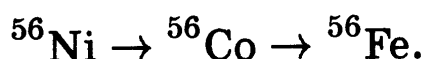
рукавов, где много массивных короткоживущих звезд. Сверхновые II типа — результат коллапса массивных звезд.

Вспышки сверхновых I типа также бывают в спиральных галактиках. Но они не концентрируются к спиральным рукавам. В общем, статистика показывает, что I тип как-то связан со звездами малых масс.

В 1963 году французский астрофизик Эрвин Шацман обратил внимание на то, что в системах малых масс белые карлики могут коллапсировать из-за аккреции на них вещества, истекающего с соседней звезды. Белый карлик, имея вначале массу существенно ниже чандрасекаровского предела, может увеличить ее до этого предела, после чего он теряет устойчивость и начинает коллапсировать. Как проходит такой коллапс? Расчеты показывают, что при сжатии белого карлика, состоящего из гелия или углерода, в центре

его сильно повышается температура. Повышается настолько, что происходит ядерный взрыв, сопровождающийся полным разлетом белого карлика. Становится понятно, почему вспышки сверхновых I типа так похожи друг на друга. Ведь всегда взрываются звезды одинаковой массы, а именно равной чандрасекаровскому пределу.

Остроумно в этой схеме объясняется и кривая блеска сверхновой I типа. При ядерном горении белого карлика образуются в большом количестве изотопы никеля ^{56}Ni . Этот изотоп радиоактивен — он самопроизвольно распадается и образует изотоп кобальта ^{56}Co , который, в свою очередь, превращается в железо ^{56}Fe :



Период полураспада никеля (время, за которое число радиоактивных атомов уменьшается вдвое) равен 6,1 дня, а кобальта — 77 дней. Энергия распада кобальта уносится электронами, которые затем излучают ее, создавая свечение разлетающегося во все стороны остатка сверхновой. Распад никеля и кобальта приводит к наблюдаемой кривой блеска.

В то же время белые карлики, состоящие из более тяжелых элементов (углеродно-кислородно-магниевые, см. рис. 39), не разлетаются полностью, а рождают нейтронные звезды.

Таким образом, механизм Шацмана — это еще один «контрабандный путь» образования нейтронных звезд в системах малой массы. Как и неконсервативный сценарий Э. Ван ден Хёвела, он может привести к возникновению рентгеновских систем малых масс.

Возникает вопрос, не являются ли новые, новоподобные, системы типа U Близнецов и полярные системы, находящиеся на пути к взрыву сверхновой? Ведь именно в этих системах идет аккреция на белые карлики. Будущее покажет. Однако похоже, что только часть этих систем дает сверхновые.

6. Рентгеновские барстеры

Совершенно новый тип рентгеновских источников был открыт американским астрофизиком Джорджем Гриндлеем и его коллегами в 1975 году. Ранее неизвестный источник каждые несколько часов посылал короткие (продолжительностью 100 секунд) вспышки мягкого рентгеновского излучения (рис. 78). Вспышка — по-английски “burst”. Отсюда название — барстер.

Между вспышками излучение не исчезало полностью, но имело гораздо более жесткий спектр. Когда начали искать оптический «двойник», оказалось, что рентгеновский источник расположен в направлении на шаровое скопление.

Шаровое скопление — особый вид звездного населения галактики, отличающийся очень высокой плотностью звезд. В среднем шаровом скоплении, имеющем размеры порядка одного светового года, содержится до миллиона звезд. Вне шаровых скоплений в Галактике на объем, в 100 раз больший, приходится всего одна звезда.

Вскоре были обнаружены барстеры еще в нескольких шаровых скоплениях. Используя расстояния до шаровых скоплений, удалось оценить энергетику барстеров. Во время вспышек их светимость в 30 000 раз больше светимости Солнца. Между вспышками светимость падает до постоянного уровня в несколько тысяч светимостей Солнца. В на-

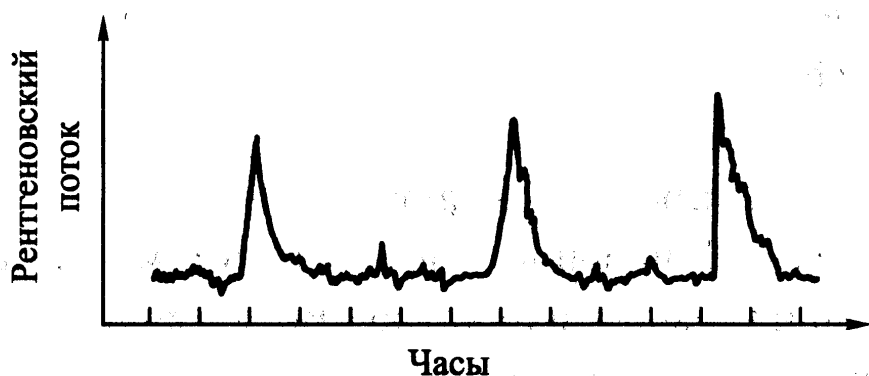


Рис. 78. Запись рентгеновского излучения барстера

стоящее время известно около 20 таких источников, часть из которых не связана с шаровыми скоплениями.

Принцип «работы» барстеров разгадала итальянский астрофизик Лаура Мараски. Она обратила внимание на то, что полная энергия излучения между вспышками примерно в 100 раз больше энергии, излучаемой во время вспышек. Это магическое число было характерно для многих барстеров. Оно и послужило ключом к разгадке тайны.

Представьте себе, что вы имеете две тепловые электростанции с разными КПД. При сжигании одного и того же количества топлива на обеих станциях отношение даваемой электроэнергии попросту равно отношению их КПД. Число 100 примерно равно отношению эффективности аккреции на нейтронную звезду к эффективности термоядерных реакций.

Принцип «работы» барстера тот же, что и у повторных новых, только белый карлик нужно заменить нейтронной звездой. Между вспышками идет квазистационарная аккреция на нейтронную звезду. Следствием ее является жесткое рентгеновское излучение — «фон». На поверхность нейтронной звезды падают еще не перегоревшие водород и гелий с соседней компоненты. Когда температура и плотность в поверхностном слое достигают критических значений, начинаются взрывные термоядерные реакции и почти все выпавшее между вспышками вещество за сотню секунд перегорает в более тяжелые элементы. Взрыв сопровождается возрастанием потока рентгеновского излучения. Горение идет у основания слоя, так что выходящее излучение «термолизуется», приобретая чернотельный спектр с температурой, соответствующей температуре оболочки (менее 10^7 К).

Так как поверхность нейтронной звезды примерно в миллион раз меньше, чем белого карлика, то плотность и температура, необходимые для взрыва, достигаются гораздо быстрее, чем на белом карлике. Поэтому «повторные новые» на нейтронных звездах вспыхивают не раз в 100 лет, а раз в несколько часов.

Но возникает несколько вопросов. Прежде всего, почему барстеры не бывают рентгеновскими пульсарами и почему рентгеновские пульсары — не барстеры? Ответ на этот вопрос кроется в гигантских различиях магнитных полей рентгеновских пульсаров и барстеров. На рентгеновских пульсарах напряженность магнитного поля достигает $10^{12} - 10^{13}$ Гс. Вследствие этого вещество выпадает не на всю поверхность, а только на 1 % ее вблизи магнитных полюсов.

При одинаковых темпах аккреции температура и плотность вещества у рентгеновского пульсара значительно выше, чем у барстера, и, по-видимому, выше, чем критические значения, необходимые для загорания термоядерных реакций. В результате вещество перегорает по ходу, не взрываясь, а так как эффективность термоядерных реакций в 100 раз меньше «КПД» аккреции, то на фоне аккреции светимость термоядерных реакций незаметна.

Магнитные поля барстеров в десятки тысяч раз слабее. Магнитосфера барстера прижата к поверхности нейтронной звезды, и вещество выпадает изотропно. Поэтому барстер — не пульсар. На самом деле даже столь слабое магнитное поле может влиять на однородность излучения, и у барстеров должно наблюдаться слабенькое «подрагивание» рентгеновского потока с периодом, равным периоду вращения нейтронной звезды. По-видимому, такое явление будет обнаружено в недалеком будущем. Теория предсказывает, что барстеры должны вращаться очень быстро, с периодами в несколько тысячных или сотых долей секунды. Это ясно — аккрецируемое вещество ускоряет нейтронную звезду, а слабое магнитное поле практически не препятствует быстрому вращению.

Вторая загадка барстеров состоит в том, что долгое время никак не удавалось доказать их двойственность. Среди барстеров не наблюдали затменных систем. Этот статистический парадокс получил следующее естественное объяснение. Представьте себе, что барстер — это двойная система, где в паре с нейтронной звездой находится очень легкая,

в десятки раз меньшая по массе нормальная звезда. Даже заполняя свою полость Роша, она по размерам значительно меньше размеров двойной (см. рис. 79). Ясно, что вероятность затмений рентгеновского источника маленькой звездой невелика. В среднем одна затменная система должна приходиться на десять незатменных. В 1982 году одна такая система была найдена. Период этой системы всего 50 минут — чуть продолжительнее школьного урока!

Как удалось доказать, что барстер — это нейтронная звезда? Мы уже отмечали, что во время вспышек спектр рентгеновского излучения близок к спектру черного тела, т. е. он подчиняется закону Стефана—Больцмана. Определив температуру и светимость, можно найти площадь, а следовательно, и радиус излучающей звезды. Он оказался равен примерно 10 км, что и предсказывает теория нейтронных звезд.

Как образуются такие системы? Есть два пути: либо неконсервативный сценарий Ван ден Хёвела, либо механизм Шацмана. Какой механизм выбрать? Данные наблюдений предъявляют очень специфические требования. Необходимо отметить следующий удивительный факт (это уже третья особенность барстеров): примерно половина рентгеновских барстеров сосредоточена в шаровых скоплениях, где нахо-

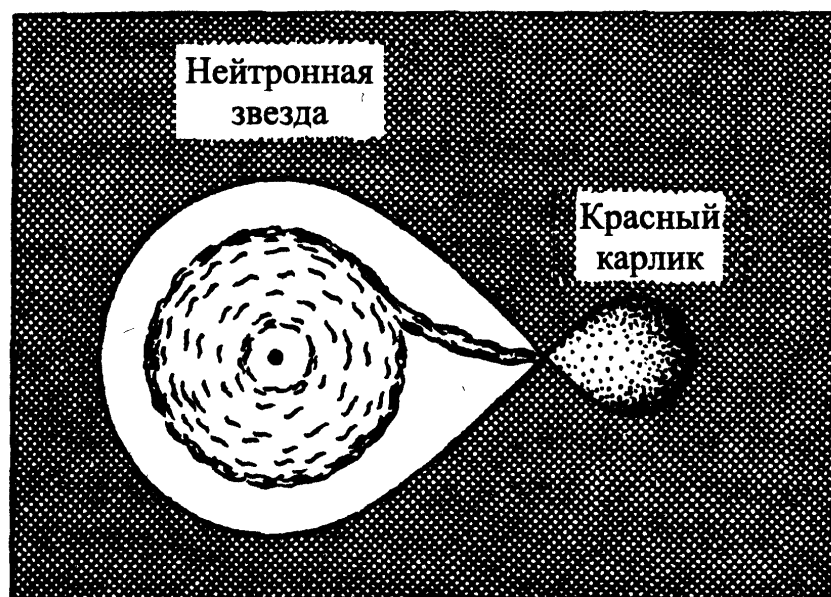


Рис. 79. Перетекание в двойной системе рентгеновского барстера

дится всего $1/1000$ часть звезд всей Галактики. Почему шаровые скопления и вся остальная Галактика так несправедливо разделили между собой барстеры?

Оба известных сценария появления нейтронных звезд в карликовых системах, кажется, не дают такой диспропорции. Поэтому был предложен третий путь — случайный захват красного карлика нейтронной звездой. Вероятность захвата пропорциональна квадрату плотности звезд. В шаровых скоплениях плотность в сотни миллионов раз выше, поэтому барстеры только там и образуются. А барстеры вне шаровых скоплений могли быть выброшены из них. Не исключено, что часть барстеров вне шаровых скоплений образовалась под действием механизма Шацмана или по сценарию Ван ден Хёвела.

7. Если бы не общая теория относительности

Все системы, о которых мы рассказывали в этой главе, — это двойные системы, где реализуется второй обмен массой, связанный с заполнением полости Роша нормальной звездой. Зачастую вещество течет с меньшей звезды на большую. Например, в рентгеновских барстерах, в системах типа U Близнецов, в полярах и т. д. В гл. IV, посвященной первому обмену, мы выяснили, что при перетекании с меньшей звезды на большую система «разъезжается». Перетекание идет со скоростью, с которой расширяется звезда, догоняя увеличивающуюся полость Роша. Это — ядерная шкала времени. Но у рассмотренных в настоящей главе систем массы нормальных звезд составляют десятые доли массы Солнца, для них ядерное время превышает возраст Вселенной. Наблюдения же темпа перетекания говорят, что характерное время изменения массы в таких системах — $10^8 - 10^9$ лет, т. е. в сотни раз меньше!

Неужели мы где-то ошиблись? Вовсе нет. Просто нужно учесть законы общей теории относительности. Как впервые

заметил польский астрофизик Богдан Пачинский, в сверхтесных системах с периодом меньше 10 часов важную роль начинает играть излучение гравитационных волн тесной двойной системой. Подобно тому, как ускоренно движущиеся заряды рожают электромагнитные волны, ускоренно движущаяся масса рождает гравитационные волны. Гравитационные волны уносят энергию системы, и она сжимается. Именно это сжатие и компенсирует расхождение (расползание) двойной системы, связанное с переносом массы. Перетекание идет в шкале излучения энергии гравитационными волнами. Расчеты, сделанные по формуле для излучения гравитационных волн двойной системой (выведена А. Эйнштейном), находятся в отличном согласии с наблюдаемым характерным темпом переноса массы. Ученые строят дорогостоящие детекторы гравитационных волн. И есть надежда, что гравитационные волны скоро откроют.

Однако сомневаться в их принципиальном существовании не приходится, как мы не сомневаемся в существовании сотен тысяч двойных звезд в Галактике, которых не было бы без гравитационных волн.

Второй обмен массой в маломассивных двойных приводит к образованию мощных рентгеновских источников. А как происходит второй обмен у массивных систем, где потоки вещества на релятивистские звезды в миллионы раз мощнее? Об этом — следующая глава.

VII

Космическое «чудо»

1. На все четыре стороны	199
2. Они должны вернуться	201
3. Почему вдвоем?	204
4. Кинематическая модель	207
5. Хотя что-то знакомое	211
6. Сверхкритическая аккреция	214
7. «Ужасы» второго обмена	220

Космическое «чудо»

Парадокс Алголя и спектральные свойства β Лиры убеждают в реальности первого обмена массой, приводящего к перемене ролей. Благодаря ей массивные системы не распадаются после первого взрыва, а вступают в новую стадию эволюции. Это подтверждается существованием массивных рентгеновских систем типа Центавра X-3 и Лебедя X-1. Оптические звезды в этих системах — голубые сверхгиганты массой более $(15 \div 20)M_{\odot}$ — интенсивно теряют вещество в виде звездного ветра. Перехватывая даже малую часть истекающего от звезды ветра, релятивистские звезды вспыхивают «ярче тысячи Солнц». При этом темп аккреции на релятивистскую звезду составляет $10^{-9} \div 10^{-10} M_{\odot}/\text{год}$. Светимость аккрецирующей звезды прямо пропорциональна темпу аккреции (см. формулу (15)). Сверхгигант в результате ядерной эволюции должен заполнить полость Роша, и начнется второй обмен; вещество потечет с более массивной звезды на менее массивную. Мы видели, что при таком перетекании звезды сближаются, и это не позволяет звезде уйти под полость Роша. В результате звезда начинает терять массу в тепловой шкале времени, которая для массивных звезд составляет десятки тысяч лет. Если бы все это вещество падало на поверхность релятивистской звезды, то темп аккреции был бы $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$, т. е. в миллионы раз больше, чем в рентгеновских системах. Но наивно было бы думать, что в этих условиях светимость релятивистской звезды воз-

растет в миллионы раз. При очень больших светимостях предположения, которые мы делали при выводе светимости аккрецирующей звезды, оказываются неверными. При увеличении темпа аккреции и светимости возрастает давление излучения, возникающего в результате аккреции. Если бы сила давления излучения стала больше силы гравитации, падение вещества стало бы невозможным. Отсюда ясно, что светимость аккрецирующей звезды не может быть сколь угодно большой. Такой же предел светимости существует и для обычных звезд. Этот предел открыл сэр Артур Эддингтон, когда исследовал равновесие звезд большой светимости.

Сила давления света, действующая на горячую плазму, пропорциональна потоку света, падающему на единицу площади, или освещенности. А освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния до звезды. Значит, сила давления света уменьшается с расстоянием точно так же, как и сила притяжения. Если на каком-то расстоянии сила давления света больше силы гравитации, то она больше и на любом другом расстоянии. Поэтому критическая светимость (эддингтоновский предел) не зависит от расстояния, а определяется только массой звезды:

$$L_{\text{Э}} = 33\,000 L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right). \quad (19)$$

Звезда с массой Солнца не может быть ярче Солнца больше, чем в 33 000 раз. Иначе силы давления излучения разорвут ее.

Аккрецирующая звезда тоже не может иметь светимость существенно больше (например, в 100 раз) эддингтоновской светимости. А так как светимость звезды пропорциональна темпу аккреции, то, очевидно, поток вещества не может быть больше темпа аккреции, соответствующего эддингтоновскому пределу. Для релятивистских звезд солнечной массы максимальный темп аккреции оказывается

порядка $10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$. С другой стороны, оптическая звезда-сверхгигант, заполнив полость Роша, ничего «не желает знать» о пределе Эддингтона для соседки и поставляет ей в 10 000 раз больше вещества, чем та может принять!

Точная теория такого сверхкритического режима аккреции еще не создана. Возможно, здесь помогут наблюдения. Ведь должны же быть в Галактике такие системы сейчас! Продолжительность второго обмена порядка теплового времени сверхгиганта, т. е. около 10 000 лет. Вспомним, как считают звезды. Всего массивных двойных примерно 1 000 000, а живут они 10^8 лет, значит, в Галактике примерно 100 звезд, находящихся в процессе второго обмена. Если даже стадия второго обмена в массивных двойных в десятки раз короче теплового времени, должна же быть хоть одна такая система в Галактике?!

1. На все четыре стороны

Самым интересным открытием в астрофизике в конце 70-х годов прошлого века было открытие удивительных свойств источника SS 433. Его спектральные свойства оказались совершенно неожиданными даже для людей с самой необузданной фантазией. Но не для всех.

Как известно, Вселенная расширяется. Этот факт, предсказанный советским физиком А. А. Фридманом (метеорологом по профессии¹³⁾, был открыт американским астрономом Эдвином Хабблом в 1929 году. Он заметил, что далекие галактики удаляются от нас, причем скорость удаления тем больше, чем дальше они от нас находятся. Эта четкая закономерность, называемая сейчас законом Хаббла, позволяет

¹³⁾ Это доказывает, что метеорологи не всегда ошибаются. Правда, предсказание А. А. Фридмана было не столь конкретным. Он лишь утверждал, что Вселенная может быть нестационарной — т. е. она либо расширяется, либо сжимается.

определять расстояния до далеких галактик, измеряя скорости их удаления.

В 1963 году американский астроном Мартин Шмидт расшифровал спектры квазаров. Спектральные линии квазаров сдвинуты в красную сторону на десятки нанометров, что, согласно эффекту Доплера, соответствует удалению квазаров от нас со скоростью в десятки тысяч километров в секунду. А по закону Хаббла выходило, что квазары — самые далекие от нас и самые яркие объекты Вселенной. В последующие 15 лет были открыты и исследованы сотни квазаров, и все они показывают только красные смещения.

Великие законы часто рождают догмы. Догмой стало общее молчаливое мнение, что во Вселенной не может быть сильных (на десятки тысяч километров в секунду) смещений в фиолетовую сторону спектра. Иллюстрацией этого может служить следующая история.

На одном из заседаний общемосковского семинара, посвященного поиску и связям с внеземными цивилизациями, обсуждался вопрос о космическом «чуде». В наше время, по-видимому, самым ярким свидетельством отсутствия братьев по разуму во Вселенной является отсутствие «космических чудес» (речь идет, конечно, о цивилизациях, с которыми «есть о чем поговорить»). Эта идея, выдвинутая И. С. Шкловским, кажется довольно убедительной. Действительно, сверхцивилизация требует для поддержания своего существования «сверхусилий» и обязательно бы «наследила» где-нибудь во Вселенной. Во Вселенной должны были бы наблюдаться объекты или явления, необъяснимые в рамках законов неживой природы — «космические чудеса». Но их нет. Правда, оптимисты ссылаются на то, что мы толком и не знаем, что такое настоящее «чудо». Что это — квадратные галактики или летающие тарелки?

Квадратная, а точнее прямоугольная, туманность наблюдается (диск с ребра). А вот с тарелками тяжелее, но здесь —

дефицит профессиональных наблюдений, или, другими словами, данных наблюдений нет.

В пылу полемики кто-то придумал в качестве «чуда чудного» объект, в спектре которого одновременно наблюдались бы и красные, и фиолетовые смещения на десятки тысяч километров в секунду. Не может же быть, чтобы объект одновременно и удалялся, и приближался к нам, да еще с такой огромной скоростью! Это «понимают» и наши «братья по разуму». И мы понимаем, что они понимают, что мы понимаем... Значит, сделают они это специально, чтобы дать о себе знать. Нужно было только подождать, когда астрономы найдут такой объект.

А ждать оставалось недолго.

Не прошло и полгода, как такой объект открыли.казалось, он одновременно и приближался, и удалялся, и стоял на месте. Двигался сразу во все стороны, как заколдованный из «Волшебной лампы Аладдина».

2. Они должны вернуться

В начале 70-х годов прошлого века американские астрономы начали поиск объектов с яркими эмиссионными линиями. Для этого они использовали спектрограф с объективной призмой. Это обычный телескоп, перед объективом которого поставлена большая призма (рис. 80). Если бы призмы не было, то на фотопластинке, помещенной в фокусе объектива, получился бы просто участок звездного неба. Но призма разлагает свет звезд на цвета. На фотопластинке появится много изображений каждой звезды в разных цветах, т. е. спектры звезд. Хотя спектр каждой звезды получается не очень высокого качества, зато их много. Спектр звезды — это ее «отпечатки пальцев», по которым определяют ее свойства. С помощью спектрографа с объективной призмой астрономы проверяют сразу большое количество звезд.



Рис. 80. Спектрограф с объективной призмой

Мы уже знаем, что наличие ярких линий излучения всегда сопровождается необычными явлениями. Это и послужило причиной составления каталога странных звезд.

Под номером 433 в этот каталог вошла переменная звезда V1343 Орла. Уже на фотопластинке были видны в ее спектре яркие линии излучения водорода и гелия. (Через несколько лет выяснилось, что в направлении на область неба вблизи V1343 Орла находятся рентгеновский источник

и остаток вспышки сверхновой — радиотуманность W50.) В 1978 году итальянские астрономы провели более детальные исследования спектра источника SS 433 (SS — первые буквы фамилий авторов каталога). Спектр звезды оказался очень необычным, наряду с яркими линиями водорода и гелия в спектре наблюдались линии, которые не поддавались отождествлению. Итальянские астрономы, дабы привлечь внимание других исследователей к этой звезде, опубликовали полученные данные в специальном циркуляре Международного астрономического союза.

На это сообщение откликнулась группа американских астрономов под руководством Брюса Маргона. Они провели тщательнейшие наблюдения этого объекта и первыми расшифровали его спектр (см. рис. 81). Оказалось, что неотожествленные линии — это те же линии водорода и гелия, но сдвинутые в фиолетовую и красную стороны на десятки нанометров. Получалось, что каждый атомный переход водорода был представлен не одной, а тремя линиями: одна, самая яркая линия, находилась в «обычном» месте, а две

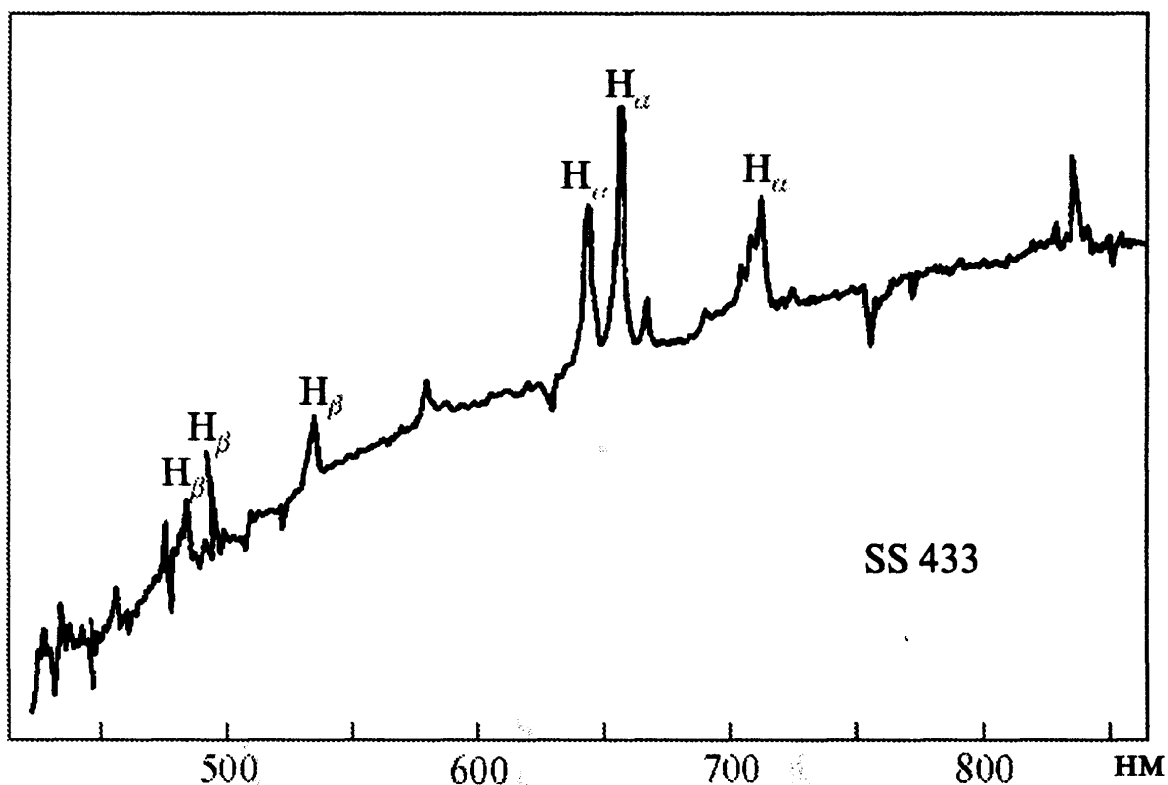


Рис. 81. Спектр SS 433

другие, смещенные по разные стороны на огромные «расстояния», соответствовали скоростям движения в десятки тысяч километров в секунду. Каково же было изумление астрономов, когда они увидели на более поздних спектрограммах, как смещенные линии «поползли» навстречу друг другу!

На появившееся сообщение о движении спутников линий по спектру быстро отреагировал известный своими оригинальными идеями астрофизик Мильгром. Он предположил, что линии движутся периодически и через некоторое время должны вернуться обратно на то место, где их впервые обнаружили.

Вскоре американские астрономы полностью подтвердили гипотезу о периодическом «хождении» линий по спектру. Период оказался близким к 164 дням. Кривые лучевых скоростей, построенные по фиолетовым и красным компонентам линий, близки к синусоидам, колеблющимся в противофазе (см. рис. 82).

Спектры были не просто сдвинуты на полпериода по фазе. Обращало на себя внимание то, что кривые имели одина-

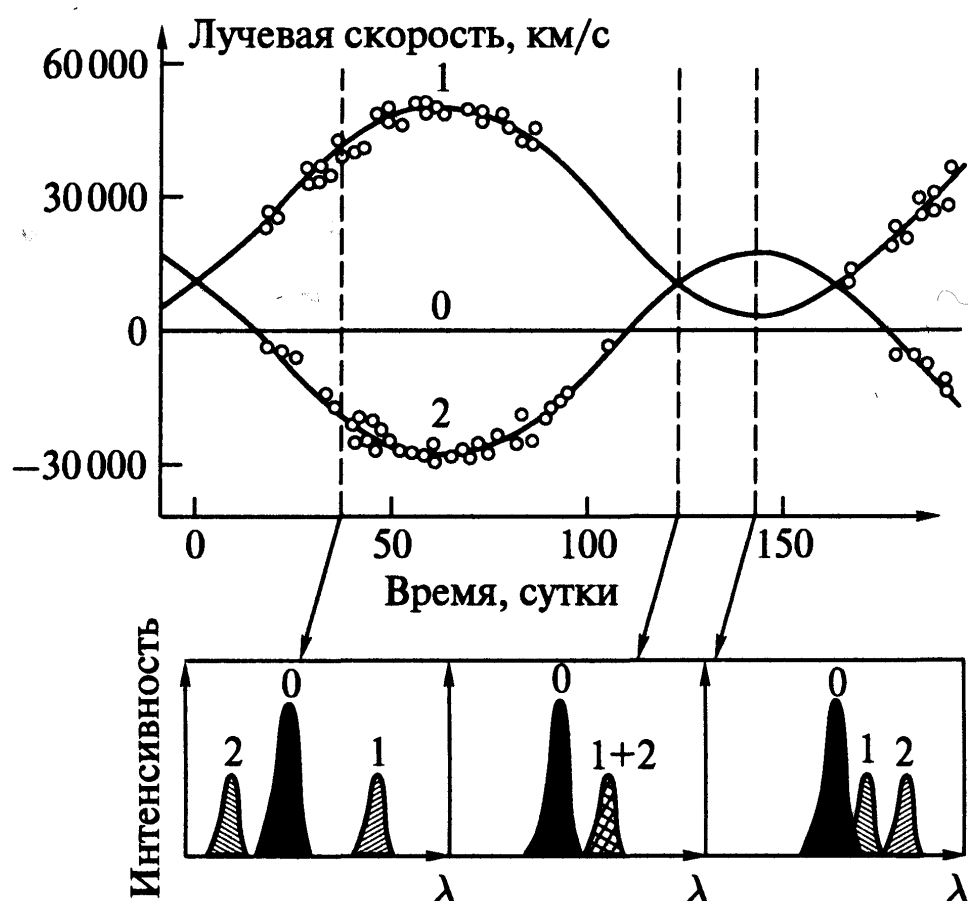


Рис. 82. Кривые лучевых скоростей, построенные по двум системам линий SS 433

ковую амплитуду ($\sim 40\,000$ км/с) и были раздвинуты по оси ординат, образуя цепь из чередующихся неравных звеньев. Соединения звеньев соответствовали равенству лучевых скоростей обеих смещенных компонент (см. рис. 82). Но самое интересное, что смещенные линии встречались не втроем, а вдвоем. Это тот самый случай, когда по количеству встречающихся можно выяснить причину встречи.

Все эти удивительные свойства помогли разгадать загадку «хождения» линий и ответить на вопрос, почему возникают смещенные линии.

3. Почему вдвоем?

Из-за чего в спектре SS 433 все линии утроены? В физике известны три механизма, которые могли бы вызвать расщепление линии в астрофизической ситуации. Это смещение

линий при относительном движении вследствие эффекта Доплера, смещение линий в гравитационном поле и так называемое зеемановское расщепление линий в магнитном поле.

Зеемановское расщепление возникает в веществе, помещенном в магнитное поле. Давайте поместим атом в магнитное поле. Тогда электрон будет двигаться не только под действием притяжения ядра, но еще и взаимодействуя с магнитным полем. Энергетические уровни атома расщепляются, и вслед за этим расщепляются спектральные линии, возникающие при переходе на эти уровни. При расщеплении в сильном магнитном поле относительный сдвиг линий $\Delta\lambda/\lambda$ зависит от длины волны линии (от энергии уровня). Разные линии одних и тех же атомов должны иметь разные относительные сдвиги. Это полностью противоречит наблюдениям, из которых следует, что относительные сдвиги у разных линий и в синей, и в красной области спектра одинаковы.

Таким свойством обладает гравитационное красное смещение. Гравитационное смещение длины волны возникает, когда фотон излучается атомом, помещенным в гравитационное поле. Улетая от притягивающего тела, фотон совершает работу против силы тяжести и должен терять «кинетическую энергию», определяемую по формуле Планка. Скорость фотона уменьшиться не может, поэтому меняются его частота и длина волны. Для обычных звезд этот сдвиг крайне мал и ненаблюдаем, но для релятивистских звезд может достигать десятков нанометров.

Но гравитационный сдвиг для внешнего наблюдателя «работает» всегда в одну сторону — в сторону уменьшения энергии фотона, т. е. увеличения длины волны (его покраснения). Как же объяснить появление фиолетовых смещений в спектре SS 433?

Остается единственный механизм — доплеровское смещение линий. Приняв такую гипотезу, приходится признать, что в звезде V1343 Орла имеются три отдельно излучающие области. Первая практически неподвижна. В ней образуются

несмещенные линии излучения. Две другие области движутся с гигантскими скоростями в противоположные стороны, причем лучевые составляющие их скоростей должны быть равны по значению и противоположны по направлению.

Мы уже отмечали интересную особенность кривых лучевых скоростей: в момент встречи «бегающих» линий они все равно смещены относительно стационарной компоненты (встречаются вдвоем). Казалось бы, это противоречит доплеровскому механизму смещения линий. Если лучевые скорости меняются в противофазе, то встретиться они могут только в момент, когда их лучевые скорости обращаются в нуль. При этом их положение должно совпадать с положением несмещенной линии, у которой лучевая скорость всегда равна нулю. Смещенные же линии в момент встречи имеют гигантскую положительную лучевую скорость: $\sim 20\,000$ км/с. Парадокс исчезает, если учесть законы специальной теории относительности. А это необходимо сделать, поскольку наблюдаемые скорости не малы по сравнению со скоростью света.

Согласно специальной теории относительности для неподвижных наблюдателей (Земли) время в движущейся системе отсчета замедляется в $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ раз, где v — полная скорость движения. Следовательно, будет меняться частота колебаний электромагнитной волны, т. е. ее длина волны (причем всегда в красную сторону). Эффект остается, даже если лучевая скорость переходит через нуль, т. е. источник излучения движется поперек луча зрения. Поэтому его называют поперечным эффектом Доплера. Правильная формула эффекта Доплера выглядит так:

$$\frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{изл}}} = \frac{1 + v_{\text{л}}/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (20)$$

В этой формуле $v_{\text{л}}$ — по-прежнему лучевая скорость, а v — полная скорость излучателя.

В момент встречи движущихся линий лучевая скорость равна нулю и длина волны принимаемого излучения опреде-

ляется полной скоростью движения v . Измерив длину волны линии в момент встречи, можно найти полную скорость движения излучающей области. (На практике не нужно ждать момента встречи линий. Достаточно найти среднее арифметическое из длин волн фиолетовой и красной компонент — это и будет длина волны места встречи.)

Полная скорость оказалась равной 80 000 км/с, т. е. почти трети скорости света.

4. Кинематическая модель

Кривая лучевых скоростей говорит о том, что излучающие области, в которых формируются смещенные спектральные линии, движутся строго в противоположных направлениях, причем строго периодически меняется и лучевая компонента скорости.

Можно было бы предположить, что SS 433 — тройная звездная система, в которой масса одной звезды много больше двух других. Период обращения менее массивных звезд равен 164 дням (см. рис. 83). Смещенные компоненты линий образуются на менее массивных спутниках, которые движутся по одной и той же орбите, строго в противофазе. А несмещенные линии образуются на центральной звезде.

Однако такая искусственная модель совершенно не выдерживает «количественной» критики. Зная скорость орбитального движения (80 000 км/с) и период обращения, по третьему закону Кеплера (формула (2)) можно найти массу центральной звезды. Она оказывается равной $10^9 M_{\odot}$, что всего на порядок меньше массы Галактики. Эта гигантская величина никого устроить не могла. Есть и другой аргумент против такой модели.

Подсчитаем, за сколько времени свет проходит всю орбиту тройной системы по диаметру. Полный круг звезды проходят со скоростью 80 000 км/с за 164 дня. Но диаметр

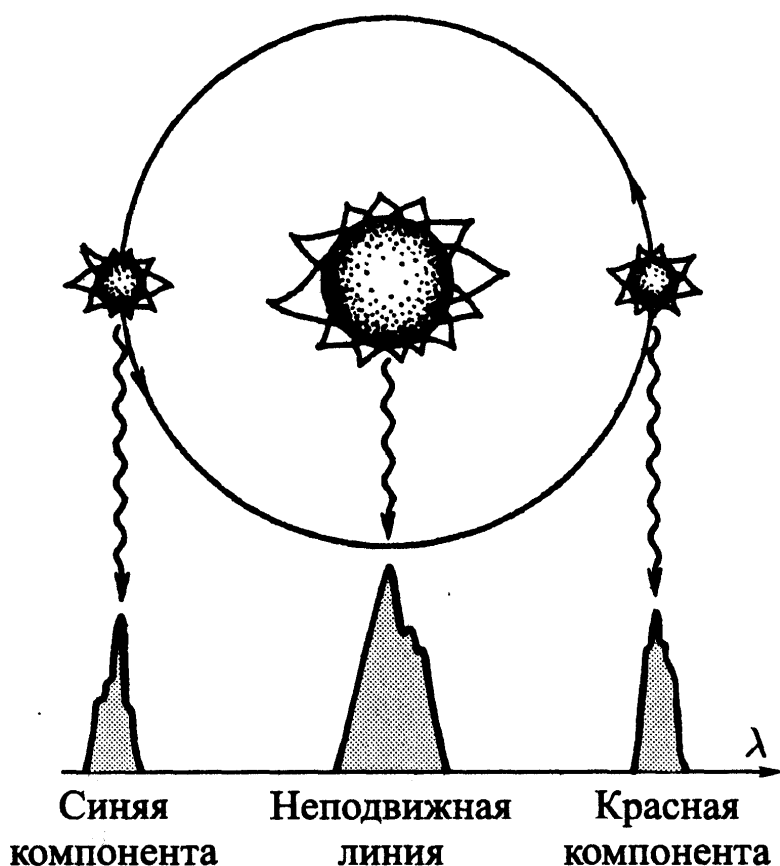


Рис. 83. Тройная звездная система —
неправильная кинематическая модель SS 433

меньше длины окружности в π раз. Значит, свет проходит диаметр системы за время $(164/3,14) \times (80\,000/300\,000) = 14$ дней. Обращение в нуль лучевой скорости у одной из звезд произошло бы на 14 дней раньше, чем у другой, что противоречит наблюдениям. Эта модель не годится из чисто кинематических соображений.

Очевидно, чтобы уменьшить массу объекта, нужно отказаться от пагубной идеи, что 164 дня — это орбитальный период. Иначе мы меньше $10^{10} M_{\odot}$ для SS 433 не получим. Это можно было бы сделать следующим образом. Представим себе газовое кольцо (или диск), вращающееся вокруг некоего тела необычной природы со скоростью 80 000 км/с (см. рис. 84). Из центрального тела бьют два пучка жесткого (высокоэнергетичного) излучения и пересекают кольцо в двух небольших областях. Здесь вещество разогревается и светит. Ясно, что от одного такого пятна линии будут сме-

щены в красную сторону, а от другого — в фиолетовую. Теперь представим себе, что вся система жестко вращается вокруг некоторой оси с периодом 164 дня. Тогда возникнет периодическое хождение линий по спектру.

Но и в этой модели масса центрального тела оказывается нереально большой. Светимость в смещенных линиях примерно в 100 раз больше светимости Солн-

ца, а температура, судя по спектру, близка к 10 000 К, что всего в полтора раза больше, чем температура фотосферы Солнца. Размеры излучающих областей не могут быть существенно меньше, чем 10 радиусов Солнца. Радиус кольца должен быть, по крайней мере, в 10 раз больше, т. е. равен примерно 100 радиусам Солнца. Это близко к размеру земной орбиты. Земля движется вокруг Солнца со скоростью 30 км/с, а газ в кольце такого же радиуса — со скоростью 80 000 км/с. Масса центрального тела в такой модели должна быть в $(80\,000/30)^2 = 7\,000\,000$ раз больше.

Чтобы еще уменьшить массу, нужно отказаться от мысли, что 80 000 км/с — это скорость орбитального движения. Так мы приходим к правильной модели. Представьте себе, что некое тело выбрасывает в двух противоположных направлениях струи газа со скоростью 80 000 км/с. Вылетая, газ расширяется, охлаждается и рекомбинирует. При этом и возникают смещенные линии излучения. Направление выброса струй вращается вокруг некоторой оси (см. рис. 85) с периодом 164 дня. Из-за этого меняется лучевая компонента скорости движения струй. Движение струй достаточно медленное, так что газ успевает высветить свою энергию прежде, чем струи существенно сдвинутся.

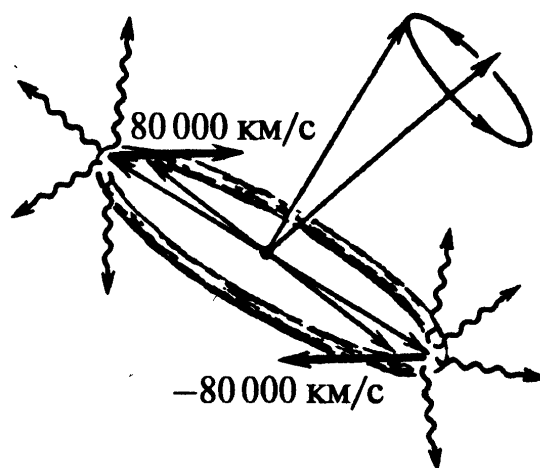


Рис. 84. Газовое кольцо, освещенное пучком излучения, — неправильная модель SS 11433

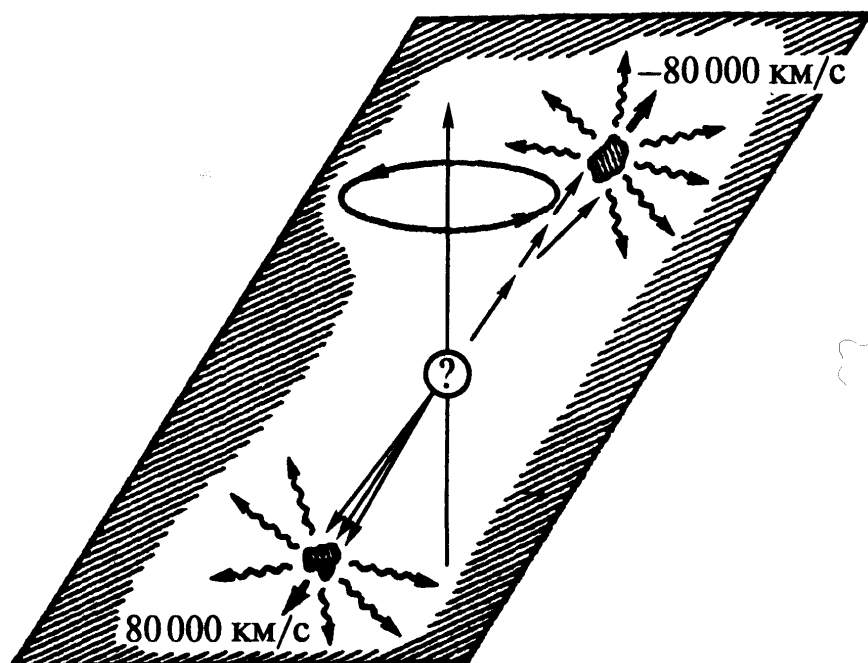


Рис. 85. Вещество выбрасывается
в двух противоположных направлениях

Из механики твердого тела известно явление прецессии, которое состоит в том, что ось вращающегося тела при воздействии внешнего момента сил начнет периодически менять свое направление, описывая конус. Это — вынужденная прецессия. Существует и свободная прецессия. Она возникает в том случае, когда ось вращения тела не проходит через его центр масс.

В нашем случае 164-дневное вращение линии выброса струй авансом называли прецессией, а 164-дневный период — прецессионным периодом. Сейчас никто не сомневается в этой кинематической модели, а вот о природе вращения направленных выбросов еще идут споры.

Почему мы уверены в том, что SS 433 действительно выбрасывает две струи газа с субрелятивистскими скоростями? Потому, что эти струи просто видны. Правда, не в оптическом, а в радио- и рентгеновском диапазонах (см. рис. 86). Излучение в видимом свете рождается на сравнительно близких расстояниях от центрального тела, так что рассмотреть даже в самый лучший телескоп и в самую лучшую погоду струи газа нельзя. Радиоизлучение возникает гораздо даль-

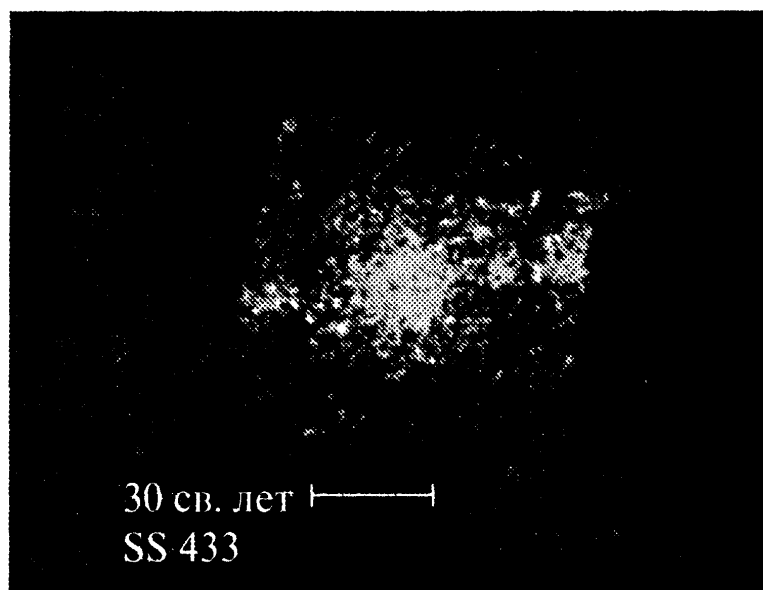


Рис. 86. Снимок SS 433 в рентгеновских лучах
(с борта обсерватории «Эйнштейн»)

ше, да и возможности радиотелескопов богаче. На радиоизображении просто видно, как из центральной области вылетают отдельные сгустки вещества, а направление выбросов меняется с периодом 164 дня. Так как скорость вылета нам известна, а угловое перемещение сгустков мы видим, то удалось определить расстояние до источника SS 433. Оно равно 10 000 световых лет, т. е. SS 433 принадлежит нашей Галактике (размер Галактики — 100 000 световых лет). Такого еще в нашей Галактике не видел никто. Чтобы понять хотя бы примерно, что же происходит в этом объекте, нужна была хоть какая-нибудь зацепка, хоть что-то обычное и знакомое.

5. Хоть что-то знакомое

Нет плохих телескопов, а есть плохие наблюдатели. Справедливость этого правила была подтверждена советским астрофизиком А. М. Черепашуком, который с помощью маленького (по современным масштабам) телескопа сделал важнейшее открытие, пролившее свет на природу источника SS 433.

Уже в первые месяцы «золотой лихорадки», поднявшейся вокруг SS 433, американские астрономы обнаружили, что центральные несмещенные линии слегка подрагивают с полуамплитудой 70 км/с и периодом около 13 дней. Позже поступило сообщение о том, что блеск звезды тоже меняется с таким же периодом. Но эти данные были слишком ненадежны и ничего не проясняли. Нужны были длительные наблюдения.

Они были проведены на небольшом телескопе, с диаметром зеркала 60 см. По негласной классификации современный большой телескоп — это телескоп с диаметром более 2 м. Телескоп с диаметром зеркала от 1 до 2 м считается средним. Остальные — маленькие.

Но маленькие телескопы обладают одним важным преимуществом по сравнению с большими — их много и они не так загружены. Чтобы надежно установить 13-дневный период переменности блеска, необходимо затратить несколько месяцев. Несколько месяцев, а не 13 дней!

На строго периодические изменения блеска звезды накладываются хаотические. В этом виновны, во-первых, атмосферные мерцания, а во-вторых, внутренняя (ее еще называют физической) переменность звезды. Чтобы усреднить случайную величину, необходимо время. Если хаотические колебания по амплитуде такие же, как периодические, то кривая блеска вырисовывается лишь после того, как вы отнаблюдаете много периодов переменности.

Наблюдая SS 433 в течение нескольких месяцев подряд, А. М. Черепашук получил возможность построить надежную кривую блеска. Ее вид напоминал кривую Алголя и не оставлял сомнений в том, что SS 433 — это затменная двойная система (см. рис. 87).

Так впервые в этом загадочном объекте появилось что-то знакомое и понятное. Дальше важно было установить, что же это за двойная. Линии поглощения в спектре SS 433



Рис. 87. Кривая блеска SS 433, полученная А. М. Черепашуком

не видны. По крайней мере, их никто не нашел. Непрерывный спектр звезды имел максимум в красной области, что указывало на малую температуру. Известно, что холодные звезды — это, как правило, маломассивные звезды. Поэтому первое время многие полагали, что SS 433 — это маломассивная двойная система.

Заблуждение быстро рассеялось, когда астрономы учли поглощение света межзвездной пылью. Созвездие Орла близко к плоскости Галактики, где много пыли. Зная расстояние до SS 433, удалось найти, что пыль ослабляет видимый блеск источника примерно на 8 величин, т. е. в 1500 раз. Но пыль не одинаково поглощает красные и синие лучи, а именно, красные поглощаются слабее, чем синие. (Кстати, по этой причине заходящее Солнце красное.)

Если учесть это, то оказывается, что звезда V1343 Орла не красная и холодная, а голубая и горячая. Анализ кривых блеска показал, что оба объекта (будем пока так называть компоненты двойной) имеют высокую температуру (выше 20 000 К) и примерно одинаковую яркость в видимом свете (глубины затмений не сильно отличаются друг от друга).

Если хотя бы одна компонента — обычная звезда, то эта звезда массивная. Размер звезды сравним с размером двойной системы. Возникло подозрение: а не заполняет ли нормальная звезда свою полость Роша и, как и β Лир, истекает на соседку?

Но это, казалось, противоречило наблюдаемым особенностям спектра. Несмещенные компоненты линий имеют ширину в несколько тысяч километров в секунду. Следовательно, они образуются в оптически тонком веществе, истекающем из двойной системы. Это очень похоже на звездный ветер от голубых сверхгигантов. Похоже, но не совсем. Темп истечения вещества в SS 433 в сотни раз выше, чем у обычных сверхгигантов. Он измеряется величиной порядка $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$. Именно такой поток массы должен, согласно теории, перетекать с массивной звезды, заполнившей полость Роша, на менее массивную компоненту.

Так что же происходит в системе звезды V1343 Орла — перетекание или истечение?

6. Сверхкритическая аккреция

Перед тем как вступать в область гипотез, нужно четко отделить наблюдаемое от воображаемого. Надежно установлено, что SS 433, она же V1343 Орла, — двойная система, период обращения которой равен примерно 13 дням. Период почти такой же, как у системы β Лиры. Из системы истекает вещество со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. Скорость истечения вполне нормальная, обычная для горячих O–B звезд, а вот темп истечения аномально велик. Само по себе это еще не повод для беспокойства. Если бы на этом список характерных свойств SS 433 закончился, то эту звезду можно было бы, хотя и с трудом, вписать в рамки обычных двойных звезд.

Но, кроме всего прочего, двойная система по непонятной причине выбрасывает две струи газа с гигантской скоростью: 80 000 км/с. Направление выброса струй «прецессирует» с периодом 164 дня. Струи наблюдаются в радио- и рентгеновском диапазонах. Двойная окружена туманностью, напоминающей остаток вспышки сверхновой. К этому стоит

добавить, что сама звезда очень слабо излучает в рентгеновском диапазоне. На этом надежная информация кончается.

Весьма вероятно, что одной из компонент двойной системы является голубая звезда спектрального класса В с массой больше или порядка $10M_{\odot}$. О природе второй звезды пока известно очень мало. Вероятнее всего, это релятивистская звезда — нейтронная звезда или черная дыра — на что указывают большая скорость выброса струй и остаток вспышки сверхновой.

Но почему релятивистская звезда ведет себя столь странным образом? В массивных двойных системах релятивистские звезды становятся яркими источниками рентгеновского излучения. В системе SS 433 совершенно не то. По своим наблюдательным свойствам вторая компонента двойной больше напоминает обычную горячую звезду. И если бы не релятивистские струи, ее вполне можно было бы отнести к ряду нормальных звезд.

Взгляните на табл. 2, в которой приведены физические характеристики рентгеновских пульсаров. Нет ни одного пульсара, светимость которого значительно превышала бы эддингтоновский предел $(19)^{14)}$. Это не случайно. Все рентгеновские пульсары «работают» в режиме докритической аккреции. Или не сильно превышая эддингтоновский предел. Совершенно по-другому выглядит релятивистская звезда, на которую идет сверхкритическая аккреция.

Сверхкритическая аккреция обязательно должна возникнуть в тесной двойной системе при втором обмене массой через внутреннюю точку Лагранжа. Темп перетекания при этом в десятки тысяч раз превышает критическое значение, соответствующее эддингтоновскому пределу. Если бы все вещество упало на релятивистскую звезду, то сила давления

¹⁴⁾ Массы рентгеновских пульсаров порядка нескольких масс Солнца, поэтому эддингтоновский предел для них равен 50–100 тыс. L_{\odot} (L_{\odot} — светимость Солнца).

излучения во столько же раз превышала бы силу гравитации. Вывод таков: все вещество не может упасть на звезду.

Но как же вещество может одновременно и падать, и не падать? Оказывается, может. Это легко устроить в случае дисковой аккреции. Н. И. Шакура и Р. А. Сюняев в 1973 году качественно описали возникающую при этом картину. Конкретно они рассмотрели сверхкритическую аккрецию на черную дыру. Вдали от черной дыры структура аккреционного диска слабо отличается от обычного докритического диска. На этих расстояниях энергия, выделяющаяся в диске, много меньше эддингтоновского предела и сила давления света невелика. Но вот на некотором расстоянии давление излучения становится сравнимым или даже больше силы гравитации. Часть вещества под действием излучения «выдувается» из диска. Остальная часть вещества продолжает продвигаться к черной дыре. Чтобы аккреция была стационарной, т. е. не зависящей от времени, на черную дыру должно падать вещества ровно столько, чтобы полная светимость в диске не сильно превышала эддингтоновский предел. Эддингтоновский предел вычисляется для случая статической (неподвижной) звезды, излучающей одинаково по всем направлениям. В диске, конечно, нет ни статичности, ни одинаковости. Поэтому небольшое превышение над эддингтоновским пределом не разрушает диск.

В режиме такой «полуаккреции» черной дыры достигнет только малая доля первоначально захваченного вещества. Почти целиком вещество «выдувается» в виде квазисферического потока, напоминающего звездный ветер. Вещества так много, что жесткое рентгеновское излучение, возникающее вблизи черной дыры, практически полностью поглощается им. Поэтому релятивистская звезда в сверхкритическом режиме не может быть ярким источником жесткого рентгеновского излучения. Внешний наблюдатель видит только «шубу», которая по внешним свойствам напоминает обычную звезду.

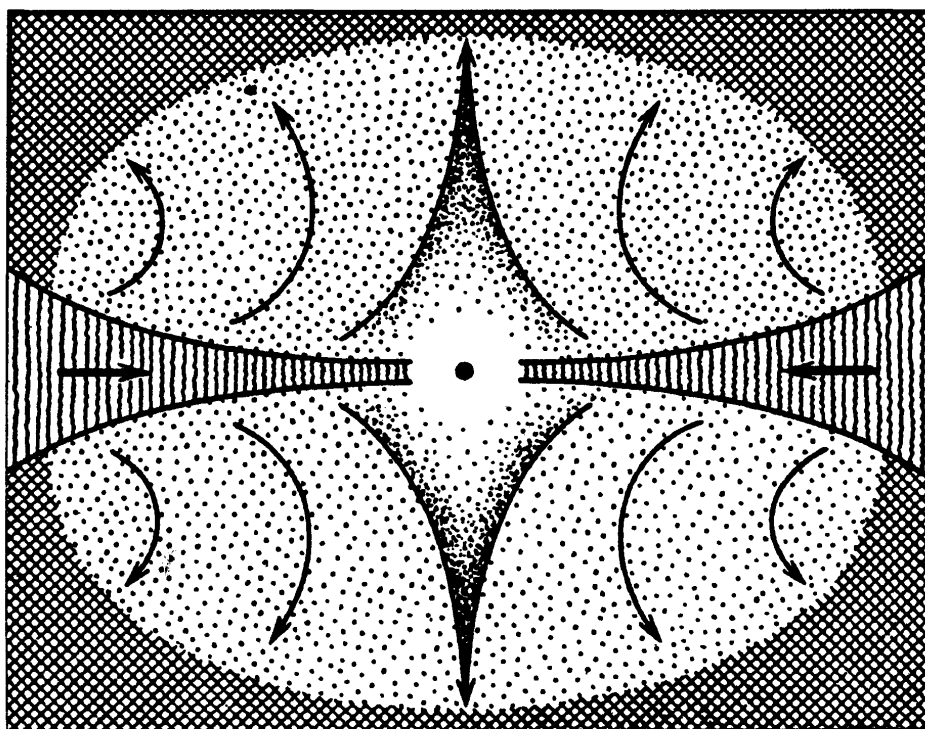


Рис. 88. Сверхкритическая дисковая аккреция

Аккреционный диск обладает выделенным направлением — осью. Вдоль этой оси могут вырываться струи газа, оттекающие с релятивистской скоростью от самых центральных областей аккреционного диска. Такая картина была описана за 6 лет до открытия уникальных свойств источника SS 433. Она могла бы рассматриваться как предсказание, если бы астрономы задолго до этого не обнаружили релятивистские струи в мире галактик и квазаров.

Классическим примером выбросов вещества (их называют джетами) из ядер галактик является выброс, наблюдаемый в галактике Дева А (см. рис. 89), известный еще с «древних» времен. Сейчас известны десятки примеров такого рода. Правда, струи в ядрах галактик движутся не с субрелятивистскими, а с ультрарелятивистскими скоростями. Это не обычное вещество, а сгустки релятивистских частиц, «запутавшихся» в магнитных полях, выброшенных вместе с ними из ядра галактики.

Именно для объяснения этих выбросов была предложена модель струй, вырывающихся вдоль оси сверхкритического диска.

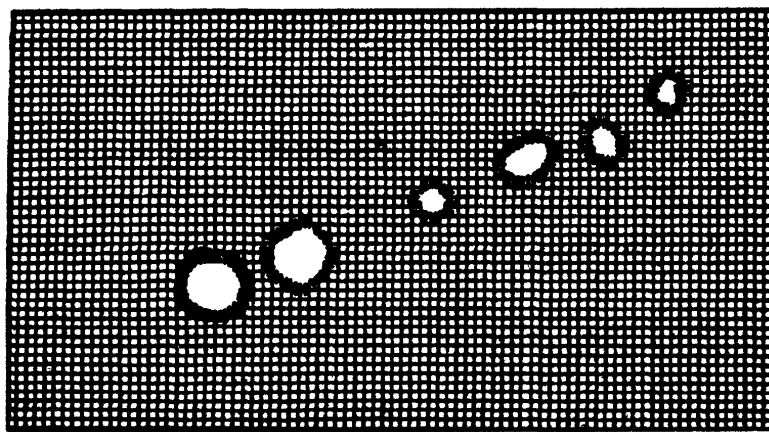


Рис. 89. Выброс из ядра галактики Дева А

Если на место черной дыры в центре сверхкритического диска поместить нейтронную звезду, то многое останется без изменений. По-прежнему все внутренности были бы скрыты от внешнего наблюдателя непрозрачной «шубой». Мы бы видели обычную звезду. Мощное магнитное поле нейтронных звезд разрушает сверхкритический диск на расстояниях в несколько десятков и сотен радиусов нейтронной звезды. Все вещество, достигающее магнитосферы, «сваливается» на поверхность нейтронной звезды. При этом выделяется энергия, в десятки и сотни раз превосходящая эддингтоновский предел. Часть вещества под действием сил давления излучения может быть выброшена вдоль магнитной оси нейтронной звезды со скоростью порядка второй космической для нейтронной звезды, т. е. со скоростью $\sim 100\,000$ км/с. Если ось вращения нейтронной звезды совпадает с ее магнитной осью, то внешний наблюдатель увидит, как из-под «шубы» в двух противоположных направлениях вырываются струи вещества, движущиеся с релятивистской скоростью.

Возможно, SS 433 — это двойная система, в которой сейчас происходит второй обмен массой, сопровождающийся образованием сверхкритического диска вокруг релятивистской звезды. При этом разрешается наблюдаемый парадокс: с одной стороны, несмещенные линии показывают существование звездного ветра, а величина потока массы скорее говорит о перетекании. Так и должно происходить при сверх-

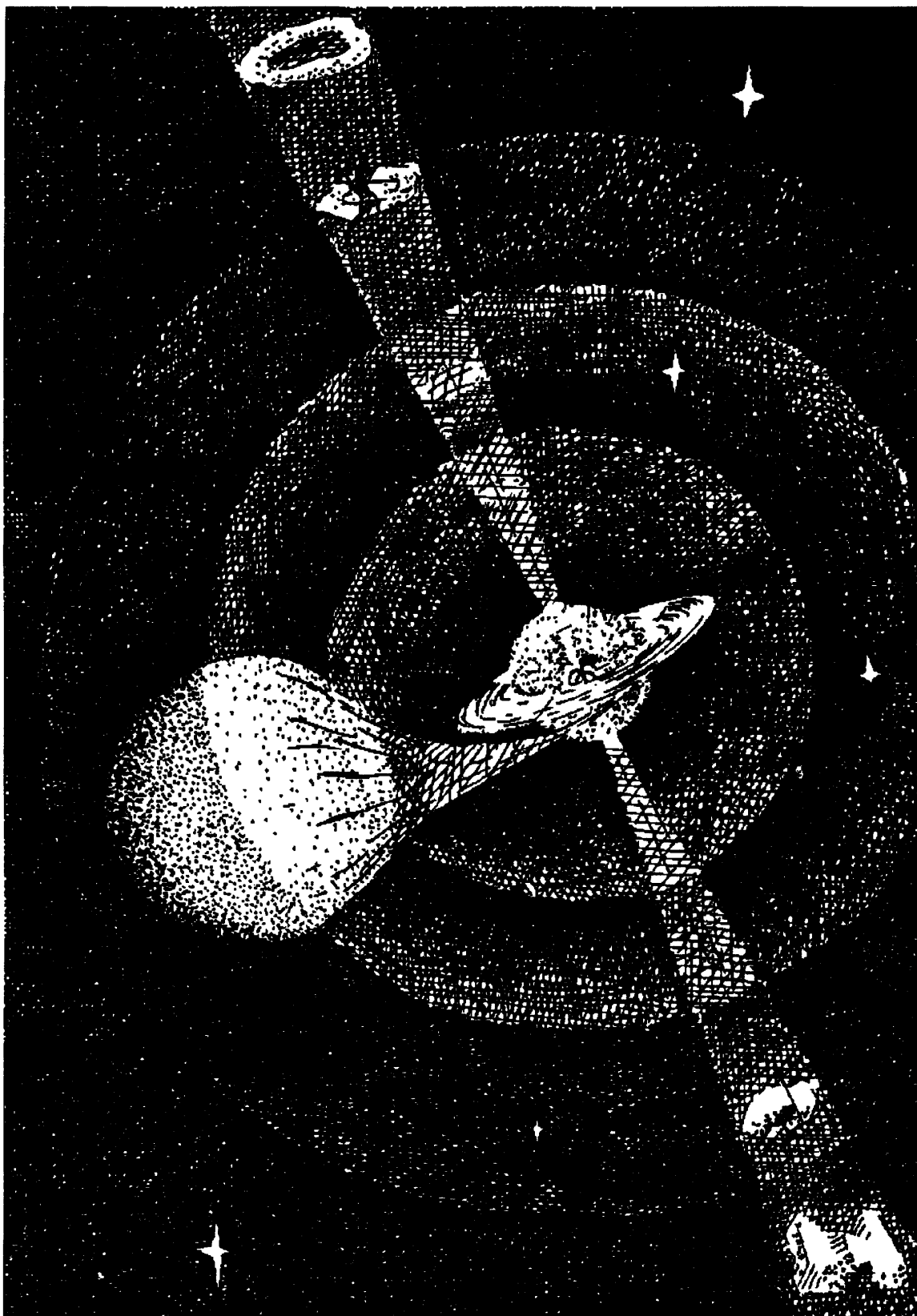


Рис. 90. Двойная в режиме сверхкритической аккреции

критической аккреции. Вещество в виде «гравитационного ветра» перетекает от нормальной звезды на релятивистскую звезду, а затем практически полностью истекает в виде звездного ветра от релятивистского спутника.

Как долго может длиться такой процесс? Точно это пока не известно. Возможно, десятки тысяч лет, а может быть, и тысячи. Если учесть, что свет от SS 433 идет к нам примерно 10 000 лет, то вполне вероятно, что сейчас в системе SS 433 обмен массы уже кончился. Мы же видим то, что происходило 10 000 лет назад.

Сейчас нет полной уверенности в том, что именно происходит или происходило в системе звезды V1343 Ора. До сих пор непонятна причина, из-за которой направление струй «ходит» с периодом 164 дня. Существует много гипотез на этот счет. Возможно, это явление сродни 35-дневному циклу Геркулеса X-1. Если ось вращения нормальной звезды не совпадает с осью вращения двойной, нормальная звезда начнет процессировать из-за приливной силы со стороны релятивистской звезды. Вместе со звездой будут покачиваться и направление истечения струй вещества, и плоскость аккреционного диска.

Такой «следающий» диск в Геркулесе X-1 периодически затмевает от нас рентгеновский пульсар, а в SS 433 меняет направление выброса струй. Эта очень привлекательная гипотеза сейчас широко распространена. Но автору кажется, что у нее есть большие недостатки и, возможно, здесь мы сталкиваемся совершенно с иным явлением.

Все эти проблемы остаются пока нерешенными. И все же с каждым годом растет уверенность в том, что SS 433 — первая массивная система, в которой мы встретились со вторым обменом массой, сопровождающимся образованием сверхкритического диска. Что происходит с двойной системой дальше?

7. «Ужасы» второго обмена

Второй обмен в массивной двойной обязательно сопровождается потерей массы. Релятивистская звезда просто физически не может принять все вещество, перетекающее от нор-

мальной звезды. Под действием давления излучения оно уносится из системы. При этом система теряет не только массу, но и вращательный момент. Из-за этого компоненты двойной системы начнут быстро «съезжаться» друг к другу. Это приводит к уменьшению полости Роша, нормальная звезда не успевает отреагировать на это уменьшение и теряет еще больше массы, что еще больше сближает звезды. Процесс самоускоряется, и релятивистская звезда оказывается внутри сверхгиганта. Сверхгигант «заглатывает» крошечную нейтронную звезду.

Лет 20–30 назад такого рода идеи показались бы по меньшей мере фантастическими. Теперь это будни астрофизики. Не одна сотня часов машинного времени была потрачена на то, чтобы понять, что происходит с релятивистской звездой, «проглоченной» сверхгигантом. Казалось бы, задачу решить просто. Строение нормальной звезды известно. Значит, известно и распределение плотности вещества в ней. Движение релятивистской звезды внутри нее подобно движению спутника, вошедшего в атмосферу Земли. Спутник тормозится сопротивлением воздуха и приближается к Земле по сильно закрученной спирали. Кстати, при этом скорость его не уменьшается, а увеличивается. Причина этого явления та же, что и у отрицательной теплоемкости звезд.

Кинетическая энергия спутника растет за счет работы сил гравитации. Но движение релятивистской звезды имеет одно важное отличие, которое неизмеримо усложняет решение задачи. Спутник, движущийся в атмосфере Земли, не меняет ее физической структуры. Энергия, выделяющаяся при сгорании спутника, ничтожна по сравнению с энергией связи атмосферы и Земли. Другое дело — звезды. Релятивистская звезда внутри обычной звезды становится для нее экологически опасной. Энергия, выделяющаяся при торможении компактной звезды, столь велика, что нормальная звезда начнет терять свое вещество. При этом меняются структура звезды и сила торможения. Точный расчет такой

динамической задачи представляет собой огромную проблему даже для современных компьютеров. Те расчеты, которые проводятся сейчас, пока еще грубы и приравняются к качественным исследованиям.

Релятивистская звезда увлекает своим гравитационным полем вещество сверхгиганта. Слой за слоем оно разгоняется и навсегда улетает со звезды. Как острый нож срезает кожуру лимона, так компактная звезда срезает верхние слои сверхгиганта. Так «проглоченная» звезда доходит до самой сердцевины.

Вспомним, что ко времени второго обмена в центре массивной звезды вызревает гелиевое ядро. Ведь обмен начинается после того, как звезда расширилась до размеров полости Роша, т. е. сошла с главной последовательности. А что произойдет, когда релятивистская звезда достигнет ядра?

Здесь возможна следующая альтернатива. Либо образуется двойная система, состоящая из гелиевой и релятивистской звезд, либо релятивистская звезда окончательно «заглатывается» гелиевым ядром и «оседает» в центре сверхгиганта.

Интересное следствие «каннибализма» звезд было рассмотрено американским астрофизиком Кип Торном и его сотрудниками. Они рассчитали структуру сверхгиганта, «проглотившего» нейтронную звезду. Источником энергии такого «каннибала» в основном является аккреция вещества на нейтронную звезду. Кстати, идея о том, что аккреция нейтронной звездой, созревшей внутри обычной звезды, может быть причиной свечения всей звезды, была впервые высказана Л. Д. Ландау в 1937 году.

Возникает вопрос об устойчивости такой звезды, т. е. вопрос о том, как долго могут жить «каннибалы». Чтобы такие «выродки» жили долго, аккреция должна быть медленной. Вещество должно поддерживать излучение нейтронной звезды, медленно оседая на ее поверхность.

Но предположим, что каннибализм — это не правило, а исключение. Двойная система остается двойной. Наступа-

ет новая стадия эволюции тесной двойной — стадия, когда рядом с релятивистской звездой вращается гелиевая звезда. На возможность существования таких двойных звезд указали советские астрофизики А. В. Тутуков и Л. Р. Юнгельсон. Гелиевые звезды — звезды Вольфа—Райе — интенсивно теряют вещество в виде звездного ветра. Казалось бы, релятивистская звезда после выхода из второго обмена массой вновь должна стать ярким рентгеновским источником. Тем не менее до сих пор (лето 1984 г.) ни от одной звезды Вольфа—Райе не обнаружено жесткого рентгеновского излучения. Так что же, выходит, страсти с «самоедством» звезд — не фантазия, а закон природы?

Глава

VIII

Странники

1. Беглецы	228
2. «Одиночные» звезды Вольфа—Райе	231
3. Второй взрыв	236
4. Двойные радиопульсары	239
5. Проблема выбора	243

Цепочка эволюционных состояний двойной системы, протянувшаяся от систем типа β Лирь или Алголя через рентгеновские двойные Центавр X-3 и Лебедь X-1, подходит к своему самому тонкому месту — второму обмену массой. В жизни двойной это один из наиболее критических для ее существования моментов. С ним может сравниться лишь взрыв одной из звезд. Второй обмен сопровождается сверхкритической аккрецией на релятивистскую звезду и, по-видимому, последующим «заглатыванием» релятивистской звезды нормальной звездой — сверхгигантом.

Выживает ли двойная после этого? Ответ на этот вопрос могут дать только наблюдения. В случае выживания образуется двойная система из гелиевой и релятивистской звезды. Нужно просто поискать их на небе. Гелиевые звезды, по-видимому, — это звезды Вольфа—Райе. Но их много. Вот если бы у таких систем были какие-нибудь особые признаки, отличающие их от обычных двойных. К счастью, отличительные признаки у систем с релятивистскими звездами есть. Это их «родимые пятна», приобретенные на более ранних этапах эволюции двойной. К концу 70-х годов прошлого века астрономы, воспользовавшись этим, ограничили круг поисков. В результате — ошеломляющий успех.

1. Беглецы

Мы живем в спиральной галактике. Подавляющее число ее звезд образуют плоскую фигуру, вид с ребра которой показан на рис. 91. Плоский диск окружен менее массивной сферической подсистемой Галактики — гало. Последние миллиарды лет звезды рождаются только в диске Галактики. Полная толщина диска порядка трех тысяч световых лет, а его диаметр — сто тысяч световых лет.

Для описания различных внутригалактических явлений обычно используют систему координат, ось z в которой направлена по оси диска. Тогда говорят, что толщина звездного диска по z -координате равна трем тысячам световых лет. Но новые звезды образуются в гораздо более тонком слое с толщиной в 5–10 раз меньшей, т. е. равной нескольким сотням световых лет. Это объясняется тем, что газ, из которого образуются звезды, сосредоточен в тонком диске толщиной в несколько сотен световых лет.

Диск вращается. Это значит, что каждая звезда вращается в поле тяжести, созданном остальными звездами Галактики. Наряду с общим вращением звезды обладают небольшими случайными (хаотическими) скоростями. Если бы их не было, то звездный диск был бы бесконечно тонким. Случайно

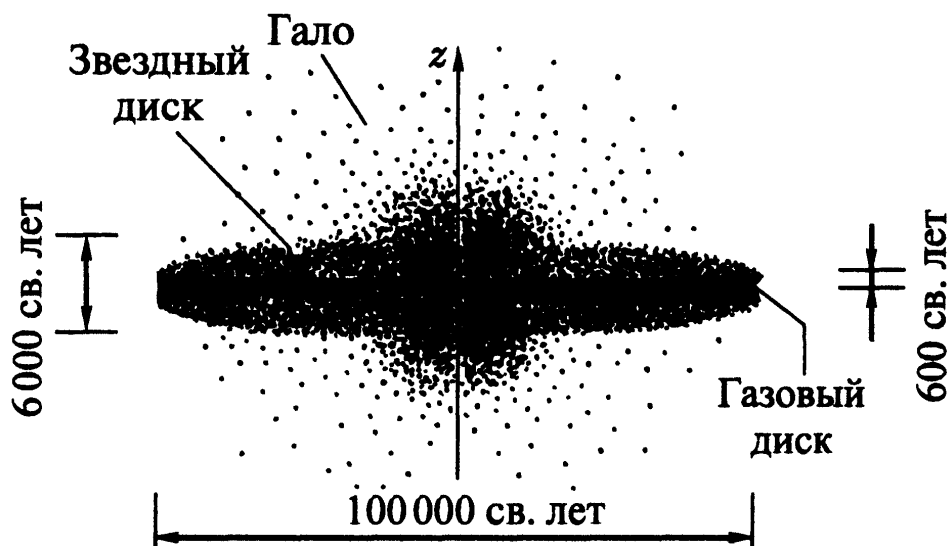


Рис. 91. Строение Галактики

чайные движения звезд размывают диск до наблюдаемой величины. Случайные скорости у молодых звезд в 10 раз меньше скорости вращения, которая почти во всей Галактике близка к 200 км/с. Чем больше случайная скорость звезды, тем выше она может подняться по z -координате.

Средняя хаотическая скорость массивных звезд в Галактике не превышает 5–10 км/с. С такой скоростью звезда не может подняться на высоту больше нескольких сотен световых лет. Действительно, большинство массивных звезд сосредоточено вблизи плоскости Галактики. Однако наблюдаются исключения из этого правила.

В Галактике есть звезды, движущиеся в десятки раз быстрее. Их называли «убегающими». Ведь с такой скоростью они поднимаются над плоскостью Галактики на высоту тысячи световых лет. Конечно, они не покидают Галактику, но странствуют по ней, не подчиняясь всеобщему «стадному» чувству.

Голубые убегающие звезды спектральных классов О и В в 50-е годы прошлого века подробно исследовал голландский астроном Блаау. Как объяснить происхождение таких звезд? Хотя их и немного, все же они составляют (по количеству) несколько процентов от нормальных звезд такого же спектрального класса.

Можно было бы предположить, что виной этому все тот же кумулятивный эффект из опыта Покровского.

Не может ли и в Галактике происходить что-либо подобное? Импульс каждой звезды мал. Но сталкиваясь друг с другом, а точнее, пролетая друг около друга, несколько звезд могут передать одной звезде большой импульс, и она, приобретя скорость в сотни километров в секунду, будет выброшена из плоскости Галактики.

Столь простое объяснение существования убегающих звезд не проходит количественно. Столкновения звезд так редки, что совершенно невозможно объяснить наблюдаемое

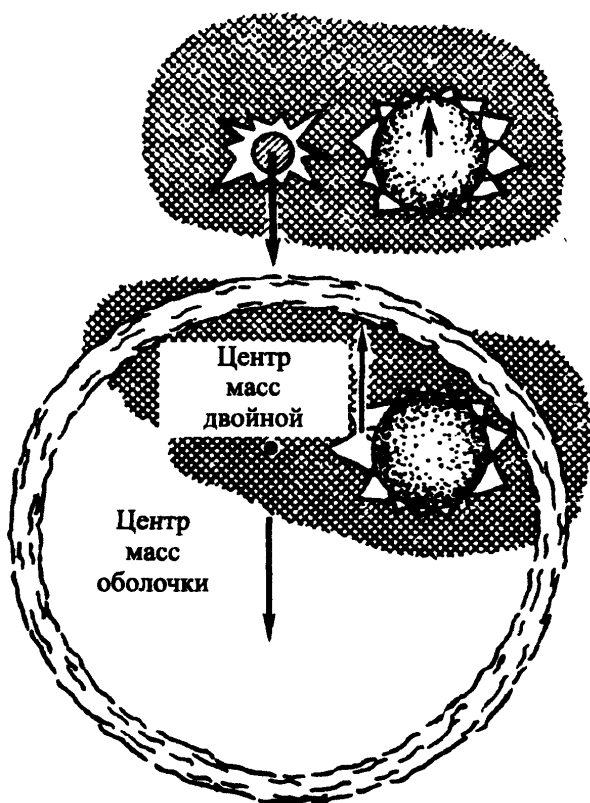


Рис. 92. Эффект «отдачи» при сбросе вещества с одной из звезд. До взрыва вещество оболочки двигалось вместе со звездой по орбите и, следовательно, обладало определенным импульсом. Если сброс происходит очень быстро, то оболочка уносит этот импульс, а оставшаяся двойная система по закону сохранения начинает двигаться в противоположном направлении. В результате центр масс «оболочка + двойная система» остается неподвижным. Подчеркнем, что оболочка сбрасывается симметрично относительно взорвавшейся звезды

число убегающих звезд. Это понимал и Блаау, который объяснил возникновение убегающих звезд совсем из других соображений.

Он предположил, что когда-то убегающие звезды были компонентами тесных двойных систем. В те годы идея перемены ролей, объяснившая парадокс Алголя, еще не завоевала права на жизнь. Поэтому Блаау рассуждал следующим образом. Более массивная компонента двойной эволюционирует быстрее. Пусть обмена масс нет. Тогда первой взрывается более массивная звезда. Сбрасывается большая часть массы двойной, и система распадается (см. гл. IV, «Продолжение следует»). Нить, связывающая компоненты двойной — гравитационное притяжение — обрывается (сила притяжения резко уменьшается, так как масса одной из звезд уменьшается в десятки раз). Звезды, а точнее нормальная звезда и сколлапсировавший остаток, разлетаются подобно камню, выпущенному из пращи. Скорость каждой звезды близка к ее орбитальной скорости, достигающей в тесных двойных системах сотен километров в секунду. Вот вам и убегающие звезды, утверждал Блаау.

Но мы-то теперь знаем, что есть парадокс Алголя, перемена ролей, и что первый взрыв в двойной не приводит к распаду. Выходит, перемена ролей есть, а механизма Блаау нет. Нет и убегающих звезд.

Да, действительно, механизм Блаау в чистом виде, по видимому, не работает, но похоже, что идею перемены ролей можно использовать для объяснения убегающих звезд. Сбросив массу, двойная система получает дополнительный импульс, но не распадается. Важно только, чтобы сброс массы произошел быстро. Ведь сброшенное вещество уносит орбитальный импульс. По закону сохранения импульса двойная должна получить импульс отдачи в обратном направлении. В этом случае двойная может приобрести дополнительную скорость до нескольких сотен километров в секунду. Двойные звезды с релятивистскими компонентами должны в среднем иметь бóльшие скорости и бóльшие z -координаты.

2. «Одиночные» звезды Вольфа—Райе

Теперь становится ясным, среди каких звезд нужно искать двойные системы с релятивистскими и гелиевыми звездами. Необходимо «перебрать» звезды Вольфа—Райе с большими скоростями или с большими z -координатами.

Но это не единственные «родимые пятна». При втором обмене массой двойная сбрасывает большое количество вещества в окружающее пространство. Это вещество должно наблюдаться в течение хотя бы непродолжительного по астрономическим масштабам времени. Некоторые «странники» должны быть окружены веществом, которое мы могли бы наблюдать в виде туманностей.

Этим требованиям удовлетворяют так называемые «одиночные» звезды Вольфа—Райе. Одиночными они называются потому, что в их спектрах видны линии только одной звезды. Либо звезда действительно одиночная, либо вторая

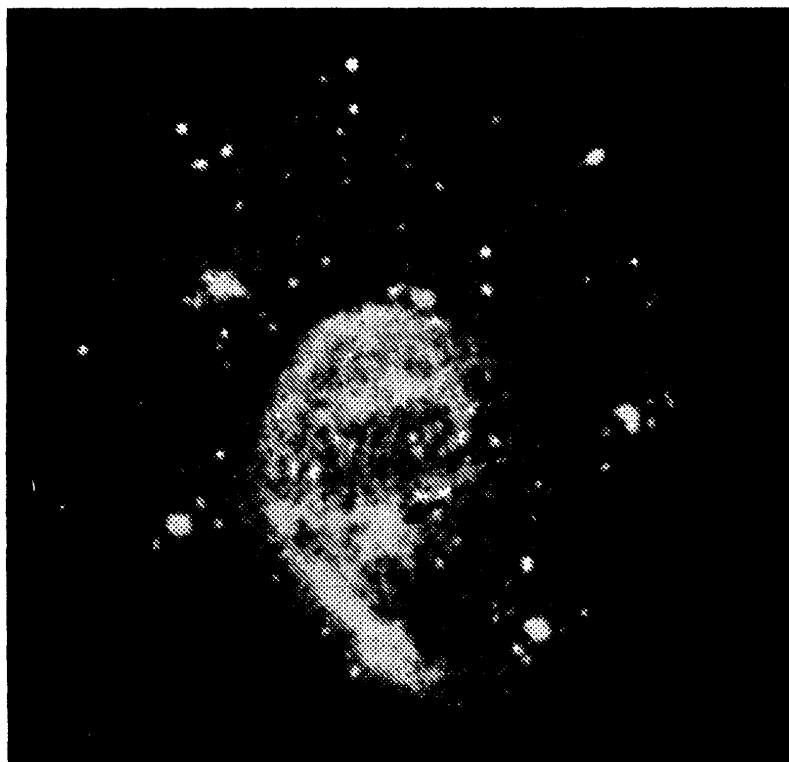


Рис. 93. Фотография кольцевой туманности NGC 6888 вокруг одиночной звезды Вольфа—Райе HD 192163 (показана стрелкой). Фотография получена Т. А. Лозинской (Крымская станция ГАИШ)

компонента настолько слаба, что ее линии не видны на фоне ярких линий излучения звезды Вольфа—Райе. Долгое время эти звезды действительно считали одиночными, поскольку ни следов затмений, ни изменений лучевой скорости у них зарегистрировано не было. В 1978 году астрономы предприняли тщательный поиск двойных среди «одиночных» звезд Вольфа—Райе. Часть «одиночных» звезд окружена туманностями кольцеобразной формы (см. рис. 93). Возможно, это и есть то самое вещество, которое двойная сбросила при втором обмене массой. Именно эти звезды в первую очередь были выбраны для проверки на двойственность.

Успех пришел сразу же. Звезда, зарегистрированная в каталоге HD (каталог Генри Дреппера) под номером 50 896, окруженная планетарной туманностью RCW11, меняла свой блеск и лучевую скорость с одинаковым периодом 3,8 дня (рис. 94). При взгляде на кривую лучевых скоростей становится ясным, сколь тяжело было обнаружить двойствен-

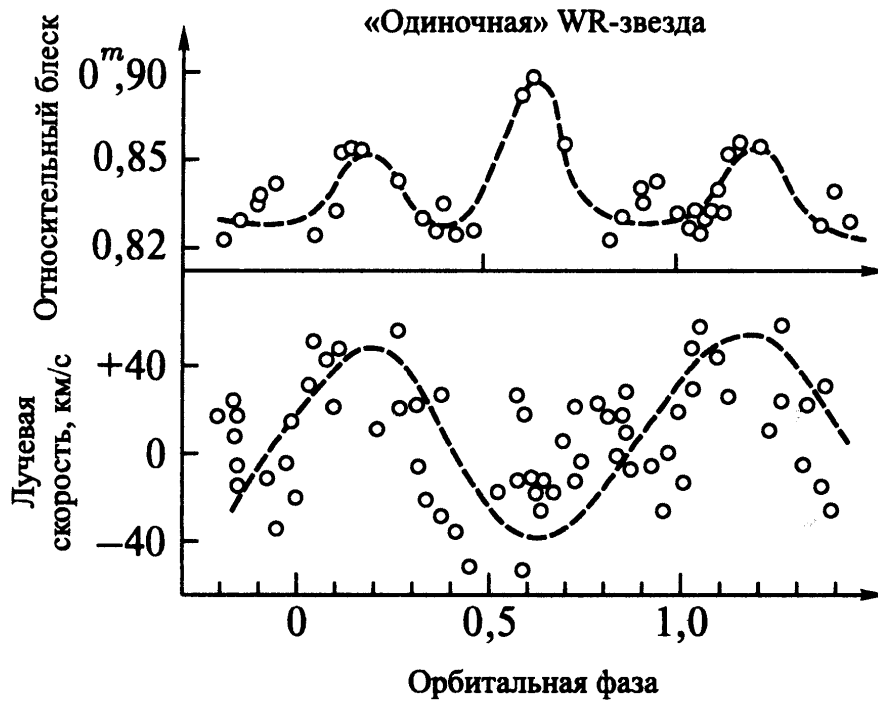


Рис. 94. Кривые блеска и лучевых скоростей «оди́ночной» звезды Вольфа—Райе HD 50896

ность у этой «оди́ночной» звезды. Ведь ширины линий в ее спектре достигают тысячи километров в секунду, а полуамплитуда колебаний лучевой скорости — всего 35 км/с. Нужно большое искусство наблюдателя и большой оптимизм, чтобы заметить и поверить в подрагивание линии всего в несколько процентов ее ширины. Это примерно то же самое, что пытаться измерить толщину лезвия бритвы обычной линейкой.

Заметьте, что на кривой блеска (рис. 94) момент вторичного минимума совпадает с переходом через гамма-скорость кривой лучевых скоростей. Это отличный аргумент в пользу затменной природы минимума. Астрономы разных стран открыли сейчас (1984 г.) около десяти таких «оди́ночных» звезд Вольфа—Райе, у которых лучевые скорости и блеск периодически меняются (см. табл. 5).

Самое поразительное — это значение функции масс, полученное по измерениям лучевой скорости. У всех звезд функция масс очень мала — много меньше массы Солнца, что свидетельствует о малой массе второй компоненты.

Таблица 5

«Одиночные» звезды Вольфа—Райе, у которых предполагается наличие релятивистского спутника

Название звезды	Видимая зв. величина	Период, дни	Амплитуда колебаний		z-координата, св. годы	Функция масс, M_{\odot}	Есть ли кольцевая туманность?
			блеска, зв. величина	скорости, км/с			
HD 50896	6,9	3,8	0,08	35	−900	10^{-2}	да
HD 192163	7,7	4,5	0,03	20	200	10^{-2}	да
HD 191765	8,3	7,4	0,04	30	100	$7 \cdot 10^{-3}$	да
HD 197406	10,5	4,3	0,06	90	3300	0,3	нет
HD 96548	7,8	4,8	0,04	10	1000	$3 \cdot 10^{-4}$	да
HD 164270	9,0	1,8	0,05	20	700	10^{-3}	нет

Действительно, давайте сделаем небольшую прикидку. В тесной двойной, состоящей из массивной звезды и нейтронной звезды, орбитальная скорость релятивистской звезды достигает 300 км/с. Так как орбитальные импульсы звезд двойной равны, то орбитальная скорость нормальной звезды, масса которой в десятки раз больше, должна быть в те же десятки раз меньше. Значит, ожидаемая амплитуда лучевой скорости массивной звезды должна исчисляться десятками километров в секунду. Именно это и наблюдается (см. табл. 5).

Если мы действительно здесь имеем дело с релятивистскими звездами, то почему же ни одна из них не излучает в рентгеновском диапазоне? Звезды Вольфа—Райе — прекрасные поставщики вещества для соседней релятивистской звезды. Их звездный ветер в десятки раз мощнее, чем у О—В сверхгигантов, рядом с которыми наблюдаются яркие рентгеновские источники.

Такое несоответствие ставит под сомнение возможность существования релятивистских компонент у звезд Вольфа—Райе. Может быть, здесь астрономы и нашли что-то, но совсем не то, что искали? Так бывает сплошь и рядом. Достаточно вспомнить историю открытия радиопульсаров. Искали мерцания, а нашли нейтронные звезды.

И все же слишком много «совпадений» между теорией и наблюдениями. А может быть, рентгеновского излучения и не должно быть? Астрономы рассуждали так. Хорошо, звездный ветер от звезды Вольфа—Райе очень интенсивный и плотный. Но, может быть, он слишком плотный? Тогда он, подобно атмосфере Земли, не будет пропускать рентгеновское излучение, и никакого рентгеновского источника и быть-то не должно. Это объяснение стало очень популярным. Все становится на свои места. Релятивистская звезда, захватывая вещество звездного ветра, излучает в рентгеновском диапазоне со светимостью, в сотни раз большей светимости Солнца. Но все рентгеновское излучение поглощается звездным ветром и переизлучается, например, в оптическом диапазоне. Затмение релятивистской звезды и приводит к падению блеска системы в видимом свете на несколько процентов. Это соответствует нескольким сотым звездной величины. Именно такие колебания блеска и наблюдаются у «одиночных» звезд Вольфа—Райе.

Но как раз после открытия двойственности «одиночных» звезд гипотеза самопоглощения рентгеновского излучения стала давать трещины. Из наблюдений мы знаем период и скорость движения компонент, значит, можем оценить расстояние между звездами. Оно оказывается в 10–15 раз больше радиуса Солнца, а размер звезд Вольфа—Райе, согласно теории, — 2–3 радиуса Солнца. Получается, что релятивистская звезда не так уж сильно погружена в оболочку, истекающую от гелиевой звезды. Звездный ветер на этом расстоянии уже прозрачен для жесткого рентгеновского из-

лучения, и релятивистская звезда должна быть видна в этом диапазоне электромагнитных волн.

Возможный выход из создавшегося положения забрезжил в другом направлении. Представим, что все открытые двойные «одиночные» содержат нейтронные звезды. Мы уже видели, что для падения вещества на поверхность нейтронной звезды необходимо выполнение по крайней мере двух условий: необходимо само вещество, и нужно, чтобы нейтронная звезда не вращалась слишком быстро, иначе магнитное поле просто разбрасывает это вещество в разные стороны (эффект пропеллера). Первое условие в системах со звездами Вольфа—Райе выполнено. А вот второе, пожалуй, нет. Вспомним, что при втором обмене массой, т. е. на стадии, непосредственно предшествующей образованию двойной, состоящей из гелиевой и релятивистской звезды, реализуется режим сверхкритической дисковой аккреции. При этом нейтронная звезда получает не только массу, но и вращательный момент. В результате из второго обмена нейтронная звезда выходит с очень быстрым осевым вращением.

Срабатывает эффект пропеллера, препятствующий возникновению яркого рентгеновского источника. Получается, что сама эволюция двойной «устроена» таким образом, что после второго обмена яркий рентгеновский источник уже не вспыхивает. Или вспыхивает, но лишь в редких случаях.

Исследования одиночных звезд Вольфа—Райе продолжаются, и реальная картина может проясниться уже в ближайшие годы.

3. Второй взрыв

Эволюция гелиевой звезды неминуемо приводит к исчерпанию ее ядерной энергии и коллапсу. Все происходит так же, как и при первом коллапсе. Центральное железное ядро превращается в нейтронную звезду, а 90 % вещества

сбрасывается в окружающее пространство. Но теперь уже взрывается более массивная компонента двойной системы. Суммарная энергия оставшихся звезд становится положительной, что приводит к развалу двойной системы. Вновь образовавшаяся нейтронная звезда становится молодым радиопульсаром. В течение нескольких миллионов лет она будет посылать импульсы радиоизлучения. Но это еще не все.

Самое поразительное то, что после второго взрыва может появиться не один, а два радиопульсара. Это естественное следствие эволюции двойной впервые было отмечено в 1974 году советскими астрофизиками Г. С. Бисноватым-Коганом и Б. В. Комбергом, которые основывались на чисто наблюдательных соображениях. Некоторые рентгеновские пульсары в двойных системах имеют периоды меньше 4 секунд и притом ускоряются. С другой стороны, радиопульсары тоже имеют периоды меньше 4 секунд. Значит, если «убрать» из двойной системы с рентгеновским пульсаром типа Геркулеса X-1 оптическую компоненту, то нейтронная звезда может стать радиопульсаром.

Мы видим, что природа делает это вполне естественно. Оптическая компонента «самоискореняется» после второго взрыва.

Итак, массивные двойные системы оказались отличными поставщиками радиопульсаров. Причем эффективность их производства превышает 100 %.

Крайне соблазнительно сделать еще один обобщающий шаг. Предположим, что все (или практически все) радиопульсары — выходцы из двойных систем. Как ни странно, такое предположение не встретит серьезных возражений. Оно выдерживает статистическую проверку.

Если каждая массивная двойная рождает один или два радиопульсара, то скорость рождения пульсаров должна примерно равняться скорости рождения двойных систем. Как сосчитать скорость рождения пульсаров? Для этого вспомним, как считают звезды, перевернув задачу. Нужно прики-

нута число радиопульсаров в Галактике и разделить на среднюю продолжительность их жизни. К сожалению, сделать это не так просто. Труднее всего установить полное число пульсаров в Галактике, так как мы видим только ближайшие из них, да и то не все. Излучение пульсаров узконаправленно. Большинство даже близких пульсаров мы не видим, потому что их излучение «промахивается» и не попадает на Землю. Их можно учесть, определив вероятность попадания. Но делается это неточно, потому что недостаточно точно известна форма луча пульсара.

Эти отягчающие подсчет обстоятельства призывают осторожно относиться ко всякого рода оценкам скорости рождения пульсаров. И все же большинство специалистов сходятся на том, что в Галактике новый пульсар образуется раз в 15–20 лет, что с «высокой точностью» равно скорости ро-

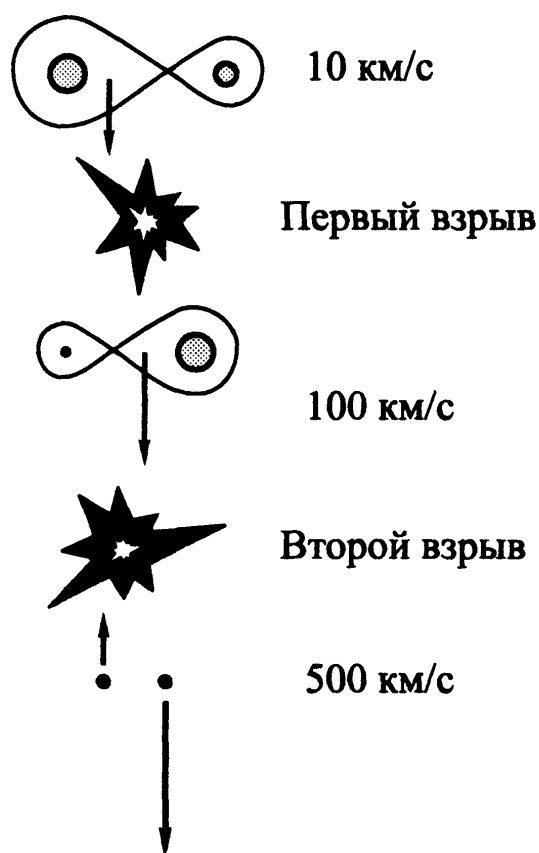


Рис. 95. В результате двух взрывов скорость радиопульсара может достичь сотен километров в секунду

ждения массивных двойных, определенной по функции Солпитера (формула (14)). Функция Солпитера дает следующую частоту рождения двойных систем с массой более $10M_{\odot}$: одна система — раз в 30–40 лет. Конечно, относиться к этим оценкам нужно осторожно.

Вообще, в астрономии такие совпадения происходят довольно часто. Известный советский астрофизик Э. А. Дибай шутил, что перемножив два любых, наугад взятых числа с соблюдением размерности, вы всегда получите третью, наблюдаемую астрономами, величину. В этой шутке есть доля горькой истины, и трудно пересчитать все идеи, погоревшие на таких совпадениях. А объясняется этот «за-

кон больших чисел» довольно просто. Многие величины в астрономии известны только с точностью до порядка, и при этом они очень велики. Кто скажет, что $10^{21\pm1}$ не равно $10^{20\pm1}$?!

И все же, если мы признаем, что предки радиопульсаров — массивные системы, многое встанет на свои места. Например, известен следующий наблюдательный факт: многие радиопульсары (у которых удалось измерить собственную скорость) движутся со скоростями в несколько сотен километров в секунду. Получается, что радиопульсары — тоже «беглецы». Но мы-то знаем, откуда они берутся. Радиопульсар имеет возможность получить большую скорость дважды — при первом (вместе с двойной) и при втором взрыве (при распаде) (рис. 95). При удачном стечении обстоятельств можно «заработать» до 500 км/с. Такие скорости и наблюдаются у самых быстрых пульсаров.

4. Двойные радиопульсары

Среди радиопульсаров, обнаруженных в первые пять лет после их открытия, не было ни одного, входящего в состав двойной системы. Вследствие какого-то неумолимого закона радиопульсары избегали двойных систем.

Эта непонятная закономерность была разрушена в июле 1974 года, когда американские радиоастрономы Р. Халс и Дж. Тейлор открыли пульсар PSR 1913+16¹⁵⁾. Период пульсаций его в среднем оказался равным 0,059 секунды. Мгновенное значение периода колебалось, в свою очередь, с периодом 7,75 часа.

В 1974 году этот эффект уже не представлял собой особой загадки. Опыт изучения рентгеновских пульсаров показал, что эти колебания — следствие эффекта Доплера и вызваны они движением пульсара по орбите. На рис. 96 пока-

¹⁵⁾ Три буквы — сокращение от английского слова pulsar, цифры означают прямое восхождение $\alpha = 19^h 13^m$ и склонение $\delta = +16^\circ$.

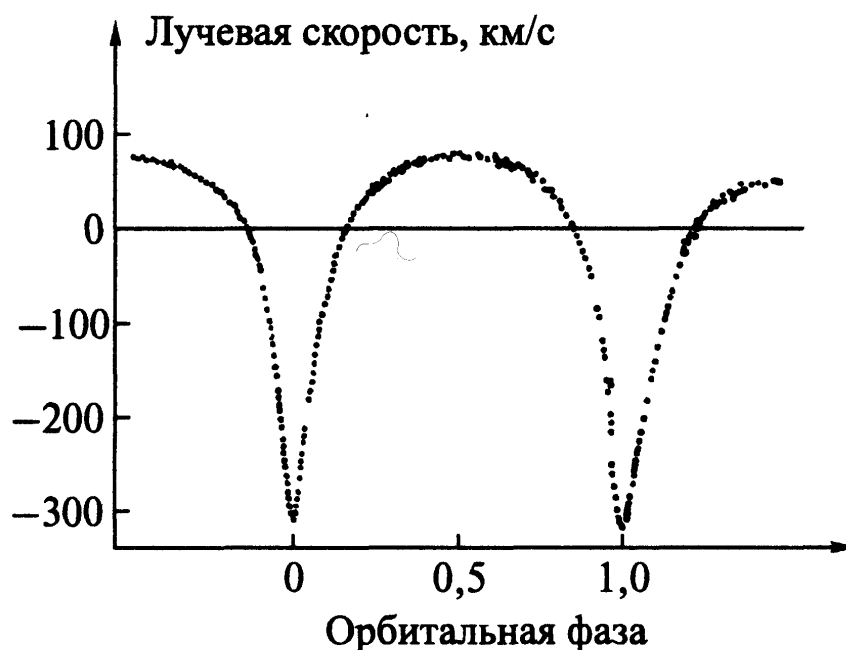


Рис. 96. Кривая лучевых скоростей радиопульсара PSR 1913+16

зана кривая лучевых скоростей, полученная сразу после открытия пульсара. Она отличается от синусоиды, и это означает, что орбита пульсара сильно эллиптическая. Функция масс системы равна $0,13M_{\odot}$. Сразу после открытия двойственности был предпринят тщательный поиск спутника пульсара. Но ни в одном из диапазонов электромагнитных волн ничего не удалось найти.

Из главы, посвященной парадоксу Алголя, мы знаем, что для получения полной информации о двойной системе и ее звездах необходимо наблюдать обе компоненты. Функция масс, определяемая по наблюдениям лучевой скорости одной из звезд, есть функция трех неизвестных: масс компонент M_1 и M_2 и угла наклона системы i . Определить же массу каждой из звезд по кривой лучевых скоростей невозможно. А ведь эта кривая — единственное, что мы имеем для пульсара с невидимым спутником.

И все же массу пульсара удалось измерить. Удалось также измерить массу невидимого спутника. Более того, точность измерений оказалась рекордной. Это единственные звезды во всей Вселенной, для которых мы знаем массы с точностью до нескольких процентов!

Все дело в чрезвычайно высокой стабильности собственного излучения пульсара. Если говорить не о периоде, а о частоте, то можно сказать, что пульсар подобен звезде, дающей абсолютно тонкие спектральные линии. Ширина спектральных линий звезд определяется в основном тепловыми движениями атомов в их атмосферах. Скорость теплового движения обычно равна нескольким километрам в секунду. Линия «размывается» относительно центральной длины волны на величину $\Delta\lambda/\lambda = v_t/c = 1/1000$. «Размывание» периода вращения пульсара, связанное с замедлением его вращения, происходит в течение 200 миллионов лет. Ширина «спектральной линии» пульсара есть величина, обратная времени размывания, так что относительная ширина составляет $\sim 10^{-17}$!

Наблюдая такую сверхтонкую линию, можно измерить лучевую скорость пульсара со сколь угодно большой точностью. Все зависит от времени наблюдения, т. е. от полного числа принятых импульсов. Точность, достигнутая уже в первый год наблюдений, позволила измерять эффекты, обусловленные специальной и общей теорией относительности. Измерение новых эффектов подобно добавлению новых, недостающих уравнений для определения неизвестных. Функция масс, определенная по классическому эффекту Доплера, дает связь трех величин. Необходимы еще два уравнения.

Здесь на помощь приходит поперечный эффект Доплера. Ведь наблюдаемый период пульсара зависит не только от лучевой скорости, но и от полной скорости пульсара. Если бы пульсар двигался по окружности и его полная скорость оставалась постоянной, то проку от поперечного эффекта Доплера не было бы. Мы же не знаем «истинного» периода пульсара! Но орбита пульсара сильно эксцентрична. Значит, меняется полная орбитальная скорость. И, следовательно, должно наблюдаться периодическое изменение периода пульсара — в периастре (в момент наибольшего сближения звезд) период пульсара удлиняется сильнее, чем в апоастре.

Так же действует и другой релятивистский эффект — замедление времени в поле тяготения. Мы уже сталкивались с ним, рассказывая о гравитационном красном смещении. Тогда мы объяснили его с чисто энергетических соображений (квант краснеет, совершая работу против сил гравитации). На языке общей теории относительности покраснение кванта связано с тем, что для удаленного наблюдателя время вблизи тяготеющего тела течет медленнее.

Итак, измерение релятивистского эффекта Доплера и гравитационного красного смещения дает еще одно уравнение. Однако «реализм действительной жизни» состоит в том, что классический эффект Доплера изменяет наблюдаемый период пульсара с тем же периодом (периодом двойной), что и релятивистский эффект. Их невозможно разделить. Вот если бы мы смогли посмотреть на двойную «сбоку»! Тогда классический эффект Доплера изменится, а релятивистские эффекты останутся прежними. Эти эффекты удалось бы разделить и получить дополнительное уравнение.

Как ни странно, это возможно. Есть еще один вполне наблюдаемый релятивистский эффект, который заменит нам «космическое путешествие». Согласно общей теории относительности, закон всемирного тяготения Ньютона в сильных полях просто неприменим, а в слабых неточен. Гравитационное поле системы двойной звезды на расстоянии большой полуоси невелико — ведь орбитальная скорость в тысячу раз меньше скорости света.

В действительности сила притяжения оказывается не строго обратно пропорциональной квадрату расстояния. Орбита двойной звезды в таких условиях не может быть замкнутой (см. рис. 97). Это выглядит таким образом, будто эллипс орбиты медленно поворачивается в плоскости двойной системы. Получается так, как если бы мы облетали двойную, наблюдая ее с разных сторон.

Это удивительно красивое обстоятельство не только позволяет разделить классический и релятивистский эффекты

Доплера, но и дает третье недостающее уравнение, необходимое для определения трех параметров: масс и угла наклона.

Полный оборот эллиптическая орбита пульсара совершает за 86 лет. Конечно, это не означает, что нужно ждать 86 лет. Точность измерений такова, что уже через несколько лет после начала наблюдений удалось измерить массы компонент двойной. Они оказались близки друг к другу и равны $(1,42 \pm 0,10)M_{\odot}$. Полученное значение массы находится в великолепном согласии с теорией эволюции и внутреннего строения звезд.

В последние годы удалось открыть еще два радиопульсара, входящих в состав двойных систем (см. табл. 6). Характерно, что и у этих звезд спутники никак себя не проявляют.

Двойная звезда излучает гравитационные волны. Общая теория относительности предсказывает определенную интенсивность этого излучения. Двойная теряет не только энергию, но и вращательный момент. Звезды «съезжаются» на встречу друг другу. При этом период системы уменьшается.

Благодаря высокой стабильности радиопульсара удалось точно измерить период двойной и его изменение. Период двойной действительно уменьшается, причем, как это и следовало ожидать, в соответствии с теорией Эйнштейна.

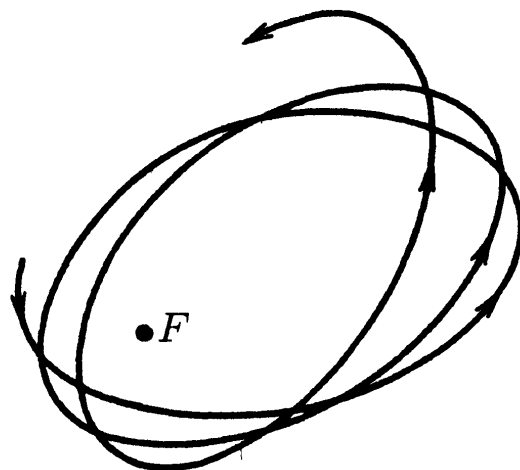


Рис. 97. Эффекты общей теории относительности приводят к тому, что орбита звезды оказывается незамкнутой

5. Проблема выбора

Из почти 400 радиопульсаров всего лишь несколько входят в состав тесных двойных систем. У всех двойных радиопульсаров вторые компоненты не видны. Скорее всего,

Таблица 6

Двойные радиопульсары

Название пульсара	Орби- тальный период, дни	Период пульса- ра, с	Эксцен- триситет	Функция масс, M/M_{\odot}	Масса второй звезды, M/M_{\odot}
PSR 1913+16	0,32	0,059	0,617	0,1322	1,4
PSR 0655+64	1,03	0,196	0,000	0,0712	$1 \pm 0,03$
PSR 0820+02	1,232	0,865	0,012	0,0030	0,2–0,4
PSR 1953+29	~120	0,006	<0,05	0,0027	0,2–0,4

невидимые компоненты в этих системах — звезды, которые также окончили свою эволюцию — белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра. Следовательно, иногда двойные системы не распадаются после второго взрыва.

Вспомним, что система распадается в том случае, если взрыв происходит быстро и если система при взрыве теряет более половины своей массы. Второе условие будет выполнено, если перед вторым взрывом нормальная звезда потеряла значительную часть своей массы в процессе эволюции. По видимому, это происходит при втором обмене массой.

Мы видели, что второй обмен массой обычно заканчивается образованием двойной, состоящей из гелиевой и нейтронной звезды. Масса гелиевой звезды не меньше $(8 \div 10)M_{\odot}$. Ясно, что при взрыве такой звезды система обязательно развалится. Но если масса предсверхновой будет поменьше, например $(2 \div 3)M_{\odot}$, система не распадется.

Помните сценарий, предложенный Э. Ван ден Хёвелом для системы пульсара Геркулес X-1? Если начальные массы звезд сильно отличались, то система интенсивно теряла вещество уже при первом обмене массой (см. рис. 67). Массивная двойная перешла в разряд среднемассивных.

Представьте себе мысленно взрыв в системе HZ Геркулеса — Геркулес X-1. Общая масса системы $(3,5 \div 4)M_{\odot}$. Из них

на нейтронную звезду приходится $1,5M_{\odot}$. Если из второй звезды в результате коллапса образуется нейтронная звезда с массой $1,5M_{\odot}$, значит, система при взрыве потеряет $(0,5 \div 1)M_{\odot}$, т. е. меньше половины массы двойной. Двойная не распадается.

У этого сценария есть одно характерное свойство. Образовавшаяся система из двух вырожденных звезд всегда имеет эксцентричную орбиту. Орбита становится эллиптической при быстром сбросе массы. Действительно, если бы система потеряла половину массы, то ее полная энергия стала бы равной нулю, а эксцентриситет орбиты (формальный) равен единице. При потере меньшего количества массы орбита превращается из круговой в эллиптическую.

Система запоминает этот эксцентриситет. У пульсаров PSR 1913+16 и PSR 0820+02 орбиты действительно эллиптические (см. табл. 6), а вот орбита радиопульсара PSR 0655+64 совершенно круговая. Либо двойная при втором коллапсе не теряла массу вообще, либо она теряла ее очень медленно, либо коллапса вообще не было. Первая возможность, названная И. С. Шкловским «тихим коллапсом», должна приводить к образованию черной дыры. Вторая возможность, сторонником которой является итальянский астрофизик Франко Пачини, может реализоваться в том случае, если коллапсирующая звезда обладает очень быстрым вращением. Центробежные силы останавливают коллапс, и звезда продолжает медленно сжиматься лишь по мере потери своего вращательного момента. Что значит медленно? Достаточно медленно, чтобы коллапс и связанная с ним потеря массы продолжались дольше, чем один оборот системы. Тогда влияние сброса массы усредняется и орбита остается круговой.

Наконец, возможен и третий вариант. Если масса нормальной звезды перед тем, как у нее исчерпались источники ядерной энергии, была меньше чандрасекаровского предела, то коллапс не наступает. Звезда медленно сжимается, превращаясь в белый карлик.

Как видим, выбор велик. Чем более поздний этап эволюции двойной мы анализируем, тем труднее понять, как двойная пришла к нему.

Во всяком случае, не удивительно, почему так мало двойных, состоящих из радиопульсара и компактной звезды. В первую очередь это связано с тем, что в природе очень редко образуются двойные, состоящие из звезд совершенно разной массы. Во-вторых, на длинном тернистом пути звездной эволюции у такой двойной много шансов погибнуть еще при первом обмене массой.

Вообще, поздние этапы эволюции двойной окутаны пока плотным туманом. Идей много — мало расчетов. Чем же все это может закончиться?

Внутренняя (ядерная) эволюция компонент двойной закончилась. Именно так мы должны думать с точки зрения астронома XX века, так как под внутренней эволюцией принято понимать медленное выгорание термоядерного горючего в недрах звезд. Эволюция теперь может идти только за счет медленного сближения звезд из-за излучения гравитационных волн. В определенный момент звезды сталкиваются. Слипание происходит почти мгновенно, за гидродинамический промежуток времени вырожденной звезды. Для нейтронной звезды и черной дыры оно примерно равно 10^{-4} – 10^{-5} с. При их слипании возникает мощный импульс гравитационного излучения, который уносит почти всю энергию двойной системы. Образовавшийся остаток — скорее всего, черная дыра — подобно радиопульсару превращается в странника.

Более разнообразно может протекать слипание двойных, состоящих из белых карликов. Их вещество еще не потеряло своей ядерной структуры и слипание может сопровождаться излучением нейтрино и сбросом вещества. В принципе такое явление можно назвать вспышкой сверхновой.

Наш рассказ подошел к концу. Мы прошли от самых первых этапов эволюции двойных, которые они «проживают» поодиночке, до самых финальных стадий, когда звезды уже просто не могут «обойтись» друг без друга.

Двойственность обогащает. Это все больше и больше чувствуется на последних этапах. Пути эволюции разветвляются, так что сценарий напоминает дерево с пышной кроной. Многие ответвления пока изучены плохо. Некоторые из них вообще могут в будущем «отсохнуть». Поэтому, рассказывая об эволюции, мы держались основного (магистрального) ее пути. Давайте теперь остановимся и подумаем, что же у нас получилось. Что растет на этом дереве? И не проглядели ли мы чего-нибудь?

1. Итоги

Эволюция двойной напоминает фильм, который прокручивают со все возрастающей скоростью. Первые этапы своей эволюции звезды проходят в ядерной шкале времени. Для массивных звезд — это десятки и сотни миллионов лет. Для звезд с меньшей массой — миллиарды лет. Более массивная звезда первой заполняет свою полость Роша, и начинается первый обмен веществом. С этим явлением мы столкнулись в системе звезды β Лир.

Первый обмен может закончиться по-разному. У систем с большим отношением масс компонент происходит сильная потеря вещества из двойной (сценарий, ведущий к системам

типа Геркулес X-1). Но, как правило, общая масса системы уменьшается не намного. Обмен заканчивается образованием систем с ярко выраженным парадоксом Алголя: менее массивная звезда выглядит более старой. Эволюция ее зашла столь далеко, что соседка, даже увеличив свою массу, уже не в состоянии ее догнать. В зависимости от массы двойной эволюция первоначально более массивной звезды заканчивается образованием белого карлика, нейтронной звезды или черной дыры. Предки белых карликов имеют массы меньше $10M_{\odot}$.

Образование первой релятивистской звезды хотя и сопровождается взрывом и сбросом вещества, но все же не приводит к распаду двойной: взрывается менее массивная звезда. Это счастливое обстоятельство, связанное с переменой ролей, приводит к качественно новым явлениям в двойных системах.

Продолжение следует. Наступает рентгеновская стадия двойных типа Центавр X-3 и Лебедь X-1. Мощные источники светят «ярче тысячи Солнц», перехватывая малую долю звездного ветра, истекающего с соседней звезды. Но первый взрыв оставит «родимые пятна» — двойная приобретет дополнительную скорость и начнет странствовать по Галактике.

Из-за ядерной эволюции нормальная компонента сходит с главной последовательности и неизбежно заполняет свою полость Роша. Начинается второй обмен массой. Нормальная звезда отдает обратно вещество, взятое у соседки.

В маломассивных двойных с нейтронными звездами второй обмен приводит к возникновению яркого рентгеновского источника (рентгеновской системы типа Геркулес X-1 или рентгеновского барстера). В системах с белыми карликами второй обмен приводит к образованию катаклизмических переменных, повторных новых, новых звезд и др. В карликовых двойных вторичное заполнение полости Роша, как правило, происходит не из-за ядерной эволюции (она оказывается слишком медленной), а из-за сближения звезд, связанного с потерей вращательного момента двойной системой.

Причина этого — гравитационные волны и своеобразный эффект магнитного пропеллера.

В массивных двойных второй обмен протекает столь быстро, что возникает сверхкритическая аккреция на релятивистскую звезду. Релятивистская звезда, окутанная плотной «шубой» истекающего вещества, не видна для внешнего наблюдателя. С виду она напоминает обычную звезду. В то же время сверхкритическая аккреция, по-видимому, приводит к образованию релятивистских струй. Возможно, именно с этим явлением мы столкнулись в системе SS 433.

Второй обмен приводит к заглатыванию релятивистской звезды ее соседкой. Здесь — очередное ответвление. Релятивистская звезда может быть полностью проглочена, и двойная система становится одиночной звездой. Или, сбросив часть массы, двойная может превратиться в систему, состоящую из гелиевого ядра и релятивистской звезды. «Одиночные» звезды Вольфа—Райе — наиболее реальные кандидаты в такие двойные системы.

Через несколько сотен тысяч лет кончается ядерное топливо в гелиевой звезде и она взрывается. Система, как правило, распадается на две релятивистские звезды. При этом в среднем образуется больше одного радиопульсара. При распаде двойной нейтронная звезда приобретает еще раз дополнительную скорость. Первый миллион лет странники посылают в окружающее пространство радиосигналы. Наконец, затухают навсегда.

В редких случаях эволюция двойной заканчивается образованием системы, состоящей из двух вырожденных звезд. Природа здесь осуществила стерильно чистый эксперимент по проверке общей теории относительности. Благодаря таким системам удалось не только с рекордной точностью «взвесить» нейтронную звезду, но и доказать, что гравитационные волны действительно существуют в природе.

Многое, о чем рассказывалось в книге, открыто и исследовано в последние 10–15 лет. Качественно новые и совер-

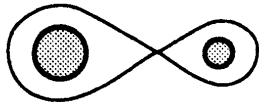
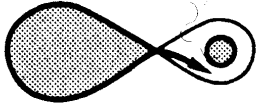


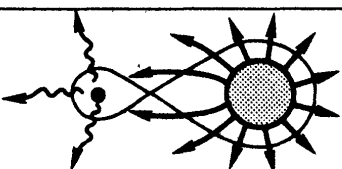
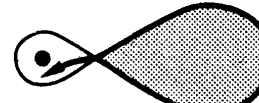
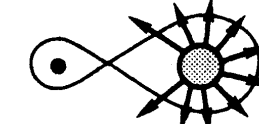


	«Вдвоем в одиночестве»
	β Лирь
	Алголь, WR + O-B
	Убегающие звезды
	Центавр X-3, Лебедь X-1
	Геркулес X-1, У Близнецов, SS 433, барстеры
	«Одиочные» WR-звезды
	Второй взрыв, или медленное остывание
	Одиочные и двойные радиопульсары

Рис. 98. Схема эволюции тесных двойных звезд.
Справа приведены некоторые наблюдаемые данные

шенно неожиданные явления, с которыми столкнулись астрономы, протекают в системах с релятивистскими звездами. Открытия, сделанные в этой области, стали частью того, что называется «революцией в астрономии». И все же это только первые шаги. Уже сейчас мы знаем достаточно, чтобы сказать, что многое в мире двойных звезд еще не открыто.

2. Эволюция в квадрате

Перед тем как рассказать о релятивистских стадиях эволюции двойных звезд, мы произвели несложный подсчет предполагаемого их числа. Рассуждения были крайне просты и потому надежны. Продолжительность жизни двойной после образования в ней релятивистской звезды близка к ядерному времени нормальной звезды, на которую перетекло вещество. Но ядерное время нормальной звезды не сильно отличается от ядерного времени первоначально более массивной звезды. Значит, двойных с рентгеновскими звездами в Галактике должно быть по порядку величины примерно столько же, сколько обычных двойных систем большой массы. А их в Галактике — десятки и сотни тысяч.

По сравнению с этим «убойным» числом смехотворно маленьким выглядит число открытых нами рентгеновских двойных — несколько сотен или тысяч. Ведь рентгеновское излучение — признак присутствия релятивистской звезды.

Глубокая пропасть, разделяющая ожидаемое и наблюдаемое, не исчезнет при повышении чувствительности рентгеновских телескопов. Уже сейчас мы видим все галактические источники жесткого рентгеновского излучения со светимостью в несколько сотен и более светимостей Солнца.

Что-то важное упущено нами. Наивный подход к релятивистским стадиям двойных не срабатывает. Существуют какие-то внутренние причины, по которым релятивистская звезда в двойной системе вовсе не обязана быть источником рентгеновского излучения. Появление рентгеновского излучения — скорее исключение, чем правило. Причем дело тут не в обычной звезде. У всех звезд есть ветер, и все звезды могут быть поставщиками топлива для аккрецирующей релятивистской звезды. Значит, релятивистская звезда не так проста. Необходимо выполнение еще какого-то условия, а может быть, и целого ряда условий, чтобы аккреционная машина заработала.

Исследования, проведенные в самые последние годы, привели к осознанию того факта, что компактные звезды тоже эволюционируют. Это самым решительным образом влияет на наблюдаемые свойства двойных. Подавляющее большинство релятивистских звезд в массивных двойных — нейтронные звезды. А одна и та же нейтронная звезда может проявлять себя совершенно непохожим образом. Еще до открытия рентгеновских пульсаров В. Ф. Шварцман показал, что нейтронная звезда в двойной системе проходит по крайней мере три стадии. Вначале она быстро вращается — излучает (эжектирует) в окружающее пространство электромагнитные волны и релятивистские частицы подобно радиопульсару. Правда, само радиоизлучение поглощается в звездном ветре, истекающем от нормального спутника. Это одна из главных причин, по которым мы не видим до сих пор ни одного радиопульсара в двойной системе с нормальной звездой.

На стадии эжекции нейтронная звезда теряет свою вращательную энергию и тормозится. В некоторый момент эжекция прекращается. Вещество, тем не менее, не может еще упасть на поверхность нейтронной звезды, которая, подобно гигантскому пропеллеру, разбрасывает магнитным полем падающую плазму. Звезда продолжает замедляться, и наконец сила гравитации побеждает. Только теперь начинается аккреция и вспыхивает яркий источник рентгеновского излучения.

Каждая из этих стадий длится десятки и сотни тысяч лет. Это — настоящая эволюция. Добавим еще эволюцию нормальной компоненты. Жизнь двойной системы с нейтронной звездой предстанет теперь совершенно в новом свете. Это не просто одна эволюция, и даже не две, а скорее, эволюция «в квадрате». Ведь состояния нормальной звезды и нейтронной звезды прямо не связаны друг с другом. Четыре стадии эволюции двойной с релятивистской компонентой (звезда на главной последовательности,

сверхгигант, звезда на стадии обмена, гелиевая звезда) мы должны умножить на число состояний нейтронной звезды. Правда, состояние нейтронной звезды все-таки связано (хотя и не жестко) с состоянием нормальной компоненты. Поэтому число возможных состояний двойной раза в два меньше. Но это не меняет сути.

На самом деле нейтронная звезда бывает не в трех, а по крайней мере в восьми состояниях. При этом только одно состояние — аккреция — сопровождается возникновением мощного теплового рентгеновского излучения. В остальных случаях, которые, правда, исследованы пока менее подробно, нейтронная звезда не проявляет себя столь ярко. Именно поэтому мы в первую очередь столкнулись в Галактике с рентгеновскими стадиями. Они просто бросаются в глаза. Это — сияющая вершина, но вершина айсберга.

Поиск нерентгеновских релятивистских двойных систем только начался. И здесь уже есть первые успехи.

Расчет числа релятивистских систем, проведенный выше, показывает, что их не намного меньше, чем обычных систем. Каждая вторая или третья массивная звезда, с виду кажущаяся одиночной, на самом деле имеет релятивистский спутник. С начала 80-х годов прошлого века астрономы начали поиск таких двойных, который сразу же увенчался успехом. Работа эта очень тонкая и требует много времени. В первую очередь решили проверить убегающие О–В звезды, которые всегда считались одиночными.

Большие скорости эти звезды приобретают при первом взрыве в двойной системе. А раз был коллапс, значит, осталась нейтронная звезда. Под действием силы притяжения нейтронной звезды массивная звезда должна двигаться по орбите со скоростью в несколько десятков километров в секунду. Следы таких движений действительно были обнаружены недавно у ряда О–В звезд.

Но это — совсем другая история.