

БАРСТЕРЫ

На протяжении веков единственным источником сведений о звездах и Вселенной был для астрономов видимый свет. Наблюдая невооруженным глазом или с помощью телескопов (с 1610 г., вслед за Галилеем), они использовали только очень небольшой интервал волн из всего многообразия электромагнитного излучения, испускаемого небесными телами (табл. 1). Можно только поражаться, как много удалось все же увидеть сквозь это узкое спектральное окно.

Т а б л и ц а 1

| Излучение | Длина волны λ , м | Энергия фотонов $\epsilon=hc/\lambda$, эВ |
|------------------|---------------------------|--|
| Радиоизлучение | $>10^{-8}$ | 10^{-2} |
| Инфракрасное | $10^{-5}-10^{-3}$ | $10^{-2}-1$ |
| Видимое | $10^{-6}-10^{-5}$ | 1-6 |
| Ультрафиолетовое | $10^{-8}-2 \cdot 10^{-6}$ | 6- 10^3 |
| Рентгеновское | $10^{-10}-10^{-8}$ | 10^3-10^5 |
| Гамма-излучение | $<10^{-10}$ | 10^5 |

$c=2,99 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме;
 $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Астрономия преобразилась с середины нашего века, когда прогресс физики и техники предоставил ей новые приборы и инструменты, позволяющие вести наблюдения в самом широком диапазоне волн — от метровых радиоволн до гамма-лучей, где длины волн составляют миллиардные доли миллиметра. Это вызвало нарастающий поток астрономических данных, чаще всего неожиданных, а иногда и совершенно поразительных. Фактически все крупнейшие открытия последних лет — результат современного развития новейших областей астрономии, которая, по удачному выражению И. С. Шкловского, стала сейчас всеволновой.

В этой главе мы расскажем об успехах рентгеновской астрономии, возникшей в последние 15—20 лет, когда появилась возможность выносить приемники рентгеновского излучения — рентгеновские телескопы — за пределы земной атмосферы.

Рентгеновская астрономия

В. К. Рентген, открывший в 1895 г. неизвестные до этого лучи, знал, что они способны засветить фотопластинку, завернутую в черную бумагу, не пропускающую свет. Таким образом, черная бумага прозрачна для рентгеновских лучей и непрозрачна для видимого света. А земная атмосфера, наоборот, прозрачна для видимого света и непрозрачна для рентгеновских лучей. Она не пропускает к нам космическое рентгеновское излучение. Поэтому рентгеновские телескопы и приходится выводить за пределы атмосферы. Это делается с помощью высотных баллонов-аэростатов, ракет, автоматических и пилотируемых космических аппаратов.

Первые рентгеновские лучи внеземного происхождения были зарегистрированы от Солнца в 1949 г., когда рентгеновский телескоп Морской исследовательской лаборатории США поднялся на ракете над земной атмосферой. Рентгеновский поток от Солнца довольно слаб, на него приходится лишь очень малая доля энергии в солнечном излучении. Основная энергия излучается Солнцем в оптической области, к которой и приспособил свою чувствительность в ходе эволюции человеческий глаз, самый совершенный оптический прибор.

Другие звезды, если бы они имели ту же светимость в рентгеновском диапазоне, что и Солнце, никогда не могли бы быть замечены рентгеновскими телескопами: расстояние до них много больше, чем до Солнца, а поток излучения падает обратно пропорционально квадрату расстояния. Поток — это количество энергии, приходящей в единицу времени на единицу площади телескопа.

Но оказалось, что среди звезд Галактики имеются такие, что их излучение почти полностью сосредоточено в рентгеновском диапазоне. Первая из них открыта в 1962 г., спустя десятилетие после «рентгеновского снимка» Солнца. Это была звезда в созвездии Скорпиона, получившая название Скорпион X-1 (здесь буква «икс» от названия рентгеновских лучей, которое дал им сам Рентген, — оно закрепилось в ряде языков).

Скорпион X-1 — ярчайшая рентгеновская звезда на небе. Ее открыла американская исследовательская группа Р. Джиаккони и Г. Гурского, которой принадлежит и ряд дальнейших достижений в наблюдениях космического рентгеновского излучения.

В 1966 г. поблизости от рентгеновского источника Скорпион X-1 была обнаружена слабая оптическая звезда-карлик. Год спустя И. С. Шкловский высказал предположение, что этот источник является двойной звездной системой, состоящей из видимой «обычной» звезды и невидимой нейтронной звезды. По его идее, сильное поле тяготения нейтронной звезды способно срывать вещество с поверхности звезды-компаньона. Это вещество, падая к нейтронной звезде, испытывает сильное сжатие и разогрев; из-за этого оно должно испускать рентгеновские лучи.

Еще в 30-е годы Л. Д. Ландау говорил, что частицы межзвездной среды, падающие в сильном поле тяготения нейтронной звезды, должны излучать рентгеновские волны при столкновении с твердой поверхностью нейтронной звезды. На этом основании высказывалась надежда, что нейтронные звезды можно будет обнаружить по их рентгеновскому излучению. Движение потоков вещества в сильном поле тяготения, их захват этим полем изучали в 60-е годы Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков в нашей стране и Э. Солпитер в США. Захват вещества гравитационным полем называется аккрецией.

Опираясь на пример источника Скорпион X-1, И. С. Шкловский предсказал, что процесс аккреции должен быть особенно эффективен в двойной системе, содержащей нейтронную звезду, где материалом аккреции служит вещество звезды-компаньона. Это предсказание целиком подтвердилось в дальнейших исследованиях рентгеновских звезд. Их массовое открытие началось в 70-е годы, когда рентгеновские телескопы стали помещать на спутники. С тех пор в космосе почти постоянно находятся исследовательские рентгеновские обсерватории. Если прежде рентгеновские наблюдения были единичными и производились при кратковременных полетах ракет и баллонов, то теперь они ведутся непрерывно в течение многих месяцев или даже лет.

Вместе с тем постоянно улучшается чувствительность рентгеновских телескопов — она тем выше, очевидно, чем меньше тот минимальный поток, который способен зарегистрировать приемник излучения. Поэтому доступными

наблюдению становятся все более слабые и все более удаленные источники.

Повышается разрешающая способность рентгеновских телескопов, т. е. способность различать на небе близкие дискретные источники или отдельные детали в протяженных источниках, определять их размеры и точное положение на небесной сфере. Под дискретными источниками понимаются компактные объекты, которые выглядят либо просто как точки, либо как тела с очень малым размером и без различимой внутренней структуры. Таковы, например, рентгеновские звезды. Дискретными источниками рентгеновских лучей являются и ядра квазаров. Протяженные источники имеют немалый видимый размер, указываемый обычно в угловых единицах; в них удастся различать те или иные детали, т. е. отдельные внутренние области повышенного или, напротив, пониженного излучения. Среди протяженных источников рентгеновского излучения — скопления галактик — рентгеновские лучи испускаются очень горячим межгалактическим газом с температурой 10^7 – 10^8 К, распределенным по всему объему скопления. Из излучения межгалактического газа и далеких квазаров складывается общий непрерывный фон рентгеновского излучения во Вселенной, обнаруженный еще в 1962 г.

Совершенствуется временно́е разрешение рентгеновских приемников — их способность различать близкие по времени сигналы, измерять длительность быстрых колебаний или отдельных импульсов в переменном потоке излучения. Это оказалось очень важным для открытия и исследования вспыхивающих и пульсирующих рентгеновских звезд.

Наконец, возрастают возможности спектрального анализа рентгеновского излучения. Сейчас удастся регистрировать не только суммарный поток излучения от источника во всем рентгеновском диапазоне, но также различать и измерять по отдельности составляющие этого потока в определенных узких интервалах длин волн. Спектр излучения — это распределение потока излучения по длинам волн. Вместо длин волн можно взять энергию фотонов, соответствующих той или иной длине волны, $\epsilon = hc/\lambda$, и получить распределение по энергии фотонов. Этот способ представления спектра принят в рентгеновской астрономии, да и в других областях астрономии и физики. Изучение спектров рентгеновских звезд дало ключ к пониманию их природы.

К настоящему времени известно свыше ста рентгеновских звезд. Самые замечательные из них — барстеры, главный предмет этой главы, а также рентгеновские пульсары, о которых мы расскажем в гл. 3.

Вспышки

В 1975 г. группа астрофизиков из Института космических исследований Академии наук СССР сообщила о наблюдении коротких и мощных всплесков космического рентгеновского излучения. Вскоре подобные всплески обнаружили и американские астрономы из Смитсо-

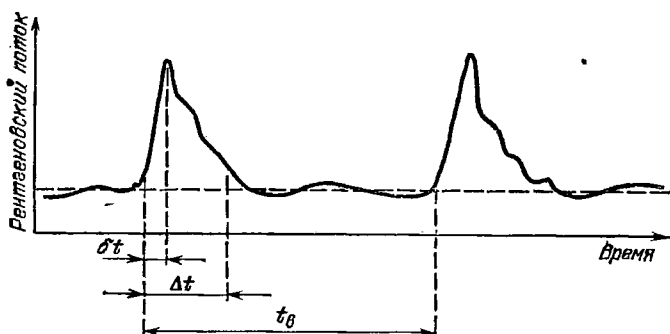


Рис. 10. Кривая блеска барстера.

анской астрофизической обсерватории. Им удалось наблюдать вспышки рентгеновского излучения, происходящие в центре одного из звездных скоплений нашей Галактики.

Так началась история исследования барстеров — вспыхивающих рентгеновских звезд. Их название происходит от английского слова *burst*, что означает взрыв, вспышка. Сейчас известны три с лишним десятка таких звезд; восемь из них принадлежат звездным скоплениям Галактики.

Если следить за отдельным барстером несколько недель или месяцев, то можно зарегистрировать сотни его вспышек, следующих одна за другой без какой-либо регулярности или периодичности. Обычно у барстера имеется также и исчезающее, хотя и слегка меняющееся со временем рентгеновское излучение. На этом фоне возникают резкие и сильные всплески излучения, длящиеся от

нескольких секунд до нескольких минут. Нарастание излучения в каждой такой вспышке происходит очень быстро, иногда за доли секунды. Промежутки между вспышками не бывают одинаковыми, но чаще всего не выходят за пределы нескольких часов или нескольких дней.

На рис. 10 показана кривая блеска барстера — зависимость его рентгеновского потока от времени. На этой кривой можно выделить три характерных временных промежутка: время нарастания потока δt ; длительность вспышки Δt и промежуток между вспышками t_n . Хотя каждое из этих трех времен различно для разных источников и для разных вспышек в одном и том же барстере, можно говорить об их характерных значениях, дающих представление о «типичном» барстере. Примем для характерных времен следующие значения: $\delta t = 1$ с; $\Delta t = 10$ с; $t_n = 10^4$ с. На эти значения мы и будем далее ориентироваться.

Расстояние

Некоторые из барстеров, как мы говорили, находятся в звездных скоплениях. Строго говоря, известно лишь то, что излучение каждого из них приходит по направлению, в котором на небе видно то или иное скопление. Во всех случаях это скопления особого типа, которые называют шаровыми. На фотографиях они имеют довольно округлую форму, в них хорошо различается центральная часть, где звезды располагаются особенно тесно друг к другу, а в самом центре изображения звезд вообще сливаются в сплошное светлое пятно (рис. 11). Рентгеновские лучи барстеров приходят по направлениям от центров шаровых скоплений. Конечно, если бы был известен только один такой пример, трудно было бы настаивать на том, что барстер на самом деле находится внутри шарового скопления, в его центре. Ведь ничего нельзя возразить тому, кто сказал бы, что это простая случайность, совпадение: барстер может находиться и ближе шарового скопления и дальше его, и только луч зрения — прямая, соединяющая нас и источник, — по воле случая, проходит через центр шарового скопления. Как говорят астрономы, источник мог бы проектироваться на скопление, не находясь в нем самом. Но когда известен не один пример, а все-таки восемь, говорить о случайном совпадении не приходится; нужно скорее полагать, что эти восемь барстеров действительно располагаются в центральных частях своих шаровых скоплений.



Рис. 11. Одно из шаровых звездных скоплений нашей Галактики.

Раз некоторые из барстеров принадлежат шаровым скоплениям нашей Галактики, значит, может быть, и все эти источники находятся в нашей Галактике? В пользу этого говорит общее расположение барстеров на небесной сфере.

Направление на любой объект на небе задается двумя угловыми координатами; можно выбрать координатную сетку так, чтобы ее начало совпадало с направлением на центр Галактики, а экватором служила плоскость Галактики. Распределение барстеров по небу в таких галактических координатах не вполне случайно (рис. 12). Большинство их сосредоточено вблизи начала координат. Это служит очевидным указанием на то, что вся совокупность источников принадлежит нашей Галактике. Более того,

отсюда следует, что типичное расстояние до барстера близко к расстоянию от нас до центра Галактики. Это расстояние составляет $d \approx 10 \text{ кпк} = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}$.

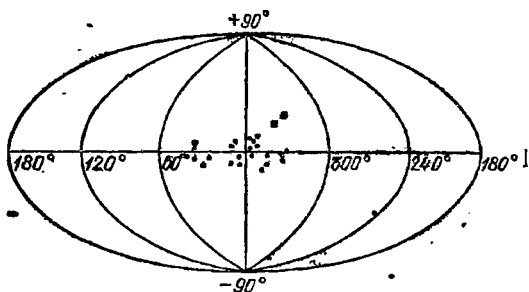


Рис. 12. Распределение барстеров на небесной сфере (в галактических координатах).

Определить расстояние до каждого отдельного барстера только по его положению на небесной сфере, конечно, невозможно. Но мы узнали типичное, характерное расстояние, и это позволяет сделать важные выводы.

Светимость и энергия

Поток, регистрируемый во время вспышки барстера, лежит обычно в пределах от 10^{-11} до 10^{-13} Вт/м^2 . В качестве характерной величины потока возьмем промежуточное значение: $f = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$.

Если известно расстояние d до источника, то по принимаемому потоку f можно подсчитать полную светимость источника, т. е. энергию, излучаемую им во всех направлениях в единицу времени. Для этого нужно поток умножить на площадь сферы с радиусом, равным расстоянию до источника. Тогда при $f = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ и $d = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}$ светимость барстера во время вспышки будет

$$L = f \cdot 4\pi d^2 \approx 10^{31} \text{ Вт.} \quad (2.1)$$

Тем же путем находят и фоновую светимость барстера, которая не исчезает в промежутках между вспышками. Ее типичная величина приблизительно в 10 раз меньше: $L_0 \approx 10^{30} \text{ Вт}$.

Энергию, которую барстер излучает за одну вспышку, можно оценить, умножив светимость (L) на длительность

вспышки ($\Delta t=10$ с):

$$E \approx L\Delta t = 10^{32} \text{ Дж.} \quad (2.2)$$

Можно оценить также и еще одну характеристику барстера — его усредненную вспышечную светимость. Она получается путем деления энергии E на типичный промежуток времени между вспышками ($t_b=10^4$ с):

$$\langle L \rangle = E/t_b = 10^{28} \text{ Вт.} \quad (2.3)$$

Интересно сравнить эту величину с фоновой светимостью барстера L_0 . Их отношение $L_0/\langle L \rangle=100$. Это означает, что фоновая светимость питается из существенно большего резервуара энергии, чем вспышечная светимость.

Спектр

Излучение барстеров регистрируется в диапазоне энергий рентгеновских фотонов от 1 до 30 кэВ. Допустим, что в нашем распоряжении имеется десять приемников фотонов, каждый из которых регистрирует фотоны только из одного определенного интервала энергий: первый из интервала от 1 до 3 кэВ, второй — от 3 до 6 кэВ, третий — от 6 до 9 кэВ и т. д. С помощью этого набора приемников мы будем производить измерения энергии, приходящей в единицу времени на единицу площади каждого из приемников. Это даст нам потоки излучения в отдельных энергетических интервалах; мы найдем таким образом, какая доля энергии из общего потока излучения выпадает на каждый из этих интервалов. Иными словами, мы сможем узнать спектр излучения — распределение его энергии (или потока) по отдельным энергетическим интервалам.

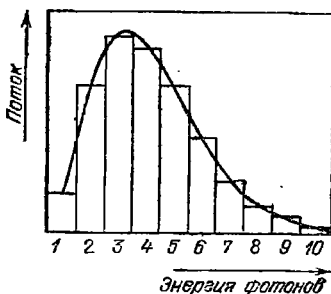


Рис. 13. Спектр излучения барстера.

Результат измерений можно представить в виде диаграммы (рис. 13); на ней каждому интервалу энергии сопоставляется столбик, высота которого соответствует принимаемому в этом интервале потоку.

Проведем на диаграмме сплошную линию через середины «крышек» наших десяти столбиков. Эта гладкая кривая тоже служит графическим представлением спектра излучения. Каким бы способом ни производилось разбиение диапазона энергий на отдельные интервалы, результат наблюдений всегда будет приближаться к этой гладкой кривой. Чем мельче разбиение, чем больше интервалов, тем ближе будет ломаная линия этого частотокола к гладкой кривой, которая его огибает.

Диаграммы такого вида, построенные для вспышечного излучения барстеров, показали, что поток распределен по энергетическим интервалам отнюдь не равномерно. Наибольшая доля его приходится на третий из десяти энергетических интервалов, о которых мы говорили (от 6 до 9 кэВ); в обе стороны от этого максимума поток в каждом из интервалов систематически уменьшается. Оказалось, что гладкая кривая, построенная по этим данным, соответствует хорошо известной в физике спектральной зависимости для излучения нагретого тела.

Физики конца XIX — начала XX веков установили, что всякое нагретое тело излучает электромагнитные волны, вообще говоря, любых частот; но в спектре излучения имеется максимум при определенной частоте, которая зависит от температуры тела. Частота в максимуме спектра прямо пропорциональна температуре:

$$\nu_m \approx 3kT/h. \quad (2.4)$$

Здесь T — температура, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, h — постоянная Планка. Частоте ν_m соответствует энергия фотона $\epsilon_m = h\nu_m \approx 3kT$.

Вид спектра, связь частоты и энергии в его максимуме с температурой имеют универсальный характер — они не зависят от рода вещества нагретого тела. Это обстоятельство ясно обнаруживается в одном из классических опытов, в котором анализируется излучение, выходящее через малое отверстие из полого тела. Такая полость с отверстием получила специальное название — «абсолютно черное тело». Дело в том, что лучи, попадающие в эту полость извне, целиком поглощаются ее стенками при многократных отражениях от них. Спектр излучения черного тела не зависит от того, из какого материала сделаны стенки полости, и выражает общие для всех нагретых тел закономерности излучения.

Излучение многих звезд, других небесных тел имеет универсальный «чернотельный» спектр. Спектр Солнца

довольно близко соответствует чернотельному излучению с температурой 5776 К — такова температура излучающей свет поверхности Солнца *).

Какова температура излучающего тела барстера? По данным наблюдений, максимуму в спектре вспышечного излучения отвечает энергия фотонов между 6 и 9 кэВ. Возьмем в качестве характерной величины энергию из середины этого интервала и положим, что $\epsilon_m = 7,5 \text{ кэВ} = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$. Тогда температура излучающего тела

$$T \approx h\nu_m/3k = \epsilon_m/3k \approx 3 \cdot 10^7 \text{ К.} \quad (2.5)$$

Как мы видим, излучающее тело барстера — точнее, его излучающая поверхность — имеет во время вспышки температуру в несколько десятков миллионов градусов. Это приблизительно в 10 тысяч раз больше температуры поверхности Солнца и вдвое больше температуры солнечных недр.

Воспользуемся теперь еще одним из универсальных законов чернотельного излучения — законом Стефана — Больцмана. Согласно этому закону поверхность тела, нагретого до температуры T , излучает в единицу времени с единицы площади количество энергии, пропорциональное четвертой степени температуры:

$$j = \sigma T^4, \quad (2.6)$$

где коэффициент $\sigma = 0,57 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана — Больцмана.

Представим себе, что излучающая поверхность барстера — это сфера радиуса R . Тогда светимость, т. е. энергию, излучаемую в единицу времени всей этой поверхностью, можно найти на основании закона Стефана — Больцмана:

$$L = j \cdot 4\pi R^2 = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2. \quad (2.7)$$

В этом соотношении нам неизвестен только радиус R , а светимость и температуру мы уже нашли (см. (2.1) и (2.5)). Значит, отсюда можно определить радиус излучающей поверхности барстера:

$$R = (L/4\pi\sigma T^4)^{1/2} \approx 10^4 \text{ м} = 10 \text{ км.} \quad (2.8)$$

Эта величина в 100 тысяч раз меньше радиуса Солнца; она в тысячу раз меньше радиуса белого карлика (имею-

*) Эту температуру называют эффективной температурой, и тем самым подчеркивают, что совпадение с универсальным спектром все же не абсолютно точное.

щего тот же размер, что и Земля). Но именно такой радиус имеют нейтронные звезды!

Напомним, что масса нейтронной звезды близка к массе Солнца ($M \approx 10^{30}$ кг), а ее средняя плотность сравнима с плотностью вещества внутри атомных ядер ($\rho \approx 10^{18}$ кг/м³). Отсюда радиус звезды

$$R \approx (M/\rho)^{1/3} \approx 10^4 \text{ м} = 10 \text{ км.} \quad (2.9)$$

Вспышки барстера рождаются на нейтронной звезде, на ее поверхности, разогретой до температуры в несколько десятков миллионов градусов. Вот вывод, который следует

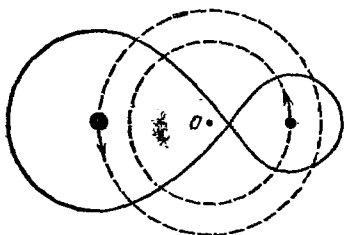


Рис. 14. Двойная звездная система с круговыми орбитами. Показаны границы полостей Роша в сечении плоскостью орбит. Точка O — центр масс системы.

из непосредственного анализа имеющихся наблюдательных данных. Исходя из этих данных, мы смогли найти характерное расстояние до типичного барстера и его светимость, а затем установили, что феномен барстера связан с самыми компактными астрономическими телами — нейтронными звездами. Это заключение подтверждается всеми дальнейшими наблюдениями барстеров.

Звезда-компаньон

Оптические наблюдения барстеров, начатые вскоре после открытия рентгеновских вспышек, выявили важный новый факт: барстеры являются не одиночными нейтронными звездами, а нейтронными звездами в двойных звездных системах. Компаньонами нейтронных звезд, обнаруженными поблизости от источников рентгеновских вспышек, оказались «обычные» звезды-карлики, в недрах которых происходит термоядерное горение. Это звезды сравнительно малых масс — от половины до одной солнечной массы. Их возраст приближается к десяти миллиардам лет, так что они принадлежат к числу наиболее старых звезд Галактики.

В двойной звездной системе звезды движутся по замкнутым орбитам вокруг их общего центра масс

(рис. 14). У барстеров периоды обращения звезд лежат в пределах от получаса до десяти дней. Размеры орбит оцениваются приблизительно в 10^9 м, что сравнимо с радиусами обычных звезд-компаньонов. В столь тесных двойных системах звезды взаимодействуют друг с другом не как тяготеющие точки, а как протяженные тела. Это означает, что взаимное тяготение звезд проявляется не только в движении каждой звезды как целого, но также и в самой форме звезды, в распределении и движении вещества во внешних ее слоях. Очень важно, что в этом случае возможно даже перетекание вещества с одной звезды на другую. Нейтронная звезда может увлекать и захватывать своим сильным полем тяготения часть вещества с поверхности звезды-компаньона. Так происходит аккреция в двойной системе.

Аккреция

Изучение нового класса небесных тел развивается обычно тремя последовательными этапами: наблюдения — интерпретация — теория. На первом этапе происходит астрономическое открытие и идет накопление важнейших фактических данных. Второй этап предполагает осмысление, анализ этих данных, сопоставление их с тем, что уже известно в науке. Интерпретация наблюдательных данных должна дать ответ на вопрос, что это такое, что там происходит. Цель третьего этапа — построить ясную картину явления, которая давала бы ответ на вопрос, как и почему происходит то, что мы наблюдаем. На этом этапе выдвигаются теоретические идеи и гипотезы, разрабатываются физико-математические модели явления, проводится их сравнение с наблюдениями. Правильность теории может быть доказана лишь ее полным согласием с фактическими данными. Теория должна обладать и предсказательной силой, чтобы на ее основе можно было делать дальнейшие выводы, допускающие проверку путем новых наблюдений.

Наш рассказ о барстерах тоже развивается от наблюдений и их интерпретации к теории этих космических объектов. И наблюдения и в особенности их интерпретация дали, как мы видим, очень многое. Теория барстеров (и других рентгеновских звезд) исходит из высказанной И. С. Шкловским идеи аккреции в тесной двойной системе, содержащей нейтронную звезду.

Каждая из звезд в двойной системе обладает зоной влияния, в пределах которой ее тяготение сильнее тяготения партнера (рис. 14). Такую зону называют полостью Роша, по имени французского астронома XIX века, который изучал динамику планет и их спутников, сходную с динамикой двойных звездных систем. Радиус нейтронной звезды гораздо меньше размера ее полости Роша. Что же касается звезды-компаньона, то ее радиус сравним

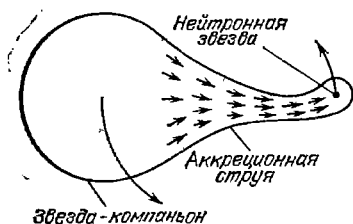


Рис. 15. Аккреция в тесной двойной системе барстера. Вещество внешних слоев звезды-компаньона переполняет полость Роша этой звезды и часть его в виде струи перетекает к нейтронной звезде. Большие стрелки указывают направление обращения звезд вокруг их общего центра масс.

с расстоянием между звездами, и она может, так сказать, переполнять собою свою полость Роша. В этом случае от нее к нейтронной звезде устремляется струя вещества, увлекаемого тяготением нейтронной звезды внутрь ее полости Роша (рис. 15).

Падая к нейтронной звезде, вещество ускоряется, приобретает значительные скорости и соответствующую им немалую кинетическую энергию. Неизбежное столкновение с поверхностью нейтронной звезды сопровождается, очевидно, торможением падающего вещества; его кинетическая энергия переходит тогда в тепло. Из-за этого поверхность нейтронной звезды разогревается и, как всякое нагретое тело, начинает излучать электромагнитные волны. Так возникает фоновая светимость барстера.

Чтобы в этом убедиться, сделаем некоторые расчеты. Найдем прежде всего скорость, с которой частицы аккреционной струи налетают на поверхность нейтронной звезды. Скорость падения любого тела в центральном поле тяготения дается соотношением

$$v = (2GM/R)^{1/2}, \quad (2.10)$$

где M — масса нейтронной звезды, R — ее радиус, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ — гравитационная постоянная. Считается, что тело падает вдоль прямой по направлению к центру тяготения.

Примем массу нейтронной звезды равной $M=1,4 M_{\odot}$ *), а ее радиус $R=10^4$ м. Тогда получим, что скорость аккреционного потока у поверхности нейтронной звезды очень высока, она сравнима со скоростью света: $v=1,5 \cdot 10^8$ м/с $\approx 0,5$ с. Каждая частица массы m , двигаясь с такой скоростью в аккреционном потоке, обладает кинетической энергией $\frac{1}{2}mv^2$. Эта энергия составляет 13% от энергии покоя частицы, даваемой эйнштейновской формулой $E=mc^2$.

Пусть на поверхность нейтронной звезды выпадает в единицу времени масса вещества J . Тогда кинетическая энергия, сообщаемая поверхности звезды в единицу времени, есть

$$Q = \frac{1}{2}Jv^2 \approx 0,13Jc^2. \quad (2.11)$$

В установившемся состоянии нагрев поверхности нейтронной звезды аккрецируемым веществом уравновешивается ее охлаждением из-за непрерывного излучения. Приравнивая величину Q (приход энергии к поверхности звезды) фоновой светимости пульсара L_0 (отвод энергии излучением), найдем, таким образом поток аккреции, необходимый для обеспечения фонового излучения барстера: $J=2L_0/v^2 \approx 10^{14}$ кг/с. Это довольно значительный поток массы, и все же звезда-компаньон вполне способна поставлять вещество в таком темпе многие миллионы лет.

Нагрев аккреционным потоком поверхности нейтронной звезды в двойной системе служит и причиной излучения ярчайшей рентгеновской звезды на небе — источника Скорпион X-1. Это как бы барстер без вспышек; у него имеется только фоновое излучение. Яркость же столь велика просто из-за того, что он находится довольно близко к нам — на расстоянии в 300 пк, что приблизительно в 30 раз меньше расстояния до типичного барстера.

Термоядерные взрывы

Но что вызывает рентгеновские вспышки, резкие подъемы светимости барстера? Причина вспышек в тех превращениях, которые испытывает вещество, выпадающее на поверхность нейтронной звезды.

*) Такова измеренная масса нейтронной звезды в двойном пульсаре — единственной пока системе, которая допускает прямое наблюдательное определение массы нейтронной звезды. Это значение совпадает (случайно) с чандрасекаровским пределом масс для белых карликов.

Газ, захваченный нейтронной звездой, имеет обычный, «солнечный» химический состав — на $\frac{3}{4}$ по массе это водород. При ударе о поверхность нейтронной звезды газ сжимается и разогревается до такой степени, что в нем становятся возможными термоядерные реакции превращения водорода в гелий — такие же, как в недрах Солнца и других «обычных» звезд. Выделяющаяся в этих реакциях энергия добавляется к той энергии, которую звезда получает из-за аккреции. Эта добавка, однако, не очень велика. Известно, что в ядерных превращениях — пусть даже до полного «стопора», т. е. превращения водорода в железо, — выделяется не больше одного процента энергии покоя вещества. Сравнивая это с нашей оценкой кинетической энергии аккрецируемого вещества, найдем, что термоядерные реакции добавляют энергию, которая в 10 раз меньше энергии аккреции.

Важно здесь другое. В результате термоядерных реакций на поверхности нейтронной звезды образуется слой гелия. Оказывается, что именно в слое гелия и развиваются процессы, вызывающие вспышки.

Более 30 лет назад Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский, работавшие тогда в Ленинградском государственном педагогическом институте им. А. И. Герцена, теоретически доказали, что при определенных условиях в звездах могут происходить термоядерные взрывы. В звезде, исчерпавшей ядерное горючее в своей центральной области, чаще всего имеются близкие к поверхности слои, где вещество еще богато водородом, гелием и другими легкими элементами. Представим себе ситуацию, когда температура в этих слоях весьма высока, но все же не вполне достаточна для протекания ядерных реакций. Пусть далее по какой-либо причине температура повысится и окажется вдруг выше критического предела, с которого становится возможным ядерное горение. Что будет происходить дальше?

Очевидно, начнутся ядерные реакции с выделением тепла; но сможет ли температура слоя оставаться достаточно высокой, повысится она или понизится, зависит от соотношения между темпом выделения тепла в ядерных реакциях и темпом, в котором избыток тепла отводится из данного слоя наружу. Если тепло выходит из слоя очень быстро, почти мгновенно, то ясно, что, едва начавшись, ядерные реакции тут же и затухнут, так как температура слоя сразу понизится и вернется к значению, меньшему критического.

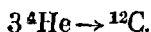
Иной результат следует ожидать в случае, если тепло,

выделяемое при ядерных реакциях, не успевает быстро покидать слой. Тогда происходит дальнейшее повышение температуры. А с повышением температуры ядерные реакции протекают все эффективнее, в повышающемся темпе происходит выделение энергии и в результате температура слоя продолжает нарастать. Но тогда ядерные реакции пойдут еще быстрее, приток энергии снова повысится и т. д. Можно сказать, что процесс ядерного энерговыделения развивается в этом случае лавинообразно, поддерживая и ускоряя сам себя, — это взрыв.

Об этом явлении вспомнили сразу же, как только были открыты барстеры; астрономы разных стран быстро пришли к общему мнению, что вспышки рентгеновского излучения обязаны варывному термоядерному горению на поверхности нейтронных звезд. Эта теоретическая идея, вместе с исходной идеей аккреции, и позволила построить полную и ясную картину физики барстера.

Количественное исследование термоядерного взрыва требует довольно сложных вычислений и не может быть сведено к простым оценкам. Расчет ведется на крупных вычислительных машинах, и это позволяет должным образом учесть все обстоятельства — структуру слоя аккрецируемого вещества, его тепловой баланс, определяемый нагревом при ядерных реакциях и охлаждением из-за теплопроводности и излучения, и большое разнообразие других факторов, существенно влияющих на физику явления. Детальные исследования этого процесса проведены в Италии Л. Мараски, А. Кавальери, в США П. Джоссом, В. Льюнном (последнему принадлежит и ряд важных наблюдательных результатов в этой области), в нашей стране Э. В. Эргма, А. В. Тутуковым и А. А. Кудряшовым, а затем и другими астрофизиками. Расчеты показали, что термоядерные взрывы, сопровождаемые вспышками рентгеновского излучения, происходят в слое гелия, образующемся на поверхности аккрецирующей нейтронной звезды. Этот слой имеет толщину приблизительно в один метр, плотность свыше миллиарда килограммов в кубическом метре и температуру в его основании около полу-миллиарда градусов.

При таких условиях способна протекать реакция объединения трех ядер гелия в ядра углерода:



Эту реакцию в ядерной физике называют тройным альфа-процессом (ядро гелия-4 — это альфа-частица). Тройной

альфа-процесс действительно может развиваться взрывообразно. В гелиевом слое он протекает столь стремительно, что температура может подскочить вдвое за несколько сотых долей секунды. Никакой теплоотвод не поспевает за таким стремительным энерговыделением: раз начавшись, горение гелия идет со все возрастающей скоростью, пока весь он не превратится в углерод *).

При сгорании одного килограмма гелия выделяется энергия $q=10^{14}$ Дж/кг $=10^{14}$ м²/с². Сколько всего энергии выделяется за вспышку? Для ответа на этот вопрос нужно, очевидно, знать массу гелиевого слоя.

Гелий полностью сгорает при взрыве, так что накопление его происходит за время между двумя последовательными взрывами. Взяв для оценки промежуток между рентгеновскими вспышками $t_b=10^4$ с и пользуясь уже полученным значением скорости аккреции $J=10^{14}$ кг/с, найдем, что масса слоя $\mu=Jt_b \approx 10^{18}$ кг. Теперь умножим эту величину (ее, кстати, можно получить и из приведенных выше параметров гелиевого слоя) на энергию, выделяемую одним килограммом гелия, и тем самым получим полную энергию вспышки: $E=q\mu \approx 10^{32}$ Дж. Эта оценка вполне согласуется с наблюдательными данными.

Если вычислить теперь усредненную вспышечную светимость, $\langle L \rangle = E/t_b$, то окажется, что в нашей теории она не зависит от величины t_b и определяется темпом аккреции:

$$\langle L \rangle = E/t_b = q\mu/t_b = qJt_b/t_b = qJ. \quad (2.12)$$

Отношение фоновой светимости $L_0 = \frac{1}{2}Jv_2$ к величине $\langle L \rangle$

$$L_0/\langle L \rangle = GM/Rq \quad (2.13)$$

выражается только через массу и радиус нейтронной звезды (две другие величины, G и q — физические постоянные). Числовое значение этого отношения при всех разумных массах и радиусах близко к 100 — в прекрасном согласии с наблюдательной величиной.

Природа барстера, таким образом, полностью разгадана: мы знаем, откуда берется энергия для его фоновой

*) В отличие от горения гелия, горение водорода на аккрецирующей нейтронной звезде происходит в спокойном режиме, без взрыва, и заметное нарастание температуры в реакциях превращения водорода в гелий всегда происходит за время в несколько сот секунд, что слишком медленно для развития взрыва.

светимости и почему происходят резкие подъемы излучения. Остается выяснить еще одно любопытное обстоятельство.

Барстеры в скоплениях

Из трех десятков известных барстеров восемь, т. е. приблизительно одна четверть, принадлежат шаровым звездным скоплениям. Эти скопления состоят из наиболее старых звезд Галактики и насчитывают каждое до миллиона звезд. Все шаровые скопления Галактики (их известно немногим более ста) содержат вместе приблизительно сто миллионов звезд, что составляет только одну десятитысячную полного числа звезд Галактики. Отсюда видно, что барстеры определенно предпочитают возникать среди звезд шаровых скоплений.

Это связано, вероятно, с самой возможностью образования тесной двойной системы, содержащей нейтронную звезду. Хорошая половина всех звезд Галактики входит в пары. Но при вспышке сверхновой и образовании нейтронной звезды пара может оказаться разорванной. Дело в том, что взрывающаяся звезда способна сбросить в виде оболочки существенную часть своей массы. При этом, как заметил И. С. Шкловский, такой сброс вряд ли происходит строго сферически; скорее он должен быть более или менее асимметричным, так что в какую-то сторону выбрасывается больше вещества, чем по другим направлениям. Из-за этого нейтронная звезда получает импульс отдачи, как ружье при выстреле, и этого импульса достаточно, чтобы звезда освободилась от притяжения своего компаньона по двойной системе. Покинувшая двойную систему нейтронная звезда имеет скорость, заметно превышающую обычные скорости звезд в Галактике.

Нейтронной звезде, движущейся с большой скоростью, нелегко найти компаньона и снова стать членом двойной системы. Для этого требуется, например, чтобы она встретила и испытала взаимодействие еще с двумя звездами, одна из которых взяла бы на себя избыток энергии нейтронной звезды и улетела, а вторая захватила бы и связала с собой нейтронную звезду своим полем тяготения. Вероятность такой тройной встречи одиночных звезд очень низка; она пренебрежимо мала для общего поля звезд Галактики, так что там такие встречи просто невозможны. Что же касается шаровых звездных скоплений, то в них звезды могут проходить довольно близко друг от друга, особенно в центральных областях, где кон-

центрация звезд (приблизительно 30 тысяч звезд на кубический парсек) в десятки тысяч раз превышает среднюю концентрацию звезд в Галактике. Все же и здесь вероятность тройной встречи одиночных звезд еще слишком низка, чтобы этот процесс мог иметь какое-то значение.

Но нейтронная звезда может встретиться не с одиночными звездами, а с двойной системой. Вероятность такой встречи много больше, чем для одиночных звезд из-за того, что пар в звездных системах довольно много.

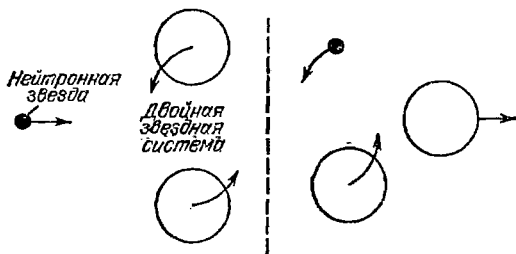


Рис. 16. Взаимодействие нейтронной звезды с двойной системой («перезарядка»).

Картину взаимодействия быстрой нейтронной звезды с тесной парой обычных звезд при близком прохождении от нее изучал английский теоретик Дж. Хиллс (с помощью моделирования процесса на большой вычислительной машине). Выяснилось, что довольно часто в результате такого взаимодействия нейтронная звезда «выбивала» из двойной системы одну из звезд и занимала ее место. Выброшенная из двойной системы звезда улетела прочь, принимая на себя избыток кинетической энергии, имевшийся у нейтронной звезды (рис. 16). Похожий процесс столкновений, сопровождающийся заменой одной частицы другой, известен и в физике плазмы — там он называется перезарядкой.

Как показывает численное моделирование, взаимодействие типа перезарядки особенно эффективно, если массы звезд в исходной паре меньше массы нейтронной звезды. Но из наблюдений известно, что звезды-компаньоны нейтронных звезд в барстерах действительно имеют малые массы. Известно также, что в шаровых скоплениях преобладают звезды сравнительно малых масс. Все это свидетельствует в пользу идеи Дж. Хиллса. К тому же вероятность встречи нейтронной звезды со звездной па-

рой в плотной центральной области шарового скопления достаточно велика, чтобы хотя бы одно такое событие, сопровождающееся образованием тесной пары с нейтронной звездой, произошло за время существования шарового скопления. В общем же в поле звезд Галактики такие встречи гораздо более редки. Возможно, именно этим обстоятельством объясняется высокая доля барстеров среди звезд шаровых скоплений.

Не исключено даже, что барстеры, наблюдаемые сейчас вне скоплений, возникли в отдаленном прошлом в плотных областях звездных комплексов, в которых (согласно современным космогоническим представлениям) рождались первые звезды Галактики. Большая часть комплексов испытала в дальнейшем распад, и их звезды — а с ними и барстеры — рассеялись по всему объему Галактики; некоторые же из комплексов продолжают существовать до сих пор в виде современных шаровых скоплений. Концентрация звезд, как и шаровых скоплений, возрастает к центру Галактики. Поэтому, возможно, и барстеры встречаются чаще всего вблизи галактического центра.