

Компактные рентгеновские источники

13.1. ОТКРЫТИЕ И ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ

Новая эпоха в развитии астрономии началась 18 июня 1962 г., когда Джаккони и его сотрудники [223] запустили с полигона Уайт-Сэндс в штате Нью-Мексико ракету «Аэроби», на борту которой находились три счетчика Гейгера. Они вскоре обнаружили, что в нашей Галактике имеются дискретные рентгеновские источники. Например, они открыли объект Скорпион X-1—самый яркий источник на небе в диапазоне энергий 1—10 кэВ. (Его название, которое сокращенно записывается как Sco X-1, означает, что это первый рентгеновский источник, открытый в созвездии Скорпиона.) Вскоре последовали дальнейшие ракетные и баллонные наблюдения, которые подтвердили данные, полученные на «Аэроби» и привели к уточнению координат открытых объектов, а также к отождествлению новых источников.

К концу десятилетия было отождествлено около 20 рентгеновских источников. Было найдено, что один из самых сильных источников — Лебедь (Cyg) X-1, является переменным во времени [97, 436]. Многие из источников оказались расположенными вблизи плоскости Галактики, что дало основание отнести большинство из них к галактическим объектам [413].

В 1966 г. в месте нахождения источника Sco X-1 был обнаружен его оптический двойник; оптическим источником оказалась старая звезда 12—13-й звездной величины. В следующем году Шкловский [538] предложил забавную (по тем временам!) теоретическую модель для Sco X-1, согласно которой рентгеновское излучение испускается высокотемпературным газом, перетекающим на нейтронную звезду от оптического компонента в тесной двойной системе. Оптический компонент представляет собой обычную остывшую карликовую звезду, ответственную за наблюдаемое оптическое излучение. Эта модель развивала оригинальную идею Хаякавы и Мацуоки [269] о том, что газовая аккреция в тесных двойных системах может оказаться источником рентгеновского излучения. (Они имели в виду необычные условия в нормальных в остальных отношениях двойных системах.)

Камерон и Мок [102] критиковали модель Шкловского, утверждая, что наблюдающееся мягкое рентгеновское излучение от Sco X-1, вероятнее всего, возникает от аккреции на белый карлик, а не на нейтронную звезду. Были обрисованы некоторые детали механизма сферической аккреции на белый карлик в двойной системе.

Вслед за этим Прендергаст и Бербидж [464] показали, что газ, перетекающий на компактную звезду от другого компонента двойной системы, обладает слишком большим моментом количества движения, чтобы течение было радиальным. Поэтому газ должен образовывать вокруг компактной

звезды тонкий аккреционный диск с приблизительно кеплеровскими скоростями вращения и с небольшой направленной внутрь скоростью дрейфа. Детали этой модели были проработаны для случая аккреции на белый карлик.

Еще в 1965 г. Зельдович и Гусейнов [634] отметили, что открытие рентгеновского или гамма-излучения от *спектрально-двойных звезд с неразделенными линиями* послужило бы сильным свидетельством присутствия либо черной дыры, либо нейтронной звезды. (Термин «спектрально-двойная» означает, что вывод об орбитальном движении в двойной системе делается на основании доплеровского сдвига спектральных линий. «Неразделенные линии» означают, что видны спектральные линии только от одного объекта). Ясно, что черная дыра или нейтронная звезда не могут дать оптические спектральные линии, так что в этом случае будет виден только один набор линий.

Еще раньше Зельдович [633] и Солпитер [497] высказывали предположение, что аккреция на черные дыры может быть эффективным способом преобразования гравитационной потенциальной энергии в излучение. Однако в то время они рассматривали аккрецию на сверхмассивные черные дыры ($M \gg 10^8 M_{\odot}$) для объяснения громадных светимостей незадолго до того открытых квазаров.

В 1969 г. Тримбл и Торн [572] пришли к заключению, что массивные невидимые компоненты, могущие быть только черными дырами или нейтронными звездами, если и существуют, то лишь в немногих известных к тому времени спектрально-двойных системах с неразделенными линиями. Вдобавок ни одна из этих систем не совпадала в то время с опубликованными координатами рентгеновских источников.

Итак, несмотря на растущие усилия теоретиков объяснить природу только что открытых галактических рентгеновских источников, в то время еще не было надежных наблюдательных свидетельств, что эти источники имеют какое-то отношение к тесным двойным системам или к компактным объектам. Однако идея уже пустила свои корни. С открытием пульсаров в 1967 г. (см: гл. 10) понятие нейтронной звезды стало внушать больше доверия.

12 декабря 1970 г. Национальным управлением по авиации и космическим исследованиям (НАСА) США с побережья в Кении был запущен первый астрономический спутник «Ухуру»¹⁾. Этот спутник, полностью предназначенный для рентгеновских наблюдений в диапазоне 2—20 кэВ, произвел революцию в наших представлениях о природе космических рентгеновских источников и компактных объектов. Прежде чем он прекратил функционировать (в марте 1973 г., гораздо позднее, чем следовало из проектного времени жизни), было отождествлено свыше 300 дискретных рентгеновских источников [200]. Особенно важным было надежное обнаруже-

¹⁾ Слово «ухуру» на языке суахили означает «свобода»; запуск был приурочен к празднованию независимости Кении.

ние рентгеновского излучения от *двойных звездных систем*¹⁾ и открытие *рентгеновских пульсаров* в двойных системах²⁾. Большинство галактических рентгеновских источников, по-видимому, представляют собой компактные объекты, которые аккрецируют газ, притекающий от соседних нормальных звезд—компонентов двойных систем. Такая интерпретация данных наблюдений вытекает из следующих фактов:

1. Переменность рентгеновского излучения с малыми характерными временами говорит о малых размерах излучающих областей.

2. Для многих источников подтверждено, что они входят в состав двойной системы, где оптический компонент обращается вокруг невидимого.

3. Аккреция вещества на компактный объект, особенно нейтронную звезду или черную дыру, является исключительно эффективным средством преобразования высвобождающейся гравитационной потенциальной энергии в рентгеновское излучение.

Вообще говоря, в списке кандидатов в рентгеновские источники есть все три типа компактных объектов: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Но в отдельных случаях конкретная природа компактного объекта может быть отождествлена с высокой вероятностью. Рассмотрим, например, источник Геркулес (Her) X-1, демонстрирующий очень короткие регулярные импульсы с периодом 1,24 с, или источник SMC X-1, лежащий в Малом Магеллановом Облаке (период 0,71 с). Постоянство периода наводит на мысль о регулярном движении в гравитационном поле. Такое движение—вращение, пульсации или орбитальное движение, характеризуется периодами

$$P \geq (G\bar{\rho})^{-1/2}, \quad (13.1.1)$$

где $\bar{\rho}$ — средняя плотность вещества в объеме, в пределах которого происходит движение (сравните с разд. 10.2). Для этих источников наблюдаемые периоды требуют $\bar{\rho} \geq 10^6$ г/см³, что подразумевает присутствие компактного объекта. В нашем случае белые карлики маловероятны (хотя такие короткие периоды возможны для массивных быстро вращающихся холодных карликов), поскольку горячие карлики с температурами поверхности порядка кэВ должны иметь довольно обширные атмосферы и более длинные периоды. Орбитальное движение, либо непосредственно модулирующее некоторый механизм излучения, либо возбуждающее короткопериодические пульсации, должно очень быстро затухать благодаря гравитационному излучению. Вращающиеся черные дыры исключаются из рассмотрения, поскольку не существует стационарных неосесимметричных черных дыр (см. гл. 12), которые потребовались бы для создания регулярной переменности. Поэтому с неизбежностью мы приходим к отождествлению этих (а возможно, и всех) импульсных рентгеновских источников с нейтронными звездами.

¹⁾ Было отождествлено около 100 оптических компонентов [84].

²⁾ На 1982 г. приблизительно 19 известных рентгеновских источников отождествлено с рентгеновскими пульсарами, входящими в двойные системы.

Мы наблюдаем импульсы, по-видимому, оттого, что диаграмма направленности рентгеновского пучка не совмещена с осью вращения аккрецирующей намагниченной нейтронной звезды. Измерение в спектре излучения Нег X-1 детали, которую можно интерпретировать как циклотронную линию, приводит к значению напряженности магнитного поля $B \sim 5 \cdot 10^{12}$ Гс вблизи поверхности (см. упражнение 13.2). Такие сильные магнитные поля совместимы с магнитными полями пульсаров (см. гл. 10), но не обнаружены на поверхности белых карликов.

С другой стороны, рассмотрение непериодического быстропеременного рентгеновского источника Cyg X-1, входящего в двойную систему, приводит к совершенно иному заключению, что мы подтвердим в разд. 13.5. Большое значение массы, получаемое для этого источника на основе комбинации оптических и рентгеновских данных (определенно $M/M_{\odot} \geq 3$ и, возможно, $9 \leq M/M_{\odot} \leq 15$), исключает из рассмотрения белый карлик или нейтронную звезду. Именно это заключение наряду с компактностью источника приводит к предварительному отождествлению Cyg X-1 с черной дырой. Если оно окажется правильным, эта находка будет, несомненно, одним из самых замечательных открытий в истории науки.

По следам триумфального эксперимента «Ухуру» в течение 70-х годов было запущено еще около десяти спутников, полностью или частично посвященных рентгеновским наблюдениям. Они известны под названиями «Коперник», «Ариэль-5», ANS, SAS-3, OSO-7 и OSO-8, COS-B, HEAO-1 и HEAO-2 (обсерватория «Эйнштейн»), «Хакучо». Эти спутники оказались полезными для подтверждения и повторного анализа наблюдений «Ухуру», для получения спектральной информации об избранных источниках, для точного определения положения некоторых из них и расширения списка известных источников посредством регистрации более слабых и более удаленных объектов. Кроме того, за это десятилетие были обнаружены совершенно новые классы рентгеновских источников. Самыми замечательными из них оказались около 30 рентгеновских *барстеров*, первые из которых были открыты на основании данных спутника ANS [247]. Эти галактические источники испускают непериодические вспышки рентгеновского излучения с характерными временами порядка минут и дней. По крайней мере девять из них лежат в шаровых скоплениях. Хотя ни для одного из этих источников не наблюдалось затмений, обычно считается, что в большинстве они представляют собой нейтронные звезды, принадлежащие к двойным системам с малой массой (см. разд. 13.6).

В нескольких следующих разделах мы дадим обзор некоторых особенностей галактических рентгеновских источников. Наше обсуждение ни в коей степени не будет полным; мы лишь попытаемся передать «дух» этой относительно новой отрасли астрономии и подчеркнуть, какое революционное воздействие она оказала на теорию компактных объектов¹⁾. Чтобы

¹⁾ Более детальные обзоры можно найти в [222, 253] (наблюдения компактных рентгеновских источников), [33, 473] (рентгеновские пульсары), [355] (источники в шаровых скоплениях и барстеры). В качестве нового каталога объектов рентгеновского неба можно рекомендовать четвертый каталог данных спутника «Ухуру» [200].

читатель в полной мере мог оценить приведенные ниже данные наблюдений, мы рекомендуем ему просмотреть приложение А, в котором описаны свойства *обычных* светящихся звезд. Такие звезды и служат спутниками компактных звезд в двойных рентгеновских системах.

В гл. 14 будет обсуждаться физика аккреции на компактные объекты.

13.2. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Распределение всех 339 рентгеновских источников, помещенных в четвертый каталог «Ухуру», показано на рис. 13.1, где представлены положения источников в галактических координатах. Совершенно очевидна концентрация сильных источников вдоль Млечного Пути, особенно на низких галактических широтах (плоскость Галактики соответствует галактической широте, тождественно равной нулю; центр Галактики лежит на галактической долготе, тождественно равной нулю). Источники на высоких галактических широтах значительно слабее, и многие из них можно отождествить с конкретными внегалактическими объектами. Исключениями являются Нег X-1 и Sco X-1, которые оба относятся к галактическим источникам. Нас здесь в основном интересуют *сильные* источники, которые составляют большинство отождествленных галактических источников.

В типичных случаях отождествленные источники расположены на расстояниях от Солнца в диапазоне 0,5—10 кпс. Значения светимостей лежат в интервале $10^{33} - 10^{38}$ эрг/с, начиная с энергий порядка 2—6 кэВ.

Известные двойные рентгеновские источники относятся по крайней мере к двум сильно различающимся типам звездных систем. Одна группа источников с отождествленными оптическими компонентами связана с поздними O- или ранними B-сверхгигантами — звездами, обладающими очень большими массами и светимостями (см. приложение А). Эти звезды сравнительно немногочисленны, время их жизни не превышает 10^7 лет. Такие молодые системы, относящиеся к населению I типа, связаны со спиральными рукавами и областями активного звездообразования вблизи плоскости Галактики. Примерами рентгеновских источников, относящихся к населению I типа и образующих двойные системы со сверхгигантами класса B0, являются Cyg X-1, Cen X-3 и 2U 0900—40.

Другая группа источников связана со звездами более поздних спектральных классов. Такие звезды по светимости, температуре и массе больше походят на Солнце. Эти звезды населения II типа с малой массой имеют большее время жизни, чем массивные O- и B-звезды; поэтому, как правило, они старше и распространены более широко. Рентгеновские источники, относящиеся к населению II типа, включают Нег X-1, Sco X-1, Cyg X-2 и Cyg X-3¹⁾.

¹⁾ Двойная природа Sco X-1 — первого открытого источника такого типа, была доказана лишь в 1975 г. [151, 233].