

КВАЗАРЫ

Сначала казалось, что эти небесные тела ни на что не похожи и сочетают в себе несовместимые свойства. Потребовалось немало усилий, прежде чем было понято, что квазары родственны радиогалактикам и другим галактикам, в ядрах которых происходят мощные процессы энерговыделения. В квазарах эти процессы достигают максимального масштаба и интенсивности. По мощности излучения квазар в сотни раз превосходит Галактику, а рождается это излучение в объеме, сравнимом по размеру с объемом Солнечной системы.

Открытие квазаров и два первых десятилетия их изучения — это, как видно, только начало длительных исследований, целью которых является объяснение физического механизма активности галактических ядер и квазаров. Они все еще остаются самой поразительной загадкой современной астрофизики.

Красное смещение

В 1963 г. М. Шмидт в обсерватории Маунт Паломар (США) получил оптический спектр слабой звездочки, совпадающей по положению на небе с объектом, который ранее был занесен радиоастрономами в 3-й Кембриджский каталог радиисточников (сокращенно ЗС) под номером 273. Окажись объект ЗС 273 действительно звездой, это была бы первая звезда, если исключить Солнце, мощность радиоизлучения которой достаточна для регистрации на Земле. Открытие радиозвезды было бы большим успехом; оставалось лишь доказать — прежде всего, по виду спектра, что это на самом деле звезда.

Но спектр ЗС 273 был совершенно не похож на типичные звездные спектры. В нем четко различались шесть спектральных линий излучения, причем четыре из них составляли последовательность, в которой расстояния между линиями (и их интенсивность) уменьшались в направ-

лении к ультрафиолетовому краю спектра. Она напоминала серию линий водорода, только не на своем месте в спектре. М. Шмидт предположил, что это и есть водородная серия, но смещенная в сторону больших длин волн. Для каждой из линий H_α , H_β , H_γ , H_δ красное смещение оказалось одним и тем же: $z = \Delta\lambda/\lambda = 0,16$. Еще две линии излучения в спектре ЗС 273 оказались смещенными на ту же величину z линиями кислорода и магния.

Вслед за этим был проанализирован спектр другого объекта из того же каталога, источника ЗС 48, и у него обнаружилось еще большее красное смещение: $z = 0,37$.

Ни одна из галактик не обнаруживала прежде такого красного смещения в своем спектре.

Красное смещение галактик — следствие их взаимного разбегания, открытого в конце 20-х годов нашего века американским астрономом Э. Хабблом. Теоретический вывод о нестационарности всей системы галактик во Вселенной, о космологическом расширении был сделан несколькими годами раньше, в 1922—1924 гг., А. А. Фридманом, одним из основоположников современной космологии.

По закону, предсказанному теорией А. А. Фридмана и найденному Э. Хабблом в его наблюдениях, галактики удаляются от нас со скоростями v , пропорциональными расстояниям d до них:

$$v = Hd. \quad (6.1)$$

Коэффициент пропорциональности — его называют постоянной Хаббла — находят из наблюдений; эта величина измерена пока не очень точно: $H = (2-4) \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$. Далее для числовых оценок мы будем брать среднее значение $H = 3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$.

Удаление галактик вызывает смещение их излучения в красную сторону спектра в результате эффекта Доплера. Зависимость красного смещения z от скорости удаления v дается простым соотношением

$$z = v/c. \quad (6.2)$$

Оно справедливо для не слишком больших скоростей v , когда значение z заметно меньше единицы.

Из закона Хаббла (6.1) и соотношения (6.2) следует связь между красным смещением и расстоянием до источника:

$$z = Hd/c. \quad (6.3)$$

Этой формулой пользуются для определения расстояний до галактик и скоплений галактик.

Красное смещение в излучении ЗС 273 и ЗС 48 имеет ту же природу, что и у галактик, и вызвано их удалением от нас в соответствии с общим космологическим расширением.

На основании записанных выше формул находим, что скорость удаления от нас источника ЗС 273 составляет 16% скорости света, а скорость ЗС 48—37% скорости света. При значении постоянной Хаббла $H = 3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$ расстояния до них равны соответственно $1,6 \cdot 10^{25}$ и $3,7 \cdot 10^{25}$ м, или 1,6 и 3,7 млрд. световых лет. Это огромные скорости и огромные расстояния.

Свету требуются, как мы видим, миллиарды лет, чтобы преодолеть расстояния, отделяющие нас от этих астрономических объектов. Это означает вместе с тем, что мы наблюдаем их такими, какими они были миллиарды лет назад. Глядя далеко в глубины Вселенной, мы видим своими глазами ее далекое прошлое.

Переменность и размер

Подчиняясь тому же закону космологического удаления, что и галактики, источники ЗС 273 и ЗС 48 сами по себе сильно отличаются от обычных галактик, подобных нашей Галактике. Прежде всего поражает их необычайная светимость.

Зная расстояние до источников, светимость можно найти по измеренному потоку излучения от них. Оказалось, что объекты ЗС 273 и ЗС 48 излучают свет гораздо интенсивнее, чем галактики,— их светимость в сотни раз превышает светимость нашей Галактики.

Далее, обычная галактика на том расстоянии, на котором находится, например, первый из этих объектов, представлялась бы — даже не в самый крупный телескоп — звездной системой с различной внутренней структурой (например, спиральным узором). Но оба наших объекта выглядят на астрономических фотографиях просто точками, как звезды. А это означает, что их размеры во всяком случае гораздо меньше размеров обычной галактики.

Представления о размере ЗС 273 вскоре удалось существенно уточнить. По предложению И. С. Шкловского советские астрономы А. С. Шаров и Ю. Н. Ефремов просмотрели старые снимки неба, хранившиеся в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга в Москве, и установили, что источник изменял свою светимость вдвое или даже втрое каждые несколько лет.

Этот результат был подтвержден американскими астрономами, в распоряжении которых имелись фотопластинки «небесного патруля» обсерватории Гарвардского университета с изображением ЗС 273 почти за 80 лет, с 1888 г. Более или менее регулярные изменения блеска ЗС 273 происходят, как выяснилось, с характерным временем около десяти лет.

Переменность источника — очень важный факт, из которого следуют далеко идущие выводы. Она указывает

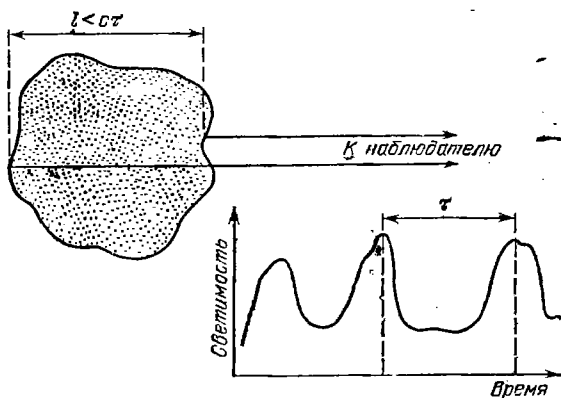


Рис. 31. Вариации светимости и размер источника. Характерное время переменности τ не может быть меньше размера источника, деленного на скорость света: $\tau > l/c$. Отсюда верхний предел размера: $l < c\tau$.

на то, что источник излучения находится в беспокойном, активном состоянии; в нем происходят какие-то бурные процессы, способные перестраивать его внутреннюю структуру, существенно изменять физические условия, в которых рождается излучение.

Переменность позволяет оценить размеры области излучения, указать их верхний предел.

Допустим, источник, имеющий размер в 10 световых лет вдоль луча зрения, вспыхнул во всем своем объеме на одну секунду и затем погас (рис. 31). Мы заметим его излучение, как только нас достигнет свет от ближайшего к нам края источника. Затем будем регистрировать свет от внутренних его областей, пока не дойдет излучение от дальнего края источника. Поэтому вспышку дли-

тельностью в одну секунду мы будем наблюдать целых 10 лет.

С другой стороны, если какое-то изменение яркости наблюдается в течение 10 лет, то это означает, что размер источника излучения в любом случае не превышает 10 световых лет. И этот вывод никак не зависит от того, что в действительности происходит в самом источнике.

Изменение блеска источника ЗС 273 с характерным временем $\tau=10$ лет означает, что его собственный размер не превышает десяти световых лет: $l < ct = 10 \text{ св. лет} \approx 10^{17} \text{ м}$. Этот верхний предел для излучающей области в 10 тысяч раз меньше размера Галактики.

Мы видим, таким образом, что в 1963 г. были открыты совсем особые объекты, которые в сотни раз ярче галактик и по крайней мере в несколько тысяч раз меньше их по размеру. Эти объекты заслуживают специального названия; сначала их называли сверхзвездами, сейчас за ними закрепилось название «квазары» — сокращение от слов «квазизвездный радиисточник».

К настоящему времени известно более двух тысяч квазаров. Некоторые из них очень похожи по своим свойствам на первые квазары ЗС 273 и ЗС 48. Но большинство — до 90% — составляют «радиоспокойные» квазары: сходные с первыми квазарами во всем остальном, они не излучают радиоволн (во всяком случае на том уровне мощности, который позволял бы регистрировать их на Земле). Вместе с тем оказалось, что квазары являются источниками инфракрасного и рентгеновского излучения. Мощность инфракрасного излучения в ряде случаев сравнима с оптической светимостью, а мощность рентгеновского излучения иногда превосходит оптическую светимость в десятки раз. В последние годы зарегистрировано также и гамма-излучение от квазара ЗС 273.

Самую большую светимость в видимом свете $L \approx 10^{40} - 10^{41}$ Вт, превышающую светимость Галактики в $10^3 - 10^5$ раз, имеет квазар ЗС 273. Его оптическое излучение сильно переменное; за время около года светимость изменялась в десятки и сотни раз. Верхний предел размера для этого источника, следующий из его переменности, составляет один световой год, или 10^{16} м.

Значительная переменность наблюдается в рентгеновском излучении квазаров. Американская орбитальная Эйнштейновская обсерватория *) зарегистрировала существ-

*) Эта автоматическая обсерватория выведена на орбиту вокруг Земли в год столетия великого физика (1979 г.).

венные изменения рентгеновской светимости квазара 3С 273 всего за один день. Отсюда следует очень жесткий верхний предел его размера — один световой день, или $3 \cdot 10^{13}$ м.

Недавно появились сообщения о наблюдении рекордно быстрой переменности у одного из квазаров — около 200 с. Это означает, что размер его излучающей области не превышает 200 световых секунд, или $6 \cdot 10^{10}$ м, это вдвое меньше радиуса земной орбиты.

Что касается красного смещения квазаров, то здесь тоже имеются рекордсмены. Самое большое красное смещение открыто в 1982 г. — это $z=3,78$. Значит, длина волны принимаемого излучения почти в 5 раз больше исходной длины волны.

При красных смещениях, превышающих единицу, простые формулы (62), (63), связывающие красное смещение со скоростью удаления источника и расстоянием до него, уже неприменимы. Дело в том, что скорости космологического удаления далеких квазаров приближаются к скорости света, и кроме того, на гигантских расстояниях до них проявляются свойства кривизны пространства-времени, характеризующие общую геометрию Вселенной. Эти свойства изучаются космологией, основанной на общей теории относительности Эйнштейна. Некоторые из этих свойств (например, кривизна трехмерного физического пространства) известны пока не очень надежно; поэтому имеется некоторая неопределенность и в расчетах расстояний до квазаров. Самому большому значению красного смещения $z=3,78$ отвечает расстояние 12—16 млрд. световых лет. Принимаемый сейчас свет испущен этим квазаром 12—16 млрд. лет назад; в те времена ни Земли, ни Солнца еще не существовало — возраст Солнечной системы «всего» около 5 млрд. лет.

В спектрах многих квазаров наблюдаются не только светлые эмиссионные линии, но и темные линии, линии поглощения. Они тоже смещены в красную сторону, однако для них значение красного смещения как правило меньше, чем для эмиссионных линий. Часто наблюдают даже несколько семейств линий поглощения в спектре одного и того же квазара, сдвинутых на различные значения z — от красного смещения самих эмиссионных линий до значительно меньших z . Линии поглощения возникают тогда, когда на пути света от квазара встречаются холодные облака газа, состоящие из атомов и молекул в нижних энергетических состояниях. Эти атомы и моле-

кулы способны поглощать энергию из непрерывного спектра квазар, они «выедают» в непрерывном излучении те волны (или кванты), которые соответствуют определенным переходам в их возбужденные состояния.

Как показали исследования, проведенные Д. А. Варшавичем и его сотрудниками в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР, семейства линий поглощения, по-видимому, возникают при прохождении света квазара сквозь галактики, лежащие на луче зрения от наблюдателя к квазару. Так как в ряде случаев красное смещение в линиях поглощения достигало значений, превышающих 2 или даже 3, то из этого следует вывод, что галактики имеются и на таких расстояниях, где наблюдать их непосредственно по излучению уже невозможно.

Галактики и квазары

За последние два десятилетия накопилось множество свидетельств того, что квазары родственны галактикам и представляют собой обширные звездные системы с компактными центральными областями — ядрами, откуда исходит основная доля их излучения. Размеры ядер малы, их яркость намного выше яркости звезд, и потому квазары выглядят на астрономических фотографиях точечными источниками.

Пожалуй, первым из фактов, позволивших найти место квазаров в общей семье астрономических систем, был химический состав их излучающих областей: они испускают линии тех же химических элементов (и с той же относительной интенсивностью), что и Солнце или облака газа в диске нашей Галактики. «Нормальный» химический состав квазаров — на это сразу же обратил внимание И. С. Шкловский — прямо указывает на их родство с «обычными» звездными системами.

Очень важно, что параллельно с изучением квазаров продолжалось углубленное изучение галактик. Это позволило установить, что большая величина красного смещения — не исключительная привилегия квазаров. Красное смещение $z=0,46$ было обнаружено у галактики 3С 295, проявляющей себя также повышенным радиоизлучением и потому еще ранее занесенной в 3-й Кембриджский каталог. Это красное смещение даже больше, чем у двух первых квазаров 3С 273 и 3С 48. Наибольшее красное смещение, зарегистрированное (в 1983 г.) у галактик, $z=1,21$, принадлежит галактике 3С 324 из того же каталога. Ме-

тоды наблюдения галактик со столь большими красными смещениями, примененные к квазарам, позволили непосредственно обнаружить вокруг самых близких из них протяженные светящиеся образования, которые оказались звездными системами, подобными обычным галактикам. В 1982 г. удалось наблюдать звездную систему вокруг ядра квазара 3С 273.

Глубокое родство имеется и в проявлениях активности ядер галактик и квазаров. Значительное сходство выявляется между радиоизлучающими квазарами и радиогалактиками, т. е. галактиками с повышенным радиоизлучением.

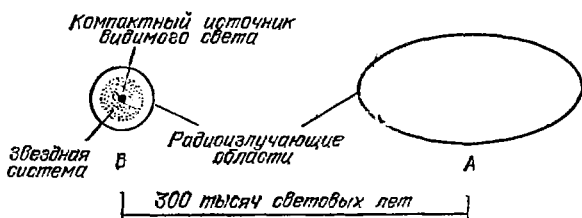


Рис. 32. Точечный источник видимого света, звездная система (открытая в 1982 г.) и протяженные области радиоизлучения в квазаре 3С 273.

Активные процессы в галактических ядрах стали предметом всестороннего изучения незадолго до открытия квазаров, с 1955 г., когда И. С. Шкловский дал объяснение явлению выброса из ядра галактики Дева А (см. ниже). В 1958 г. В. А. Амбарцумян выдвинул общую концепцию активности ядер галактик и привлек к этому явлению широкое внимание астрономов. Различные проявления активности ядер — переменность, истечения и выбросы вещества, радиоизлучающие компоненты — достигают в квазарах максимальных масштабов по энергетике и пространственным размерам. Резервуаром и генератором энергии для этих явлений служит ядро квазара, которое должно быть массивнее и гораздо компактнее, чем самые мощные ядра галактик.

Еще в год открытия квазаров, в 1963 г., удалось выяснить, что радиоисточник 3С 273 является двойным, у него имеются две излучающие области (рис. 32). Это установили австралийские радиоастрономы; в своих наблюдениях они использовали Луну в качестве естественного экра-

на, который заслоняет при своем движении источник радиоизлучения. Зная необходимые данные о движении Луны, можно с высокой степенью точности фиксировать положение источника на небе, выяснить его угловые размеры и даже внутреннюю структуру. Оказалось, что радиоизлучение ЗС 273 исчезает при покрытии Луной в два этапа: сначала поток резко уменьшается приблизительно вдвое, а еще через некоторое время и вовсе исчезает.

Падение интенсивности двумя ступеньками означает, очевидно, что Луна заслоняет сначала одну излучающую область, а затем и вторую. Более крупная из этих областей (компонента А) имеет вид сильно вытянутого эллипса, тогда как другая, несколько меньшая область (компонента В) более или менее сферична (вернее, выглядит на радиокarte почти правильным кружком). Центр компоненты В совпадает с положением оптического ядра квазара ЗС 273. Угловое расстояние между центрами обеих компонент составляет $20''$, что соответствует линейному расстоянию около 300 тысяч световых лет. Собственные размеры компонент приблизительно вдвое меньше расстояния между ними.

Развитие радиоастрономических наблюдений, особенно с использованием одновременно двух или нескольких радиотелескопов, находящихся далеко друг от друга, позволило в последние годы надежно подтвердить и уточнить двухкомпонентную структуру радиоисточника, связанного с квазаром ЗС 273. Исследования с помощью двух инструментов — 42-метрового радиотелескопа Национальной радиоастрономической обсерватории (США) и 22-метрового радиотелескопа Крымской астрофизической обсерватории — привели к выводу о том, что 20% излучения на волне 6 см от компоненты В исходит из области с угловым размером $0,0004''$ или меньше, т. е. с линейным размером, не превышающим полтора световых года.

Двойственность радиоизлучающих областей — распространенное свойство радиоисточников, связанных с квазарами. Часто радиоизлучающие области сильно вытянуты и представляются скорее струями, чем облаками. Такие образования принято сейчас называть джетами (по английски «джет» значит «выброс»). Компонента А квазара ЗС 273 — один из примеров джета. У сильных источников радиоизлучения, таких как этот квазар, наблюдается обычно по одному крупному, протяженному джету. У более слабых источников имеется, как правило, два

джета, вытянутые вдоль одной линии, а в середине между ними находится компактный источник радиоизлучения, совпадающий с оптическим изображением квазара.

В ряде случаев джеты излучают не только радиоволны, но и видимый свет. Один оптический джет известен в астрономии уже очень давно, с 1917 г. На фотографии массивной эллиптической галактики Дева А заметно яркое вытянутое образование, исходящее из ядра галактики и имеющее размер до 5 тысяч световых лет. Само ядро этой галактики имеет массу $(10^5-10^7)M_{\odot}$ и размер около 500 световых лет.

Очень похожий оптический джет найден в 1963 г. и на фотографии квазара ЗС 273, сделанной с помощью 5-метрового телескопа обсерватории Маунт Паломар. По размеру, форме и положению он подобен радиокомпоненте А. Это, собственно, тот же джет, но обнаруженный не в радиоизлучении, а в видимом свете.

Сходство джетов у ЗС 273 и у галактики Дева А — важное указание на общую природу явлений активности в квазарах и ядрах галактик.

Не менее важно и то, что многие массивные эллиптические галактики являются источниками интенсивного радиоизлучения. Такова, например, галактика Лебедь А. Ее радиоизлучение было обнаружено (случайно) еще в 1946 г. В диапазоне метровых волн она является самым ярким объектом неба. Только Солнце превосходит ее по величине привиняемого радиопотока, да и то всего в 2 раза. Радиосветимость Солнца $L_{\odot r} = 10^{10}$ Вт; зная расстояние до радиогалактики Лебедь А, $d \approx 1$ млрд. световых лет, и до Солнца, $d_{\odot} = 8$ световых минут, находят радиосветимость радиогалактики: $L_r \approx \frac{1}{2} L_{\odot r} (d/d_{\odot})^2 \approx 10^{38}$ Вт. По мощности излучения радиогалактика Лебедь А сравнима с квазарами ЗС 273 и ЗС 48, хотя и уступает самым мощным квазарам, светимость которых еще в 100—1000 раз больше.

В 50-е годы было установлено, что излучение радиогалактики Лебедь А исходит из двух областей, разделенных расстоянием около полумиллиона световых лет. Размеры областей — около 100 тысяч световых лет. Посредине между ними находится гигантская эллиптическая галактика с массивным ядром. Она тоже излучает радиоволны, хотя и слабее, чем обширные области вне ее. Одна из замечательных особенностей радиокартинки этого источника — очень яркие пятна небольших размеров на внешних краях обеих протяженных радиокомпонент (рис. 33).

Не все радиогалактики имеют столь высокую радиосветимость, как Лебедь А, но поток радиоизлучения от них превышает поток радиоизлучения обычных галактик ($\sim 10^{32}$ Вт) в сотни, тысячи или даже миллионы раз. Многие из них имеют по две излучающие области, как Лебедь А, обнаруживают выбросы и струи, подобные джету квазара 3С 273.

Самая близкая к нам гигантская радиогалактика лежит в направлении на южное созвездие Центавра. Расстояние до нее — 15 миллионов световых лет; мощность



Рис. 33. Схема строения радиогалактики Лебедь А.

радиоизлучения около 10^{35} Вт. У нее имеются две радиокомпоненты. Общая протяженность радиоизлучающих областей достигает 3 миллионов световых лет. Эллиптическая галактика (рис. 34) диаметром около 50 тысяч световых лет находится в середине между радиокомпонентами; с нею связан компактный яркий источник радиоизлучения, который тоже является двойным; его размер в 100 раз меньше общего размера всей системы, а ось малых радиокомпонент приблизительно совпадает с осью больших радиокомпонент. Малые радиокомпоненты похожи на джеты из ядер галактики Дева А и квазара 3С 273. Их ориентация указывает на связь и малых, и больших радиоизлучающих областей с ядром центральной эллиптической галактики.

Самая далекая радиогалактика, отождествленная с оптической галактикой, это уже упоминавшаяся галактика 3С 324. Расстояние до нее около 7,5 млрд. световых лет; мощность излучения в несколько раз больше радиомощности Лебеда А.

Значительное сходство с квазарами имеют и сейфертовские галактики, названные так в честь открывшего их в 40-е годы американского астронома К. Сейферта. Они принадлежат к классу спиральных галактик и состав-

ляют приблизительно одну сотую их общей численности; но в отличие от обычных галактик этого типа (таких, как наша Галактика), сейфертовские галактики обладают компактными яркими ядрами, из которых исходит излучение в сильно расширенных линиях водорода и гелия*), а также интенсивное излучение в непрерывном спектре.

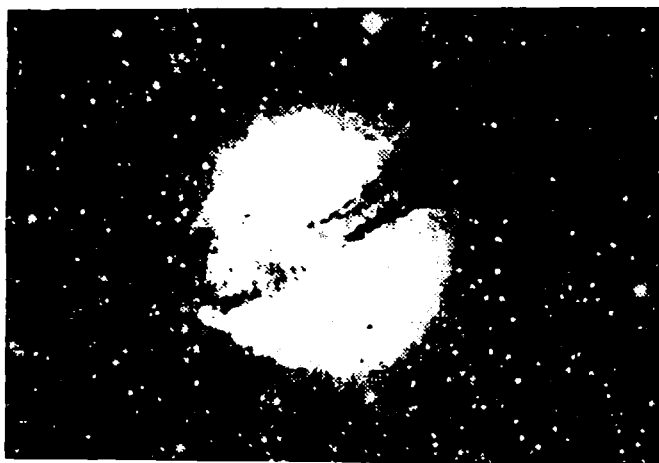


Рис. 34. Необычная эллиптическая галактика в центре радиогалактики Центавр А. Галактику пересекает темная полоса — это облака поглощающей свет газопылевой среды. Такие облака имеются обычно в дисках спиральных галактик. Высказывается предположение, что эта галактика представляет собою, возможно, результат столкновения двух галактик — эллиптической и спиральной.

Ядра являются иногда мощным источником радиоволн и рентгеновских лучей. Их излучение переменное, что, как и в случае квазаров, указывает на происходящие в ядрах этих галактик бурные процессы.

Родственны квазарам и так называемые лацертиды (от Лацерта — латинского названия созвездия Ящерицы, где был найден первый объект этого типа — галактика VL Ящерицы). Это сильные источники оптического, инфракрасного и радиоизлучения. Как и ядра квазаров, они

*) Немного дальше мы объясним, из-за чего происходит уширение линий.

выглядят на фотографиях точечными источниками, окруженными иногда слабо светящимися ореолами, которые в действительности являются звездными системами. Лацертиды обнаруживают также сильную переменность. До недавнего времени в их излучении не удавалось обнаружить четких спектральных линий; из-за этого оценка расстояний до них оставалась не очень определенной. Сейчас линии в нескольких случаях обнаружены, измерено их красное смещение и по его значению произведено определение расстояний. Они оказались сравнимыми с расстоянием до далеких квазаров.

Итак, прослеживается вполне очевидная непрерывность свойств от нормальных галактик — через радиогалактики, эллиптические галактики с активными ядрами, сейфертовские галактики и лацертиды — к квазарам. Выяснение этого факта было решающим шагом к пониманию природы квазаров.

Остается сказать о ядре нашей Галактики. Оно не принадлежит к числу активных. Центральную область Галактики невозможно наблюдать оптическими методами из-за поглощения света газопылевыми облаками, лежащими на луче зрения. Данные о ней получены из наблюдений в инфракрасном и радиодиапазонах электромагнитных волн, для которых облака прозрачны. В центре вращения Галактики находится довольно яркий радиоисточник Стрелец А; его радиосветимость, $\sim 10^{27}$ Вт, все же сильно уступает светимости квазаров и активных ядер. Наблюдения показали, что этот источник состоит из компактной (размером не более $2 \cdot 10^{12}$ м) компоненты и протяженной компоненты.

С компактным радиоисточником совпадает по положению область интенсивного инфракрасного излучения размером $3 \cdot 10^{15}$ м. Всего в пределах центрального парсека Галактики имеется около двух десятков инфракрасных источников. В этой области сосредоточено несколько миллионов звезд — их концентрации здесь существенно выше, чем в среднем по Галактике.

Недавно обнаружено, что из центральной области Галактики исходит гамма-излучение с энергией квантов около 511 эВ. Эта энергия равна энергии покоя электрона или позитрона, и потому такую гамма-линию в излучении центра Галактики связывают с процессом аннигиляции пар электронов и позитронов. Гамма-излучение центра Галактики переменено с характерным временем около полугода.

Процессы в центре Галактики привлекают сейчас большое внимание исследователей. Высказывается ряд интересных догадок о природе этих явлений; среди обсуждаемых возможностей — гипотеза двойной системы в компактном источнике Стрельца А, содержащей две черные дыры с массами до $300 M_{\odot}$; допускается (хотя, по видимому, и с меньшими основаниями) черная дыра массой до миллиона солнечных масс. По мнению И. С. Шкловского многое объясняется предположением о вспышке сверхновой в центральном парсеке Галактики. Ряд признаков указывает на то, что в компактном источнике Стрельца А находится, возможно, нейтронная звезда с прецессирующими струями в тесной двойной системе, похожая на двойную звезду SS 433. Если так, то все, что наблюдается в центре Галактики, представляет собой более или менее рядовое явление, способное возникать и не обязательно там, где находится центр звездной системы.

Излучающие области

Квazar, проявляющий все «типичные» свойства этих объектов, — такой, скажем, как первый из них, 3С 273 (см. рис. 32) — обладает компактным ядром, которое излучает в оптическом, инфракрасном, радио- и рентгеновском диапазонах волн. Ядро окружено звездной системой, похожей на сферическую составляющую нашей Галактики или на эллиптическую галактику. Ядро и звездная система погружены в протяженный радиоисточник, подобный компоненте В квазара 3С 273. На значительных расстояниях от ядра имеются джеты, протяженные радиоизлучающие компоненты, подобные компоненте А квазара 3С 273. Сейчас накоплен богатый наблюдательный материал, который позволяет составить довольно полное представление о физических условиях в радиоизлучающих компонентах, в центральной области, откуда исходят эмиссионные линии, даже в более глубоких недрах ядра, где рождается непрерывное оптическое, рентгеновское и гамма-излучение.

Протяженные радиокомпоненты. Их излучение имеет нетепловое происхождение. Бесспорный показатель — линейная поляризация радиоизлучения джетов и протяженных радиокомпонент; это в одинаковой степени свойственно и квазарам, и радиогалактикам.

Радиоволны рождаются здесь благодаря синхротронному механизму излучения. Хотя пространственные мас-

штабы радиоизлучающих компонент квазаров (и радиогалактик) совсем иные, локальные физические процессы по существу те же, что в Крабовидной туманности (вспомним гл. 3): электроны высоких энергий движутся в сравнительно слабых магнитных полях и излучают электромагнитные волны из-за неравномерности своего движения. Каждый электрон излучает независимо от других, общее излучение всей области складывается из волн, излучаемых отдельными электронами.

Вероятно, магнитное поле в протяженных компонентах квазаров сравнимо по величине индукции с магнитным полем Крабовидной туманности $B \approx 10^{-7}$ Тл. Мы можем поэтому заимствовать из гл. 3 некоторые полезные сведения. Например, энергия релятивистских электронов, создающих радиоизлучение, оценивается величиной $\epsilon \approx 10^{-10}$ Дж $\approx 10^9$ эВ. Мощность излучения одного такого электрона $w \approx 10^{-22}$ Вт. На основании этих данных легко найти полное число релятивистских электронов и их общую энергию в протяженных радиокомпонентах. Типичная радиосветимость компонент $L \approx 10^{39}$ Вт. Чтобы ее создать, требуется следующее число частиц:

$$N \approx L/w \approx 10^{63}. \quad (6.4)$$

Их общая энергия

$$E \approx \epsilon N \approx 10^{53} \text{ Дж}. \quad (6.5)$$

За счет этой энергии светимость может поддерживаться в течение времени

$$t_r = E/L \approx 10^{14} \text{ с} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ лет}. \quad (6.6)$$

Интересно сравнить это время с возрастом источника. Ориентировочную оценку возраста радиокомпонент можно получить из естественного допущения, что они были выброшены в свое время ядром квазара.

Действительно, примеры галактик Дева А, Лебедь А, квазара 3С 273 не оставляют сомнений в том, что джеты и радиоизлучающие области — результат активности ядра галактики или квазара. Имеются примеры, когда радиоизлучающие области связаны с ядрами «мостами», наблюдаемыми в радиоизлучении. Расстояние между компонентами А и В в квазаре 3С 273 составляет приблизительно 300 тысяч световых лет. Скорость удаления компоненты А от ядра квазара во всяком случае не может превышать скорости света. Следовательно, явление, породившее ра-

диоизлучающие области, произошло не позднее, чем по крайней мере 300 тысяч лет назад.

Действительный возраст радиокomпонент может быть больше этой минимальной оценки. Но если он не превышает миллиона лет, запас энергии, оцениваемый соотношением (6.5), достаточен, как видно из (6.6), для того, чтобы обеспечивать наблюдаемую радиосветимость в течение всего этого времени.

Вернемся к предположению о магнитном поле, которое принято в сделанных выше оценках. Вероятно, частицы высоких энергий и магнитные поля, в которых они движутся, имеют общее происхождение; и те и другие порождаются в каком-то едином процессе и потому соотношение между полной энергией частиц и энергией магнитного поля не может быть полностью произвольным. В тех случаях, когда это удавалось проверить, обе энергии оказывались близкими. Такое приближенное, по порядку величины, равенство энергии частиц и магнитного поля (равнораспределение энергии между частицами и полем) существует, например, в Крабовидной туманности.

Для типичных условий, подобных условиям в компоненте *B* квазара 3С 273, энергия магнитного поля близка по значению к полной энергии частиц, если магнитное поле соответствует принятому выше значению магнитной индукции.

Идея синхротронной природы излучения джетов впервые выдвинута в 1955 г. И. С. Шкловским. Изучая выброс из галактики Дева А, он сделал предположение, что яркое оптическое свечение выброса обусловлено не звездами или горячим газом, как это принималось до того, а излучением высокоэнергичных электронов в магнитном поле. Годом позже это предположение получило подтверждение в наблюдениях линейной поляризации в излучении выброса.

Слабое оптическое свечение, наблюдаемое из области компоненты *A* квазара 3С 273, как и радиоизлучение этого джета, тоже несомненно имеет синхротронную природу.

Эмиссионные линии. Судя по переменности излучения в эмиссионных линиях, области в ядре квазара, где они возникают, гораздо компактнее радиокomпонент. Характерный размер составляет, по-видимому, 10^{18} м. Присутствие в этой области излучающих атомов водорода означает, что температура газа близка к 10 тысячам градусов. (Физические условия здесь похожи на те, что и, например, в излучающих струях двойной звезды SS 433, — см. гл. 4.)

По наблюдаемому потоку излучения в эмиссионных линиях оценивают полную массу излучающего газа. Она оказывается равной $(10^5-10^6)M_{\odot}$.

Эмиссионные линии квазаров (а также и сейфертовских галактик) очень широкие. Это означает, что излучающие атомы имеют немалые собственные случайные скорости, добавочные к скорости удаления от нас источника как целого. Действительно, разброс скоростей на величину Δv в сторону больших и меньших значений вызывает — по эффекту Доплера — соответствующий разброс красных смещений вокруг среднего значения z : $\Delta z \approx \Delta v/c$.

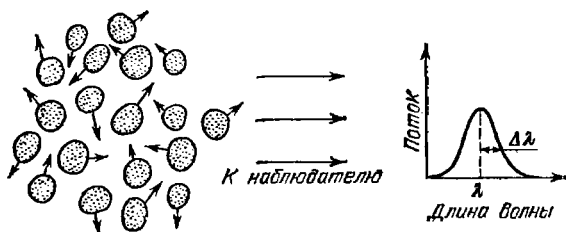


Рис. 35. Уширение эмиссионной линии из-за хаотических движений излучающих облаков.

Поэтому вся совокупность движущихся атомов излучает какую-то данную линию на разных длинах волн в пределах интервала красных смещений от $z-\Delta z$ до $z+\Delta z$ (рис. 35).

Типичная ширина линий в оптических спектрах квазаров соответствует разбросу красных смещений $\Delta z = 5 \cdot 10^{-3}$, что означает существование собственных движений атомов со скоростями $|\Delta v| \approx 5 \cdot 10^{-3} c = 1,5 \cdot 10^6$ м/с*).

Сравним эти скорости со скоростью теплового движения при температуре $T \sim 10^4$ К: $v_T \approx (kT/m_H)^{1/2} \sim 10^4$ м/с ($m_H = 2 \cdot 10^{-27}$ кг — масса атома водорода). Сопоставление величин Δv и v_T приводит к выводу, что расширение линий излучения в квазарах связано не с тепловым движением атомов, которое для этого слишком слабо, а, вероятно, с движениями целых объемов газа — «облаков», причем скорости облаков существенно превышают скорость теплового движения. Кинетическая энергия облаков при

* Точнее, это величина проекции характерной скорости случайных движений на луч зрения; но случайные движения происходят с практически одинаковыми скоростями по всем направлениям.

их массе $M_g = (10^5 - 10^6) M_\odot$

$$E_k = 1/2 M_g (\Delta v)^2 \sim 10^{47} - 10^{48} \text{ Дж.}$$

Чтобы движущиеся облака газа могли удерживаться в пределах объема с размером R (например, шара этого радиуса), сила тяготения должна быть достаточно велика. Облако не выйдет из объема, если его скорость меньше второй космической скорости, т. е. скорости отрыва от притягивающей массы M . Скорость отрыва есть $\sqrt{2GM/R}$ и, значит, для удержания облака тяготеющая масса (ср. соотношение (5.5), имеющее, очевидно, тот же смысл) должна удовлетворять условию:

$$2GM/R \gtrsim (\Delta v)^2. \quad (6.7)$$

Выбирая в качестве размера области значение $R = 10^{18}$ м, найдем из (6.7) ограничение снизу на массу ядра, способного удерживать движущиеся облака:

$$M \gtrsim \Delta v^2 R / G \approx 3 \cdot 10^{40} \text{ кг} \approx 10^{10} M_\odot. \quad (6.8)$$

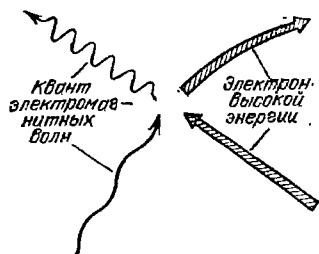
Это довольно значительная масса, существенно превышающая массы самых крупных галактических ядер. В действительности масса ядра квазара скорее всего меньше, чем $10^{10} M_\odot$; она не удовлетворяет неравенству (6.8). Это должно означать, что облака, из которых исходят эмиссионные линии квазара, не связаны гравитационно с его ядром и удаляются от него со скоростями в несколько сотен или даже тысяч километров в секунду.

Непрерывное излучение. Характерное время переменности для непрерывного оптического излучения квазаров меньше, чем для эмиссионных линий. Поэтому меньше и возможные размеры излучающей области: $\leq 10^{14} - 10^{15}$ м. Она находится глубоко в ядре квазара, под слоем излучающих линий облаков. Линейная поляризация излучения указывает на его нетепловую, синхротронную природу.

Если принять, что магнитное поле в этой области имеет индукцию $B \sim 10^{-4}$ Тл (что много больше, чем в протяженных радиокомпонентах), то по общей теории синхротронного излучения можно найти, что видимый свет должны излучать электроны с энергией $\epsilon \approx 10^{-9}$ Дж $\approx 10^{10}$ эВ. Мощность излучения каждого такого электрона $w \approx 10^{-13}$ Вт. Типичная наблюдаемая светимость ядер квазаров на частотах видимого света составляет $L \approx 10^{41}$ Вт. Значит, число электронов в области $N \approx L/w \approx 10^{53}$, и их

полная энергия $E \approx \epsilon N \approx 10^{45}$ Дж*). Это наименьшая из трех энергий, которые мы здесь оценили: она в сотни раз меньше кинетической энергии облаков и в 100 миллионов раз меньше энергии релятивистских электронов в радиоконпонентах. Продолжительность излучения за счет этого запаса энергии очень мала, $t = E/L \sim 10^4$ с ≈ 3 ч.

Рис. 36. Рассеяние фотона на электро-
роне высокой энергии. Исходная
энергия фотона много меньше энер-
гии электрона. Часть энергии элек-
трона передается фотону в процессе
их столкновения и взаимодействия.



Значит, в область, где возникает непрерывное оптическое излучение, должны постоянно доставляться все новые и новые высокоэнергичные частицы — иначе излучение прекратилось бы через несколько часов. Источником релятивистских электронов являются самые глубинные области ядра квазара.

При типичных размерах центральной области оптического синхротронного излучения и принятой величине магнитного поля полная энергия содержащихся в ней электронов близка к энергии магнитного поля — на этом основании и выбрано значение магнитной индукции.

Синхротронную природу со сравнимым темпом энерговыделения имеют также компактные источники инфракрасного и радиоизлучения в ядре квазара.

Что же касается рентгеновского и гамма-излучения ядер квазаров, то для его возникновения важен, вероятно, процесс рассеяния оптических фотонов на электронах больших энергий с обменом энергией между квантами и электронами (рис. 36). Электрон, обладающий высокой энергией, $\sim 10^{-9}$ Дж, при столкновении с фотоном видимого света, энергия которого $\hbar\omega$ на множество порядков меньше, может передать ему часть своей энергии, и тогда фотон, увеличив энергию, превратится из оптического в рентгеновский или гамма-фотон. (Этот процесс называется обратным эффектом Комптона.)

*) Эта оценка, как и оценка (6.5), является минимальной — она не учитывает возможного поглощения синхротронного излучения в самом источнике.

При полном излучении ядра квазара на всех длинах волн со светимостью $L \approx 10^{40} - 10^{41}$ Вт в течение, например, миллиона лет расходуется энергия $E \approx 10^{53} - 10^{54}$ Дж. Эта величина близка к энергии радиоизлучающих компонент, которая, согласно нашей оценке, тоже расходуется приблизительно за миллион лет. Таковы общие масштабы энергетики излучающих областей квазаров.

Рассматривая сначала самые крупные образования — протяженные радиокомпоненты, затем области излучения вблизи ядра квазара и в нем самом, мы продвинулись в глубь ядра квазара до расстояний $10^{14} - 10^{15}$ м от его центра. Что находится еще глубже, в сердцевине ядра, и что там происходит? Это главный вопрос физики квазаров. Ведь именно там, в недрах ядра, рождаются высокоэнергичные электроны и магнитные поля; отсюда выбрасываются облака газа, излучающие в линиях, бьют мощные струи — джеты.

Существующий сейчас подход к физике квазаров привлекает в качестве возможных «генераторов» его энергии очень плотную звездную систему, вращающуюся сверхмассивную звезду, огромную черную дыру. Они обязательно существуют одновременно, и их относительная роль различна, вероятно, в разных объектах и на разных стадиях их эволюции.

Сверхплотная звездная система

Самые концентрированные из известных непосредственно наблюдаемых звездных систем — ядра шаровых звездных скоплений. Звезды расположены в них настолько тесно, что их изображения на фотографиях сливаются в сплошное пятно. В сфере радиуса $\sim 10^{16}$ м в центре шарового скопления находятся 10^5 звезд с полной массой около $10^5 M_{\odot}$. Но по сравнению с ядром квазара размер этой области в 10–100 раз больше, а содержащаяся в ней масса в $10^2 - 10^3$ раз меньше.

Звездная система в ядре квазара должна быть гораздо компактнее любой наблюдаемой звездной системы. Отсюда происходят ее особые свойства, наиболее важное из которых — быстрая эволюция, ведущая к существенным изменениям строения системы за времена, много меньшие ее возраста.

Скорости и температура. Любая звездная система — это система многих частиц, которыми являются отдельные звезды. В ее поведении имеется немало общего с такими

системами многих частиц, изучаемыми в физике, как газ, плазма, электроны в твердом теле. В обычном газе столкновения частиц друг с другом приводят к случайным изменениям скорости каждой частицы. Хотя скорости отдельных частиц все время меняются, можно говорить о величине характерной или средней скорости частицы, под которой мы будем понимать корень квадратный из среднего квадрата скорости. Пусть, например, после первого столкновения частица имеет значение квадрата скорости v_1^2 , после второго — v_2^2 , после третьего — v_3^2 и т. д. Эти значения случайны и их заранее предсказать нельзя. Средний квадрат скорости равен сумме всех этих значений v_1^2, v_2^2, v_3^2 и т. д., разделенной на число столкновений.

Имеется и другая средняя величина квадрата скорости, которая получается, если сложить мгновенные значения квадратов скорости всех частиц системы в какой-то момент времени и разделить эту сумму на число частиц. Согласно одному из законов газов столкновения перестают изменять состояние газовой системы как целого, когда обе средние величины — средний квадрат скорости одной частицы, вычисленный за времена многих ее столкновений, и средний мгновенный квадрат скорости частиц системы — становятся равными друг другу. О таком состоянии газа говорят как о термодинамически равновесном состоянии.

Столкновения частиц газа обязательно приводят к этому состоянию; процесс приближения к нему называется релаксацией. Длительность релаксации определяется частотой столкновений частиц и обычно близка к нескольким временам свободного пробега частицы между двумя последовательными столкновениями.

В состоянии равновесия средний квадрат скорости частиц газа определяется температурой системы: $\overline{v^2} = 3kT/m$. (Здесь, как всегда, k — постоянная Больцмана, m — масса частицы.)

Динамику звездной системы, в которой имеется множество случайно движущихся частиц — звезд, тоже можно характеризовать квадратом скорости звезд. В стационарном гравитационно связанном состоянии системы характерная величина квадрата скорости определяется хорошо уже известным нам соотношением (см. гл. 5):

$$v_G^2 \approx GM/R, \quad (6.9)$$

где M — масса системы, R — ее характерный радиус; считаем, что звездная система имеет сферическую форму.

Если гравитационно связанная стационарная система содержит в звезды и газ, находящиеся в гидростатическом равновесии в общем гравитационном поле системы, то средний квадрат тепловой скорости частиц газа совпадает с характерной величиной квадрата скорости звезд: $\overline{v^2} = v_c^2$. Это связано с тем, что ускорение любого тела в поле тяготения не зависит от его массы и определяется только самим полем тяготения. Поэтому и скорости тел не зависят от их масс. Например, два спутника разных масс движутся по одной и той же орбите вокруг Земли с одной и той же скоростью, которая определяется лишь массой Земли и радиусом орбиты.

Из сравнения величин $\overline{v^2}$ и v_c^2 видно, что состояние гравитационно связанной стационарной системы можно характеризовать температурой:

$$kT = GmM/3R. \quad (6.10)$$

Это температура газа, но о величине (6.10) можно говорить и как о температуре звездной системы.

Теплоемкость. Температуру (6.10) можно выразить через энергию системы. Для этого воспользуемся одной из общих теорем механики — так называемой теоремой вириала. Из нее следует, что кинетическая энергия стационарной системы E_k связана с абсолютной величиной ее гравитационной потенциальной энергии U соотношением $E_k = 1/2|U|$, где $U \approx -GM^2/R$. Полная энергия системы

$$E = E_k + U = -E_k \approx -GM^2/2R. \quad (6.11)$$

Она равна кинетической энергии, взятой со знаком минус, или, что то же, половине потенциальной энергии. (Легко видеть, что соотношение (6.9) тоже вытекает из теоремы вириала.) Знак минус у полной энергии — признак связанности системы. Чтобы удалить все частицы системы на большие расстояния друг от друга, нужно внести в нее энергию извне.

Поскольку $GM/R \approx -U/M = -E/2M$, то температуру звездной системы можно выразить через ее полную энергию следующим образом:

$$kT = 2/3|E|(m/M) \propto |E|. \quad (6.12)$$

Отсюда видно, что увеличение энергии системы ведет не к увеличению, а к уменьшению ее температуры. Увеличение энергии уменьшает абсолютную величину отрицательной энергии E , а температура пропорциональна

менно абсолютной величине E . По той же причине уменьшение полной энергии, т. е. ее возрастание по абсолютной величине, ведет к повышению температуры.

В этом отношении гравитационные системы противоположны газам. Можно сказать, что они имеют отрицательную теплоемкость: сколько ни «черпай» энергию из гравитационной системы, она будет становиться от этого только горячее. Этим свойством обладают все гравитационные системы — и отдельная звезда, и целая звездная система.

Есть и еще одна замечательная особенность температурного поведения гравитационных систем. Пусть две звездные системы с разными температурами T_1 и T_2 приведены в соприкосновение друг с другом, так что звезды одной системы могут проникать в другую и между системами возникает обмен энергией. Обмен энергией, как и в газе, происходит путем «столкновений» звезд. Под «столкновением» двух звезд нужно понимать их гравитационное взаимодействие при близком прохождении друг от друга, хотя они и не соприкасаются непосредственно. Звезды более горячей системы, обладающие в среднем большей характерной скоростью и кинетической энергией, при столкновении со звездами более холодной системы будут чаще отдавать им свою энергию, чем получать от них. Значит, более горячая система будет терять энергию, а более холодная получать ее. Однако, теряя энергию, горячая система будет не охлаждаться, а наоборот, нагреваться; холодная же система, получая энергию, будет охлаждаться. Таким образом, различие температур этих систем не уменьшается со временем, а возрастает.

Как ни удивительны эти тепловые парадоксы, они не выходят за рамки законов физики, общих для всех физических систем.

Ядро и гало. Когда какая-то звезда получает в результате сближений с другими звездами кинетическую энергию, близкую к той, которая требуется для ухода из системы, ее орбита становится сильно вытянутой, а сама звезда может при движении по ней подходить к самому краю, к наружной границе системы. Звезд с такими орбитами немного и их тем меньше, чем более вытянута орбита. Это означает, что плотность звезд спадает к границам системы. Разреженная область на периферии звездной системы называется гало системы.

С другой стороны, те звезды, которые в результате сближений отдали энергию звездам гало, испытывая, так

сказать, отдачу, сосредоточиваются во внутренней, центральной области системы, образуя довольно плотное ее ядро. Таким образом, звездная система в ходе эволюции приобретает специфическую структуру, в которой можно различать три элемента: среднюю часть, более плотное ядро и разреженное гало.

Мы видим, что релаксация, приближение к равновесию, делает систему не более однородной (как это происходит в жидкостях и газах), а наоборот, создает в ней неоднородность, формирует ее внутреннюю структуру.

Звезды, составляющие гало и ядро, различаются не только размерами их орбит. Они составляют как бы две подсистемы и одна из них — ядро — вложена в другую — гало, причем звезды гало при своих движениях пересекают область ядра.

У этих подсистем различна средняя кинетическая энергия звезд: у гало она меньше, а у ядра больше. Хотя звезды гало получают, как мы говорили, кинетическую энергию от звезд ядра, их средняя кинетическая энергия от этого не возрастает, а наоборот, убывает, так как звезды гало выходят на более высокие орбиты, и потому размер составляемой ими подсистемы возрастает. Но кинетическая энергия системы и ее температура связаны с размером системы соотношением обратной пропорциональности:

$$E_k \propto T \propto 1/R.$$

Звезды ядра, отдающие энергию звездам гало, оседают к центру системы, и так как при этом размер ядра убывает, средняя кинетическая энергия звезд и температура этой подсистемы возрастают. Можно сказать, что звездная система содержит в себе разреженное холодное гало и плотное горячее ядро.

Обмен энергией между ядром и гало звездной системы усиливает различие их плотностей и температур. Даже слабое начальное различие ядра и гало неизбежно возрастает и усиливается с течением времени. Механизм такой неустойчивости — парные сближения звезд, при которых «горячие» звезды ядра отдают (чаще, чем получают) кинетическую энергию «холодным» звездам гало. Это пример контакта двух звездных систем или подсистем, сопровождающийся явлением, о котором мы уже упоминали: при таком контакте холодная система становится холоднее, а горячая горячее. Их плотности тоже стремятся при этом к еще большему различию.

Контактные столкновения. В ходе релаксации эволюция системы убыстряется. Ее сжатие, особенно в более плотной центральной области, происходит все быстрее, и наконец звезды оказываются в столь малом объеме, что начинают испытывать прямые контактные столкновения друг с другом. Если прежде звезды взаимодействовали друг с другом только гравитационно, то теперь они взаимодействуют контактно, ударяясь друг о друга.

Принципиальные черты этого особого этапа эволюции сверхплотной звездной системы изучены в работах, выполненных Л. Э. Гуревичем в нашей стране и Л. Спитцером в США.

При таких столкновениях звезды приходят в непосредственный контакт друг с другом, и ясно, что при этом произойдут разнообразные явления, способные сильно изменить внутреннее строение звезд: они могут деформироваться, потерять часть вещества внешних своих слоев, разбиться на части, а может быть, наоборот, слипнуться. При таких явлениях определенная доля кинетической энергии относительного движения сталкивающихся звезд переходит в кинетическую энергию сбрасываемого вещества; значительная ее доля тратится и на нагрев материала звезд, когда они в результате столкновения слипаются.

Эти потери энергии — отличительная черта контактных столкновений. Всякий отвод энергии движения звезд в гравитирующей системе приводит к ее сжатию, а это в свою очередь вызывает увеличение скоростей звезд и их кинетической энергии. Но чем плотнее система и чем больше скорости звезд, тем чаще их столкновения. Значит, «включение» контактных столкновений убыстряет сжатие системы, а тем самым делает частоту столкновений еще большей, так что этот процесс сам себя ускоряет.

Стадия квазара. Теория сверхплотных звездных систем служит основой для исследования эволюционных процессов, способных привести центральную область галактики, ее ядро, к состоянию бурной активности. Первым этапом этой эволюции может служить постепенное сжатие звездной системы.

В сложных системах, содержащих массивные и компактные звездные скопления, главным механизмом эволюции могут служить не сближения звезд друг с другом, а сближения звезд со скоплениями и самих скоплений между собой. Гравитационное взаимодействие при таких сближениях, очевидно, гораздо эффективнее, чем при сближении одиночных звезд. Поэтому сложная система

способна довольно быстро эволюционировать на стадии гравитационных взаимодействий и перейти затем к следующему этапу эволюции, к стадии контактных столкновений, на которой распределение звездных скоплений становится настолько плотным, что происходит, вероятно, перемешивание всех их звезд и образуется единая сверхплотная звездная система с массой и размерами, характерными для ядер квазаров и активных галактик.

Если ядра квазаров и активных галактик действительно содержат в себе сверхплотные звездные системы, то эти системы несомненно находятся на стадии контактных столкновений звезд.

Частые контактные столкновения звезд ведут к двум новым явлениям — накоплению в звездной системе газа, потерянного звездами при их соударениях, и к возникновению в ней молодых массивных звезд, которые образуются из этого газа. Звезды с массами в $(10-30)M_{\odot}$ ярко светят и исчерпывают запасы своего ядерного топлива за несколько миллионов или десятков миллионов лет. Вероятный итог их жизненного пути — отделение оболочки, а затем вспышка сверхновой, при которой большая часть их вещества рассеивается, а плотный остаток превращается в нейтронную звезду.

Еще до открытия квазаров, в 1960 г., И. С. Шкловский указал на важную роль вспышек сверхновых в явлениях активности галактических ядер. Так как полное энерговыделение при каждой вспышке сверхновой составляет $10^{44}-10^{45}$ Дж, то для объяснения энергетики мощных радиогалактик и квазаров требуется, чтобы ежегодно в их ядрах взрывалось по 100—1000 сверхновых. Это вполне могло бы обеспечить среднюю светимость на характерном для квазаров уровне $10^{39}-10^{40}$ Вт. Особенно важно, что результатом вспышек сверхновых (как следует из непосредственных наблюдений, например, Крабовидной туманности) является возникновение большого числа релятивистских частиц, создающих нетепловое, синхротронное излучение. Генерация энергии в нетепловых формах, т. е. в форме релятивистских частиц и магнитных полей, служит принципиальной чертой активности ядер галактик и квазаров.

Вспышки сверхновых способны объяснить также и факт сильной нерегулярной переменности, наблюдаемой у многих квазаров.

Накопление в ядре галактики или квазара большого числа нейтронных звезд, остатков сверхновых служит до-

полнительным источником энергии в нетепловых формах. Нейтронные звезды, обладающие сильными магнитными полями, являются мощными генераторами релятивистских электронов. Хотя конкретные физические механизмы рождения и ускорения частиц еще и не вполне ясны, наблюдения радиопульсаров с несомненностью указывают на это их свойство.

Сверхмассивная звезда

Из газа, освобождаемого звездами при их столкновениях или при вспышках сверхновых, могут возникать не только обычные массивные звезды, знакомые по наблюдениям, но и гипотетические звезды очень больших масс — до $(10^8-10^9)M_{\odot}$. Главная особенность сверхмассивных звезд — преобладание в них лучистого давления, т. е. давления излучения, над газовым давлением.

Светимость. Равновесие сил давления излучения и тяготения определяет светимость сверхмассивной звезды. Сила давления излучения, действующая на газ, создается по существу потоком квантов из внутренней горячей области звезды наружу. Поток излучения увлекает за собой электроны, а электроны «тянут» и ядра, связанные с ними кулоновским электрическим взаимодействием.

Тот факт, что поток электромагнитных волн способен создавать силу давления, действующую на вещество, впервые установлен экспериментально в 1901—1909 гг. классиком отечественной физики П. Н. Лебедевым. Тем самым был надежно подтвержден один из принципиальных выводов теории электромагнетизма, сформулированной к концу XIX века Дж. К. Максвеллом и Г. Герцем. Светимость, соответствующая равенству сил тяготения и давления излучения, равна:

$$L_E = \frac{4\pi G m_p c}{\sigma_T} M = 1,25 \cdot 10^{31} \frac{M}{M_{\odot}} \text{ (Вт)}. \quad (6.13)$$

Замечательно, что в выражение (6.13) не входит радиус R , и светимость L_E зависит только от массы звезды. Это соотношение получено А. Эддингтоном; величина L_E называется эддингтоновской светимостью. При массе в миллиард масс Солнца сверхмассивная звезда обладает гигантской светимостью, в сотни раз превышающей типичную светимость галактик.

Магнитная сверхзвезда. Очевидно, что самой по себе высокой светимости еще недостаточно, чтобы сверхмассив-

ная звезда создавала явление квазара. Ее излучение — это тепловое равновесное излучение, а требуется, чтобы в ядре квазара существовал источник энергии в нетепловых формах. Сверхмассивная звезда может служить таким источником, если она вращается и обладает сильным магнитным полем. Теория «магнитной сверхзвезды» разработана в Физическом институте им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР.

Такая звезда представляет собою как бы гигантский пульсар. Ее вращение создает электрические поля и обеспечивает магнитно-дипольное излучение электромагнитных волн, которые ускоряют электроны до релятивистских энергий. На основании общих формул для магнитно-дипольного излучения (см. гл. 3) можно рассчитать, что звезда с массой в миллиард солнечных масс, радиусом $r_* = 10^{15}$ м, магнитным полем с индукцией $B = 10$ Тл и периодом вращения один год имеет мощность 10^{41} Вт, характерную для сильных нетепловых источников в ядрах квазаров.

Не исключено, что вращающаяся магнитная сверхзвезда способна выбрасывать струи или сгустки плазмы и релятивистских электронов вдоль оси своего магнитного поля. Это объяснило бы происхождение джетов и протяженных радиоизлучающих компонент.

После миллиона лет жизни сверхмассивная звезда катастрофически сжимается. Если ее масса составляет миллиард масс Солнца, это сжатие неудержимо и звезда превращается в результате в черную дыру. Судьба звезд с меньшими массами — до $(10^5 - 10^6) M_\odot$ — иная. Как показали расчеты Г. С. Бисноватого-Когана и его коллег в Институте космических исследований Академии наук СССР, сжатие таких звезд после миллиона лет существования завершается термоядерным взрывом, при котором выделяется энергия

$$E_N \approx 10^{45} M/M_\odot (\text{Дж}).$$

Если звезды с массами $\sim 10^5 M_\odot$ взрываются в среднем раз в 30 лет, это может обеспечить среднюю светимость ядра квазара на высоком уровне $\sim 10^{41}$ Вт. Предполагается, что, как и при вспышках сверхновых, в таких взрывах возникают потоки релятивистских частиц, способных создавать нетепловое синхротронное излучение.

Сверхмассивная черная дыра

Слова «квазар» и «черная дыра» появились в языке почти одновременно, около 20 лет назад. Сейчас они все чаще встречаются рядом в книгах и научных статьях. Почти наверняка можно предсказать, что в последовательной и полной теории квазаров черные дыры будут играть ключевую роль. Идею о черных дырах в квазарах первым высказал Я. Б. Зельдович в 1964 г.

Формирование черной дыры в центре сверхплотной звездной системы может идти различными путями. Один из них — коллапс сверхмассивной звезды. Возможно, что из газа, накапливающегося в звездной системе на стадии контактных столкновений образуются не звезды, а массивное и плотное газовое облако в центре, которое постепенно охлаждается и претерпевает общее гравитационное сжатие до состояния черной дыры, минуя промежуточные квазистационарные состояния, подобные состоянию равновесия вещества в сверхмассивной звезде. Сжатие центральной области сверхплотной звездной системы также способно привести непосредственно к образованию черной дыры.

Гравитационный радиус. Черная дыра возникает тогда, когда в ходе коллапса радиус тела массой M окажется меньшим величины $r_g = 2GM/c^2$, называемой гравитационным радиусом.

Сила тяготения вблизи гравитационного радиуса столь велика, что даже свет не может ее преодолеть: луч света, испущенный с поверхности тела, радиус которого меньше его гравитационного радиуса, не выходит наружу. Об эффекте пленения света сильным гравитационным полем писал еще в конце XVIII века П. Лаплас. Опираясь на ньютонову теорию тяготения, он утверждал, что тяготение звезды с плотностью как у Земли и диаметром, превышающим диаметр Солнца в 250 раз, не выпускает свет этой звезды. Легко видеть, что скорость, которой должно обладать тело, чтобы оторваться от такой звезды, вторая космическая скорость $\sqrt{2GM/r}$, сравнивается со скоростью света. Скорость отрыва равна скорости света при радиусе, равном гравитационному радиусу.

Нейтронные звезды, самые плотные из реально наблюдаемых небесных тел, не очень далеки от состояния черной дыры. При массе $1,5 M_\odot$ гравитационный радиус $r_g = 4,67$ км; это всего вдвое меньше типичного радиуса нейтронной звезды ~ 10 км.

Черные дыры еще не открыты в природе, они остаются пока гипотетическими объектами, но в их существовании вряд ли можно сомневаться. Наблюдательные поиски черных дыр составляют одну из самых увлекательных задач астрономии. Сейчас имеется целый ряд звезд, которые считаются вероятными кандидатами в черные дыры. Об этом мы уже упоминали в гл. 1.

Что же касается квазаров, то непосредственные наблюдения не позволяют «увидеть» там ни сверхплотной системы звезд, ни единой сверхмассивной дыры, ни тем более черной дыры. И все же без черных дыр в квазарах, кажется, не обойтись.

Черная дыра в ядре квазара должна содержать очень значительную массу — до миллиарда масс Солнца. При $M=10^9 M_{\odot}$ гравитационный радиус $r_g=3 \cdot 10^{12}$ м. Это всего лишь в 10 раз больше верхнего предела для размера центральной области квазара 3С 273 (см. выше). Средняя плотность шара такой массы при радиусе, равном гравитационному, довольно мала, в 50 раз меньше плотности Солнца. Ясно, что при таких условиях в состоянии самого вещества нет ничего необыкновенного; но создаваемое этим телом внешнее поле тяготения сильнее любого силового поля в природе. С сильным полем тяготения черной дыры и связана, как можно полагать, мощная энергетика квазаров.

Аккреция. Черная дыра сама по себе ничего не излучает; наоборот, она захватывает свет и частицы извне. Но в ее сильном гравитационном поле частицы разгоняются до больших скоростей — они падают на черную дыру, приближаясь к критической поверхности радиуса r_g со скоростью, стремящейся к скорости света. Частицы, аккрецируемые черной дырой, обладают большой кинетической энергией. Весь вопрос в том, как извлечь ее из окрестности черной дыры.

Я. Б. Зельдович предложил рассмотреть картину несимметричной аккреции, когда частицы падают на черную дыру не строго радиально, а пролетают от ее центра на расстоянии, равном, например, $3r_g$. Пучки или струйки частиц, падающие так с разных сторон, ускоряются в поле тяготения и могут сталкиваться друг с другом. Часть большой кинетической энергии их относительного движения переходит при столкновениях в тепло. Газ из-за этого нагревается и излучает электромагнитные волны, которые могут покинуть окрестности черной дыры. Согласно расчетам выделяемая таким путем энергия достигает одной

десятой энергии покоя сталкивающихся частиц. Напомним для сравнения, что при термоядерных реакциях выделяется не более одной сотой энергии покоя вещества.

Этот процесс доказывает принципиальную возможность извлечения значительной энергии из сильного поля тяготения черной дыры. Аккрецирующая черная дыра может, как мы видим, служить эффективным источником энерговыделения.

Процесс аккреции в большой эллиптической галактике с черной дырой в центре мог бы питаться газом, который сбрасывается звездами галактики на поздних стадиях их эволюции (путем отделения оболочек красных гигантов и т. п.). Этому газу ничего не остается, как падать к центру галактики, где он и захватывается черной дырой. Такую возможность указал в конце 60-х годов И. С. Шкловский. Недавно появились прямые наблюдательные указания на наличие значительных масс газа в некоторых эллиптических галактиках.

Если принять, основываясь на наблюдениях и теории звездной эволюции, что звезды теряют в среднем 10^{19} кг в год в расчете на одну массу Солнца, то от всех звезд крупной эллиптической галактики с массой $10^{12} M_{\odot}$ можно ожидать выделения 10^{31} кг газа в год. «Коэффициент полезного действия» черной дыры κ можно определить как долю энергии покоя газа, которая преобразуется в выходящее наружу излучение. Тогда средняя светимость черной дыры

$$L = \kappa Jc^2 \approx 3\kappa \cdot 10^{40} \text{ (Вт)}, \quad (6.14)$$

где J — аккреционный поток, т. е. масса газа, падающая к черной дыре в единицу времени. Принятый выше темп выделения газа в крупной эллиптической галактике соответствует $J = 3 \cdot 10^{23}$ кг/с.

Энерговыделение ядра на уровне $L = 10^{39}$ Вт, характерное для активных ядер эллиптических галактик, обеспечивается, как видно из соотношения (6.14), при коэффициенте полезного действия $\kappa \gtrsim 0,03$, что согласуется с расчетами, о которых говорилось выше.

Большое энерговыделение может быть связано с аккрецией газа из сверхплотной звездной системы в ядре квазара, когда эта система переходит к стадии контактных столкновений звезд. Как показал Л. Спитцер, в каждом акте контактных столкновений может выделяться в виде

газа около 5% массы сталкивающихся звезд, если каждая из них имеет массу Солнца. Например, в звездной системе с массой $10^9 M_{\odot}$ и радиусом 10^{15} м каждая звезда испытывает одно контактное столкновение в среднем через время τ_c , т. е. каждые десять тысяч лет. Это означает, что во всей системе столкновения случаются в среднем каждые 5 минут ($\tau_c/N \approx 300$ с). Отсюда следует оценка аккреционного потока на черную дыру в центре звездной системы:

$$J = 0,05 \cdot 2M_{\odot}N/\tau_c \approx 10^{26} \text{ кг/с.}$$

Такой поток способен обеспечить светимость на высоком уровне 10^{41} Вт, характерном для самых мощных квазаров, при коэффициенте полезного действия черной дыры $\kappa \geq 0,01$.

Аккреционный диск. Поток газа, падающего на черную дыру, может обладать моментом количества движения (вращательным моментом). Это наверняка так, когда сверхплотная звездная система в ядре квазара вращается, хотя бы и не слишком быстро. Приближаясь к черной дыре, газ убыстряет свое вращение вокруг оси вращения звездной системы. В соответствии с законом сохранения момента количества движения, скорость вращения возрастает обратно пропорционально расстоянию до оси вращения. Если представить себе процесс аккреции как оседание к черной дыре вращающегося облака газа, станет ясно, что облако сжимается вдоль оси вращения быстрее, чем поперек оси, ибо сжатие в поперечном направлении мешают возрастающие центробежные силы. В результате вокруг черной дыры образуется сильно сплюснутое вращающееся облако, которое называют аккреционным диском *).

Диск вокруг сверхмассивной черной дыры похож на кольца Сатурна. Но кольца Сатурна образованы твердыми телами, а диск вокруг черной дыры является газовым. Столкновения между частицами газа приводят к тому, что они движутся не по круговым орбитам, а по скручивающимся спиральям, и постепенно приближаются к критической поверхности черной дыры. Столкновения частиц нагревают диск и часть его тепловой энергии излучается в виде электромагнитных волн.

*) Теорию аккреционных дисков разработали советские астрофизики В. Г. Горбачкий, Н. И. Шакура и Р. А. Сюняев и английские теоретики Д. Линден-Белл, М. Рис и Дж. Прингл.

Излучение нагретого диска — это тепловое излучение. А как получить от черной дыры энергию в нетепловых формах? Вероятно, и в этом случае, как и в случае сверхмассивной звезды, нужно исходить из предположения о магнитных полях и аналогий с пульсарами. Если аккреционный диск пронизан магнитными полями, поперечными его плоскости, как это предполагает Р. В. Э. Лавлейс из Корнельского университета (США), то вращение диска способно генерировать сильные электрические поля. Электрические поля ускоряют заряженные частицы до релятивистских энергий; двигаясь в магнитных полях, эти частицы должны рождают энергичные кванты, которые в свою очередь рожают пары электронов и позитронов, т. е. развивается каскадный процесс того же типа, что и в радиопулсарах.

Генерация релятивистских частиц происходит в области, размер которой сравним с гравитационным радиусом. Это означает, что характерное время возможных изменений потока энергии ограничено снизу величиной

$$r_g/c = 2GM/c^3 \approx 10^{-5} M/M_\odot (c).$$

При массе $M=10^9 M_\odot$ от квазара можно ожидать переменности с характерным временем $\geq 10^4$ с, т. е. около трех часов и более. Рекордно быстрая переменность с характерным временем ~ 200 с, о которой мы говорили, соответствует массе черной дыры не более $2 \cdot 10^7 M_\odot$.

Теория аккреции и аккреционных дисков вокруг черных дыр позволит, можно надеяться, объяснить происхождение выбросов — джетов и протяженных радиокомпонент из ядер активных галактик и квазаров. То обстоятельство, что в ряде наблюдаемых случаев выбросы происходят в одном и том же направлении на протяжении нескольких миллионов лет, означает наличие выделенного направления в ядре источника, которое остается фиксированным в течение всего этого времени. Такое направление может быть связано с осью вращающегося аккреционного диска. Поиски физического механизма, способного обеспечить выброс сгустков плазмы вместе с релятивистскими частицами или узких струй релятивистских частиц вдоль этой оси, — одна из самых трудных задач физики квазаров и активных ядер галактик.

Замечательное сходство релятивистских струй, выбрасываемых двойной звездой SS 433 и джетов в квазарах и радиогалактиках; общий процесс синхротронного излучения, действующий как в радиопулсарах, так и в ква-

зарах; целый ряд иных общих признаков и свойств этих объектов,— все это означает, вероятно, что в природе существуют определенные физические процессы, развивающиеся с одинаковой эффективностью в объектах, размеры которых различаются в 10^{10} и более раз. Исследования пульсаров и квазаров, нейтронных звезд и массивных черных дыр превращаются сейчас в единую область изучения физических процессов, связанных с высокими энергиями частиц и сильными полями тяготения. Главные ее результаты еще впереди.