

дукция максимальна в области спиральных ветвей. В среднем, плотность энергии магнитного поля близка к плотности энергии хаотических движений газа (порядка 10^{-12} эрг/см³). Конфигурация линий магнитной индукции бывает как упорядоченной, так и хаотичной, запутанной, особенно в областях происходящего звездообразования (это определяется характером движения газа).

Если не учитывать излучения активного ядра, то мощность нетеплового радиоизлучения галактики пропорциональна количеству молодых звезд, то есть темпу звездообразования. Это объясняется тем, что основные источники релятивистских электронов, рождающих синхротронное излучение (сверхновые звезды, массивные звезды с аккрецирующими компонентами в тесных парах), связаны с массивными короткоживущими звездами.

11.7. Звездообразование в галактиках

11.7.1. Общие сведения

Формирование галактических дисков еще не завершилось, и процесс рождения звезд из межзвездного газа продолжается. Звездообразование — это наиболее масштабный процесс в галактиках. Именно он формирует контрастные спиральные ветви, подпитывает энергией все компоненты межзвездной среды, определяет цвет и спектр галактики.

Структура галактики, ее светимость, химический состав звезд и газа — все это результат определенной «истории» звездообразования — от начала формирования галактики до наших дней.

Как и в нашей Галактике, в других звездных системах прямым свидетельством происходящего звездообразования является присутствие массивных короткоживущих звезд и связанных с ними объектов: молодых звездных систем (скоплений, ассоциаций), областей III, сверхновых типа Ib/c и II. Непосредственные наблюдения отдельных молодых звезд и их группировок возможны лишь для ближайших галактик. Однако в большинстве случаев о происходящем звездообразовании приходится судить по косвенным признакам. К таковым, прежде всего, относятся :

— высокая светимость галактики в эмиссионных линиях областей ионизованного водорода; наиболее часто в качестве индикатора звездообразования используется интенсивность линии H α ;

— повышенная мощность излучения галактики в ультрафиолетовой и голубой областях спектра, непосредственно связанная с присутствием молодых горячих звезд;

— повышенная мощность излучения в ИК диапазоне на длинах волн около 8 мкм, где излучают многоатомные молекулы полиароматических углеводородов, и в далеком ИК диапазоне (FIR), где максимум в спектрах галактик приходится на 60–200 мкм; это излучение приходит от межзвездных пылинок, нагретых до температуры 20–30 К. Основным источником энергии, нагревающей пыль и молекулярный газ, является голубое и ультрафиолетовое излучение молодых горячих звезд. Вдали от областей звездообразования слабый нагрев пыли происходит за счет старых звезд диска; максимум излучения этой холодной пыли приходится на более длинные волны, соответствующие более низкой температуре;

— повышенная мощность теплового и синхротронного излучения в радиоконтинууме; оба компонента радиоизлучения связаны с активностью массивных звезд, нагревающих газ и поставляющих релятивистские электроны в межзвездную среду;

— повышенная мощность рентгеновского излучения диска, связанная с горячим газом.

Между потоком в линии H_{α} , потоком в далеком ИК диапазоне, а также тепловым и нетепловым радиоизлучением существуют тесные корреляции, подтверждающие, что ионизация газа, нагрев пыли и образование релятивистских электронов имеют один источник: активность массивных звезд. К сожалению, исходя из многочисленных, но косвенных признаков существования массивных звезд, невозможно получить непосредственно количественную оценку темпа звездообразования (для краткости обозначим его SFR), под которым понимают суммарную массу возникающих звезд в расчете на один год. Для количественной оценки SFR необходимо иметь определенную модель «перекачки» энергии молодых звезд в излучение в той или иной области спектра.

Темп звездообразования $SFR \equiv dM_*/dt$ определяет полную массу рождающихся звезд в единицу времени. Его можно рассчитать как для звезд всех масс, так и только для массивных звезд, с которыми связаны наблюдаемые индикаторы звездообразования. Например, SFR, определенный по эмиссионным линиям, относится преимущественно к O-звездам, по FIR-излучению — к звездам в более широком интервале масс (звезды классов O–B–A). Что касается

звезд с массой меньше солнечной ($M < M_{\odot}$), то они настолько слабо проявляют себя при рождении, что включить их в оценку SFR можно лишь путем экстраполяции распределения относительного числа звезд по массе, то есть оценивая или принимая определенный вид функции распределения масс молодых звезд, называемой начальной функцией масс (НФМ). В широком интервале звездных масс НФМ хорошо описывается степенным законом $dN \sim M^{-\alpha} dM$, где $\alpha \simeq 2.3 \div 2.5$.

Таким образом, для оценки SFR приходится исходить из некоторой модели звездного населения. Исходными данными при построении модели являются спектры и светимости звезд в зависимости от их возраста, массы и химического состава, а также форма НФМ. Большую проблему при этом представляет учет поглощения излучения, которое особенно значительно в УФ области спектра. В этом отношении наиболее надежным представляется оценка SFR по моделированию всего спектра галактики — от УФ до FIR, или по оценкам светимости галактики в двух интервалах спектра: в УФ диапазоне и FIR, поскольку вся поглощенная энергия УФ лучей «высвечивается» в далеком ИК диапазоне.

Оценки показателей цвета галактик также могут быть использованы для измерения SFR. Однако, поскольку цвет звездного населения зависит не только от количества молодых звезд, но и от звезд более старых, здесь требуется использование метода эволюционного моделирования. Метод заключается в моделировании спектра галактики, который рассматривается как сумма спектров звезд различного возраста и массы со статистическим весом, равным относительному вкладу этих звезд в интенсивность излучения звездной системы на выбранной длине волны.

Имеющиеся оценки показывают, что типичные значения SFR в галактиках составляют $1 \div 10 M_{\odot}/\text{год}$ для спиральных галактик и $\ll 1 M_{\odot}/\text{год}$ для галактик E–S0 (за очень редкими исключениями). Сравнение оценок SFR, выполненных различными методами и различными авторами, показывает, что они могут отличаться в 2–3 раза, как правило, вследствие принятия в модельных расчетах различных НФМ, различных эволюционных треков звезд и использования различных способов оценки поглощения излучения. Следует также иметь в виду, что величина SFR зависит от принятого расстояния до галактики, поскольку базируется на измерении ее светимости в том или ином спектральном интервале. Но даже если бы оценки, выпол-

ненные различными методами, были абсолютно точны, они все равно не совпали бы при использовании различных индикаторов звездообразования. Так, интенсивность эмиссионных линий и теплового радиоизлучения определяется количеством наиболее массивных звезд и дает «текущий» темп звездообразования за средний интервал времени в несколько миллионов лет, УФ излучение зависит от присутствия звезд с возрастом в несколько десятков миллионов лет, а далекое ИК излучение, которое также отражает SFR в наблюдаемую эпоху, обусловлено не только самыми массивными звездами, но и звездами умеренных масс, поэтому оценки L_{FIR} характеризуют темп звездообразования за последние $\approx 10^8$ лет. Что касается «голубых» показателей цвета ($B-V$, $U-B$), то здесь время усреднения $\sim 10^9$ лет. Поэтому, сравнивая различные методы оценок dM_*/dt , можно получить информацию об истории звездообразования.

11.7.2. Физические процессы, управляющие звездообразованием

Звездообразование носит характер локальных вспышек, достаточно коротких по времени (продолжительностью от нескольких миллионов до нескольких десятков миллионов лет). Максимальный размер областей звездообразования составляет несколько сотен парсек. Системы такого масштаба носят название молодых звездных комплексов (Ю. Н. Ефремов) и присутствуют в галактиках всех типов, в которых происходит образование звезд. Выделяются комплексы главным образом по концентрации OB-звезд и межзвездного газа, и в одной галактике их может быть несколько десятков.

Звездные комплексы очень неоднородны по плотности, и внутри них выделяются более мелкие скопления молодых звезд и ассоциации. Как показывают наблюдения ближайших галактик, внутри комплексов, по-видимому, могут образовываться не только звездные группировки, но и одиночные звезды, не входящие ни в какие скопления.

Звездные комплексы, целиком охваченные звездообразованием, встречаются очень редко. Их принято называть **сверхассоциациями**. Примеры сверхассоциаций: комплекс 30 Doradus в Большом Магеллановом Облаке, где находится область III гигантских размеров, которая даже получила собственное имя («Гарантул»), и ярчайшая часть спиральной ветви Туманности Андромеды, вошедшая в каталог NGC как отдельный объект (NGC 206). Если можно было

бы перенести отдельно взятую ассоциацию в межгалактическое пространство, то этот объект был бы классифицирован как карликовая неправильная галактика со вспышкой звездообразования.

Заметим, что звездообразование в сверхассоциациях происходит все-таки не вполне одновременно: обычно группировки молодых звезд внутри них имеют разброс возрастов порядка миллиона лет.

Со звездными комплексами ассоциируются гигантские газовые комплексы, располагающиеся (в спиральных галактиках) преимущественно в спиральных ветвях. Масса газа в них порядка $10^7 M_{\odot}$, что превышает массу тех звезд, которые они порождают. Газ наблюдается во всех формах — от холодных молекулярных облаков до полностью ионизованных областей. Сложный характер звездообразования в комплексах связан с их неоднородностью: распределение газа носит иерархический характер, когда мелкие (и более плотные) структурные образования являются частью более крупных (и разреженных), а те, в свою очередь, частью еще более крупных структур. Наиболее плотные образования быстрее остывают, становятся гравитационно связанными и непрозрачными для излучения, нагревающего газ. По мере затухания внутренних турбулентных движений самые плотные области газовых комплексов сжимаются, делятся на молекулярные облака и порождают звезды.

Через несколько десятков миллионов лет после начала звездообразования большая часть газа уходит из комплекса, наиболее яркие звезды гаснут, неустойчивые звездные системы распадаются, и комплекс «растворяется» среди более старых звезд. Считается, что большая часть звезд диска — это успевшие постареть и «перемешаться» звезды некогда существовавших и распавшихся звездных систем.

Таким образом, процесс превращения газа в звезды можно условно разделить на несколько этапов: формирование крупномасштабных газовых комплексов, появление в них гравитационно связанных молекулярных облаков, сжатие наиболее плотных областей в облаках до возникновения звезд, нагрев газа молодыми звездами и вспышками сверхновых и, наконец, уход газа; приводящий к прекращению звездообразования и распаду «рыхлых» звездных систем. Продолжительность первого этапа сопоставима с периодом оборота вокруг центра галактики (или со временем пересечения промежутка между спиральями) — около 10^8 лет. Раз начавшись, активная фаза звездообразования длится несколько десятков миллионов лет. Наконец, примерно такое же время требуется для разрушения ком-

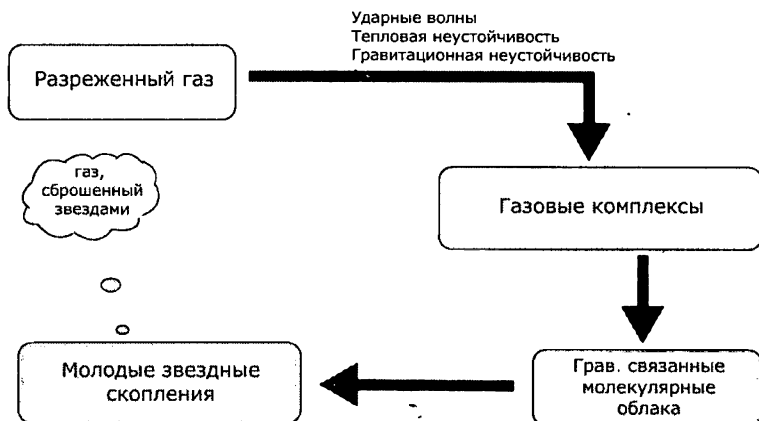


Рис. 11.10. Схема звездообразования в галактиках.

плексов⁷. При этом звездообразование, завершившись в одной области галактики, может, порождая волны сжатия в газе, ускорить начало того же процесса в соседних областях диска.

Сложность создания физической картины процесса звездообразования связана с двумя факторами: во-первых, с его зависимостью от многих параметров газовой среды (плотность, давление, химический состав, магнитное поле, момент импульса, характер и скорости внутренних движений), а во-вторых, с существованием (и сложностью расчета) обратной связи в системе газ–звезды–газ, обусловленной воздействием появившихся звезд на газовую среду, в которой они рождаются. Причем эта обратная связь может быть как положительной (стимулировать образование звезд), так и отрицательной (тормозить этот процесс), все зависит от соотношения между темпом передачи энергии газу и скоростью его остывания. Основной «канал» обратной связи — это взрывы сверхновых и расширение их газовых остатков. Взрыв одной сверхновой типа II приходится на несколько сотен возникших звезд. Это означает, что через несколько миллионов лет после начала звездообразования в молодом скоплении или комплексе произойдет серия вспышек. Существенная доля энергии, выделяющаяся при взрыве сверхновой, передается окружа-

⁷ Тем не менее, слабые следы комплексов можно проследить в течение значительно большего времени — по повышенной концентрации уже не связанных между собой звезд сходного возраста, например, цефеид.

ющей среде. В итоге возникают расширяющиеся области горячего разреженного газа и ударные волны, распространяющиеся по межзвездному газу. Эти ударные волны играют роль положительной обратной связи в процессе звездообразования — они сжимают сравнительно плотные участки газа, ускоряя их остывание и дальнейшее сжатие, стимулируя тем самым рождение звезд. Однако очень мощная вспышка звездообразования приводит к иному: она нагревает и выбрасывает газ из комплекса и поэтому сама себя гасит.

Таким образом, звездообразование является, по рассмотренным выше причинам, саморегулирующимся процессом: он может быть самоподдерживающимся, но очень высокая активность может сохраниться лишь на короткое время из-за нагрева газа и его ухода из области звездообразования. Уменьшение количества молодых звезд, в свою очередь, уменьшит и нагрев газа. Температура газа начнет падать, внутренние движения — затухать, так что плотность газа будет возрастать, приводя, в конечном счете, к новому всплеску звездообразования. В локальных областях галактик или в карликовых галактиках эта обратная связь может обусловить автоколебательный режим звездообразования.

В таких галактиках как наша, газ, благодаря полученной энергии, может удаляться от плоскости диска над локальными областями звездообразования на сотни парсек, затем он частично остывает и падает назад к плоскости либо смешивается с горячим газом гало, хотя и не покидает галактику. Но в карликовых галактиках при мощных вспышках звездообразования наблюдается интенсивный отток ионизованного газа, надолго или навсегда покидающего галактику, поскольку ее масса недостаточна для удержания быстрых потоков. Поэтому для маломассивных галактик интенсивное звездообразование может завершиться почти полной потерей газа. Таких карликовых галактик, лишенных газа, известно довольно много.

Достаточно строгих количественно рассчитанных схем, связывающих условия возникновения и характер эволюции звездообразования со свойствами газовой среды пока не создано. Однако наблюдения на качественном уровне убедительно демонстрируют как зависимость темпов звездообразования от плотности газа, так и стимулирующую роль расширяющегося газа в появлении новых очагов звездообразования.

Из перечисленных этапов самым продолжительным является первый (формирование гравитационно связанных облаков и газо-

вых комплексов), поэтому основные факторы, влияющие на темп звездообразования, действуют именно на этом начальном отрезке времени.

Самый важный параметр, от которого зависит интенсивность звездообразования — плотность газа в той или иной области галактики. Это обусловлено тем, что с возрастанием плотности:

- газ быстрее остывает, что облегчает формирование любых уплотнений (облаков);

- облака газа чаще сталкиваются между собой, и поскольку столкновения не абсолютно упруги, это приводит к сжатию и остыванию газа, а также к уменьшению относительных скоростей облаков и ускорению их слияния;

- среда становится локально непрозрачной для ультрафиолетовых лучей (из-за пыли), экранируя газ от источников излучения, падает его температура, что при достаточном давлении среды ускоряет формирование холодных молекулярных облаков.

Между темпом звездообразования (SFR) и полным количеством газа в галактике (молекулярного + атомарного) существует хорошо выраженная взаимосвязь. Чем выше масса газа в галактике, которая равна $M_g \approx 1.4(M_{HI} + M_{H_2})$, тем в среднем больше молодых звезд в ней наблюдается⁸. Однако эта зависимость носит лишь статистический характер: при той же массе газа количество молодых звезд в различных галактиках может отличаться более чем на порядок, особенно у карликовых систем, где звездообразование, по-видимому, носит особенно ярко выраженный вспышечный характер. Следовательно, количество газа в галактике не является единственным параметром, определяющим интенсивность процесса рождения звезд.

Рассмотрим влияние других факторов, способствующих рождению звезд и увеличивающих эффективность звездообразования. Под эффективностью звездообразования β будем понимать темп рождения звезд в расчете на единицу массы газа:

$$\beta = (dM_*/dt) \cdot (1/M_g).$$

Величина, обратная β , имеет размерность [год] и по своему смыслу является промежутком времени, за который запасы газа, если они не пополняются, уменьшаются в e раз. Оценки β показали, что эта величина слабо зависит от массы газа в галактиках и для спиральных

⁸ Коэффициент 1.4 учитывает содержание гелия и более тяжелых элементов.

галактик составляет $\approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ лет $^{-1}$, хотя для Iгг-галактик она, как правило, в несколько раз ниже.

Высокая эффективность звездообразования означает более благоприятные условия для рождения звезд в данной системе, но сама по себе не характеризует темп происходящего звездообразования. Если в галактике наблюдаемое звездообразование слабое, то это еще не означает, что его эффективность низка; возможно, что в галактике весь газ уже почти исчерпан.

Поясним это на простом примере.

Пусть эффективность звездообразования β не меняется со временем. Тогда, с учетом того, что звезды за короткое время (по сравнению со временем исчерпания газа), возвращают в межзвездную среду часть своей массы r (по оценкам $r \approx 0.3-0.4^9$), будем иметь:

$$\frac{dM_*}{dt} = \frac{dM_g}{dt} \frac{1}{1-r} = -\beta M_g, \quad (11.36)$$

откуда

$$\frac{d(\ln M_g)}{dt} = -\beta(1-r). \quad (11.37)$$

Интегрируя уравнение по времени от 0 до T , где T — возраст диска, и считая, что в начале эволюции $t = 0$ весь диск с массой M_d был газовым, получаем для «текущего» времени $t = T$:

$$\left. \frac{dM_*}{dt} \right|_{t=T} \equiv \beta M_g(T) = \beta M_d \exp[-\beta(1-r)T]. \quad (11.38)$$

Обозначим β_r величину $\beta(1-r)$. Полученная зависимость SFR от β_r проходит через максимум $(dM_*/dt)_{max} = M_d/eT(1-r)$ при $\beta_r = 1/T$ (см. рис. 11.11). Это означает, что если наблюдаемый возраст диска галактики $T < \beta_r^{-1}$, то чем выше β , тем интенсивнее образование звезд. Однако, если возраст диска галактики $T > \beta_r^{-1}$, то ситуация становится обратной. В этом случае, чем выше эффективность звездообразования, тем ниже его современные темпы, отнесенные к полной массе диска M_d , и причина этого в том, что большая часть газа уже перешла в звезды. В точке максимума $\beta_r = T^{-1}$, и соответствующая относительная масса газа в диске составит

$$\left(\frac{M_g}{M_d} \right)_{max} = \exp(-\beta_r T) = e^{-1} \approx 0.37. \quad (11.39)$$

⁹Эта величина зависит от начальной функции масс звезд.

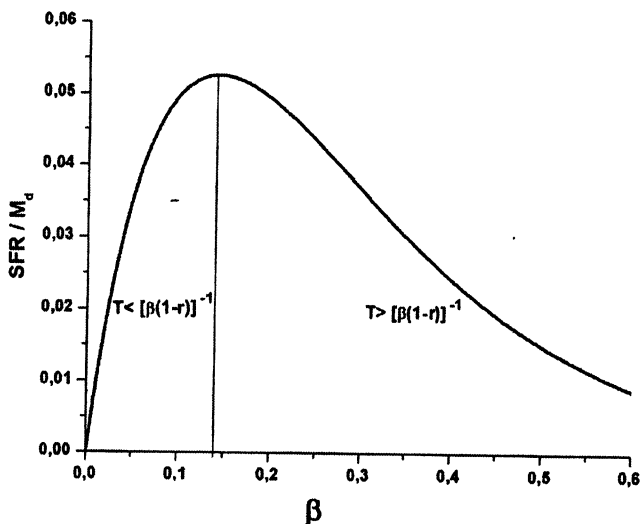


Рис. 11.11. Зависимость темпа звездообразования, нормированного на полную массу диска, от эффективности звездообразования β для фиксированного возраста звезды $T \approx 10^{10}$ лет при условии, что β не меняется со временем. Размерность по обеим осям 10^{-9} лет $^{-1}$.

В большинстве галактик относительная масса газа в диске меньше e^{-1} . Заменяв отношение M_g/M_d отношением поверхностных плотностей σ_g/σ_d , получаем тот же вывод — если доля газа меньше $e^{-1} \approx 0.37$ (а это справедливо для абсолютного большинства спиральных галактик) и при этом β_r можно считать постоянной, то чем выше эффективность звездообразования, тем ниже его наблюдаемые темпы в расчете на единицу поверхностной плотности диска.

Эта заведомо упрощенная модель эволюции диска галактики показывает, что между темпом звездообразования, его эффективностью и относительным содержанием газа в диске нет однозначного соответствия.

Предположение о постоянстве эффективности звездообразования может не выполняться, если условия звездообразования сильно менялись в процессе эволюции. Поэтому в общем случае история галактики имеет более сложный характер. Самый важный фактор, который не учитывает рассмотренная выше модель, это аккреция газа на диск, которая должна была быть особенно сильной на стадии формирования диска. В то далекое время масса галактики росла как

за счет выпадания на нее межгалактического газа, так и за счет поглощения спутников или слияния более мелких галактик в единую систему. Современные темпы аккреции на галактики, подобные нашей, не превосходят нескольких масс Солнца в год, что, однако, сопоставимо с темпами звездообразования в них.

Два основных фактора, которые приводят к возрастанию эффективности звездообразования на данном расстоянии от центра:

а) наличие ударных волн (или просто сильных волн сжатия), увеличивающих плотность газа и, как следствие, ускоряющих его охлаждение, образование и сжатие холодных облаков, а также

б) гравитационная неустойчивость газового слоя.

Оба эти фактора ответственны за повышение эффективности звездообразования в спиральных ветвях галактик.

11.7.3. Волны сжатия

В мелких масштабах (сотни парсек) ударные волны, сжимающие окружающий газ, возникают при расширении «пузырей» горячего газа вокруг молодых звездных группировок. Расширяющийся газ получает энергию от вспышек сверхновых, звездного ветра и ионизирующего излучения горячих звезд. Звездообразование ускоряется при сжатии и последующем охлаждении газа. Появление новых очагов рождения звезд в свою очередь порождает новые волны сжатия и способствует распространению звездообразования по газовому диску галактики — по аналогии с распространением лесного пожара, где каждое горящее дерево с некоторой вероятностью поджигает соседнее. При определенной вероятности «поджига» соседнего дерева и определенном темпе выроста новых деревьев должен установиться стационарный режим «горения». Аналогичная ситуация может иметь место и при распространении звездообразования в дисках галактик.

Помимо локальных областей сжатия газа, в галактиках распространяются крупномасштабные волны, связанные со спиральными волнами плотности, которые сжимают газ, входящий в спиральную ветвь, и тем самым синхронизируют звездообразование вдоль фронта. В реальных галактиках сильная неоднородность межзвездной среды приводит к более сложной картине: вдоль спирали появляется целая сетка переплетающихся фронтов сжатия, которые выдают свое присутствие ростом непрозрачности среды с увеличением плотности газа. На изображениях галактик хорошо заметно, что вдоль

спиральных ветвей (как правило, по их внутренней кромке) концентрируются многочисленные пылевые прожилки.

Звздообразование в спиральных ветвях усиливается не только потому, что в них выше плотность газа, но и потому, что эффективность звездообразования β также выше. Однако возрастание эффективности процесса в спиральных рукавах в значительной степени компенсируется его уменьшением между спиральными ветвями, поэтому наличие спиральной структуры слабо отражается на характере звездообразования в галактике в целом.

Дополнительным механизмом, сжимающим газ и увеличивающим эффективность звездообразования в дисковых галактиках богатых скоплений, может служить статическое давление со стороны горячего межгалактического газа, окружающего галактики (Засов, 1974).

Ударные волны в газовой среде, стимулирующие процесс звездообразования, возникают также при сильных приливных взаимодействиях в тесных системах галактик. Возмущающая сила со стороны близкой галактики вызывает некруговые движения газа, неизбежно приводящие к росту дисперсии скоростей облаков и их более частым столкновениям. Усиление темпов звездообразования в сильно взаимодействующих, особенно взаимопроникающих, системах заметно проявляется в возрастании мощности излучения эмиссионных линий и повышении светимости L_{FIR} в далекой ИК области.

Ближайшая галактика, центр которой охвачен мощной вспышкой звездообразования — неправильная галактика М82 в Большой Медведице. Несмотря на ее небольшую массу, темпы звездообразования в ней в несколько раз выше, чем в нашей Галактике. Но самая высокая интенсивность звездообразования (а также его эффективность) наблюдается у взаимопроникающих или сливающихся галактик. Газ сжимается в той области, где происходит столкновения двух газовых дисков, как в известной системе *Antennae*. Увеличение плотности газа и вспышка звездообразования может иметь место и на более позднем этапе, когда в результате перераспределения газа формируется очень плотный молекулярный диск вокруг ядра галактики. Поверхностная плотность газа в таких дисках достигает $10^4 M_{\odot}/\text{пк}^2$ (как в известной галактике NGC 6240). Темпы звездообразования в окооядерных дисках могут измеряться сотнями солнечных масс в год, а темпы исчерпания газа в областях звездообразования — не превышать 10^8 лет, что говорит о нестационарности про-

цесса. Из-за высокой непрозрачности плотных газопылевых дисков основная энергия галактик со вспышкой звездообразования излучается не в видимой, а в далекой ИК области спектра.

Одновременно высокие значения β и SFR в галактике свидетельствуют либо о том, что галактика еще молодая ($T < \beta_r^{-1}$), либо о вспышке звездообразования. Первый вариант, в принципе, приемлем для некоторых карликовых галактик, сильно «обедненных» металлами, хотя в большинстве случаев и у них удается найти косвенные свидетельства существования старого звездного населения (например, присутствие в спектре следов звезд умеренного возраста или гладкое распределение поверхностной яркости диска, на фоне которого выделяются очаги происходящего звездообразования). Поэтому в большинстве случаев причиной высокой SFR является все же вспышка звездообразования (т. е. кратковременное возрастание β) в старой звездной системе. За редчайшими исключениями, наблюдения галактик не противоречат представлению об их большом возрасте (10–13 миллиардов лет), независимо от их морфологического типа и наблюдаемого темпа звездообразования.

11.7.4. Гравитационная неустойчивость газового диска

Если вращающийся газовый диск является гравитационно неустойчивым, в нем могут развиваться крупномасштабные неоднородности, приводящие к образованию массивных газовых комплексов. Вращение диска является фактором, стабилизирующим диск относительно крупномасштабных гравитационных возмущений и таким образом уменьшающим эффективность звездообразования.

Как отмечалось выше (раздел 11.4.8), критическое значение для поверхностной плотности газа во вращающемся диске

$$\sigma_{g,c} = \frac{C_s \kappa}{Q_c \pi G}. \quad (11.40)$$

Для галактических дисков параметр устойчивости Q_c составляет 1.5–2, эпициклическая частота $\kappa \approx 10^{-15} \text{ с}^{-1}$, а скорость звука $C_s \approx 6\text{--}10 \text{ км/с}$.

В 1970-е годы впервые была выдвинута идея, что распределение газа в дисках галактик следует зависимости $\sigma_{g,c}(R)$ (Квирк, 1972). Дальнейшие исследования показали, что в галактиках, содержащих сравнительно много газа (Sbc–Irr), распределение плотности $\sigma_g(R)$ действительно близко к $\sigma_{g,c}(R)$, причём на большей части диска раз-

личие между наблюдаемой и критической плотностью газа хотя и реально, но не превышает фактора 2, что сопоставимо с точностью определения $\sigma_{g,c}$ ¹⁰. На периферии галактик, где плотность газа значительно ниже критической, темпы звездообразования, как и его эффективность, быстро падают. Тем не менее, слабое звездообразование продолжается и там, в отдельных «островках», где концентрируется газ. Рождение звезд в условиях низкой средней плотности газа обусловлено либо значительно меньшей дисперсией скоростей газа, либо другими процессами, увеличивающими его локальную плотность и не связанными с крупномасштабной неустойчивостью.

В диске долгое время (миллиарды лет) может поддерживаться плотность газа на уровне, близком к критическому ($\sigma_g \approx \sigma_{g,c}$) — как из-за низких темпов звездообразования, так и в результате пополнения запасов межзвездной среды при аккреции межгалактического газа или газа, сброшенного старыми звездами галактики на заключительных стадиях их эволюции. При плотности, превышающей критическую, но близкой к ней, развитие гравитационной неустойчивости в газовом диске должно приводить к образованию неоднородностей с характерным масштабом

$$\lambda \approx \frac{2\pi^2 G \sigma_g}{\kappa^2}$$

(см. раздел 11.4.8). Для величин σ_g и κ , наблюдаемых в галактиках, λ составляет несколько сотен парсек во внутренней области диска и более 1 кпк на его периферии, если плотность газа там еще не опускается под критический уровень. Предполагается, что сжатие таких неоднородностей и приводит к появлению «сверхоблаков» в богатых газом галактиках.

Наконец, если σ_g значительно больше $\sigma_{g,c}$, то развитие неустойчивости должно привести к росту крупномасштабных неоднородностей в диске и возрастанию скоростей хаотических движений газа. Это, в свою очередь, будет усиливать звездообразование вследствие сжатия газа при столкновениях газовых масс. По-видимому, такой режим бурного звездообразования имел место в молодых галактиках, при высокой плотности газа формирующегося диска.

¹⁰ Отношение между наблюдаемой и критической плотностью газа зависит от принятого расстояния до галактики. Поэтому условие, согласно которому плотность газа не превышает критического значения для устойчивости и обычно близка к нему, можно использовать для уточнения расстояний до галактик (Засов, 1983).

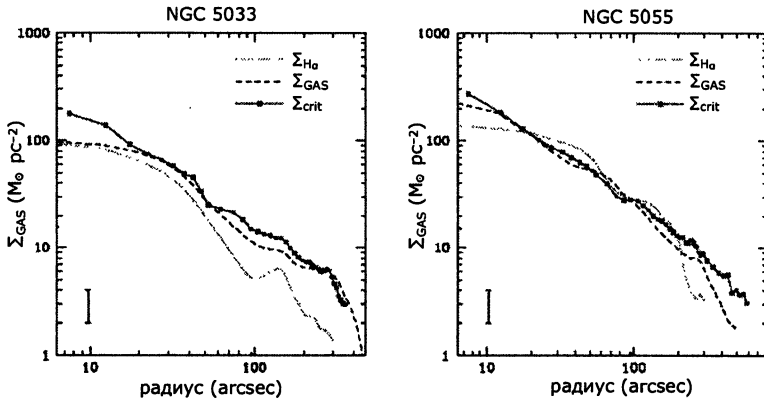


Рис. 11.12. Радиальные зависимости: а) яркости в линии H_{α} ($\Sigma_{H_{\alpha}}$), которая пропорциональна локальному темпу звездообразования, б) поверхностной плотности газа (Σ_{gas}), и в) критической плотности газа (Σ_{crit}) для двух спиральных галактик (по Wong, Blitz, 2002).

Условие гравитационной устойчивости накладывает ограничение на массу газа в галактике

$$M_g(R_{max}) \leq \int_0^{R_{max}} 2\pi R \sigma_{g,c}(R) dR, \quad (11.41)$$

где R_{max} — радиус газового диска, в пределах которого $\sigma_g \approx \sigma_{g,c}$.

Принимая скорость вращения примерно постоянной вдоль радиуса (что, как правило, недалеко от истины, за исключением самых внутренних областей диска) и считая, что радиус R_{max} близок к оптимальному радиусу R_{opt} диска, получим для $Q_c \approx \sqrt{2}$, см. (11.40):

$$M_g \leq 2 \frac{C_s V}{G} R_{opt}. \quad (11.42)$$

Это соотношение позволяет объяснить, почему относительная масса HI падает с ростом скорости вращения (от Igg до Sa-галактик). Считая, что масса галактики $M \approx V^2 R_{opt} / G$, а $C_s \approx 10$ км/с, из предыдущего уравнения имеем:

$$\frac{M_g}{M}(R_{opt}) \leq \frac{2C_s}{V} \approx \frac{20}{V[\text{км/с}]}. \quad (11.43)$$

Здесь $M_g \approx 1.4(M_{HI} + M_{H_2})$ включает все элементы, тяжелее H.

Если $\sigma_g \simeq \sigma_{g,c}$, т. е. газовый диск близок к границе устойчивости, то внешнее воздействие (например, сильное гравитационное возмущение со стороны близкой галактики) может спровоцировать неустойчивость диска и, как следствие, вызвать вспышку звездообразования в нем. Это дополнительный механизм усиления звездообразования во взаимодействующих галактиках, помимо прямого столкновения газовых масс двух взаимопроникающих галактик.

11.8. Ядра галактик

11.8.1. Общие сведения

Термин «ядро галактики» может иметь два смысла: ядро как центральная, выделяющаяся высокой яркостью, наиболее плотная область галактики (для близких и далеких галактик эта область будет иметь разные линейные размеры), и ядро как исчезающее маленькая (по сравнению с размером галактики) область, где разыгрываются процессы, сопровождающиеся выделением большого количества энергии, не объясняющиеся активностью отдельных звезд. Ниже мы будем использовать именно второй вариант термина.

Первое обнаружение галактик с активными ядрами принадлежит американскому астроному К. Сейферту (1943). Он выделил небольшое число внешне нормальных спиральных галактик, у которых ядро выглядит как звездообразный объект и имеет необычный для галактики спектр, содержащий яркие и очень широкие эмиссионные линии. Подобные галактики (а они, как оказалось впоследствии, составляют около 1% от полного числа спиральных галактик) получили название сейфертовских.

Интерес к активности ядер резко поднялся с открытием в 1950-е годы радиогалактик, источник мощной энергии которых нельзя было объяснить активностью звезд, а позднее — с открытием квазаров — радиоисточников очень малого углового размера, на месте которых в оптике были обнаружены необычные звездоподобные объекты, заметно меняющие свою яркость и поэтому трудноотличимые от переменных звезд. Их эмиссионный спектр не поддавался расшифровке, пока не стало очевидным, что он содержит линии обычных элементов, но сильно сдвинутые в красную сторону (М. Шмидт, 1963 г.). Последнее сразу указало на внегалактическую природу таких объектов. Но при этом пришлось принять, что их излучение