

Оглавление

Предисловие редактора	5
1. Введение	6
1.1. Немного истории	6
1.2. Три кита, на которых стоит теория эволюции галактик	11
1.3. Два способа изучать эволюцию, или Что мы знаем про далекие галактики	15
2. Классические и современные теории формирования галактик 27	27
2.1. Джинсовский размер и джинсовская масса	27
2.2. Бездиссипативный коллапс протогалактического облака	29
2.3. Диссипативный монолитный коллапс протогалактического облака	32
2.4. Другие модели «монолитного» коллапса	34
2.5. Джинсовский коллапс в условиях хаббловского расширения	36
2.6. Иерархическая концепция формирования галактик	38
2.7. Сравнения с наблюдениями: проблемы иерархической концепции	42
2.8. Линзовидные галактики	50
3. Динамические механизмы эволюции галактик	55
3.1. Глобальные свойства современных галактик	56
3.2. Быстрые механизмы динамической эволюции галактик	63
3.3. Вековая эволюция дисков галактик	67
3.4. Динамическая эволюция галактик под действием окружения	72
4. Спектрофотометрическая эволюция галактик	76
4.1. Метод эволюционного синтеза	76
4.2. Развитие метода эволюционного синтеза	81
4.3. Общие представления об эволюции цвета эллиптических галактик	85
4.4. Подсчеты галактик	86
4.5. Некоторые не вполне решенные проблемы эволюционного синтеза	90
4.6. Что удалось узнать про эволюцию галактик на $z \leq 1$ с помощью эволюционного синтеза	93
4.7. Космическая история звездообразования	98

5. Происхождение элементов и химическая эволюция галактик	106
5.1. Первичный нуклеосинтез	106
5.2. Сходятся ли данные наблюдений с теорией?	113
5.3. Нуклеосинтез в звездах.	117
5.4. Простая модель химической эволюции.	120
5.5. Химический состав звезд в Галактике.	124
5.6. Средний химический состав звезд и газа в галактиках разных типов	131
5.7. Примеры современных моделей химической эволюции.	138
6. Ядра галактик	151
6.1. Звездные ядра галактик	151
6.2. Газ в ядрах галактик	159
6.3. Черные дыры в ядрах галактик	164
7. Возраст Вселенной и ее населения	171
7.1. Возраст подсистем Галактики и галактик	171
7.2. Возраст Вселенной	179
8. Галактики на больших красных смещениях	183
8.1. Как находят на небе галактики на больших z	184
8.2. Какие они, галактики на больших z ?	188
9. Заключение: эмпирические сценарии эволюции галактик	201
9.1. Эволюция размеров: возможные механизмы.	202
9.2. Downsizing: от большого к малому.	204
9.3. Аккреция: основной двигатель эволюции дисковых галактик?	206
9.4. Космологические филаменты!	209
9.5. Эмпирический сценарий: все начиналось с S0...	210
Литература	216

Предисловие редактора

Каждая эпоха считает себя уникальной, и это действительно так. А в чем же тогда состоит уникальность нашего времени, если речь идёт об изучении Вселенной? До конца XX века астрономы могли предъявлять как свои достижения рост масштабов охваченного измерениями пространства: от сотен тысяч километров в эпоху Галилея до нескольких световых лет в XIX веке; от миллионов световых лет в начале XX века до миллиардов — в конце. Ясно, что в XXI веке этот экспоненциальный рост масштабов не сможет продолжаться, поскольку в пространстве-времени астрономы уже почти достигли эпохи Большого взрыва. Сейчас в астрономии происходит бурное накопление фактического материала, на смену умозрительным схемам приходит живая и детальная картина строения и эволюции нашего мира.

С начала нынешнего века количество известных объектов Солнечной системы возросло от десятков тысяч до сотен тысяч, количество экзопланет — от нескольких десятков до нескольких тысяч. Если в обзорах конца XX века астрономы оперировали тысячами галактик, то сегодня в рядовой работе изучаются миллионы звездных систем, а в некоторых — даже сотни миллионов. Этот стремительный рост наблюдательного материала не мог не перевернуть многие представления об эволюции Вселенной.

Именно этому перевороту посвящена данная книга. Ее автор — крупный отечественный специалист в области внегалактической астрономии, внесший заметный вклад в наблюдение и теоретическое изучение эволюции галактик. Ольга Касьяновна Сильченко — доктор физико-математических наук, лауреат престижных научных премий, руководитель коллектива астрономов, изучающих структуру и эволюцию галактик различными методами, в том числе с помощью нашего крупнейшего 6-метрового телескопа БТА. Эта книга демонстрирует эволюцию взглядов на происхождение и жизнь галактик, содержит обзор самых современных фактов о них и собственный взгляд автора на возможное эволюционное толкование этих фактов. Книга заполняет большой пробел в наших знаниях о галактиках, поскольку на русском языке уже несколько десятилетий не публиковались подобные обзоры.

Я искренне рекомендую всем, кто интересуется современной астрономией, познакомиться с этой книгой, чтобы ощутить глубину поиска и уровень проблем, вставших перед теми, кто изучает историю Вселенной.

В. Г. Сурдин, декабрь 2016



1 Введение

Галактики – крупные конгломераты звезд, содержащие также некоторое – весьма разное – количество газа и пыли. Галактики – основной видимый структурный элемент Вселенной (Галактики, 2017). Если вы разглядываете Вселенную, то видите в ней именно галактики. Теоретики расскажут вам, что на самом деле Вселенная состоит из темной материи и управляется темной энергией. Но в наблюдениях мы видим и прослеживаем структуры во Вселенной именно через исследование галактик. Поэтому наблюдательное исследование эволюции Вселенной – это исследование эволюции галактик. Такой «экстремистский» тезис я буду доказывать, обосновывать, иллюстрировать на протяжении всей этой книги.

Исследование эволюции галактик сейчас переживает бурное развитие в связи с развитием техники астрономических наблюдений. Теория пока не поспевает за наблюдательными открытиями, поэтому ключевые концепции приходится пересматривать достаточно часто. Я расскажу о текущем состоянии дел и немного о перспективных – весьма вероятных будущих изменениях в общепринятых взглядах на эволюцию галактик и, соответственно, на эволюцию всей Вселенной.

1.1. Немного истории

Вопросы происхождения и эволюции галактик начали ставить сразу, как только возникла внегалактическая астрономия. Эдвин Хаббл создавал свою морфологическую классификацию галактик, считая, что он рисует эволюционную последовательность. Если рассматривать морфологическую схему Хаббла (рис. 1.1) слева направо, как принято читать и писать у европейцев, то в начале эволюционной, как думал Хаббл, последовательности идут эллиптические галактики – однородные и бесструктурные сфероиды. Затем идут линзовидные галактики, у которых уже можно различить два компонен-

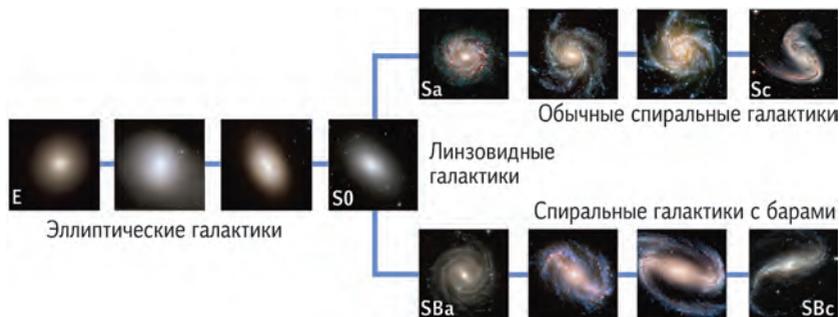


Рис. 1.1. Схема классификации галактик по Хаббл 1936 года, так называемая «вилка» или «камертон» Хаббла. Рисунок А. Каспаровой. Фото: NASA/ESA.

та — плоский диск и сфероидальный балдж. А за ними следуют разнообразные спиральные галактики: у них есть и балдж, и диск, и спиральные рукава, и области звездообразования, а иногда глобальные бары (перемычки, пересекающие центр галактики), и множество более мелких структур. Сам Хаббл считал, что любая галактика сначала формируется как эллиптическая, а потом у нее постепенно развиваются и другие компоненты помимо сфероидального. Отголоски его воззрений остались в нашей современной терминологии: вслед за Хабблом мы до сих пор называем те галактики, что на схеме Хаббла слева, галактиками «ранних типов», а те, что справа, — галактиками «поздних типов». Впрочем, эволюционный смысл схемы Хаббла был очень быстро отвергнут, как только накопилась достаточная статистика измерений глобальных характеристик галактик. Во-первых, оказалось, что галактики разных морфологических типов заполняют разные интервалы масс: среди эллиптических есть и очень массивные, до 10^{12} масс Солнца (M_{\odot}) в виде звезд, и совсем карликовые, чуть массивнее шаровых скоплений, т. е. 10^6 – $10^7 M_{\odot}$. Спиральные же галактики бывают только «средней» массы — они встречаются в узком диапазоне интегральных абсолютных звездных величин: примерно от $M_B \approx -18$ до $M_B \approx -21$, т. е. масса их звездного населения 10^{10} – $10^{11} M_{\odot}$.

Невозможно вообразить себе механизм эволюции, вынуждающий эллиптическую галактику в процессе развития сбрасывать звездную массу, чтобы встроиться в нужный интервал светимостей и превратиться в спиральную галактику. Кроме того, эллиптические и дисковые галактики обладают принципиально разным моментом

импульса: эллиптические вращаются очень медленно или почти совсем не вращаются, спиральные же демонстрируют весьма значительный момент. Откуда они его могут взять на промежуточных стадиях эволюции? В схеме Хаббла указаний на это не было.

К 1970-м годам среди астрономов утвердилось мнение, что галактики разного морфологического типа имеют разные начальные условия и сценарии формирования, поэтому не могут превращаться друг в друга. Любопытно, что это мнение продержалось недолго. Уже к середине 1990-х годов вновь возникла идея эволюционной трансформации морфологических типов, но теперь вектор направления эволюции развернулся в противоположную сторону: сейчас теоретики считают, что сначала образуются чисто дисковые галактики (т. е. спиральные совсем поздних типов), потом у них в ходе вековой (т. е. медленной, постепенной) эволюции нарастают балджи, а потом они и вовсе сливаются друг с другом и в результате «мерджинга» (англ. *merge* — объединяться, сливаться) начинают новую жизнь уже как сфероидальные эллиптические галактики.

Однако чтобы образовать любую звездную структуру, нужны сами звезды. Что касается основного элемента процесса формирования всех типов галактик, т. е. образования звезд, то в середине XX века существовали две конкурирующие концепции: космогония Дж. Джинса, для которой ключевое слово — «конденсация», и космогония В. А. Амбарцумяна, ключевое слово — «разлет». Согласно концепции Джинса, звезды (и галактики) образовывались в результате гравитационного коллапса (сжатия) и сопутствующей ему фрагментации газовых облаков. Механизм этого процесса — гравитационная неустойчивость — был совершенно понятен всем исследователям; источники энергии для поджига термоядерных реакций в звездах тоже вполне традиционны и хорошо изучены в рамках классической термодинамики. Концепция же Амбарцумяна вдохновлялась загадочной тогда колоссальной энергетикой активных ядер галактик. Предполагалось, что в них существует некое «дозвездное вещество» (сокращенно называемое «Д-телами»), которое обладает кучей неизвестных свойств, поскольку сама природа его неизвестна, а также одним известным свойством: оно само по себе разлетается (взрывается) с мощным выделением энергии, и из его брызг и образуются звезды. Таким образом, предполагалось, что изначально было ядро галактики, а потом вокруг него уже надстраивались все остальные



Рис. 1.2. M51 — галактика со спутником, наблюдаемым в проекции на спиральную ветвь. Фото: космический телескоп «Хаббл» (NASA/ESA).

структуры галактики. Несмотря на энтузиазм и талант Амбарцумяна и его сотрудников и многолетние усилия большой и хорошо оснащенной Бюраканской обсерватории в Армении, детализировать природу «дозвездного вещества», источник его энергетики и механизм его разлета так и не удалось. В итоге окончательно победила концепция Джинса.

Любопытная и вполне оригинальная космогоническая концепция развивалась в прошлом веке и в стенах Государственного астрономического института (ГАИШ) МГУ. Профессор Б. А. Воронцов-Вельяминов, увлекавшийся взаимодействием галактик и практически открывший взаимодействующие галактики как класс, был вдохновлен структурой близкой спиральной галактики M51 (рис. 1.2), у которой крупный спутник виден прямо на конце спиральной ветви. Воронцов-Вельяминов составил каталог взаимодействующих галактик, где обозначил M51 первым номером, VV1, и подобрал еще целую коллекцию похожих галактик — взаимодействующих галактик «типа M51». Он выдвинул идею, что небольшие галактики второго поколения могут образовываться в результате гравитационного (приливного) вза-

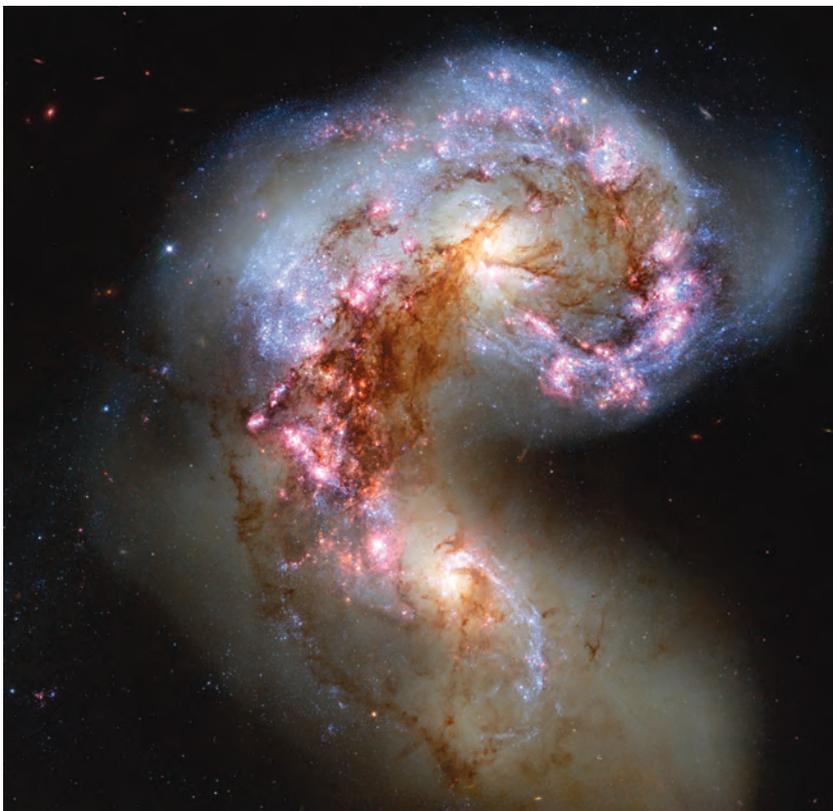


Рис. 1.3. Сливающиеся галактики «Антенны». Фото: космический телескоп «Хаббл» (NASA/ESA).

имодействия крупных газовых дисков, в их глобальных приливных структурах: спиральных ветвях, «мостах», «хвостах» и т. д. В свое время эта концепция не получила достаточного резонанса. Однако уже много позже в приливных хвостах взаимодействующей пары галактик NGC 4038/NGC 4039 («Антенны», рис. 1.3) Пьер-Алан Дюк и Феликс Мирабель (Duc, Mirabel, 1997) обнаружили молодые звездные суперкомплексы массой до миллиарда масс Солнца. Их в конце концов признали новорожденными карликовыми галактиками, и сейчас уже выделен целый класс таких галактик – «приливные карлики». Это единственный тип галактик, про который все согласились, что в них нет темной материи. Так идея Воронцова-Вельяминова неожиданно получила наблюдательное подтверждение.

1.2. Три кита, на которых стоит теория эволюции галактик

Все исследования формирования и эволюции галактик опираются прежде всего на физическую модель. Хотя в перспективе это должна быть единая, самосогласованная модель, но исторически сложилось так, что до сих пор практически независимо рассматривается три класса физических механизмов, формирующих и изменяющих структуру и наблюдаемые характеристики галактик — их размер, блеск, цвет, внутренние движения. Эти три класса механизмов — три кита, на которых покоятся (или, напротив, быстро меняются) наши представления об эволюции галактик, — следующие:

- динамическая эволюция,
- спектrophотометрическая эволюция,
- химическая эволюция галактик.

В классическом варианте теории динамическая эволюция понималась прежде всего как ранняя стадия эволюции, относящаяся собственно к формированию галактики. Эта традиция объяснялась тем, что большинство галактик вокруг нас выглядят как динамически устойчивые, прорелаксировавшие системы; судя по всему, в них выполняется теорема вириала, $2T + U = \text{const}$, где T — кинетическая энергия системы, а U — ее потенциальная энергия. Поэтому сначала предполагалось, что бурные динамические процессы, оформившие в основном структуру галактик, относились к первому миллиарду лет их жизни, к эпохе коллапса протогалактического газового облака и основного звездообразования в нем. А позже динамические эффекты лишь слегка изменяли структурные характеристики: например, из-за увеличения хаотических скоростей старых звезд («динамический нагрев») могли утолщаться диски галактик.

В последние десятилетия общее мнение о важности динамических процессов в структурной эволюции современных галактик стало радикально меняться. Прежде всего, зрелищный феномен взаимодействия галактик, хотя и достаточно редкий в нашу эпоху, все же навел астрономов на мысль, что галактики могут сливаться, а в давние времена, когда плотность вещества в расширяющейся Вселенной была выше, чем сейчас, и частота слияний тоже могла быть выше. Эту идею сейчас подхватили и успешно эксплуатируют космологи; согласно их сценариям, вся эволюция галактик — это череда последовательных слияний. Между тем, конечно, слияния («мерджинг», как говорят западные коллеги) — это динамические катастрофы, ко-

торые полностью перестраивают галактику и дают начало ее новой жизни. Кроме катастроф, могут существовать и плавные, монотонные, но тем не менее существенные изменения в структуре галактик под действием разного рода динамических неустойчивостей; такие изменения называют «вековой эволюцией». В последнее время все более популярной становится идея о том, что даже такие глобальные структуры в галактиках, как бары (центральные перемычки), которые дали Хабблу основание выделить особую ветвь морфологической классификации галактик, SB-ветвь (внизу справа на рис. 1.1), на самом деле не являются пожизненным атрибутом галактики: в ходе вековой эволюции они могут возникать, потом рассасываться, потом возникать снова. Также вековая эволюция может изменять соотношение размеров балджа и диска в галактике и даже менять ее морфологический тип.

Спектрофотометрическая эволюция галактик — т. е. эволюция их светимости, цвета и спектра — определяется суммарным эффектом эволюции составляющих ее звезд. При наблюдениях мы можем разрешить на отдельные звезды только самые близкие к нам галактики; для подавляющего же большинства галактик доступны измерения только интегральные потоки — сумма излучений всех звезд, составляющих данную галактику или данную область галактики.

Простейшим аналогом галактик как звездных систем являются звездные скопления, которые состоят из звезд одного возраста и одного химического состава, но разной массы. Галактика же в общем случае состоит из многих поколений звезд, т. е. как бы представляет собой сумму гиперскоплений разных возрастов; в самосогласованной (идеальной) модели и металличность поколений должна быть разной в соответствии с ходом химической эволюции в галактике. На деле же пока более успешными, в плане сравнения с наблюдениями, являются модели звездных населений галактик с единым химическим составом для всех звезд — химическим составом, вероятно, соответствующим среднему, взвешенному по светимости звезд, обилию элементов в звездах галактики.

Спектрофотометрические модели галактик строятся численным интегрированием (сложением) спектров звезд, которые, в свою очередь, берутся из хорошо разработанной теории эволюции звезд. Определяющими параметрами эволюционных треков звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рассела служат масса и металличность звезды,

поэтому интегрирование проводится по массам и возрастам звезд, а металличность фиксируется как параметр модели галактики. При этом, конечно, надо знать или задавать из априорных предположений распределения звезд в галактике по массам и возрастам. В самом простом случае предполагается, что в определенный момент времени образовался некий конгломерат звезд разных масс, но одинаковой металличности, и дальше он спокойно эволюционировал без добавления туда новых звезд. Такой частный вариант модели еще называют «пассивной эволюцией» и довольно успешно применяют его для описания эволюции эллиптических галактик. Расчеты показывают, что пассивно эволюционирующая система звезд с возрастом тускнеет и краснеет, поскольку наиболее массивные, яркие голубые звезды заканчивают свой жизненный путь раньше, чем менее массивные. К возрасту около 10 млрд лет такая звездная система уже состоит только из звезд, менее массивных, чем Солнце, и ее спектрофотометрическая эволюция сильно замедляется. Поэтому эллиптические галактики на красных смещениях $z=0$ и $z=0,5$ выглядят совершенно одинаковыми, хотя более далекие из них — на $z=0,5$ — в среднем на 3–5 млрд лет моложе. А вот если в галактике в середине или на любом другом промежуточном этапе ее жизненного пути образовывались новые молодые звезды, то она в этот момент «омолаживалась», т. е. ярчала и голубела, и дальше эволюция должна была пойти уже немного по-другому, в частности — в более резвом темпе.

Если коротко охарактеризовать самые общие впечатления от современных цветов и светимостей близких галактик, то они хорошо описываются моделями, в которых практически все галактики — старые, т. е. первая вспышка звездообразования состоялась более 10 млрд лет назад, а дальше — чем более ранний морфологический тип у галактики, тем меньше было характерное время затухания ее глобального звездообразования. В эллиптических галактиках все должно было закончиться менее, чем за 1 млрд лет, а в Sc-галактиках звездообразование тлеет примерно на постоянном уровне все время ее жизни. В неправильных и карликовых галактиках вообще предполагается «вспышечный», т. е. сильно неравномерный ход глобального звездообразования.

Химическая эволюция галактик — это история происхождения химических элементов. Согласно современным представлени-

ям, только самые легкие элементы — водород и его изотопы, гелий и литий — образовались в Большом взрыве, в первые несколько минут жизни Вселенной. Все остальные элементы образуются в звездах в процессе их эволюции, в ходе термоядерных реакций. Различают несколько классов ядерных реакций, характерных для звезд различных масс в разные периоды их жизни: протон-протонную цепочку, CNO-цикл, горение гелия, горение углерода, s-процессы, r-процессы и т. д. (Звезды, 2013). Мнения теоретиков о вкладе тех или иных реакций в производство каждого конкретного химического элемента еще окончательно не устоялись. Однако те, кто моделирует химическую эволюцию галактик, смело берут «state-of-art», т. е. самые свежие расчеты звездного нуклеосинтеза, а далее интегрируют производство химических элементов по времени и по массам звезд точно так же, как при спектрофотометрическом моделировании интегрировали светимости звезд. Параметры модели, соответственно, те же самые — начальное распределение звезд по массам и история звездообразования в галактике, плюс теория звездного нуклеосинтеза, которая на данный момент считается заданной.

В астрономии все элементы тяжелее гелия традиционно называют «металлами», в этом мы терминологически расходимся с химиками. Поскольку металлы в звездах синтезируются, но практически не разрушаются, металличность галактики со временем всегда возрастает, но с какой скоростью и по какому закону — это уже зависит от деталей модели. В области химической эволюции галактик у исследователей есть мощный эталон, которого нет в области спектрофотометрической эволюции, — это наша собственная Галактика. Посмотреть на нее со стороны и измерить светимость мы не можем, а вот измерить химический состав отдельных звезд — можем. Химический состав звезд Галактики уже давно исследуется в массовом порядке, есть хорошая статистика, но нельзя сказать, что она сильно проясняет ситуацию. Вроде бы самые первые звезды должны образовываться из первичного газа, не прошедшего еще через цепь термоядерных реакций в недрах звезд, а потому имеющего нулевую металличность. Однако в нашей Галактике пока не найдено ни одной звезды с нулевой металличностью. Куда же делись маломассивные долгоживущие первичные звезды с нулевой металличностью? Или откуда взялся ненулевой уровень начальной металличности в нашей Галактике? Вроде бы металличность газа и соответственно звезд, из

него образующихся, должна монотонно возрастать со временем, но в диске Галактики до сих пор не найдено убедительной антикорреляции металличности звезд с их возрастом. Возраст Солнца — не менее 4,5 млрд лет, но современная металличность межзвездной среды очень близка к солнечной. Чем объяснить практически нулевой темп обогащения металлами межзвездной среды галактического диска?

А наблюдательная техника продолжает развиваться. Сейчас уже в звездах измеряют детальный химический состав — не общую металличность, а содержание отдельно железа, кислорода, магния, кальция, и т. д. Соответственно, и от современной теории химической эволюции галактик теперь уже требуются сценарии, объясняющие не только общую металличность, но и соотношение содержаний отдельных химических элементов на каждом этапе эволюции и в разных типах галактик. Нельзя сказать, что задачи теории химической эволюции упрощаются со временем — а мы и прежние еще не решили...

1.3. Два способа изучать эволюцию, или

Что мы знаем про далекие галактики

Чтобы наполнить картину эволюции галактик конкретным содержанием и выстроить последовательность и значимость различных возможных эволюционных этапов и механизмов, необходимы наблюдательные данные. Их можно получать двумя принципиально разными способами. Во-первых, можно подробно изучать строение и характеристики близких галактик и строить физические модели эволюции, которые на финальной стадии, к моменту нулевого красного смещения, дают именно такие объекты, какие мы видим рядом с собой, полностью похожие по динамике, структуре и характеристикам звездного населения. А во-вторых, учитывая колоссальную проникающую силу современных больших телескопов, можно заглядывать напрямую на большие красные смещения — там мы видим галактики, какими они были несколько миллиардов лет назад. Ведь скорость света конечна, и с очень далеких расстояний свет может идти от галактики до нас миллиарды лет.

На рис. 1.4 представлена связь красного смещения, на котором наблюдается галактика, и времени, прошедшего для нее от рождения Вселенной, т. е. от Большого взрыва до момента испускания галактикой тех квантов, которые мы сейчас принимаем. Для рас-

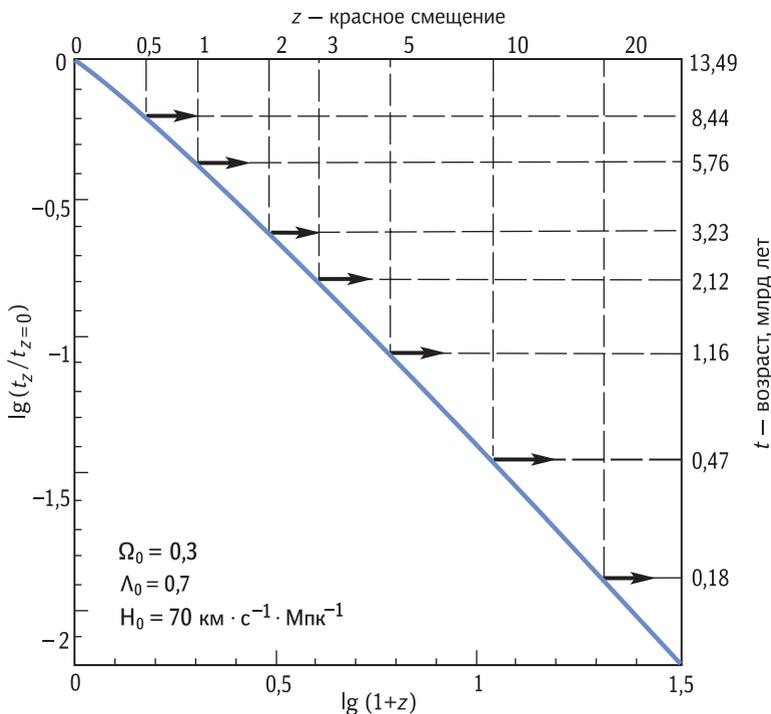


Рис. 1.4. Схема, связывающая наблюдаемое красное смещение галактики (горизонтальная ось) с возрастом Вселенной в тот момент, когда наблюдаемая нами галактика излучила принятый в наши дни от нее свет (вертикальная ось). Расчет сделан в рамках общепринятой сейчас космологической модели, параметры которой указаны в нижнем левом углу.

чета графика на рис. 1.4 использована самая популярная современная космологическая модель — с темной материей и темной энергией. Именно космологическая модель определяет геометрию Вселенной, шкалу расстояний и, соответственно, время, которое требуется лучу света, чтобы дойти от галактики на красном смещении z до нас, находящихся на $z=0$. Из рис. 1.4 видно, что когда мы наблюдаем галактику на красном смещении $z=1$, мы ее видим такой, какой она была 8 млрд лет назад. А на красном смещении $z=5$, где сейчас идут самые массовые поиски и обзоры галактик, видна Вселенная всего через один миллиард лет после Большого взрыва. С современными наблюдательными средствами мы видим практически всю эволюцию Вселенной на просвет и, двигаясь по z , можем

напрямую наблюдать эволюцию полного космического населения галактик.

Первый подход, когда мы изучаем в деталях близкие галактики, хорош тем, что мы видим в галактиках всё и с большой точностью измеряем все характеристики галактик. Ограничения первого подхода тоже ясны: мы можем заложить в модели только ту физику, которую уже знаем, а если в эволюции галактик есть то, чего мы себе пока не представляем, оно будет упущено, и модель получится неверной. Правда, тот факт, что модель неверна, мы рано или поздно обнаружим, когда появятся новые наблюдательные данные, которые в данную модель не укладываются. Второй подход, на первый взгляд, кажется более прямым: выстраивая наблюдаемые характеристики галактик вдоль красного смещения, мы вроде бы получаем временной ход их эволюции, не опирающийся на априорные модельные предположения. Однако когда работа в этом направлении пошла активно, выяснилось, что и тут все непросто.

Допустим, в каком-то диапазоне спектра — например, в дальнем инфракрасном диапазоне — обнаруживается совершенно новый вид галактик; к примеру, удалось определить их красное смещение, хотя и это не всегда возможно, и это красное смещение оказалось большим: мы видим ранний этап эволюции. Теперь надо понять: превратятся ли эти необычные галактики во что-то обычное к настоящей эпохе, к $z=0$, и во что именно, или же с ходом эволюции исчезнут как класс, и мы не увидим рядом с нами их прямых потомков. Единственный известный пока нам способ сделать это, то есть выстроить наблюдаемые на разных красных смещениях совершенно разные по виду галактики в одну эволюционную цепочку, состоит в том, чтобы привлечь те самые физические модели эволюции, правильность которых еще никто не доказал. И все возвращается на круги своя.

Пока что чем больше наблюдательных данных о далеких галактиках собирается в копилках астрономов, тем менее ясной представляется общая картина. Есть и прямые противоречия: одни данные говорят за один сценарий эволюции, другие — за совершенно иной. Наука об эволюции галактик находится сейчас в том счастливом возрасте, когда фактов уже достаточно, чтобы было над чем поразмыслить, но полную картину еще предстоит построить.

Наиболее яркий пример прямого наблюдательного изучения эволюции галактик путем сопоставления их типичных характери-

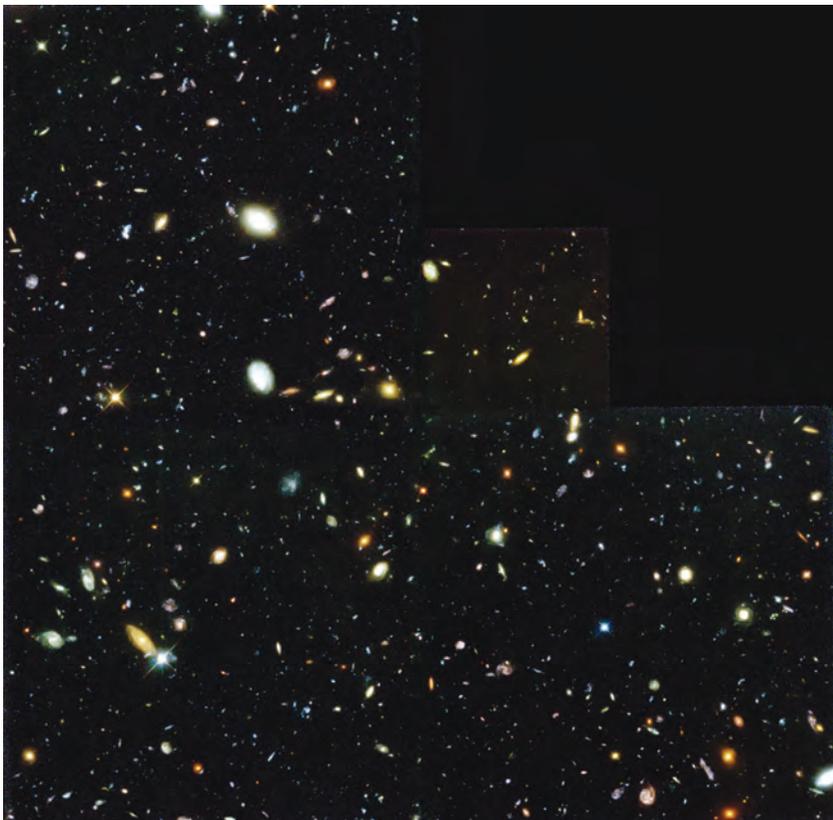


Рис. 1.5. Самое первое Глубокое поле «Хаббла» (HDF-N). Фото: NASA/ESA

стик на разных красных смещениях служит история исследования глубоких полей «Хаббла» (HDF, Hubble Deep Fields) – то есть площадок неба, снятых космическим телескопом «Хаббл» с очень длинными экспозициями. Сейчас их уже несколько – Ультраглубокое поле «Хаббла» (2004), Крайне глубокое поле «Хаббла» (2012 г.), а началось все с двух небольших площадок – северной и южной. Северное глубокое поле «Хаббла» (HDF-N) было снято первым и на сегодняшний день исследовано досконально. Вся эта эпопея с глубокими полями «Хаббла» началась в 1994 году, когда после починки космического телескопа «Хаббл» (далее – HST) выяснилось, что теперь он может получать изображения с угловым разрешением $0,1''$. Астрономам захотелось посмотреть с таким разрешением на очень далекие галакти-

ки; для этого нужно было получить очень глубокий снимок, т. е. снимок с очень большой экспозицией. В созвездии Большая Медведица была выбрана небольшая, всего 5,3 кв. минуты дуги, и на первый взгляд совершенно пустая площадка, и с прибором WFPC2 (Wide-Field Planetary Camera-2) она экспонировалась в течение 10 суток. Были получены снимки в четырех широких фотометрических полосах: использовались фильтры F300W, F450W, F555W и F814W, центрированные на длины волн, указанные в их именах (в нанометрах), и грубо соответствующие фотометрической системе Джонсона–Казинса, т. е. фильтрам U, B, V и I. Позднее площадку досняли с прибором NICMOS (Near-Infrared Camera and Multi-Object Spectrograph) в фильтрах F110W (1,1 мкм, J) и F160W (1,6 мкм, H).

Таким образом, для всех объектов площадки были получены не только широкополосные цвета, но и грубое распределение энергии в спектре в диапазоне от 3000 до 16 000 Å. Какая в результате получилась картинка – можно увидеть на рис. 1.5. Предельная звездная величина, достигнутая в экспозиции HDF-N, $V_{\text{lim}} \approx 30^m$. Площадка располагается на высокой галактической широте, поэтому несомненных звезд на ней мало – всего 9; есть еще несколько десятков слабых точечных голубых объектов, которые могут оказаться старыми белыми карликами. Все остальные объекты площадки, а их около трех тысяч, – это галактики. Самой близкой к нам оказалась красивая эллиптическая галактика чуть выше центра кадра – ее красное смещение $z = 0,09$. На каком красном смещении располагается самая далекая галактика в HDF-N, пока сказать трудно. Есть один объект, широкополосные цвета которого намекают на $z \approx 12$, однако все попытки снять спектр галактики, чтобы найти в нем эмиссионную линию для спектрального подтверждения красного смещения по эффекту Доплера, потерпели неудачу – уж слишком слабый у нее блеск.

Подавляющее большинство галактик, обнаруженных в HDF-N, находятся на красных смещениях меньше 1. Правда, надо иметь в виду: в основном это так называемые фотометрические красные смещения. Снять спектр галактики 25-й звездной величины, используя даже самые крупные наземные телескопы, – дело долгое, дорогое и трудное. Поэтому в поле HDF-N прямо измерили значения z только у 150 галактик из 3000, причем, естественно, у самых ярких. Для остальных моделировали цвета: распределения энергии в спектрах близких галактик сдвигали в красную сторону, «свора-

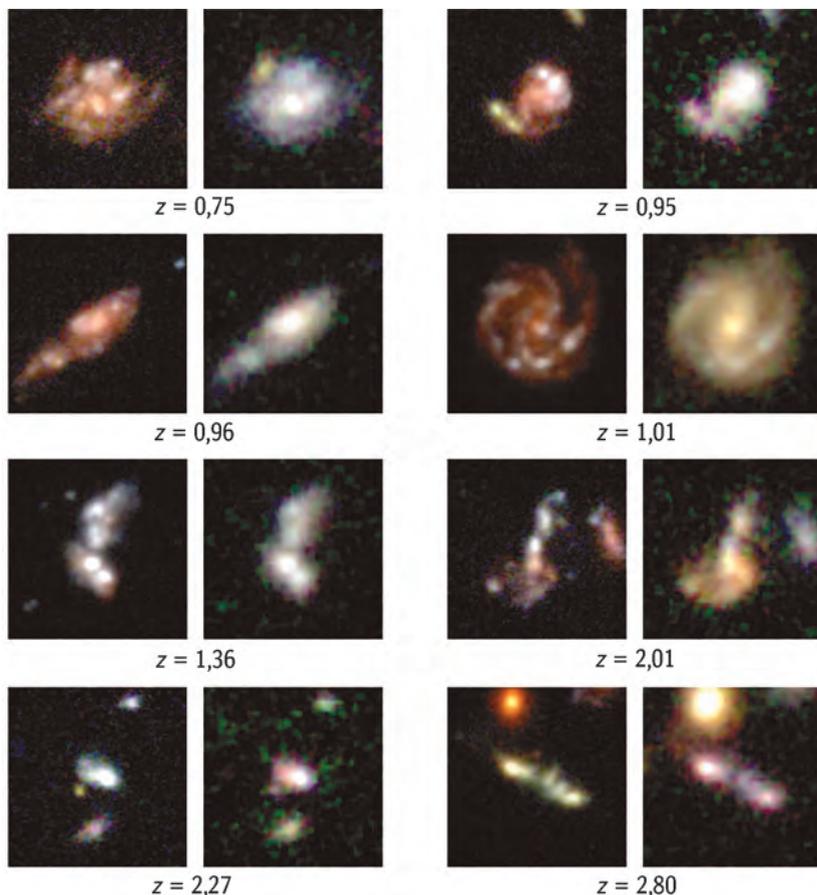


Рис. 1.6. Изменение морфологии типичной галактики с ростом красного смещения в Глубоком хаббловском поле. В каждой паре снимков левое изображение получено в оптическом диапазоне спектра, а правое – в ближней инфракрасной области на длине волны 2 мкм.

чивали» с кривыми реакции фильтров и смотрели, как меняется видимый цвет в зависимости от z . Совпал при каком-то конкретном красном смещении модельный цвет с наблюдаемым для некоей галактики – вот вам и фотометрическое z .

По всем 150 галактикам, у которых красное смещение измерено спектрально, калибровки фотометрических z , естественно, были проверены; авторы методики уверяют, что точность фотометрических красных смещений, определенная как $(z_{\text{ph}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}})$, луч-

ше 5%. Среди того большинства галактик, у которых $z < 1$, опять же большую часть представляют слабые голубые галактики с нерегулярной морфологией, и относительное количество таких галактик явно растет с z . Однако на $z \leq 1$ наблюдаются и яркие представители всех хаббловских морфологических типов. Например, в правом нижнем углу HDF-N (рис. 1.5) видна роскошная спиральная галактика, развернутая плашмя; ее красное смещение $z = 1,01$. Статистический анализ показывает, что в интервале $1 > z > 0$ ни число, ни характерные светимости и размеры эллиптических и спиральных галактик не изменились: все крупные галактики, которых мы видим рядом с нами, уже сформировались к эпохе $z \approx 1$, т. е. 8 млрд лет назад. Однако картина резко меняется на $z > 1,5$: в HDF-N нет ни одной галактики с большим z , которые имели бы правильную морфологию, а всего их там несколько десятков. Характерное изменение морфологии с z можно проследить, например, на рис. 1.6 (взяты из обзора Ferguson et al., 2000): галактики на $z > 2$, как правило, «множественные», т. е. представляют собой скопления сгустков неправильной формы. Линейные размеры сгустков значительно меньше, чем типичные размеры современных галактик, — их диаметры меньше 1 кпк.

Сторонники иерархической концепции, т. е. гипотезы формирования больших галактик путем слияния мелких фрагментов, обрадовались, решив, что в HDF-N напрямую виден этот процесс на красных смещениях $z = 2 \div 3$. Однако скептики тут же выдвинули свои возражения. Во-первых, существует космологическое ослабление поверхностной яркости — эффект Толмена, пропорциональный $(1+z)^4$, — и значит, на больших красных смещениях мы можем не увидеть обычные диски галактик, а будем видеть только самые яркие области звездообразования в них; у современных молодых звездных комплексов как раз подходящие размеры. Во-вторых, на $z > 2$ в оптическую область спектра, где наблюдала WFPC2, из-за красного смещения попадает уже далекая ультрафиолетовая область спектра в собственной системе длин волн галактики, а ультрафиолетовая морфология галактики может сильно отличаться от оптической, опять же из-за очагов звездообразования. Последнее возражение удалось отчасти снять после того, как HDF-N отнаблюдала с прибором NICMOS на 1,1 мкм и 1,6 мкм и посмотрели уже на оптическую (в системе длин волн галактик) морфологию тех же самых далеких объектов; оказалось, что она качественно не отличается от морфологии, на-

блюдавшейся с WFPC2 (на рис. 1.6 слева – изображения галактик, полученные с WFPC2, а справа – полученные с NICMOS). Однако первое возражение пока еще никто не опроверг.

Вообще-то наблюдательные поиски галактик в процессе их формирования начались задолго до запуска космического телескопа «Хаббл». Еще в 1970-х годах усилиями сначала Пиблса и Патриджа, а потом Беатрис Тинсли, которая изобрела метод эволюционного спектрофотометрического моделирования, стал очень популярен такой образ новорожденной эллиптической галактики: «10 миллионов Туманностей Ориона». Действительно, цвета близких эллиптических галактик очень красные, и они свидетельствуют в пользу того, что все звездообразование в этих галактиках закончилось в первый миллиард лет их жизни. Между тем самые крупные из них содержат до $10^{12} M_{\odot}$ звезд. Разделив одно на другое, получаем на заре формирования эллиптической галактики темп звездообразования (SFR, Star Formation Rate) до $1000 M_{\odot}$ в год! Для сравнения – в современных крупных спиральных галактиках в среднем $SFR \approx 1 M_{\odot}$ в год. Спектрофотометрические модели предсказывают, что при текущем $SFR \approx 1000 M_{\odot}$ в год галактика должна быть очень яркой – примерно как квазар, т. е. на 4 звездные величины ярче, чем сегодня, – а также голубой и с мощной эмиссионной линией водорода Ly α в спектре.

Вот таких «зверей» и искали весьма активно на небе в 1970–1980-е годы, сначала с фотографической техникой, а потом уже и с помощью ПЗС-приемников. К 1978 году был закончен первый глубокий подсчет галактик Крона: он считал их в двух фильтрах, голубом и красном, и обнаружил, что в В-лучах слабых галактик 23–24-й звездной величины гораздо больше, чем можно было предсказать, исходя из парадигмы пассивной эволюции, т. е. из предположения, что на любом z галактики такие же и в том же количестве, что и рядом с нами. Этот результат вдохновил Тинсли: она произвела необходимые модельные расчеты и объявила, что среди «избыточных» слабых голубых галактик Крона должно быть много далеких, на $z > 3$, эллиптических галактик в момент их основной эпохи звездообразования. Она не дожидаясь результатов массовой спектроскопии слабых голубых галактик; всем остальным заинтересованным исследователям эти результаты принесли разочарование: «избыточные» слабые голубые галактики оказались все на $z < 1$, с основной концентрацией между $z = 0,5$ и $z = 0,8$. Выше уже упоминалось, что на $z = 0,8 \div 1$

все спиральные и эллиптические галактики уже «на месте», т. е. их тогда было столько же, сколько и сейчас; так что слабые голубые галактики не могут быть их предшественниками. Вместе с тем они не могут иметь отношение и к современным неправильным галактикам (Irr) — их намного больше, они в среднем массивнее и имеют практически солнечный химический состав межзвездной среды, тогда как близкие Irr-галактики обеднены металлами. Что это за население и куда оно потом делось, почему мы не видим потомков слабых голубых галактик Крона рядом с нами — все эти проблемы до сих пор не решены, и нет даже разумных предположений на этот счет.

Первичные эллиптические галактики продолжали искать в глубоких обзорах, в основном ожидая от них яркую Ly α -эмиссию. Точность и глубина измерений с появлением новых детекторов всё улучшались, а первичные галактики всё не находились. К 1995 году, когда предел обнаружения оказался в несколько раз ниже теоретических ожиданий для молодых эллиптических галактик, был наконец сделан вывод, что по крайней мере до $z \approx 5$ «первичных» галактик нет. Какие тому могут быть объяснения? Во-первых, пыль. После того как полный обзор неба сделал инфракрасный спутник IRAS, к концу 1980-х годов, уже все знали, что галактики с самым мощным в современную эпоху звездообразованием и соответственно с самой высокой болометрической светимостью в оптике и в ультрафиолете почти не видны. Их вспышки звездообразования полностью погружены в межзвездную пыль, и все ультрафиолетовое и видимое излучение молодых звезд не выходит из галактик наружу, а перехватывается пылью, которая сильно нагревается и очень ярко светит в инфракрасном диапазоне спектра.

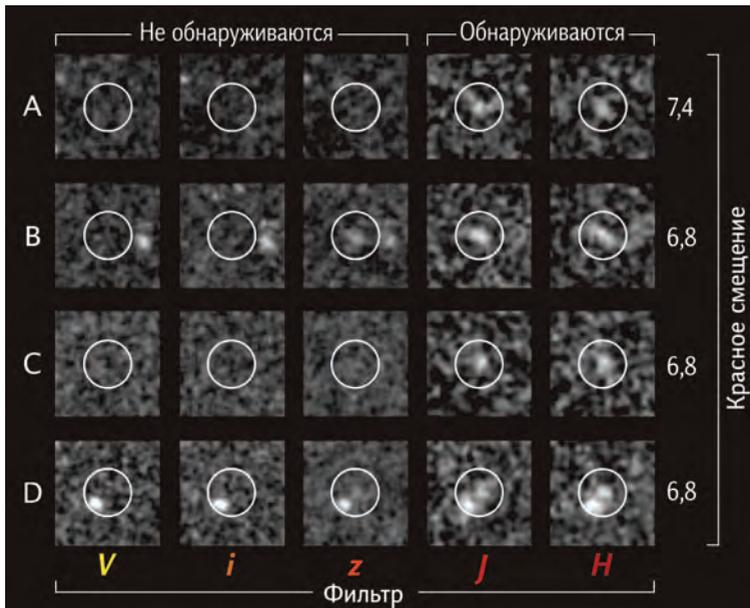
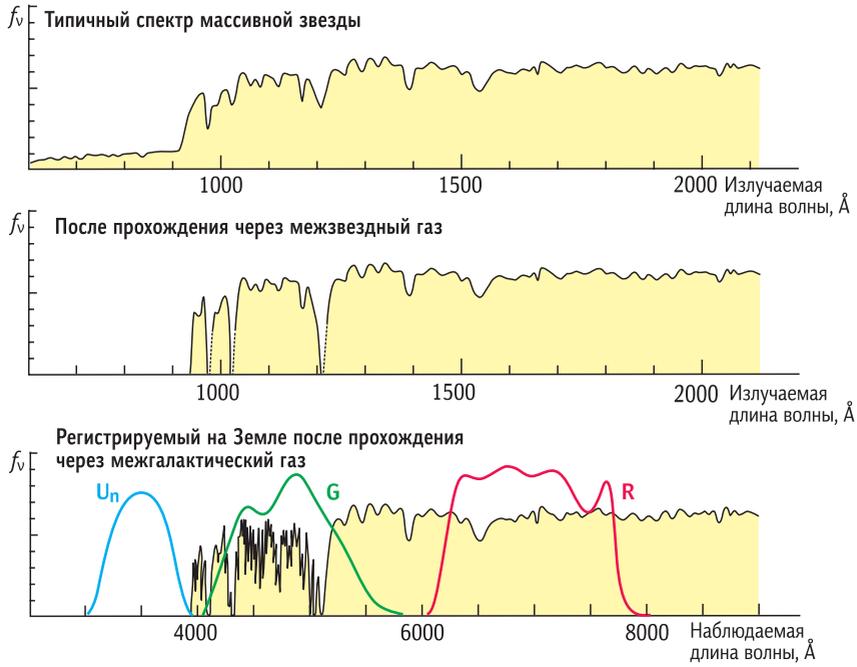
Может быть, и первичные вспышки звездообразования на $z = 4 \div 5$ тоже заэкранированы пылью? Оппоненты возражали: если вспышка звездообразования первична, то металлов еще вовсе нет, звезды не успели их создать, а значит, не может быть и пыли. Но сейчас, измеряя эмиссионные линии различных элементов в спектрах квазаров на больших z , вплоть до $z = 6,28$, исследователи убедились, что на $z = 5 \div 6$ металлы уже были, и в оболочках квазаров металличность даже превосходит солнечную. Следовательно, пыль на этих красных смещениях тоже есть, и ее даже может быть много. Откуда все это там взялось — отдельный вопрос, но сам факт надежно установлен.

Однако кроме пыли существует и другое возможное объяснение отсутствия ярких «первичных» галактик, и оно особенно нравится космологам — сторонникам иерархической концепции формирования галактик. Что если первичные вспышки звездообразования происходили не в таких огромных конгломератах, как современные эллиптические галактики, а в относительно небольших облаках, $10^7 \div 10^8 M_{\odot}$, и поначалу, на $z = 5 \div 6$, образовывались только карликовые галактики? Масштабы «сотни Орионов» выглядят уже достаточно скромно, и через всю Метагалактику мы их, конечно, не разглядим. Потом карлики в ходе динамической эволюции должны были многократно сливаться и к сегодняшнему дню собраться в массивные сфероидальные звездные системы. Эта альтернатива тоже дает решение проблемы отсутствия ярких первичных галактик — но способна ли она пройти и другие наблюдательные тесты?

Между прочим, сейчас уже нашли на $z = 3 \div 7$ целое население достаточно массивных ($M \geq 10^{10} M_{\odot}$) галактик, предположительно переживающих свою первую серьезную эпоху звездообразования. Это так называемые Ly-break галактики (далее LBG): их нашли по голубому обрыву спектра за границей лаймановского континуума (в системе длин волн галактики). Дело в том, что если в галактике изначально много нейтрального водорода, как мы этого ожидаем для галактики, только-только приступившей к образованию звезд, то весь ее лаймановский континуум уйдет на ионизацию этого газа, и в спектре на волнах короче $\lambda_0 = 912 \text{ \AA}$ ничего не останется. Рис. 1.7 иллюстрирует технику поиска LBG-галактик, в данном случае на $z = 7$: в фильтре i ($\lambda_c = 7500 \text{ \AA}$) галактики не видно, а в фильтре J ($11\,000 \text{ \AA}$) и в более красных она видна превосходно — значит, с большой долей вероятности это Ly-break галактика на $z \approx 7$.

В основном благодаря усилиям Чарльза Стейделя (Steidel, 1999) сейчас известно уже несколько тысяч таких объектов и подведены первые статистические итоги. Так, по своим свойствам, в том числе и по характерной светимости (а значит, скорее всего, и по массе), LBG-галактики на $z = 3$, $z = 4$ и $z = 5$ идентичны друг другу. Это означает, что процесс формирования звездного населения в этих галакти-

Рис. 1.7. *Вверху* — иллюстрация методики поиска далеких (Ly-break) галактик: Steidel (1999). *Внизу* — картина «проявления» далекой галактики при сдвиге полосы наблюдения в красную сторону. Из запасов NASA/ESA.



ках был достаточно затяжным. В спектрах половины LBG-галактик вовсе не оказалось Ly α -эмиссии, а в остальных она весьма скромная; да и темпы звездообразования, оцененные по потоку в ультрафиолете (в системе галактики), оказались в среднем весьма умеренными, от 8 до 25 M_{\odot} /год, что согласуется с идеей о большой продолжительности у них эпохи звездообразования. Есть предположение, что LBG-галактики — это будущие балджи современных дисковых галактик ранних типов; впрочем, доказать это трудно. Любопытно, что после того как была оценена средняя плотность на небе пересчитанных на довольно больших площадях LBG-галактик, выяснилось, что в HDF-N количество LBG-галактик в несколько раз меньше среднего ожидаемого (Steidel et al., 1996b). То есть в плане средней эволюции галактик на больших z Северное глубокое поле «Хаббла» оказалось совершенно нетипичным, что неудивительно, учитывая его малые размеры. Тогда насколько же репрезентативна статистика морфологических типов галактик, которую астрономы с энтузиазмом изучают по глубоким полям «Хаббла» в течение уже многих лет?!

