

Эволюция галактик: от больших z до современной эпохи

В.П. Решетников¹

*Астрономический институт им. В.В. Соболева,
Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Петродворец,
Университетский просп. 28, Российская Федерация*

Рассматриваются проблемы, связанные с обнаружением и исследованием далеких галактик. Суммируются основные наблюдательные характеристики (морфология, распределение яркости, химический состав, функция светимости и др.) для галактик с $z \sim 1$ и $z > 5$. Обсуждаются современные численные и полуаналитические модели формирования и эволюции галактик.

1. Введение

Мы живем в эволюционирующей Вселенной, характеристики которой, включая свойства ее основных оптических “кирпичиков” – галактик, меняются со временем. Это утверждение кажется очевидным. Действительно, характерные времена эволюции звезд сопоставимы с хаббловским временем и, следовательно, состоящие из звезд галактики также должны менять свои характеристики со временем (в первую очередь – светимости и показатели цвета). Наблюдая все более далекие и, значит, все более молодые объекты, можно надеяться увидеть *другие*, непохожие на окружающие нас, галактики – галактики в процессе своего формирования.

До относительно недавнего времени наблюдательные данные, свидетельствующие об изменении характеристик галактик с z , были лишь фрагментарными. На протяжении ряда лет едва ли не единственным примером такого рода было обнаружение повышенной доли голубых галактик в далеких – с красным смещением

¹resh@astro.spbu.ru

$z \geq 0.3$ – богатых скоплениях галактик (так называемый “Butcher–Oemler effect”). Основной причиной такого положения вещей, естественно, являлось явно недостаточное для изучения далеких объектов развитие наблюдательной техники.

Чтобы наглядно представить себе сколь сильно возросли за последние десятилетия наблюдательные возможности астрономии, рассмотрим галактику с видимой звездной величиной $V \sim 23^m$ и угловым размером $\sim 1''$ на красном смещении $z \sim 1$.

Тридцать лет назад, в середине 70-х годов прошлого века, единственное, что удалось бы измерить у такой галактики – фотографические звездные величины в одном–двух фильтрах.

В середине 80-х использование ПЗС-приемников уже позволяло выполнить интегральную фотометрию в нескольких фильтрах, измерить характеристики эмиссионных и абсорбционных линий и оценить красное смещение.

В середине 90-х наблюдения на Космическом телескопе Хаббл дали возможность исследовать морфологию и выполнить поверхностную фотометрию галактик с угловым разрешением $\sim 0.''1$ (на $z = 1$ этому разрешению соответствует линейный размер 0.8 кпк). С помощью наземных наблюдений на крупнейших телескопах становится возможным построить распределение энергии в широком диапазоне длин волн – от УФ до ИК.

Начиная со второй половины 90-х можно получать динамические данные – строить кривые вращения для спиральных галактик и оценивать дисперсии скоростей звезд для эллиптических галактик на 8 и 10-метровых наземных телескопах.

Как видно из этой короткой сводки, для реального исследования далеких объектов потребовался резкий скачок в развитии наблюдательной техники – использование внеатмосферных наблюдений и переход к наземным телескопам с диаметром зеркала 8 и более метров.

В следующих разделах этого обзора будет рассказано о сложностях изучения далеких галактик, будут кратко суммированы наблюдательные данные о галактиках на $z \sim 1$ и $z > 5$ (основное внимание будет уделено структуре самих галактик) и обсуждены современные модели формирования и эволюции галактик.

2. Проблемы изучения далеких галактик

2.1. Космологическое ослабление яркости

Первая проблема – это так называемое *космологическое ослабление поверхностной яркости*. Принято считать, что поверхностная яр-

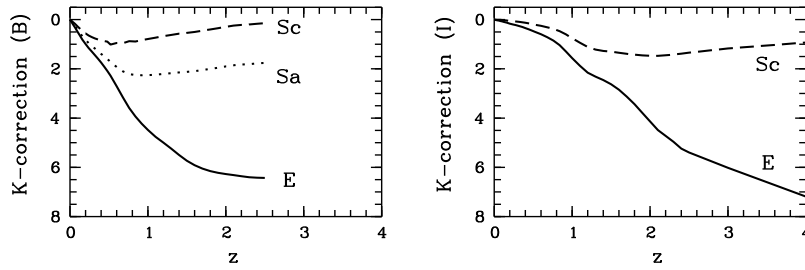


Рис. 1. Величины K -поправок (в звездных величинах) в фильтрах B (слева) и I (справа) для галактик разных типов (Пожианги, 1997).

кость не зависит от расстояния до объекта, однако это справедливо только для стационарной Вселенной. В расширяющейся Вселенной яркость зависит от красного смещения:

$$I_{obs} = \frac{I_{true}}{(1+z)^4},$$

где I_{obs} – это наблюдаемая болометрическая поверхностная яркость объекта, имеющего красное смещение z , I_{true} – поверхностная яркость объекта в покоящейся, связанной с самим источником, системе отсчета.

Из этой формулы видно, что расширение Вселенной приводит к очень быстрому падению поверхностной яркости с ростом z . Объекты с $z = 1$ имеют в 2^4 раз меньшие яркости (или, в звездных величинах, $\Delta\mu = 3^m$) по сравнению с аналогичными объектами вблизи нас. Галактики с $z = 5$ ослабевают на 8^m . Следовательно, даже с помощью космических наблюдений среди предельно далеких галактик нам доступны лишь имеющие очень высокую поверхностную яркость (например, за счет мощной вспышки звездообразования).

Падение яркости с увеличением z (наряду с влиянием K -поправки – см. далее) приводит к еще одной наблюдательной проблеме – при сравнении линейных размеров галактик, наблюдаемых на разных расстояниях, нельзя использовать их изофотные (измеренные в пределах фиксированного значения поверхностной яркости) диаметры.

2.2. K -поправка

Второй затрудняющий исследования фактор состоит в том, что при наблюдении движущегося источника мы регистрируем в данном интервале длин волн излучение, испущенное галактикой в другом – смещенном – диапазоне. Исправление наблюдений за этот эффект называется K -поправкой.

У галактик с большими красными смещениями в оптическом и ИК диапазонах мы наблюдаем излучение, испущенное в коротковолновой области спектра. Например, излучение с $\lambda \sim 1500 \text{ \AA}$ от галактики с $z = 2.7$ будет наблюдаться при $z = 0$ в полосе V . Если эта галактика удалена на $z \sim 10$, то ее УФ излучение будет фиксироваться в фильтре H . Основная проблема при учете K -поправки состоит в том, что распределение энергии в коротковолновой области спектров галактик известно плохо и поэтому значение этой поправки для далеких галактик может быть очень неточным.

K -поправки для галактик разных морфологических типов в фильтрах B и I показаны на рис. 1. На рисунке видно, что относительный сдвиг полос излучения и приема может привести к сильному занижению реальной светимости внегалактического объекта. Следует также обратить внимание на немонотонность значений поправок для спиралей и их быстрый рост с изменением z для эллиптических галактик. Разное поведение $K(z)$ для объектов разных типов отражает значительные отличия в распределениях энергии в их спектрах.

Помимо полной светимости объекта, K -поправка сильно меняет и наблюдаемую морфологию галактик (этот эффект иногда называют “морфологической K -поправкой”). Например, если мы наблюдаем в полосе I галактику с $z = 1$, то ее распределение яркости и морфологию надо сравнивать не с данными в этой же полосе для близких галактик, а с характеристиками галактик в фильтрах U и B ($8000 \text{ \AA}/(1+z) = 4000 \text{ \AA}$).

2.3. Поправка за эволюцию

Далекие галактики могут находиться на более ранней стадии своей эволюции, когда их характеристики еще сильно отличались от тех, что мы наблюдаем при $z = 0$. Это сильно усложняет отождествление объектов на больших z с их существующими в настоящую эпоху “потомками”.

Характеристики галактик могут эволюционировать как за счет внутренних процессов (например, вековая (secular) эволюция – см. обзор О.К.Сильченко в этом сборнике), так и за счет внешних факторов (слияния с другими галактиками, поглощение спутников, ак-

креция газа, приливные возмущения и др.). Самый простой вариант эволюции – это так называемая “пассивная” фотометрическая эволюция. Понятие пассивной эволюции применимо в первую очередь к эллиптическим галактикам, которые в первом приближении можно рассматривать как объекты, возникшие в ходе короткой одиночной вспышки звездообразования. В последующем предполагается, что характеристики галактики (светимость, показатели цвета, химический состав) меняются просто за счет постепенной эволюции составляющих ее звезд. Такие изменения можно достаточно просто рассчитать и, тем самым, восстановить картину эволюции галактики. Этот подход, конечно, очень упрощен и применим даже не ко всем эллиптическим галактикам.

У спиральных галактик процесс звездообразования протекает на гораздо большей шкале времени, может быть сильно немонотонным (рис. 2) и их фотометрическая эволюция (и соответствующие поправки) могут быть оценены лишь очень приближенно.

2.4. Деградация разрешения

С увеличением z объекты отодвигаются от нас все дальше и их угловые размеры постепенно уменьшаются. Характерный размер типичной галактики с $z \sim 1$ составляет $1''$ – $2''$. Очевидно, что изучать структуру таких объектов с поверхности Земли практически невозможно, так как угловое разрешение при наблюдениях сквозь атмосферу в оптическом диапазоне составляет лишь $\sim 0.''5 - 1''$.

Важно отметить также, что заполненная материей Вселенная работает как гигантская гравитационная линза и поэтому угловые размеры объекта фиксированного линейного размера достигают минимума при $z \sim 1 - 2$, а затем начинают *увеличиваться*. Это приводит к тому, что даже относительно небольшие галактики с диаметром ~ 10 кпк разрешаются при космических наблюдениях с угловым разрешением $\sim 0.''1$ практически при любых z .

Выше были перечислены далеко не все проблемы, с которыми сталкиваются астрономы при изучении далеких галактик. Но даже этот перечень по крайней мере отчасти объясняет, почему реальный прогресс в этой области начался лишь с 90-х годов, когда появилось новое поколение наземных телескопов с диаметром зеркал 8–10 м и стал активно работать Космический телескоп Хаббл.

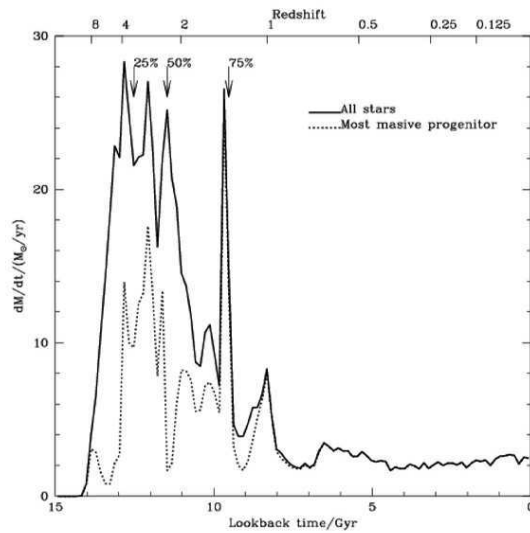


Рис. 2. Типичная история звездообразования в массивной спиральной галактике, согласно численным расчетам Абади и др. (2003). Вдоль вертикальной оси отложен темп звездообразования в $M_{\odot}/\text{год}$, вдоль верхней горизонтальной оси — z , вдоль нижней — время в млрд. лет ($t = 0$ соответствует современной эпохе). Стрелками указаны эпохи, когда сформировались 25%, 50% и 75% звезд галактики. Отдельные пики на кривой связаны с поглощением крупных спутников.

3. Галактики на $z \sim 1$

Основой наших знаний о структуре галактик на $z \sim 1$ (эти объекты удалены от нас примерно на половину Хаббловского времени или на $\sim 7\text{--}8$ млрд. лет) являются так называемые «глубокие поля», полученные на телескопе Хаббл, — HDF-N, HDF-S, HUDF, GOODS и пр. (Решетников, 2005).

3.1. Морфология

В близкой к нам области Вселенной оптическая морфология подавляющего большинства ярких галактик может быть описана в рамках простой классификации, предложенной Хабблом. Лишь при-

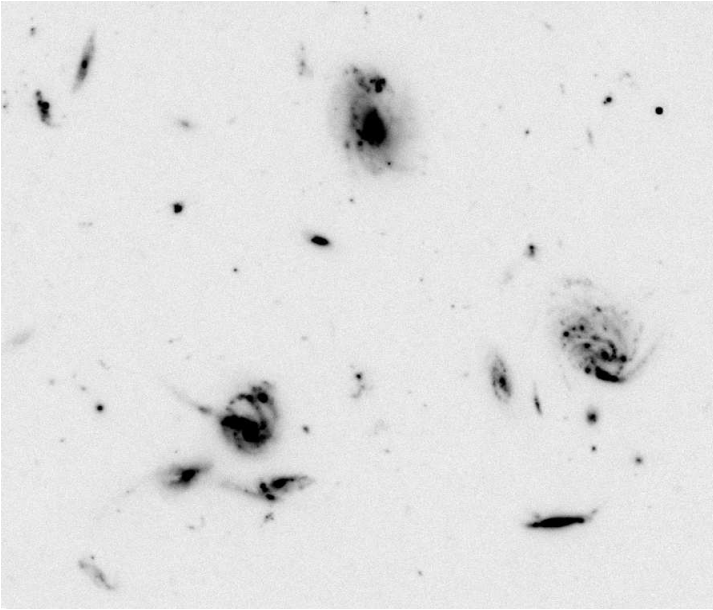


Рис. 3. Фрагмент ($\sim 23'' \times 27''$) Сверхглубокого поля Хаббла (HUDF) – см. <http://www.stsci.edu/hst/udf>.

мерно 5% близких объектов не вписываются в эту классификацию и их относят к неправильным или взаимодействующим галактикам. Ситуация с далекими галактиками совсем не такая. Как оказалось, при переходе к слабым и более далеким объектам растет доля галактик, не вписывающихся в Хаббловскую схему (Фергюсон и др., 2000). При $z \sim 1$ доля неправильных и асимметричных галактик достигает 30%–40% (см. примеры на рис. 3). Интересно, что при этом относительная доля галактик с барами остается примерно постоянной ($\sim 40\%$) по крайней мере вплоть до $z = 1$.

Статистика объектов в глубоких полях свидетельствует также, что доля взаимодействующих галактик и галактик в стадии слияния увеличивается с ростом z . Если аппроксимировать этот рост законом $(1+z)^m$, то данные наблюдений приводят к значению $m \approx 3 \pm 1$ для $z \leq 1$.

Увеличивается с z и частота встречаемости сильных вертикальных деформаций плоскостей дисков спиральных галактик (из-

гибов), что по крайней мере отчасти связано с увеличением частоты взаимодействий галактик.

3.2. Поверхностная яркость, показатели цвета, размеры

Для спиральных галактик при $z \sim 1$ характерны повышенная примерно на 1^m (в фильтрах B и V) поверхностная яркость и, в среднем, более голубые показатели цвета (рис. 4). Эллиптические галактики демонстрируют сходные зависимости своих характеристик от z (Рензини, 2006).

Распределение ярких спиральных галактик (со светимостями как у Млечного Пути и более) по линейным размерам (или по значениям экспоненциального масштаба диска) мало меняется к $z \sim 1$. Массивные спиральные галактики уже существовали в ту эпоху, и их дальнейшая эволюция происходила, по-видимому, преимущественно пассивно (раздел 2.3) – их светимости, показатели цвета и поверхностные яркости постепенно менялись за счет эволюции составляющих галактики звезд. При $z > 1$ ситуация меняется и линейные размеры галактик к $z \sim 3$ уменьшаются в 2–3 раза (Фергюсон, 2004).

3.3. Радиальное и вертикальное распределения яркости спиральных галактик

При описании радиального распределения поверхностной яркости дисков близких спиральных галактик как правило используют модель экспоненциального диска, хотя она может быть далеко не столь универсальна, как это обычно предполагается (Полен, Тружилло, 2006). Большая часть дисков далеких галактик не может быть представлена такой моделью одиночного экспоненциального диска. Среди них часто наблюдаются распределения яркости, которые лучше аппроксимируются двумя экспоненциальными дисками, причем масштаб внешнего диска может быть как меньше (усеченные диски), так и больше (диски с внешней оболочкой) соответствующего значения для внутреннего. Кроме того, среди спиральных галактик на $z \sim 1$ много объектов входят в состав взаимодействующих систем и их наблюдаемые фотометрические профили сильно искажены и асимметричны.

Исследования видимых “с ребра” спиральных галактик ряда глубоких полей (HDF-N, HDF-S и HUDF) привели к выводу о повышенной в 1.5–2 раза толщине звездных дисков галактик при $z \sim 1$. Это заключение основано на анализе отношений радиального и вертикального масштабов яркости. Причинами такого отличия могут являться, например, пониженная по сравнению с близкими галак-

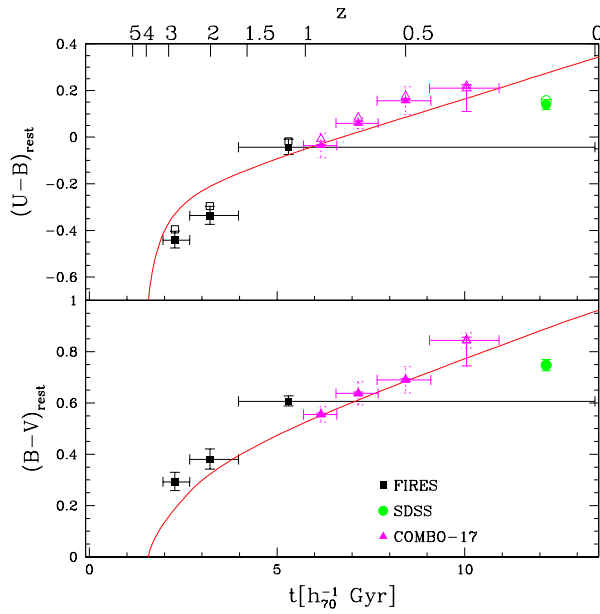


Рис. 4. Средние показатели цвета звездного населения галактик (усредненные в пределах 1 Мпк^3) в зависимости от z по данным различных обзоров (Рудник и др., 2003). Непрерывными линиями показана модель эволюции показателей цвета образовавшегося при $z = 4$ звездного населения с экспоненциально убывающим темпом звездообразования с характерной шкалой $\tau = 6 \cdot 10^9$ лет.

тиками поверхностная плотность дисков, взаимодействие между галактиками, а также то, что к $z = 0$ диски могут еще немного вырасти в радиальном направлении и, тем самым, их относительная толщина уменьшится.

3.4. Соотношение Талли–Фишера

В настоящее время построены кривые вращения и получены оценки максимальных скоростей вращения для нескольких сотен спиральных галактик с $z \sim 0.5 - 1$. Это позволило изучить соотношение Талли–Фишера (зависимость между максимальной скоростью вра-

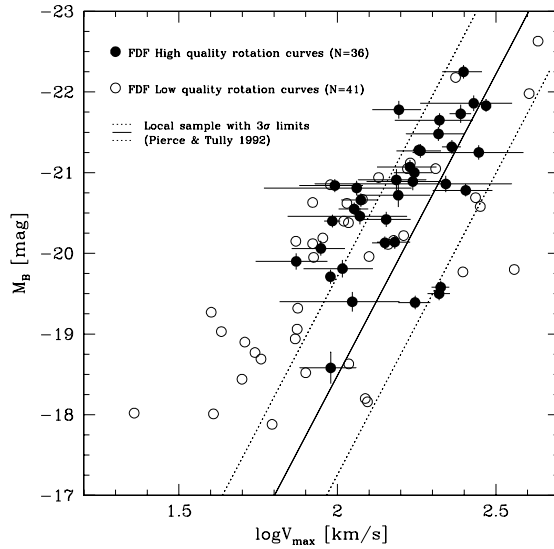


Рис. 5. Соотношение Талли–Фишера для спиральных галактик на $z \sim 0.5$ (Бом и др., 2004). Непрерывной прямой показано соотношение для близких галактик, линии из точек демонстрируют $\pm 3\sigma$ отклонения от средней зависимости.

щения и полной светимостью галактик) для объектов на разных z (см. пример на рис. 5). Как оказалось, характеристики массивных галактик уже находились на этой зависимости в той же области, что и характеристики близких объектов. При переходе к маломассивным галактикам наблюдается систематическое отклонение их параметров от локальной зависимости (рис. 5). Наиболее заметно этот эффект выражен в полосе B и почти отсутствует в длинноволновых фильтрах. Сравнивая положение галактик на соотношении Талли–Фишера на разных z , можно сделать вывод, что к $z \sim 1$ маломассивные спиральные галактики становятся ярче на $\Delta M(B) \approx 1^m - 1.^m5$. Эволюция светимости массивных галактик выражена гораздо слабее.

По-видимому, существует эволюция и динамических характеристик галактик. Согласно Флоресу и др. (2006), при $z \sim 0.6$ около половины всех галактик демонстрируют сложную кинематическую

структуру, свидетельствующую о гравитационном взаимодействии, слияниях, сильных истечениях вещества. Примерно 40% ярких галактик не находятся в динамическом равновесии и их поле скоростей не может быть описано моделью вращающегося диска.

3.5. Химический состав

В многочисленных работах исследовалось относительное содержание кислорода в газовых подсистемах спиральных галактик вплоть до $z \sim 1$. Содержание кислорода обычно характеризовалось параметром $R_{23} = ([OIII]\lambda\lambda 4959, 5007 + [OII]\lambda 3727)/H\beta$, прокалиброванным по данным для близких галактик. Основным результатом работ явилось обнаружение эволюции зависимости между светимостью галактик, измеренной в оптических и ИК-фильтрах, и содержанием кислорода O/H. Оказалось, что, как и в случае соотношения Талли–Фишера, характеристики ярких (массивных) спиральных галактик при $z \geq 0.5$ уже находились в той же области, что и характеристики близких галактик. Слабые галактики демонстрируют систематически более низкие значения содержания кислорода по сравнению с близкими галактиками той же светимости.

3.6. Соотношения для эллиптических галактик

Анализ зависимости цвет–величина и соотношения Корменди для эллиптических галактик скоплений и поля показал четкие свидетельства эволюции как яркости, так и показателей цвета галактик. Эллиптические галактики на $z \sim 1$ имеют в среднем более высокие поверхностные яркости и более голубые показатели цвета. Наблюдаемая эволюция этих характеристик количественно согласуется с тем, что звездообразование в галактиках завершилось еще при $z \geq 3$ и с тех пор они эволюционируют пассивно (Рензини, 2006).

Эти заключения были подтверждены и исследованием фундаментальной плоскости для галактик на разных z . Фундаментальная плоскость с изменением красного смещения объектов остается параллельной самой себе, а величина сдвига согласуется с пассивной эволюцией галактик после их формирования. Сдвиг фундаментальной плоскости свидетельствует об изменении с z светимости галактик и, соответственно, об изменении отношения масса–светимость: $\Delta \log M/L_B \approx -0.5z$.

На рис. 6 показана эволюция отношения M/L_B для массивных ($M > 10^{11} M_\odot$) эллиптических галактик (верхняя кривая линия – аппроксимация наблюдательных данных для галактик скоплений, нижние кривые – для галактик поля). Показанные на рисунке данные согласуются с образованием эллиптических галактик скоп-

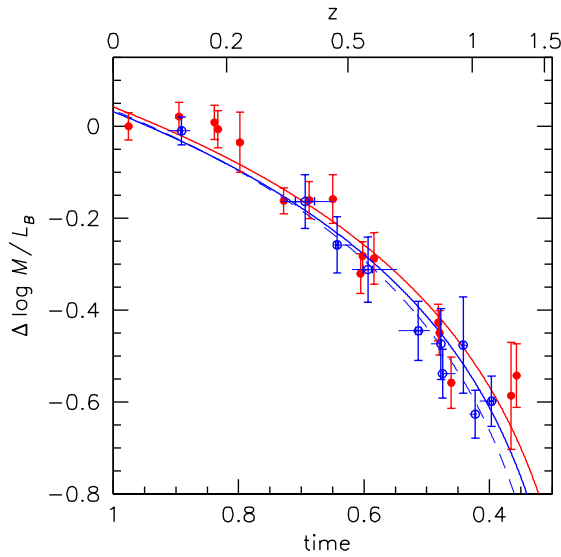


Рис. 6. Эволюция отношения масса–светимость для эллиптических галактик поля и скоплений (ван Доккум, ван дер Марел, 2006).

лений и поля при $z \approx 2$ (для НФМ Солпитера). Средний возраст звездного населения массивных галактик поля оказался лишь на $\sim 4\%$ меньше возраста звездного населения массивных галактик скоплений (ван Доккум, ван дер Марел, 2006). Существуют наблюдательные указания на то, что эволюция эллиптических галактик может зависеть от их массы – маломассивные галактики демонстрируют больший разброс значений M/L и меньший, в среднем, возраст звездного населения.

В скоплениях галактик на $z \sim 1$ уже существовало соотношение морфология–плотность, хотя его форма отличалась от известного для близких скоплений (в основном, за счет дефицита галактик типа S0 и избытка спиральных галактик).

3.7. Функция светимости

Функция светимости галактик систематически меняется с ростом z . Для ярких эллиптических галактик эта эволюция может быть описана как чисто пассивная эволюция светимости (от $z = 1$ к $z = 0$ галактики “тусклеют” на $\Delta M(B) \approx 1^m$) при сохранении про-

пространственной плотности. Доля слабых эллиптических галактик с ростом z уменьшается.

Результаты для спиральных галактик показывают значительный разброс, однако можно считать, по-видимому, установленным, что пространственная плотность спиральных галактик поздних типов и галактик с активным звездообразованием к $z \sim 1$ заметно увеличивается.

Основной вывод, который можно сделать на основе проведенного выше анализа, – при $z \leq 1$ наблюдается эволюция практически всех крупномасштабных характеристик галактик. Эта эволюция дифференциальна – массивные (с массой порядка Млечного Пути и более) спиральные и эллиптические галактики к $z \sim 1$ уже сформировались и их последующая эволюция является в основном пассивной, эволюция менее массивных галактик выражена гораздо сильнее.

4. Галактики на $z > 5$

От галактик на $z \sim 1$ теперь перейдем, минуя “пустыню красных смещений” (redshift desert) на $z \sim 1 - 2.5$ ¹, к самым далеким объектам Вселенной. Красным смещениям $z > 5$ соответствует возраст Вселенной (время, прошедшее после начала космологического расширения) ≤ 1 млрд. лет и, следовательно, объекты с такими z должны быть очень молодыми, формирующимися галактиками.

4.1. Поиск далеких галактик

Технические сложности обнаружения и исследования галактик с $z > 5$ столь велики, что это стало возможным лишь несколько лет назад. В настоящее время известно уже несколько десятков таких объектов, имеющих спектроскопические оценки z , причем самый далекий из них находится на $z = 6.96$ (Иуе и др., 2006).

Существует несколько методов выделения галактик на больших z . Одним из наиболее эффективных способов отбора кандидатов в такие объекты является анализ широкополосных показателей цвета с целью обнаружения галактик с необычными цветами. Этот метод в первую очередь нацелен на поиск галактик со скачком распределения энергии в области лаймановского континуума (912 Å),

¹Это название обусловлено чисто техническими сложностями измерения красных смещений спектральными методами в этом диапазоне z .

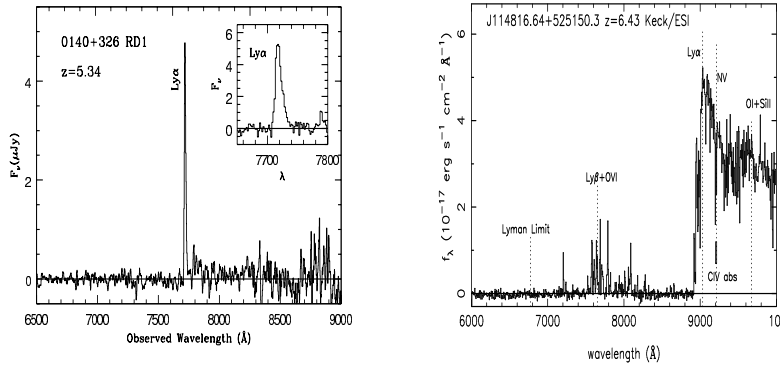


Рис. 7. Спектр галактики с $z = 5.34$ (слева) и спектр квазара с $z = 6.4$ (справа).

ожидаемым у галактик с активным звездообразованием. Из-за поглощения в облаках $L\alpha$, проецирующихся на луч зрения, у далеких галактик также “выедается” излучение в непрерывном спектре между 912 \AA и линией $L\alpha$. Это создает дополнительную спектральную особенность, позволяющую выделять далекие галактики по их показателям цвета. С помощью такого подхода уже обнаружено более тысячи объектов с $z > 2.5$, которые обычно называют Lyman-Break Galaxies или просто LBGs (Джиавалисико, 2002).

Второй часто используемый метод – это поиск галактик с сильной эмиссионной линией $L\alpha$ с помощью глубокой узкополосной фотометрии площадок на небесной сфере и с последующим спектральным изучением обнаруженных объектов. Найденные таким образом объекты часто называют “ $L\alpha$ -излучателями” ($L\alpha$ emitters или LAEs).

Далекие объекты ищут и находят в избранных сверхглубоких полях наземных и космических телескопов (Решетников, 2005), вблизи фоновых скоплений галактик, усиливающих благодаря гравитационному линзированию потоки от объектов, расположенных далеко за скоплениями, а также вблизи уже известных далеких галактик. Примеры спектров далекой галактики и квазара приведены на рис. 7

4.2. Характеристики галактик на $z > 5$

Объекты, обнаруживаемые на $z > 5$ – это, как правило, компактные ($\sim 1\text{--}5$ кпк), асимметричные объекты очень высокой поверх-

ностной яркости. Эквивалентные ширины линии $L\alpha$ в системе отсчета, связанной с галактиками, – десятки–сотни ангстрем, оценки темпа звездообразования по светимости в линии $L\alpha$, составляют $\sim 5\text{--}10 M_{\odot}/\text{год}$. Моделирование процесса звездообразования свидетельствует о том, что массы объектов достигают $\sim 10^9\text{--}10^{10} M_{\odot}$, а характерный возраст звездного населения – несколько сотен миллионов лет. Это означает, что звездообразование во многих таких (прото)галактиках началось при $z \geq 7\text{--}9$. Глобальная плотность заключенных в галактики звезд при $z \sim 6$ уже достигала $\sim 1\%$ современного значения.

Функция светимости LAEs не показывает значимых изменений в интервале z от 3 до 6 (оценки пространственной плотности LAEs в этом диапазоне красных смещений составляют $\sim 10^{-4} \text{ Мпк}^{-3}$), затем их пространственная плотность начинает уменьшаться. Это падение, возможно, связано с еще не закончившейся при $z > 6$ эпохой вторичной ионизации Вселенной, маскирующей присутствие областей звездообразования на больших z . Функция светимости LBGs, возможно, несколько меняется и LBGs на $z \sim 6$, в среднем, слабее, чем на $z \sim 3$. Пространственное распределение объектов с $z > 5$ во многих исследованных площадках показывает признаки существования крупномасштабной структуры.

Характеристики галактик, выделяемых на больших красных смещениях, в сильной степени искажены самой процедурой их отбора и поэтому неясно, в какой степени они отражают свойства всех объектов, реально существующих при $z > 5$. Наблюдаемые объекты могут быть “строительными блоками”, из которых впоследствии за счет взаимных слияний и аккреции вещества извне вырастут окружающие нас галактики. С другой стороны, некоторые из этих объектов могут представлять собой формирующиеся балджи массивных спиралей или эллиптические галактики.

5. Сценарии формирования и эволюции галактик

Немного упрощая, можно сказать, что существует два основных сценария формирования галактик. Первый был предложен в начале 60-х годов прошлого века Эггеном, Линден-Беллом и Сендиджем (1962). В рамках этого сценария наша Галактика образовалась в ходе сжатия одиночного протогалактического облака на относительно короткой шкале времени ($\sim 10^8$ лет). Этот сценарий иногда называют сценарием “моноклитного (или одиночного) коллапса” (monolithic collapse).

Впоследствии оказалось, что формирование нашей и других галактик должно было протекать более сложным образом (например, Сирл, Зинн, 1978), и, кроме того, в их образовании очень важную роль играет скрытая масса (или, как ее иногда называют, темная материя²). Современные значения космологических параметров, основанные на трехлетней работе спутника WMAP в сочетании с данными о крупномасштабном распределении галактик (обзоры 2dF и SDSS), таковы: $H_0=71$ км/с (значение постоянной Хаббла в современную эпоху), $\Omega_\Lambda=0.74$ (плотность темной энергии в долях критической плотности), $\Omega_b=0.044$ (плотность барионного вещества), $\Omega_{DM}=0.22$ (плотность небарионной скрытой массы). Как видно из этих чисел, вклад скрытой массы примерно в 5 раз превышает вклад обычного вещества и именно поведение этой темной материи должно было определять ранние этапы формирования и сгущивания галактик.

С конца 70-х годов XX века начал развиваться так называемый “иерархический сценарий” или “CDM-сценарий” рождения галактик (Вайт, Рис, 1978; Фал, Эфстатиу, 1980). Согласно иерархической модели, на первом этапе малые возмущения плотности бесстолкновительной темной материи растут за счет гравитационной неустойчивости и взаимных слияний. Когда контраст плотности увеличивается до $\delta\rho/\rho \sim 1$, возмущения обособливаются от космологического расширения и образуют гравитационно-связанные гало темной материи (рис. 8). Газ, первоначально перемешанный с частицами скрытой массы, участвует в коллапсе, но затем нагревается ударными волнами до тепловой (или “вириальной”) температуры темных гало.

На втором этапе происходит радиативное охлаждение газа и его аккреция к центрам темных гало. Еще на стадии до своего сжатия неоднородности плотности – составляющие их газ и скрытая масса – приобретают угловой момент за счет приливного взаимодействия с другими неоднородностями (механизм, впервые предложенный Фредом Хойлом еще в 1949 году). Поэтому аккреция газа при условии сохранения его углового момента приведет к формированию вращающегося газового диска, из которого затем за счет процесса звездообразования возникнет и звездный диск.

Различная история слияний протогалактических фрагментов и разный характер аккреции газа приводят к появлению галактик разных типов. Например, единовременная аккреция большого

²Не путать с темной энергией, обсуждаемой в докладе А.Д.Чернина в этом сборнике!

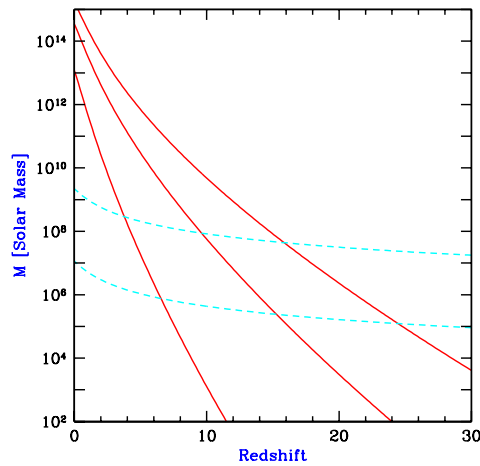


Рис. 8. Зависимость массы сформировавшихся темных гало от z (Баркана, Лоеб, 2001). Непрерывными линиями показаны массы гало, соответствующие 1σ , 2σ и 3σ флуктуациям плотности (снизу вверх). Пунктирными кривыми изображены зависимости, соответствующие минимальным вириальным температурам, требуемым для эффективного охлаждения атомарного газа (верхняя кривая) и газа с добавлением молекулярного водорода (нижняя кривая). Пересечение этих кривых показывает, что наиболее вероятная эпоха образования первых галактик – это $z \approx 10-20$ (или $\approx 200-400$ млн. лет после начала космологического расширения).

количества газа может привести к мощной вспышке звездообразования, которая временно приостановит или совсем исключит дальнейшее выпадение газа. Это один из вариантов рождения эллиптических галактик и балджей спиралей.

Дальнейшая эволюция галактик, в ходе которой они активно взаимодействуют со своим окружением (спутниками, другими галактиками, межгалактическим газом), продолжает изменять их характеристики. Например, поглощение маломассивных спутников может стимулировать рост балджей спиральных галактик, слияния объектов сравнимых масс заканчиваются образованием эллиптических галактик. Разнообразные внутренние неустойчивости в звезд-

ных и газовых дисках также приводят к медленной (т.н. вековой) эволюции их характеристик. Основные эффекты вековой эволюции (динамических процессов, действующих на длительной шкале времени) – это вертикальный “нагрев” дисков, образование баров, возможный рост псевдобалджей и т.п. (Корменди, Кенникат, 2004). Следовательно, наблюдаемые свойства окружающих нас галактик (см. обзор О.К.Сильченко в это сборнике) определяются сложной и отчасти случайной комбинацией как начальных условий при их формировании, так и последующей эволюцией, зависящей от множества внешних и внутренних факторов.

Основными методами изучения формирования и эволюции галактик в рамках иерархического сценария являются звездно- и газодинамические численные расчеты, дополняемые так называемыми полуаналитическими моделями (см., например, обзоры Авиллы-Риса, 2006 и Бауга, 2006). В полуаналитических моделях недостаточно хорошо поняты процессы, связанные с образованием галактик (например, звездообразование, обратное влияние рождающихся звезд на окружающую среду (feedback), охлаждение газа, рост сверхмассивных черных дыр в центрах галактик, влияние ультрафиолетового фонового излучения и т.п.), параметризуются простыми аналитическими выражениями. Сравнивая результаты расчетов с наблюдениями галактик на разных z , можно уточнять значения параметров или усложнять модели, выбранные для описания разных процессов.

На рис. 9 изображена общая схема проведения подобных расчетов. Как видно из этого рисунка, расчеты образования галактик объединяют самые разные разделы астрономии и космологии. Начальные условия задаются космологической моделью и спектром флуктуаций плотности. (Обычно предполагается, что флуктуации плотности представляют собой квантовые флуктуации, выросшие в период инфляции до макроскопических масштабов.) Далее требуется знать самые общие характеристики небарионной скрытой массы, построить историю слияний темных гало и рассчитать их структуру. Поведение космического газа – это центральная проблема в моделях формирования галактик. Физика охлаждения газа, процесс звездообразования, влияние звездного ветра, всплеск сверхновых, активных ядер галактик на формирующуюся галактику и на межгалактическую среду – все это пока описывается простыми феноменологическими моделями. Данные о звездообразовании в галактиках комбинируются с моделями химической и звездной эволюции, что позволяет рассчитать распределение энергии в их спектрах, а также распределение поверхностной яркости. В современных полуаналитических моделях (например, Шпрингел и др.,

2005) учитываются также процессы слияний между уже сформировавшимися галактиками, поглощение спутников, вековая эволюция структуры галактик и др. процессы.

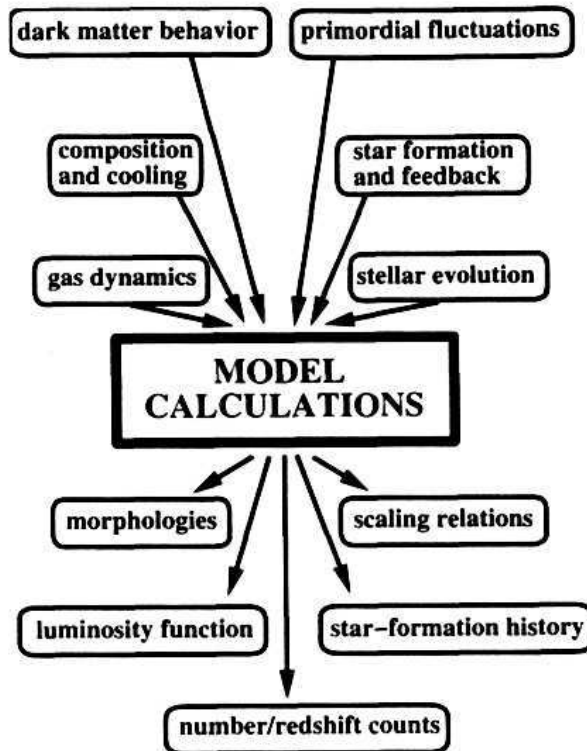


Рис. 9. Упрощенная схема, иллюстрирующая основные элементы полуаналитических моделей образования и эволюции галактик (Кол и др., 2000; Кил, 2002).

Результаты расчетов сравниваются с характеристиками реальных объектов (рис. 9) – с их морфологией, распределением яркости, размерами, функцией светимости, различными масштабными соотношениями (например, Талли–Фишера для спиральных галактик и фундаментальной плоскостью для эллиптических галактик) и т.д.

Каковы успехи иерархической модели? Одним из несомненных достижений является описание крупномасштабного распреде-

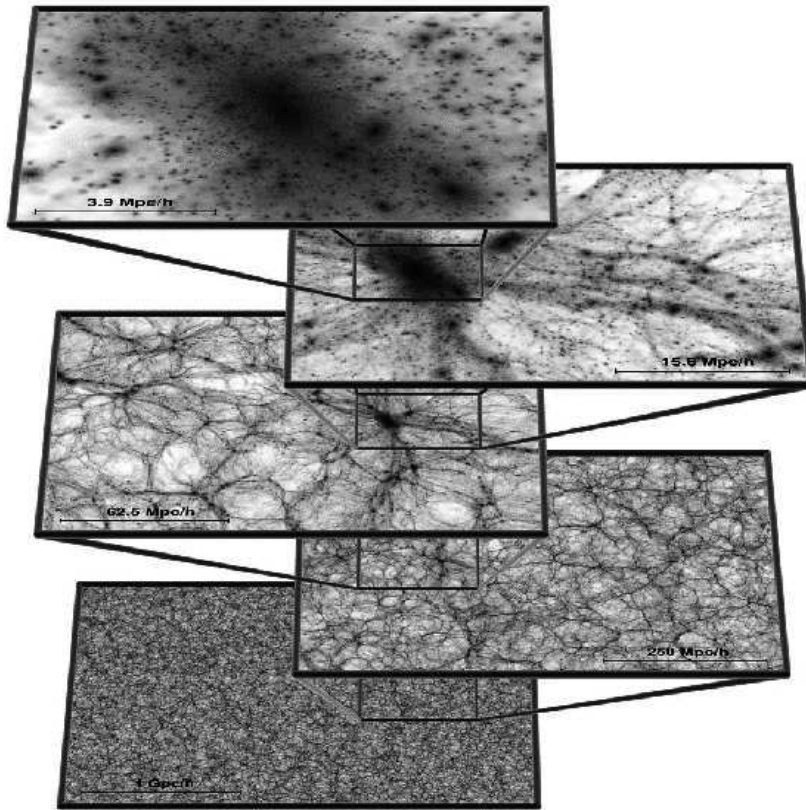


Рис. 10. Спроецированное распределение скрытой массы в настоящую эпоху (Шпрингел и др., 2005). Изображен слой толщиной 15 Мпк. На нижнем рисунке показано распределение на масштабах Гпк, на самом верхнем – на масштабах нескольких Мпк.

ления галактик. Это распределение определяется поведением скрытой массы, поскольку галактики образуются в центрах темных гало. На рис. 10 для примера показано распределение скрытой массы при $z = 0$ согласно самым детальным проведенным к настоящему времени численным расчетам (“Millennium Simulation” – Шпрингел и др., 2005). В этих расчетах прослежена эволюция распределения скрытой массы в кубической области размером 500 Мпк от $z = 127$

до $z = 0$. (Полное число частиц в этих вычислениях превысило 10^{10} !) В численные расчеты эволюции темной материи была добавлена полуаналитическая модель формирования галактик, позволившая найти для разных моментов времени координаты, скорости и индивидуальные характеристики для галактик ярче Малого Магелланового Облака в рассматриваемом объеме (их число превышает 10^7). Количественный анализ пространственного распределения модельных галактик при $z = 0$ дал очень хорошее согласие с данными для реальных галактик (2dF, SDSS и APM обзоры). Расчеты воспроизводят даже зависимость скучивания от светимости и показателей цвета галактик.

В рамках иерархической модели удается рассчитывать функцию светимости близких галактик, зависимость удельного темпа звездообразования во Вселенной от z . Модель предсказала, а затем это было подтверждено и наблюдениями, уменьшение размеров дисковых галактик с ростом красного смещения (см. раздел 3.2 статьи). Усредненная эволюция показателей цвета и поверхностной яркости также естественным образом вписывается в иерархический сценарий. Детальные расчеты, по-видимому, могут воспроизвести наличие массивных галактик на больших z и “анти-иерархический тренд”, состоящий в том, что темп звездообразования у массивных галактик в прошлые эпохи был выше, чем сейчас (эта проблема решается учетом влияния излучения активных галактических ядер на межгалактический газ). Есть и другие достижения, касающиеся описания самых общих, интегральных характеристик галактик. В то же время детальное описание структуры объектов до недавнего времени было за пределами возможностей расчетов (в первую очередь, из-за недостаточного разрешения). Однако в последние годы стали появляться и такие исследования (например, Говернато и др., 2006).

У иерархического сценария есть, конечно, и очевидные проблемы. Одной из самых обсуждаемых в последние годы являлась так называемая “проблема спутников”. Расчеты формирования галактик в Λ CDM космологии показали, что массивные спиральные галактики должны быть окружены целой свитой карликовых объектов, число которых должно примерно на порядок превышать реально наблюдаемое число спутников. Еще одно затруднение – в ранних расчетах наблюдалась катастрофическая потеря углового момента барионной составляющей модельных объектов, в результате чего диски спиральных галактик получались слишком компактными и яркими. Такие модельные галактики сильно отклонялись от соотношения Талли–Фишера для реальных галактик. В современных расчетах, в которых учитывается обратное влияние рождающегося

звездного населения и излучения активных ядер, принимается во внимание влияние фонового УФ-излучения и в которых используется высокое разрешение ($> 10^5$ частиц на одну галактику), эти проблемы отчасти уже преодолены (Говернато и др., 2006).

Известны и другие проблемы (например, несоответствие структуры центральных областей получаемых из расчетов темных гало с данными по кинематике центральных областей галактик), которые несомненно приведут к дальнейшему развитию и модификации иерархической модели.

6. Заключение

В последние годы произошел резкий скачок в наших знаниях о структуре галактик в более ранние космологические эпохи. Наблюдения свидетельствуют, что многие характеристики галактик к $z \sim 1$ претерпевают изменения – теряет свою универсальность Хаббловская классификация, значительно возрастает число взаимодействующих и сливающихся галактик, а также галактик с активным звездообразованием, возрастает поверхностная яркость и светимость, “толстеют” показатели цвета. Наблюдаемая эволюция дифференциальна – она почти незаметна для массивных галактик и хорошо выражена для маломассивных. К $z \sim 1$ в основном уже сформировались основные масштабные соотношения для ярких галактик – соотношение Талли–Фишера для спиральных галактик, фундаментальная плоскость и зависимость цвет–величина для эллиптических, зависимость морфология–плотность в скоплениях. Эти соотношения систематически отличаются от известных при $z = 0$, давая дополнительные свидетельства эволюции галактик. На еще больших z изменения становятся еще заметнее, однако и возрастают сложности в однозначной интерпретации наблюдаемых изменений (см. раздел 2).

В обзоре в самых общих чертах был описан иерархический сценарий образования и эволюции галактик в рамках Λ CDM космологии. Этот сценарий еще весьма несовершенен, и это вполне естественно, поскольку проблема образования галактик очень многогранна, сложна и ее решение невыводимо “из первых принципов”. Самосогласованное рассмотрение этой задачи требует объединения почти всех разделов астрофизики – от физики ранней Вселенной до эволюции звезд и космического газа. Кроме того, лишь в последние годы стали появляться массовые наблюдательные данные о галактиках на разных z , которые можно использовать для проверки теоретических моделей.

У современных моделей есть ряд несомненных достижений, которые позволяют надеяться, что некоторые базовые составляющие окончательной картины формирования и эволюции галактик уже известны. К таким ключевым элементам можно, по-видимому, отнести: близкий к гауссовому спектр первичных флуктуаций плотности, бесстолкновительную небарионную темную материю, гравитационную неустойчивость, последовательный рост галактик за счет слияний и внешней аккреции.

Наблюдения далеких галактик, а также численные расчеты их формирования и эволюции наглядно показывают, что образование галактик – это не событие, привязанное к определенной эпохе в прошлом, а процесс, отчасти продолжающийся и в наше время. Достижения последних лет позволяют надеяться, что будущие наблюдательные проекты (такие как JWST (James Webb Space Telescope – космический телескоп с диаметром зеркала 6.5 метров), ALMA (Atacama Large Millimeter Array), LOFAR (Low Frequency Array) и многие другие) и дальнейшее развитие теории позволят разобраться в особенностях этого процесса и в основных чертах решить проблему образования и эволюции галактик в течение одного–двух десятилетий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 06-02-16459.

Литература

- Абади и др. (M.G. Abadi, J.F. Navarro, M. Steinmetz, and V.R. Eke), *Astrophys. J.* **591**, 499 (2003).
- Авила-Рис (V. Avila-Reese), *astro-ph/0605212* (2006).
- Баркана, Лоеб (R. Barkana and A. Loeb), *Phys. Rep.* **349**, 125 (2001).
- Бауг (C.M. Baugh), *astro-ph/0610031* (2006).
- Бом и др. (A. Bohm, B.L. Ziegler, R.P. Saglia, et al.), *Astron. Astrophys.* **420**, 97 (2004).
- Вайт, Рис (S.D.M. White and M.J. Rees), *MNRAS* **183**, 341 (1978).
- ван Доккум, ван дер Марел (P.G. van Dokkum and R.P. van der Marel), *Astrophys. J.* *astro-ph/0609587* (2006).
- Говернато и др. (F. Governato, B. Willman, L. Mayer, et al.), *MNRAS* **374**, 1479 (2006).
- Джиавалиско (M. Giavalisco), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **40**, 579 (2002).
- Ие и др. (M. Iye, K. Ota, N. Kashikawa, et al.), *Nature* **443**, 186 (2006).

- Кил (W.C. Keel), *The Road to Galaxy Formation* (Chichester: Praxis Publishing, 2002).
- Корменди, Кенникат (J. Kormendy and R.C. Kennicutt), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 603 (2004).
- Кол и др. (Sh. Cole, C.G. Lacey, C.M. Baugh, and C.S. Frenk), *MNRAS* **319**, 168 (2000).
- Пожианти (B.M. Poggianti), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **122**, 399 (1997).
- Полен, Тружилло (M. Pohlen and I. Trujillo), *Astron. Astrophys.* **454**, 759 (2006).
- Рензини (A. Renzini), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **44**, 141 (2006).
- Решетников В.П., *Успехи физ. наук* **175**, 1163 (2005).
- Рудник и др. (G. Rudnick, H.-W. Rix, F. Franx, et al.), *Astrophys. J.* **599**, 847 (2003).
- Сирл, Зин (L. Searle and R. Zinn), *Astrophys. J.* **225**, 357, (1978).
- Шпрингел и др. (V. Springel, S.D.M. White, A. Jenkins, et al.), *Nature* **435**, 629 (2005).
- Фал, Эфстатиу (S.M. Fall and G. Efstathiou), *MNRAS* **193**, 189 (1980).
- Фергюсон и др. (H.C. Ferguson, M. Dickinson, and R. Williams), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **38**, 667 (2000).
- Фергюсон и др. (H.C. Ferguson, M. Dickinson, M. Giavalisco, et al.), *Astrophys. J.* **600**, L107 (2004).
- Флорес и др. (H. Flores, F. Hammer, M. Puech, et al.), *Astron. Astrophys.* **455**, 107 (2006).
- Эгген и др. (O.J. Eggen, D. Lynden-Bell, and A.R. Sandage), *Astrophys. J.* **136**, 748 (1962).