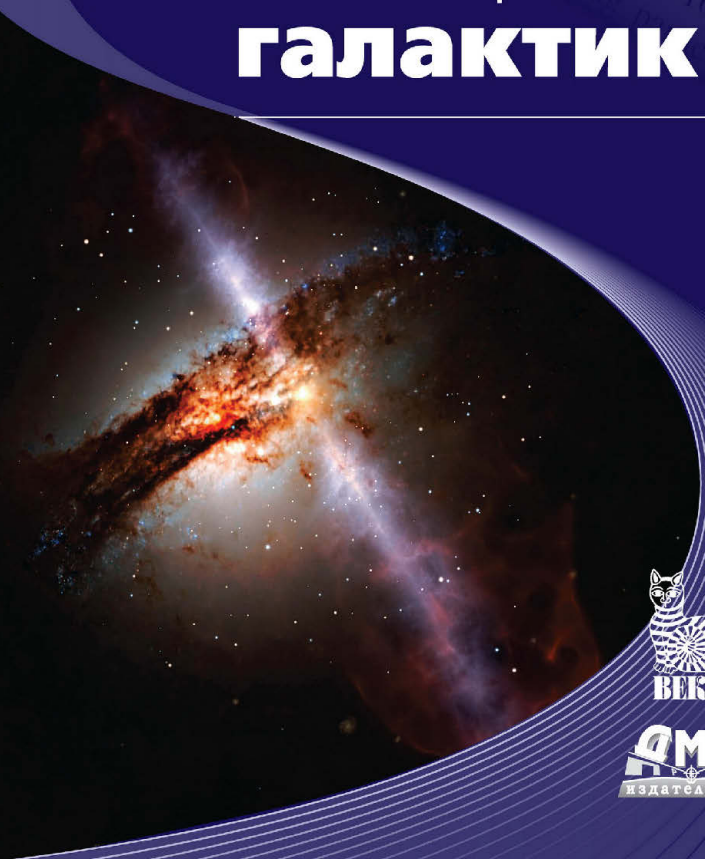
О. К. Сильченко

Происхождение и эволюция **галактик**



ВЕК2
ДМК
издательство

УДК 524
ББК 22.67
С36

Сильченко, Ольга Касьяновна.
К68 Происхождение и эволюция галактик / О. К. Сильченко ; под ред. В. Г. Сурдина. — Эл. изд. — 1 файл pdf : 224 с. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-224-3

В книге представлены современное состояние нашего знания и личные представления автора о формировании и эволюции галактик во Вселенной. Галактики — крупные образования, состоящие из миллиардов звезд, а также газа и пыли, — начали формироваться около 13 млрд лет назад. Наблюдения астрономов показывают, что сначала полностью сформировались самые крупные галактики, а потом очередь дошла до карликовых, в которых процесс звездообразования продолжается и в нашу эпоху. В книге рассказано, как и почему менялась со временем структура галактик, какими методами мы исследуем свойства галактик, находящихся по соседству или далеко от нас, и почему именно эта область наших представлений о Вселенной сейчас бурно развивается и каждый день полна неожиданных открытий.

УДК 524
ББК 22.67

Электронное издание на основе печатного издания: Происхождение и эволюция галактик / О. К. Сильченко ; под ред. В. Г. Сурдина. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — 222 с. — ISBN 978-5-89818-124-6. — Текст : непосредственный.

На передней стороне обложки: мощные джеты, вырывающиеся из окрестности сверхмассивной черной дыры в центре галактики Кентавр А (NGC 5128) в представлении художника L. Calçada (ESO), взявшего за основу реальное изображение этой галактики.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-224-3

© Сильченко О. К., 2017
© Переиздание. ДМК Пресс, 2022

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

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 $z \leqslant 1$ 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

2 Классические и современные теории формирования галактик

2.1. Джинсовский размер и джинсовская масса

В основе всех классических теорий формирования галактик лежит концепция гравитационной неустойчивости Джеймса Джинса. Ее суть в том, что газовое облако начинает катастрофически сжиматься под действием собственной гравитации, когда его размер (λ) настолько велик ($\lambda > \lambda_J$), что возникающий при сжатии градиент давления не успевает со скоростью звука (c_{sound}) эффективно передаваться наружу за характерное динамическое время t_{grav}, и возникающее внутри большого облака плотное «зернышко» не успевает рассосаться:

$$\lambda_J \equiv c_{sound} \cdot \tau_{grav} = \sqrt{\frac{dp/d\rho}{G\rho}}.$$

Пусть в однородной самогравитирующей газовой среде возникла флуктуация плотности (локальное уплотнение) с избытком плотности $\delta\rho$, избытком давления δp и соответствующим избытку плотности избытком гравитационного потенциала $\delta\phi$. Запишем для этой флуктуации три уравнения, связывающие эти три характеристики и описывающие их дальнейшую эволюцию — гидродинамические уравнения Эйлера, уравнение неразрывности и уравнение Пуассона:

$$\begin{cases} \rho \dfrac{\partial v}{\partial t} = -\operatorname{grad}\delta p - \rho \operatorname{grad}\delta\phi \\ \dfrac{\partial}{\partial t}\delta\rho = -\rho \operatorname{div}\delta v \\ \Delta\delta\phi = 4\pi G\delta\rho \end{cases}$$

Теперь введем упрощающие предположения. Пусть облако сферически симметрично, т. е. задача одномерна и можно спроециро-

вать все векторные величины на одну ось — скажем, на ось X. Пусть выполняется физическое условие адиабатичности, т. е. $\delta p = c^2_{\text{sound}}\,\delta\rho$. Будем искать решение для ρ, ϕ и v в виде распространяющихся волн — гармонических колебаний: $(\rho_0, \phi_0, v_0)\exp(i\omega t - ikx)$ (где ω — частота колебаний, k — волновое число, обратно пропорциональное масштабу волны). Теперь все производные от экспонент берутся аналитически, экспоненты слева и справа сокращаются, и вместо уравнений в частных производных появляется простая система линейных уравнений: вместо $\partial/\partial t$ имеем $i\omega$, а вместо $\partial/\partial x$ имеем $-ik$. После переноса всех слагаемых налево система уравнений принимает следующий вид:

$$\begin{cases} i\omega\rho\delta v_x - ic^2_{\text{sound}}k\delta\rho - i\rho k\delta\phi = 0 \\ i\rho k\delta v_x - i\omega\delta\rho = 0 \\ 4\pi G\delta\rho + k^2\delta\phi = 0 \end{cases}$$

Это линейная система из трех уравнений с тремя неизвестными, и все правые части равны нулю. Чтобы такая система имела *ненулевое* решение, ее детерминант должен быть равен нулю. Приравниваем детерминант нулю:

$$\omega^2 - k^2c^2_{\text{sound}} + 4\pi G\rho = 0.$$

Если частота колебаний ω действительна, то флуктуация устойчиво колеблется, а вот если ω мнимая, наступает коллапс — экспоненциальный рост возмущения плотности. Следовательно, условие коллапса:

$$k^2c^2_{\text{sound}} \leqslant 4\pi G\rho.$$

Критическое волновое число

$$k_{\text{J}} = \sqrt{\frac{4\pi G\rho}{c^2_{\text{sound}}}},$$

и, соответственно, джинсовский размер

$$\lambda_{\text{J}} \equiv \frac{2\pi}{k_{\text{J}}} = \sqrt{\frac{\pi c^2_{\text{sound}}}{G\rho}},$$

а джинсовская масса

$$M_{\text{J}} \equiv \rho\lambda^3_{\text{J}} = \pi^{3/2}c^3_{\text{sound}}\,\rho^{-1/2}G^{-3/2}.$$

Любопытные физические следствия можно получить из этой формулы. Пусть газ (так и быть, идеальный) описывается политро-

пой, $p \propto \rho^{\gamma}$; в этом случае $c^2_{\text{sound}} \propto \rho^{\gamma-1}$. Тогда джинсовская масса зависит только от плотности:

$$M_J \propto \rho^{(3\gamma-4)/2}.$$

Как видно из формулы, есть критическое значение $\gamma = 4/3$; например при адиабатическом сжатии, $\gamma = 5/3$, джинсовская масса будет расти, и газ будет продолжать сохранять однородность. А вот при $\gamma < 4/3$, т. е. если газ остывает, например высвечивая лишнюю энергию, то при сжатии джинсовская масса будет уменьшаться, и облако, сжимаясь, будет фрагментироваться на все более мелкие куски, которые, в свою очередь, будут самостоятельно сжиматься, поскольку джинсовская масса уменьшилась с увеличением плотности. Они будут сжиматься дальше, дальше фрагментироваться и т. д. Когда масса типичного фрагмента дойдет до массы порядка массы Солнца, вспыхнет звездообразование, и мы получим в итоге звездную систему — галактику. Если же сжатие не сопровождается высвечиванием, а происходит, например, адиабатически, то фрагментация и соответственно звездообразование в финале не происходят.

2.2. Бездиссипативный коллапс протогалактического облака

Два основных вида коллапса протогалактического облака рассматривались в 1970-е годы в работах классиков. При *бездиссипативном* коллапсе нет диссипации энергии — полная энергия системы сохраняется. Классическую модель образования (эллиптических) галактик путем бездиссипативного коллапса опубликовал Ричард Готт (Gott, 1973). Ключевым допущением этой модели было то, что полное превращение газа в звезды произошло еще на стадии до сжатия протогалактического облака, когда оно еще участвовало в общем хаббловском потоке, в расширении Вселенной. В тот момент, когда граница облака остановилась из-за его самогравитации и облако обособилось от хаббловского потока, оно уже полностью состояло из звезд и было не газовым, а звездным. Звездные системы, как известно, бесстолкновительны, поэтому при коллапсе звездного облака полная энергия сохраняется, но происходит бурная релаксация — перераспределение энергии между отдельными звездами.

В этой работе Готт рассмотрел четыре варианта начальных условий. Все четыре протогалактики были однородными сферами, состоящими из звезд общей массой $M = 10^{11} M_{\odot}$ и радиусом $R_0 = 20$ кпк

(параметры ориентированы на типичные размеры и массы современных эллиптических галактик), с изотропным максвелловским распределением абсолютных величин случайных скоростей звезд (средняя начальная случайная скорость всех звезд, если сложить их векторно, равна нулю). Отличались все четыре модели друг от друга начальной угловой скоростью твердотельного вращения галактики как целого: от $\Omega = 0$ в модели I до $\Omega = \sqrt{0{,}75}\,\Omega_0$ в модели IV. Здесь предел Ω ставится на уровне $\Omega_0 \equiv \sqrt{GM/R_0^3}$, что соответствует предельной допустимой скорости вращения, когда на границе облака на экваторе центробежная сила полностью уравновешивает силу гравитации облака и в экваториальной плоскости не происходит ни коллапса, ни разлета.

Готт считал свои модели на компьютере «в лоб», методом N тел, где число гравитационно взаимодействующих друг с другом частиц N было равно 2000. По сравнению с современными моделями N тел, где в расчет принимается до миллиарда частиц, каждая из которых гравитационно взаимодействует с каждой, модели Готта, конечно, не впечатляют. Однако, например, финальные размеры прорелаксировавшей системы можно было оценить заранее и в чисто аналитическом рассмотрении. Действительно, в начальный момент времени, на старте коллапса, модель I (без вращения) имела нулевую кинетическую энергию, суммарную по всем звездам, и полная энергия связи, которая состоит из суммы потенциальной и кинетической энергии, на старте была равна $E_b = -W_0$, то есть слагаемое потенциальной энергии было, а слагаемого кинетической энергии — нет (индекс «0» относится к начальному состоянию модели).

Потом коллапс пошел, произошла бурная релаксация, обмен звезд энергией, и в конце концов система пришла к вириальному равновесию, условие которого $2T_1 + W_1 = 0$ (T — суммарная кинетическая энергия, W — суммарная потенциальная энергия, индекс «единица» отличает конечное состояние системы от начального с индексом ноль). Энергия связи не изменилась, поскольку диссипации не было, но теперь, после того, как коллапс закончился, она состоит из суммы: $E_b = -(T_1 + W_1)$, или, после подстановки T_1 из условия вириального равновесия, $E_b = -W_1/2$. Поскольку энергия связи не изменилась, приравниваем начальное и конечное ее значение и получаем $W_1 = 2W_0$. Как известно, потенциальная энергия самогравитирующей сферы $W = -3GM^2/5R$ — обратно пропорциональна радиусу сферы

при заданной массе. Поэтому, поскольку потери массы не было, конечный равновесный радиус звездного облака, испытавшего бездиссипативный коллапс, — ровно половина начального: $R_1 = R_0/2$.

Теперь обратимся к моделям, изначально вращавшимся. На экваторе вращение (центробежная сила) препятствует сжатию, и конечный радиус будет больше $R_0/2$; в предельном случае, когда скорость вращения на экваторе Ω_0, радиус вовсе не изменится и останется R_0. Зато на полюсе вращение совсем не мешает сжатию по направлению к центру, и вдоль оси вращения мы получим тот самый конечный радиус $R_0/2$. Таким образом, невращающийся конечный продукт будет иметь сферическую форму и $R_1 = R_0/2$, а вращающийся окажется эллипсоидом с максимальным сжатием, равным 2. Очевидно, что путем бездиссипативного коллапса можно получить эллиптические галактики E0–E5, но нельзя получить более сплюснутые системы E6 и E7 (в классификации Хаббла цифра после буквы «E» — это умноженная на 10 эллиптичность изофот, т. е. $10(a-b)/a$, где a и b — большая и малая полуоси эллипса, аппроксимирующего изофоту).

В численном эксперименте Готта выяснились дальнейшие любопытные детали бездиссипативного коллапса: он проходит за два-три цикла осцилляций, т. е. за максимальным сжатием следует некоторое расширение с последующим вторичным сжатием, прежде чем система достигнет вириального равновесия. В момент максимального сжатия звезды, проходящие через центр, могут приобретать энергию. В финальном равновесном распределении энергий звезд присутствуют два отдельных пика: большинство звезд потеряло энергию и сформировало плотное компактное изотермичное «ядро» звездной системы, а меньшинство — приобрело энергию, ушло на периферию и образовало протяженное разреженное «гало». Чем быстрее начальное вращение протогалактики, тем меньше размером получается «гало».

Хотя качественно финальные продукты бездиссипативного коллапса в целом и походили на реальные эллиптические галактики, но в количественных характеристиках были серьезные нестыковки. Например, модели Готта с вращением имели эллипсоидальную форму, но численный расчет давал для них вытянутые изофоты в центре и круглые — во внешних частях, где доминирует гало. Между тем у реальных эллиптических, слегка сплюснутых галактик все как раз на-

оборот — в центре изофоты круглые, а кнаружи эллиптичность возрастает. Еще хуже проблема с размером ядра и центральной плотностью вещества (звезд). Реальные «ядра» эллиптических галактик намного компактнее и плотнее, чем те, что получались у Готта. Плотность вещества в эллиптических галактиках, образующихся по Готту, очень тесно связана со средней плотностью материи во Вселенной на момент формирования галактики. Если галактики образуются примерно на $z \approx 10$, когда плотность материи во Вселенной была $\sim 3 \cdot 10^{-27}$ г/см^3, при бездиссипативном коллапсе это вещество сжалось максимум в 10–15 раз, значит, получается $5 \cdot 10^{-26}$ г/см^3. А реальные средние плотности эллиптических галактик намного больше, 10^{-24} г/см^3. Так что бездиссипативный коллапс *звездного* протогалактического облака уже на стадии заявки модели был признан неподходящим.

2.3. Диссипативный монолитный коллапс протогалактического облака

Гораздо более широкое признание получили модели диссипативного коллапса протогалактического газового облака, наиболее детально разработанные Ричардом Ларсоном в конце 1960-х — начале 1970-х годов. Подход Ларсона был в большой степени феноменологическим: модель содержала большое количество параметров, и он широко практиковал их насильственную подгонку в целях согласия результатов моделирования с наблюдательными данными. Однако при этом модели были несомненно физичны, а сам принцип допущения диссипации энергии снимал многие проблемы, в частности, проблему плотности и размеров «ядра» сфероидальной галактики.

В основе первой модели Ричарда Ларсона (Larson, 1969) лежала прозрачная здравая физическая мысль. Действительно, характерная масса галактик (и, следовательно, как думали тогда, протогалактик) — около $10^{11} M_\odot$, а джинсовская масса при температуре 10^4 К (типичная температура газа водорода после рекомбинации), если даже варьировать разные другие параметры в широких пределах, заключена в пределах от 10^5 до $10^8 M_\odot$. То есть массивное протогалактическое газовое облако не может быть однородным, оно еще до начала общего коллапса должно распасться на множество более мелких сгустков. Эти сгустки-облака, вероятно, находятся в турбулентном движении, напоминающем броуновское движение молекул. И тут

Ларсон вводит диссипацию: пусть случайные столкновения этих облаков полностью неупруги. Тогда при столкновении двух облаков они слипаются, теряют скорость (и энергию!), падают в центр протогалактики, накапливаются и уплотняются там и служат топливом для звездообразования, интенсивность которого по закону Шмидта 1959 года должна быть пропорциональна квадрату объемной плотности газа. При этом суммарная энергия системы уменьшается на величину совокупной кинетической энергии этих двух облаков, и, соответственно, со временем монотонно убывает средняя дисперсия скоростей сгустков.

Весь этот процесс Ларсон запускал для сферического, изначально не вращающегося облака массой $10^{11} M_{\odot}$ и радиусом 50 кпк; на разностной схеме отдельно для газа и для звезд численно решались гидродинамические уравнения Эйлера с источниками. Звездообразование в модели шло только в ядре, но размеры ядра со временем увеличивались. Получалось, что за $8 \cdot 10^8$ лет (так называемое динамическое время системы, сравнимое со временем свободного коллапса) в звезды переходит половина всего газа, а через 1,7 млрд лет — 97%. Так в 1969 г. Ларсон получил сферическую эллиптическую галактику с плотным звездным ядром без всякой бурной релаксации.

Далее Ларсон продолжал совершенствовать свою модель и опубликовал несколько ее модификаций, иногда весьма радикальных. В следующей статье (Larson, 1974) он добавил эволюцию звезд (ведь звезды в процессе эволюции сбрасывают обратно в межзвездную среду около 80% своего исходного газового материала!) и синтез ими тяжелых элементов. В третьей статье (Larson, 1975) наконец появилось изначальное вращение протогалактического облака — Ларсон внял доводам Пиблса, что протогалактическое облако — не одно во Вселенной, есть соседние облака, которые, пролетая мимо, будут раскручивать протогалактическое облако, сообщать ему внутренний момент вращения.

Вместе с вращением в модели Ларсона появилась и проблема: теперь стало невозможно прежним механизмом образовать эллиптическую галактику, потому что газ в ходе диссипации терял энергию, но не момент вращения, и потому оседал не в центр, а в протяженный тонкий диск, где и происходило звездообразование. Получалась спиральная галактика вместо эллиптической. Ларсон не растерялся и для отвода момента наружу ввел вязкость в столкновитель-

ной системе газовых облаков. Вязкость могла быть разной природы — в частности, турбулентная или за счет крупномасштабных газовых потоков, — Ларсон тут не настаивал на конкретном механизме, но величину ее (коэффициент вязкости в формуле Навье—Стокса) подогнал так, чтобы вместо звездного диска получался звездный сфероид. И все получилось еще лучше, чем прежде, даже проблема с эллиптичностью изофот, которая так мучила Готта, решилась сама собой: в центре изофоты теперь были круглые, а эллиптичность достигала максимума на радиусе 3÷5 кпк. Сформировавшиеся эллиптические галактики вращались с бешеной скоростью, 150÷180 км/с, но наблюдательных данных по вращению эллиптических галактик тогда еще практически не было, и проверить этот результат Ларсона никто не мог. Правда, его конкурент Готт утверждал, что никакая турбулентность не даст такой большой вязкости, которая нужна Ларсону, и что реальная вязкость на порядок меньше, чем предлагает Ларсон. Ну, на то он и конкурент.

Через год Ларсон опубликовал четвертую статью (Larson, 1976), где предлагал сценарий образования спиральных (дисковых) галактик. Все происходило так же, как с эллиптическими, только на поздних стадиях первичного коллапса выключалось звездообразование, чтобы сохранить газ для диска. Однако это была последняя статья Ларсона по развитию моделей монолитного диссипативного коллапса протогалактических облаков. Аргументы критиков возымели свое действие, и уже в 1979 году Ларсон кардинально изменил свою точку зрения: он опубликовал вместе с Тинсли статью, где утверждал, что эллиптические галактики образуются «большим мержингом» — слиянием двух спиральных галактик сравнимых масс. Но про мержинг, который стал главным фетишем космологов, когда они решили вписать процесс формирования галактик в общую картину эволюции Вселенной, будет рассказано ниже.

2.4. Другие модели «монолитного» коллапса

Одним из серьезных упрощающих допущений классических моделей монолитного (т. е. «из одного куска») коллапса была сферическая симметрия начальных условий. Последователи классиков (и сами теперь уже классики) попытались отказаться от нее, а также сочетать диссипативный и бездиссипативный коллапс — возникли так называемые «блинные» модели.

Джеймс Бинни (Binney, 1977) пересмотрел основополагающую идею Ларсона о том, что первоначальное протогалактическое облако сначала испытало фрагментацию. А если нет? Тогда оно будет коллапсировать в тонкий «блин», и вся диссипация энергии, а также остывание за счет высвечивания, будут сосредоточены в экваториальной плоскости «блина», где развивается ударная волна в конечной фазе коллапса. Дальнейшая судьба процесса, вообще говоря, сильно зависит от массы протогалактики (которая у классиков фиксировалась!). У Бинни из маленьких облаков получались неправильные галактики с непрерывно тлеющим до сих пор слабым звездообразованием, а из больших — эллиптические: там газ быстро превращался в звезды в блине, а потом бесстолкновительно релаксировал в плоскости, перераспределяясь по радиусу. Поскольку в реальной жизни таких резких границ и однозначных соответствий между морфологическим типом и массой галактики нет (например, Большое Магелланово Облако достаточно массивно, чтобы, по Бинни, быть эллиптической галактикой), то в конечном счете модели Бинни представляли собой чисто теоретический интерес, хотя и хорошо цитировались.

Рэй Карлберг (R. Carlberg) начиная с 1984 г. опубликовал серию работ, в которых попытался усовершенствовать модели Ларсона с учетом новых наблюдательных данных. К середине 1980-х уже знали, что сплюснутая форма эллипсоидальных E-галактик поддерживается не вращением, а анизотропией дисперсии скоростей звезд; знали и о том, что металличность звезд коррелирует с массой галактики — в маленьких эллиптических галактиках металлов меньше. Кроме того, космологи уже уверяли всех, что основная доля вещества во Вселенной находится в форме темной материи. Как со всем этим справился Карлберг? Он поставил следующие начальные условия:

1) именно в том месте, где образуется галактика, и только там, $\rho_{gas}/\rho_{dark\ matter} > 1$ — чтобы гравитация темной материи не мешала веществу коллапсировать;
2) скорость вращения не нулевая, но мала по сравнению с дисперсией случайных скоростей звезд — $v_r/\sigma = 0{,}05$;
3) начальная конфигурация протогалактического облака — однородный *вытянутый* эллипсоид с отношением осей 2:1;
4) процесс столкновения сгустков-облачков далее ветвится в диссипацию и звездообразование: в нескольких процентах случаев

сталкивающиеся облачка целиком превращаются в звезды, а в остальных случаях сгустки просто слипаются;

5) в результате массированного звездообразования развивается галактический ветер, и некая доля газа, определяемая свободным параметром *s*, уходит из системы совсем; собственно, только параметр *s* и варьировался в моделях Карлберга.

Сам процесс коллапса протогалактического облака у Карлберга происходил следующим образом: сплюснутое протогалактическое облако сжималось в «блин», и в экваториальной плоскости шло звездообразование. После того как половина газа падала в плоскость и превращалась в звезды, этот звездный диск начинал радиальный коллапс, практически бесстолкновительный. Затем следовала бурная релаксация, и в результате получался звездный сфероид с анизотропной дисперсией скоростей. Модели с более сильным галактическим ветром, естественно, заканчивали формирование звездного сфероида с меньшей конечной металличностью и дисперсией скоростей. Все это было очень похоже на реальные свойства галактик; но в этих моделях Карлберга темная материя не играла никакой роли, и поэтому впоследствии они не выжили.

2.5. Джинсовский коллапс в условиях хаббловского расширения

По теории Большого взрыва на заре юности нашей Вселенной, до эпохи рекомбинации (на $z>1500$), над давлением вещества доминировало давление излучения:

$$p=\rho_R c^2/3,$$

где c — скорость света, а ρ_R — пространственная плотность фотонов. Следовательно, тогда скорость звука была

$$c_{\text{sound}} \equiv \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \frac{c}{\sqrt{3}},$$

и джинсовская масса была чудовищно велика:

$$M_{\text{J},z>1500} = 1{,}5\cdot 10^{18}\left(\frac{35000}{1+z}\right)^{\frac{3}{2}} M_{\odot}.$$

Естественно, ни звезды, ни галактики при такой джинсовской массе образоваться не могли. Но Вселенная расширялась, остывала, в какой-то момент температура упала ниже десяти тысяч граду-

сов, и наконец электроны смогли уверенно сесть на свои орбиты вокруг протонов. Барионная плазма превратилась в нейтральный газ, в основном — водород. И вот после рекомбинации, когда вещество отделилось от излучения и приобрело собственную скорость звука:

$$c_{\text{sound}} \equiv \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \left(\frac{kT}{m_H}\right)^{\frac{1}{2}},$$

джинсовская масса упала скачком до вполне разумных значений:

$$M_{\text{J},z=z_{\text{rec}}} = \left(\frac{\pi k}{G m_H}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T_{0,R}^3}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^5 M_\odot.$$

Так что в упрощенной картине ничто не мешало шаровым скоплениям начать образовываться на $z \approx 1000$. Однако в ту далекую эпоху распределение вещества во Вселенной было очень однородным. Мы точно знаем об этом, потому что до нас, находящихся на $z = 0$, дошло реликтовое космическое излучение, которое было жестко связано с барионами на красных смещениях $z > 1500$ и освободилось от него в конце эпохи рекомбинации. Позже излучение продолжало заполнять Вселенную, расширяться вместе с ней, и сейчас, измеряя распределение по небесной сфере температуры реликтового излучения, мы как бы видим «поверхность последнего рассеяния», тот последний миг, когда барионы еще были перемешаны и связаны с излучением. Наблюдаемое распределение по небу температуры реликтового излучения очень однородно, его флуктуации порядка всего лишь одной миллионной доли средней температуры. Если и флуктуации барионной плотности на красном смещении $z \sim 1000$ были такими же маленькими, порядка одной миллионной доли от средней плотности материи во Вселенной, то космологам надо было очень сильно подумать, как из этих крохотных зародышей вырастить современные галактики.

Дело в том, что это только «сферический конь в вакууме», то есть сферические флуктуации плотности в квазистационарной среде растут по Джинсу — с экспоненциальной скоростью, как мы увидели в начале этой главы. Если же поместить такую флуктуацию плотности в расширяющуюся среду (Вселенную), которая будет тянуть внешние слои флуктуации за собой в процессе общего хаббловского расширения, то рост плотности в коллапсирующей флуктуации сильно замедляется и становится не экспоненциальным, а

линейным. То есть с момента $z \sim 1000$ до наших дней наблюдаемая флуктуация, равная одной миллионной, может вырасти только в тысячу раз и превратиться в одну тысячную. Между тем нелинейная стадия коллапса наступает, только когда плотность внутри флуктуации как минимум вдвое больше, чем вокруг нее. Сопоставление этих двух фактов трагично: путем гравитационной неустойчивости Джинса никакие звезды и галактики за время, прошедшее после рекомбинации, образоваться не могли. Если только не...

И вот тут мы упираемся в необходимость темной материи. Никакие другие аргументы — ни большая дисперсия скоростей галактик в скоплениях, ни плоские кривые вращения галактик за пределами их оптических границ — не являются на самом деле такими уж «железными», их всегда можно обойти, считая скрытую от наших глаз гравитирующую массу чем-то другим, барионным, но не светящимися звездами. А вот как быстро вырастить флуктуации плотности с момента рекомбинации до наших дней... Пока придуман только такой выход: на самом деле есть темная материя, электрически нейтральная, переставшая взаимодействовать с излучением задолго до эпохи рекомбинации, выращивавшая свои флуктуации задолго до $z \sim 1000$, и именно темная материя доминирует в гравитации, в процессе коллапсов, фрагментаций, построения крупномасштабных структур во Вселенной.

2.6. Иерархическая концепция формирования галактик

Представления о самом механизме формирования галактик изменились, когда космологам удалось убедить астрономическое сообщество, что основной вклад в массу (плотность) Вселенной вносит темная материя.

До сих пор нет полного согласия насчет того, из чего, собственно, состоит темная материя. Большинство склоняется в пользу гипотетических «холодных» элементарных частиц — аксионов или WIMP (Weakly Interacting Massive Particles), ни одну из которых ядерным физикам еще не удалось поймать в лабораторных экспериментах на ускорителях. Но хотя частицы темной материи еще никто не видел, космологи уже знают всё про их свойства; самое главное из этих свойств — способность гравитировать. Когда-то, на заре юности Вселенной, холодная темная материя (Cold Dark Matter, CDM) заполняла Вселенную практически равномерно. Од-

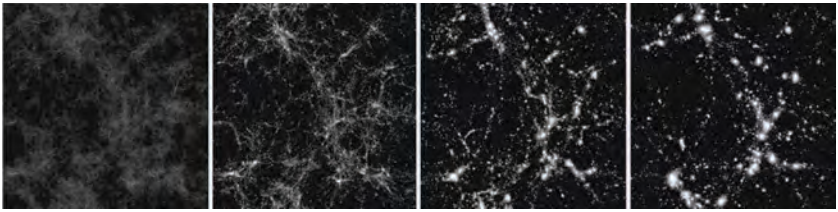


Рис. 2.1. Изменение со временем (слева направо) распределения холодной темной материи в модельной Вселенной под действием одной только гравитации — численный эксперимент методом N тел. Начальное условие — почти однородное распределение плотности темной материи во Вселенной. Координаты сопутствующие, т. е. расширение происходит, но здесь оно не отражено.

нако в этом равномерном поле плотности местами возникали слабые уплотнения — флуктуации плотности с контрастом $10^{-5} \div 10^{-6}$. Холодная темная материя бесстолновительна, у нее нет давления, есть только гравитация, и вот под действием гравитационной неустойчивости эти случайные флуктуации плотности начинают расти, уплотняться, сливаться друг с другом в более крупные сгустки темной материи, и весь этот процесс продолжается до наших дней. Так образуются галактики (вернее, их гипотетические темные гало), так образуются скопления галактик, так формируется вся крупномасштабная структура Вселенной (рис. 2.1).

Эта идея называется «иерархической концепцией», потому что процесс формирования темных гало идет от малых к большим: малые под действием взаимной гравитации сближаются и постепенно сливаются во все более крупные. Каждому моменту времени, каждой эпохе, каждому красному смещению соответствует своя характерная масса сливающихся в данный момент темных гало. Например, на $z \approx 10$ формируются гало с массой $10^7 \div 10^8 M_\odot$, на $z \approx 3$ — гало с массой $\sim 10^{10} M_\odot$, а сейчас, на $z = 0$, масштаб «скучивающейся» темной материи — уже $10^{14} \div 10^{15}\ M_\odot$, это масштаб скоплений галактик.

Но темные гало — это все-таки не галактики, как мы их привыкли себе представлять: темную материю не видно, она не светит. Звезды же, составляющие галактику, формируются из газа, т. е. из барионного компонента материи. Каково место барионов в иерархической концепции формирования галактик? По мысли космологов, первоначально барионы, в большинстве своем атомы водорода, были равномерно перемешаны с темной материей в пропорции по мас-

се примерно 1:6 (в пользу темной материи) и коллапсировали вместе с ней. Однако это не тот коллапс газового облака под действием самогравитации, который рассматривался в классических моделях: перемешанный с темной материей газ коллапсирует вместе с ней под действием *ее* гравитации, фактически — во внешнем гравитационном поле. При этом газ, в отличие от темной материи, — система столкновительная; при коллапсе гало и особенно при слияниях гало в газе возникают ударные волны, которые разогревают его до вириальной температуры (вспомним рентгеновский межгалактический газ близких скоплений галактик — его температура как раз соответствует вириальной энергии темного гало массой $10^{14}\ M_{\odot}$).

Что происходит дальше? Численное решение уравнений газодинамики для барионов встраивается в гравитационный численный эксперимент методом N тел для темной материи; оказывается, что газ постепенно остывает, высвечиваясь, и оседает в центр гало, формируя компактный плотный диск. От падения в *самый* центр гало газ удерживает изначально имеющийся у него момент импульса. От того, насколько велик этот момент, зависит, насколько компактным получается газовый диск. Ранние модели формирования галактик (точнее, газовых протогалактик) в рамках иерархической концепции предполагали, что пока газовые сгустки осядут в диск (а газ разбивается на сгустки, когда остывает), они за счет динамического трения о темную материю потеряют часть момента. Однако в результате расчетов получались слишком маленькие диски, не похожие на современные спиральные галактики, с которыми их хотелось бы ассоциировать. Постепенно космологи пришли к выводу, что наблюдения свидетельствуют в пользу сохранения момента вращения газом при его оседании в холодный диск; динамическое трение почему-то (непонятно пока, почему) неэффективно в данном случае.

Далее в этом плотном холодном газовом диске должно вспыхнуть звездообразование, и часть газа должна превратиться в звезды — образуется звездный диск, такой (или, по крайней мере, качественно такой), какие мы наблюдаем в современных спиральных галактиках. Мощное звездообразование производит «обратный эффект»: вспыхивают сверхновые, которые не только поставляют тяжелые элементы в межзвездную среду, но и нагревают газ до такой степени, что может возникнуть галактический ветер — мощное истечение теплого газа прочь из галактики, и тогда известная

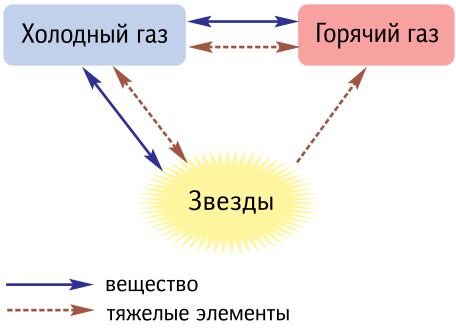


Рис. 2.2. Схема формирования барионной составляющей галактики. Горячий газ остывает, становится холодным, из него образуются звезды, которые в процессе эволюции сбрасывают обратно в межзвездную среду как холодные оболочки с пылью, так и теплый звездный ветер и суперэнергетичные оболочки сверхновых, и весь цикл обмена повторяется.

доля холодного газа диска снова возвратится в горячий газ гало (рис. 2.2). Тем не менее в результате этого процесса в центре каждого сколлапсировавшего темного гало должен образоваться звездный (точнее, звездно-газовый) диск, или, в терминах привычной нам морфологической классификации, спиральная галактика позднего типа, без балджа. Однако иерархическая концепция требует, чтобы темные гало и дальше сливались между собой; что же при этом происходит с их центральными галактиками? Они тоже сливаются, хотя и позже, чем их темные гало. При этом из двух холодных газовых дисков образуется один большой холодный газовый диск, а из двух холодных звездных дисков образуется один большой, динамически горячий звездный сфероид: звездные системы при слиянии сильно разогреваются динамически. Поскольку при слиянии темные гало объединяются намного быстрее, чем их барионные «начинки», то в принципе часто можно встретить одно большое темное гало, внутри которого проживают несколько отдельных галактик. В плане связи концепции с наблюдениями это означает, что общее темное гало имеют и большая спиральная галактика со своими карликовыми спутниками, и несколько больших галактик, принадлежащих к одной группе, и сотни галактик, составляющих скопление.

Если два холодных звездных диска в конце концов слились и образовали горячий звездный сфероид, похожий на эллиптическую галактику, в дальнейшем вокруг этого сфероида опять может сконденсироваться из горячей фазы холодный плотный газовый диск, в нем опять вспыхнет звездообразование, и вот уже сфероид стал балджем, а вокруг него нарастился новый звездный диск — получилась

спиральная галактика раннего типа. А если не нарастился (что чаще происходит в поздние времена, на малых красных смещениях, из-за общекосмического исчерпания газа) — сфероид останется «голым», т. е. эллиптической галактикой. Так в рамках концепции формирования галактик иерархическим гравитационным скучиванием хаббловская последовательность морфологических типов снова стала эволюционной, только, по сравнению с представлениями прошлого века, «вывернутой наизнанку». Теперь считают, что сначала формируются поздние типы — чисто дисковые галактики типа Sc—Sd и Irr, потом они сливаются и превращаются в балджи, потом балджи наращивают на себя новые диски и становятся спиральными галактиками раннего типа Sa–Sb, а вот если слияния первоначальных дисков происходят в поздние эпохи, то тут уже, позже всех, образуются эллиптические галактики.

Моделирование формирования галактик в рамках иерархической концепции обычно осуществляется не для отдельного объекта, как это было в эпоху расцвета классических теорий, а для всех галактик Вселенной сразу. Это может делаться прямым численным экспериментом по расчету эволюции распределения вещества во Вселенной — методом N тел в кубе с периодическими краевыми условиями для учета гравитации и лагранжевым гидродинамическим подходом «сглаженных частиц» для учета газодинамики барионной среды. Либо статистически (это так называемый полуаналитический метод), задействуя распределения темных гало по массам в каждый последовательный момент времени (для этого есть аналитическая формула Пресса—Шехтера) и выбирая методом Монте-Карло «пути» (или, как еще говорят, «дерева», т. е. генеалогические древа) слияния этих гало в дальнейшем. Поэтому первые — и при этом основные — достижения иерархической концепции состоят в относительно успешном воспроизведении статистических характеристик *современного* населения галактик: распределения галактик по морфологическим типам, по светимостям, и т. п.

2.7. Сравнения с наблюдениями: проблемы иерархической концепции

Однако есть целый комплекс десятилетиями собиравшихся наблюдательных данных, относящихся к *наблюдаемой* эволюции галактик, которые пока никак не укладываются в иерархическую кон-