

О. К. Сильченко
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

ЭМПИРИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Рассматривается проблема происхождения и эволюции галактик.

We consider a problem of formation and evolution of galaxies.

Введение. Теория и практика эволюции галактик

Согласно известной классификации Эдвина Хаббла [1] галактики бывают эллиптические (в форме сфероида, то есть «толстенькие») и дисковые. Дисковые галактики состоят, в первом приближении, из двух компонент — компактного сфероида (балджа) и протяженного диска. Отдельный вопрос, который до сих пор дискуссионен, — можно ли считать балджи эллиптическими галактиками, помещенными в центр дисков, или у них есть принципиальные различия. Так или иначе, но балджи тоже сфероиды (то есть «толстенькие» звездные структуры), а вот диски сплюснуты настолько, что во многих моделях их представляют двумерными структурами, совсем без толщины. Это, конечно, сильная идеализация: толщина у дисков есть, иногда и весьма заметная, но существенно, что радиус (или характерный масштаб вдоль радиуса) дисков существенно превышает их толщину (или характерный масштаб распределения звезд перпендикулярно плоскости диска). Когда Хаббл создавал свою схему, он назвал ее левую часть — ручку «вилки» — «галактиками ранних типов», а правую часть, оба зубца вилки, — «галактиками поздних типов». Значит ли это, что он придавал эволюционный смысл своей схеме? Тогда он думал, что спиральные галактики — многокомпонентные системы со множеством деталей в структуре — образуются со временем из простых сфероидов, галактик эллиптических, путем наращивания дисков. Минуло десятки лет, в астрономию пришли космологи-теоретики и перевернули эволюционное направление схемы Хаббла: теперь они говорят, что первыми сформировались спиральные галактики, в которых доминируют диски и упорядоченное

круговое вращение звезд и газа как раз в плоскости этого диска, а эллиптические галактики, где вращение слабо и момент куда-то делся (?) в процессе эволюции, это продукты поздних слияний спиральных галактик. Поэтому в среднем эллиптические галактики и массивнее, чем спиральные; а если бы спиральные образовывались из эллиптических путем наращивания дисков, то было бы наоборот. Такова нынче теория.

Существующая статистика по морфологическим типам галактик в разных местах Вселенной говорит о том, что в ближней Вселенной самый распространенный морфологический тип — спиральные галактики, их 75 %. Если разглядывать «поле», то есть области с достаточно неплотным расположением галактик, то там совсем мало эллиптических галактик, около 6 %, а линзовидных галактик — всего около 15 % [2]. Но чем в более плотные области мы углубляемся, тем больше там линзовидных галактик: в группах галактик их уже примерно столько же, сколько и спиральных, — по 45 % и тех и других, а в скоплениях галактик (куда, впрочем, входит всего 7 % галактик ближней Вселенной) линзовидные галактики уже составляют большинство — до 60 % галактик скоплений, это линзовидные галактики [3]. Эллиптических галактик в скоплениях около 25—30 % всего населения, и любопытно, что этот процент не менялся последние 5—8 млрд лет. Значит, плотное окружение каким-то образом подавляет звездообразование в дисках. Один из главных вопросов современного этапа развития исследований эволюции галактик: каким именно способом?

И наконец, за последнее десятилетие-полтора появилось огромное количество *наблюдательных данных* об эволюции галактик. С помощью крупных 8—10-метровых телескопов можно успешно и подробно изучать большие выборки галактик на далеких красных смещениях — вплоть до $z = 5-7$. На таких красных смещениях мы непосредственно наблюдаем галактики в молодости, ведь от галактик на $z = 1$ свет до нас идет 8 млрд лет, от галактик на $z = 2$ — 10 млрд лет, а от галактик на $z = 5$ — все 12 млрд лет. То есть сейчас подробно наблюдается все, что сформировалось и жило в нашей Вселенной всего через один миллиард лет после Большого взрыва. Мы практически видим всю историю Вселенной на просвет. И то, что мы видим, с одной стороны, выстраивается в какую-то осмысленную последовательность, которая может быть реально наблюдаемой эволюцией галактик, а с другой стороны — часто кардинально противоречит стройным предсказаниям «общепринятой» космологии. Что же мы

узнали и какие выводы уже можем сделать из наблюдательных фактов относительно путей эволюции во Вселенной?

Эволюция размеров: возможные механизмы

С помощью Хаббловского телескопа и его уникального пространственного разрешения, а также благодаря адаптивной оптике в ближнем инфракрасном диапазоне на крупных наземных телескопах удалось составить хорошую статистику и проследить эволюцию типичных размеров галактик разных морфологических типов за последние 10–11 млрд лет. Оказалось, что неожиданно быстро эволюционируют размеры именно эллиптических, пассивных в смысле звездообразования галактик. На красном смещении 1.5–2 наблюдается целое население объектов — гигантских, сфероидальных, без звездообразования, радиусы которых в 4–6 раз меньше, чем размеры таких же по массе эллиптических галактик рядом с нами. А если сообразить, что при разнице линейных размеров 4–6 раз вся эта гигантская масса звезд, 100 млрд солнечных масс, была втиснута в объем, в 100 раз меньший нынешнего, и соответственно плотность упаковки звезд в центрах далеких эллиптических галактик 10 млрд лет назад была на два порядка больше нынешней...

Раз у галактик нет звездообразования, то хотелось бы придумать какой-нибудь чисто динамический механизм, который привел бы далекие компактные массивные эллиптические галактики на современную фундаментальную плоскость за 8–11 млрд лет эволюции. В принципе, большой «сухой» (бездиссипативный) мерджинг способен привести к расширению центрального сгущения звездной плотности (“core”) и уменьшению центральной звездной плотности. Но при больших слияниях размер продукта слияний будет расти примерно пропорционально его массе. Это значит, что на диаграмме «масса — эффективный радиус» галактика будет эволюционировать под очень небольшим углом, почти параллельно последовательности современных эллиптических галактик. А при «посадке» далекой галактики массой $2 \times 10^{11} M_{\odot}$ путем серии больших слияний на диаграммах «масса — средняя плотность» или «масса — дисперсия скоростей звезд» на современные последовательности она будет «улетать» по массе далеко за пределы $> 10^{12} M_{\odot}$. Рядом с нами отсутствуют в до-

статочном количестве такие массивные галактики. Это значит, что эволюционный канал больших слияний для далеких массивных компактных эллиптических галактик наблюдательно закрыт.

В связи с этим, а также осмысливая крутые градиенты металличности звездного населения во внутренних областях и пологие — во внешних, целый ряд исследователей одновременно, и мы в том числе [4], предложили для формирования и эволюции эллиптических галактик другой сценарий, кардинально отличающийся от классического иерархического сценария больших слияний. Этот сценарий сейчас фигурирует в литературе как «двухэтапный» или «двухстадийный». Основываясь на наборе чисто эмпирических аргументов, можно предположить, что в ходе первой стадии, на $z \geq 3$, формировались компактные «затравки» будущих эллиптических галактик, и формировались они в процессе, очень похожем на моноклитный коллапс. Впоследствии, на $z \leq 1.5$, и масса, и размер этих звездных систем увеличивались благодаря множественному *малому мерджингу*: на галактику падали ее спутники.

В природе в эллиптических галактиках наблюдается полное разнообразие радиальных профилей среднего возраста звездного населения. Можно предположить, что это из-за того, что на хозяйскую галактику могли падать как спутники с газом, с небольшим его количеством, так и спутники совсем без газа, как спутники со старым звездным населением, так и спутники с относительно молодыми звездами. В этом вопросе должно наблюдаться, и наблюдается, «космическое разнообразие» (cosmic variance). Однако с динамической точки зрения моделирование множественного малого мерджинга предсказывает, что звездная система, испытывающая его, будет греться, расширяться, и ее радиус будет расти пропорционально *квадрату* массы. А это значит, что возможно существенно увеличить размер звездной системы, несильно изменяя ее массу. Это, очевидно, как раз то, что наблюдается, если считать далекие компактные эллиптические галактики непосредственными эволюционными предшественниками современных эллиптических галактик.

Downsizing: от большого к малому

Самое неожиданное: абсолютно не оправдался в результате наблюдений иерархический характер «собираения» галактик, предсказанный космологами. Вместо первоначального рождения карликов и их постепенного слияния в гигантские галактики наблюдается строго обратный процесс. Гигантские галактики образовались первыми;

причем в последние 8 млрд лет, на $z < 1$, отсутствовала эволюция как их числа (в единице сопутствующего объема), так и их содержимого — звездного населения. При наблюдениях близких эллиптических галактик были обнаружены корреляции: чем массивнее галактика, тем старше ее звездное население, а также чем массивнее галактика, тем выше отношение содержания магния к содержанию железа в ее звездах. Последняя зависимость означает, что чем массивнее галактика, тем короче была эпоха основного звездообразования в ней: для самых массивных Es эта эпоха значительно короче 1 млрд лет. Между тем численное моделирование эволюции Вселенной, в котором первую роль играет гравитация, а вторую — газодинамика, предсказывает все как раз наоборот. Если галактика маломассивная, она не может удержать газ, нагреваемый молодыми звездами, он должен практически сразу после начала звездообразования покидать галактику, и звездообразование должно останавливаться рано. В массивных же галактиках гравитация способна удержать газ в процессе звездообразования до полного его исчерпания. Что же мы видим в реальной Вселенной? В массивных эллиптических галактиках отношение магния к железу в звездах свидетельствует об эпохе звездообразования длиной максимум несколько сотен миллионов лет, тогда как в сфероидальных карликах Местной Группы прямые оценки возрастов звезд, а также и отношения магния к железу в их атмосферах дают длительность самой первой эпохи звездообразования не менее 3 млрд лет. Как это может быть?

Приходится вводить в модели формирования галактик дополнительные факторы, подправляющие изначально слишком простую физику. Для быстрой остановки звездообразования в массивных сфероидальных галактиках придумали feedback («обратную связь») от центральных черных дыр. Когда в галактике при начале основного звездообразования еще много газа, его потоки к центру должны «поджигать» активность ядра, что, вероятно, и наблюдается на красном смещении около двойки, где особенно много квазаров. А дальше проснувшийся квазар своим мощным излучением разогревает окружающий газ и не дает ему больше собираться в звезды. Как известно, чем больше масса сфероидальной галактики, тем массивнее ее центральная черная дыра (по крайней мере, в настоящую эпоху эта оговорка важна), а чем массивнее черная дыра, тем выше ее эддингтоновский предел, тем мощнее, в принципе, она может светить.

Вот отсюда может возникнуть «правильная» корреляция между массой галактики и краткостью эпохи звездообразования в ней.

И действительно, когда этот feedback включили в полуаналитические модели формирования галактик в рамках эволюции Вселенной (LCDM-модель), сразу стало значительно легче: в модели появились старые массивные эллиптические галактики на $z = 0$. Немного смущает, что в наблюдениях пока не удалось увидеть остановку звездообразования квазаром в конкретных галактиках на $z = 2-3$, хотя космический телескоп Herschel, наблюдавший в далеком инфракрасном диапазоне и специализированный как раз для измерений темпов звездообразования в далеких галактиках, был нацелен на эту задачу и особо искал хоть какие-то случаи такого рода. Не нашел.

Что касается галактических ветров в карликах, то очень постепенно, и тоже в результате наблюдений, исследователи приходят к мысли, что энергетика вспышек звездообразования в малых галактиках не хватает для того, чтобы заставить газ улететь насовсем. Наблюдаемые истечения из областей звездообразования показывают весьма умеренные скорости, меньшие, чем «скорость убегания». То есть события в карликах, вероятно, развиваются так: начинается звездообразование, газ греется и уходит из областей звездообразования, останавливая процесс на какое-то, вероятно, недолгое, время. Но уходит он недалеко, застревая в темном гало. Там он высвечивает, остывает и падает обратно на галактику, провоцируя начало следующего этапа звездообразования. Поэтому звездообразование в карликах продолжается миллиарды лет, и часто вплоть до настоящей эпохи, но происходит вспышками.

Аккреция — основной двигатель эволюции дисковых галактик?

Независимо от общего космологического сценария эволюции Вселенной, уже давно исследователи осознали необходимость допущения постоянной аккреции внешнего холодного газа на диск нашей Галактики, а по аналогии — на диски спиральных галактик вообще. Каковы наблюдательные факты, делающие необходимым допущение такой аккреции? Прежде всего, невозможность построения моделей химической эволюции дисковых галактик без внешней аккреции. В окрестностях Солнца давно наблюдается так называемый «парадокс G-карликов». G-карлики — это звезды с массами порядка одной массы Солнца, и время их жизни на главной последовательности — порядка 10 млрд лет. Это означает, что в диске нашей Галактики, где звездообразование теплится с примерно постоянным темпом все по-

следние 8 млрд лет, среди G-карликов должны встречаться звезды всех возрастов, от 8 млрд лет до нуля. А поскольку звезды в процессе своего горения все время синтезируют новые химические элементы — кислород, магний, железо, то содержание тяжелых химических элементов в звездах должно со временем увеличиваться и молодые звезды должны содержать больше тяжелых элементов, чем старые. Так вот, *все* G-карлики в окрестностях Солнца имеют одну и ту же, солнечную металличность! То же самое и с субгигантами: для них возможно измерить возраст, и у звезд диска нашей Галактики отсутствует корреляция возраст — металличность! Решить этот парадокс можно только одним эффективным способом: постоянно разбавлять газ диска Галактики, обогащенный свежесинтезированными продуктами звездной эволюции, внешним газом, бедным металлами. Тогда можно поддерживать среднюю металличность газа (и звезд) на постоянном уровне все время жизни и эволюции диска Галактики.

Для других спиральных галактик — для спиральных галактик ближней Вселенной как класса — есть еще один серьезный аргумент, требующий постоянной добавки внешнего газа в диск галактики. Это короткое время «исчерпания газа». Звезды образуются конкретно из молекулярного газа, а облака молекулярного газа, при определенных благоприятных условиях, собираются из водорода атомарного. Оказалось, что если разделить наблюдаемую в галактике массу молекулярного газа на темп звездообразования, то получается время исчерпания молекулярного газа от 0.5 млрд лет у карликов до 3 млрд лет у гигантских спиральных галактик, а время исчерпания атомарного газа и вовсе постоянно у всех близких галактик — около 2—3 млрд лет [5]. Но время жизни галактических дисков, в течение которого звездообразование все время идет с более-менее постоянной скоростью, 8—10 млрд лет! Неужели мы присутствуем при массовой смерти спиральных галактик? Эта идея никому не нравится; спасение от выделенности данного момента состоит в предположении, что постоянная аккреция газа извне подпитывает звездообразование в диске и что, в принципе, это равновесный процесс: сколько газа сверху упадет в единицу времени, столько и уйдет на формирование новых звезд.

Итак, ход эволюции спиральных галактик в последние 8 млрд лет полностью зависел от аккреции извне холодного газа — и звездообразование, и химическая эволюция. И, возможно, структурная эволюция тоже. После обзора ближних галактик космическим ультрафиолетовым телескопом GALEX выяснилось, что 30 % всех дисковых га-

лактик имеют ультрафиолетовое продолжение дисков, — излучение в ультрафиолете продолжается иногда на два—пять радиусов оптического (старого) звездного диска. Понятно, что это на наших глазах продолжается «достройка» внешних областей диска, формирование диска inside-out. Но что питает это звездообразование в областях, где старых звезд нет? Сейчас уже уверенно говорят, что протяженные ультрафиолетовые диски галактик — это следствие недавнего события падения крупной массы внешнего газа именно на периферию галактик. То есть падало не просто газовое облако — падало газовое облако с большим моментом вращения, необходимым для того, чтобы оно осело именно во внешней части вращающегося галактического диска. И вот тут пора перейти к вопросу об источниках внешней аккреции газа.

Космологи обещали, что Λ CDM-теория эволюции Вселенной как целого способна обеспечить источник постоянной плавной аккреции газа на диски галактик. А именно, первичный газ, вириализованный до рентгеновских температур по всему объему темного гало, должен очень постепенно остывать, высвечивая свою энергию, и оседать в диск (поскольку момент он при этом не теряет). Однако незадача опять вышла с наблюдениями: у гигантских спиральных галактик не оказалось рентгеновских гало! У эллиптических галактик той же массы — наблюдается, а у спиральных, которым аккреция гораздо нужнее, чем эллиптическим, — нет. Или, если, как у трех самых массивных спиральных галактик, удастся что-то вытянуть, то оказывается, что этого рентгеновского газа примерно в 100 раз меньше, чем нужно. И вот тут нашелся теоретик, израильский космолог Авишай Декель, который предложил радикальное *теоретическое* решение проблемы. Он предложил линейную аккрецию холодного газа из космологических филаментов.

Космологические филаменты!

Однородная изначально Вселенная очень быстро в процессе эволюции распределения темной материи под действием гравитации приобретает сетчатую, или ячеистую, или пенообразную структуру. И тогда между «узлами» крупномасштабной структуры, где рождаются массивные галактики, натягиваются нити — так называемые филаменты. Они состоят из темной материи, но есть там и газ, причем газ холодный, и он не стоит на месте: под действием гравитации он течет в узлы, туда, где идет формирование галактик. Первона-

чальные расчеты Декеля показывали, что аккреция холодного газа из филаментов на галактики эффективна только на больших красных смещениях, $z > 2$, и он даже связывал резкий спад в интенсивности космического звездообразования на $z < 1$ со сменой доминирующего режима аккреции, с линейного холодного на цилиндрический горячий. Однако сама идея была так хороша и так здорово решала и проблему источника аккреции холодного газа, и проблему недостачи момента в модельных галактиках, получаемых цилиндрической аккрецией, что народ стал ее обдумывать и обдумывать. И тут вот что приходит в голову. Да, в *массивных* галактиках аккреция из филаментов становится неэффективной на $z < 1$ из-за того, что у массивных галактик предполагается наличие горячей газовой короны, которая будет разогревать и поглощать любой подходящий снаружи филамент. Однако это именно в *массивных* галактиках! А у маломассивных галактик рентгеновских гало нет и быть не может — не хватает массы, чтобы разогреть газ. То есть маломассивным галактикам ничто не мешает аккрецировать из филаментов и на $z < 1$.

Позвольте, что же это получается? Массивные галактики аккрецируют из филаментов на $z > 2$, но и звезды свои они образуют тогда же. А маломассивные галактики аккрецируют из филаментов до сих пор, и звездообразование в них продолжается до сих пор! Это же downsizing! Без всякого «обратного эффекта» от активных ядер! А увеличение размеров «космологических ячеек» со временем, то есть фактически увеличение расстояний между соседними филаментами, все большее и большее «прореживание» системы филаментов, может приводить к тому, что они все чаще «промахиваются» мимо центра галактики при аккреции на нее и таким образом приносят газ со все бóльшим орбитальным моментом. Это приводит к концентрации аккрецируемого газа на периферии дисков и к построению дисков спиральных галактик «изнутри–наружу» (inside-out).

Эмпирический сценарий: все начиналось с S0...

Итак, какие установленные наблюдательные факты могут служить основой для формулировки эмпирического сценария эволюции дисковой галактики? На высоких красных смещениях, 10 млрд лет назад, в дисках галактик еще было много собственного газа, до половины всей барионной массы или выше; эти газовые диски были толстыми, турбулентными, и звездообразование в них шло невероятно эффективно, с временами исчерпания газа меньше 1 млрд лет. Из

этой эпохи должны были «вылупляться» толстые звездные диски, без спиральных рукавов (из-за того, что они динамически горячие и потому устойчивые против волновых возмущений плотности); и отношение магния к железу в звездах этого диска должно было быть выше солнечного, из-за краткости эпохи звездообразования [6]. Первые ассоциации, которые вызывает это описание, — это диски линзовидных галактик в близких группах и скоплениях, там, где не было условий для внешней аккреции холодного газа последние 5–8 млрд лет, где «реликтовые» дисковые галактики могли сохраняться без новых добавок все эти последние миллиарды лет. Но и толстый диск нашей собственной Галактики тоже подходит под это описание!

Ближе к красному смещению $z = 1$ ситуация во Вселенной меняется. Звездный компонент в массивных галактиках уже в основном сформировался, и собственного газа в дисках не осталось. Звездообразование во Вселенной начинает затухать, — средняя космическая интенсивность звездообразования падает практически вертикально, с $z = 1$ до $z = 0$ она упала на порядок. Но в локальной Вселенной есть (должна быть!) постоянная аккреция внешнего газа с высоким угловым моментом на диски галактик — на массивные эллиптические галактики она не идет, потому что там на пути холодных потоков газа встает горячее рентгеновское гало. Именно внешняя аккреция газа может подпитывать современное звездообразование в дисковых галактиках — не такое эффективное, как на $z = 2$, но все-таки местами заметное.

Мы знаем, что в локальной Вселенной, в поле, 75 % галактик — спиральные, а 15 % — линзовидные. То есть в одних дисках, которых больше, звездообразование идет и видны спиральные ветви, а в других, которых меньше, звездообразования практически нет (а когда есть, это не спиральные ветви, а кольца). Почему? Неужели на линзовидные галактики поля не идет аккреция, хотя они находятся точно в таком же окружении, что и спиральные? Нет. Статистика результатов наших наблюдений [7] показывает, что на линзовидные галактики поля аккреция газа идет: в большинстве из них протяженные газовые диски наблюдаются. Однако газ в этих дисках ионизован не молодыми звездами, а ударными волнами. Спектральные наблюдения показывают, что именно в линзовидных галактиках поля кинематика газа часто не похожа на кинематику звезд: газ или вращается в обратную сторону, или вообще сосредоточен в диске, плоскость которого наклонена к плоскости звездного диска.

Очевидно, гравитационные приливные воздействия звезд на такой газовой диск греют его и мешают звездообразованию (которое требует холодного газа). То есть условием стационарного звездообразования в диске галактики в настоящую эпоху является не только постоянная аккреция внешнего газа, но и подходящая геометрия этой аккреции — в плоскости основного звездного диска, что опять же возвращает нас к холодным филаментам Декея! Впрочем, ориентация современных дисковых галактик в пространстве относительно филаментов крупномасштабной структуры — это модная сейчас, но совершенно отдельная тема...

Библиографические ссылки

1. *Hubble E. P.* Realm of the Nebulae. — 1936.
2. *Naim A., Lahav O., Buta R. J. et al.* A comparative study of morphological classifications of APM galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1995. — Vol. 274. — P. 1107–1125. [arXiv:astro-ph/9502078](#).
3. *Dressler A.* Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies // *Astrophys. J.* — 1980. — Vol. 236. — P. 351–365.
4. *Baes M., Sil'chenko O. K., Moiseev A. V., Manakova E. A.* Metallicity and age gradients in round elliptical galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 467. — P. 991–1001. [astro-ph/0702605](#).
5. *Saintonge A., Kauffmann G., Wang J. et al.* COLD GASS, an IRAM legacy survey of molecular gas in massive galaxies - II. The non-universality of the molecular gas depletion time-scale // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 415. — P. 61–76. [1104.0019](#).
6. *Bournaud F., Elmegreen B. G., Martig M.* The Thick Disks of Spiral Galaxies as Relics from Gas-rich, Turbulent, Clumpy Disks at High Redshift // *Astrophys. J. Lett.* — 2009. — Vol. 707. — P. L1–L5. [0910.3677](#).
7. *Katkov I. Y., Kniazev A. Y., Sil'chenko O. K.* Kinematics and Stellar Populations in Isolated Lenticular Galaxies // *Astron. J.* — 2015. — Vol. 150. — P. 24. [1505.01386](#).