

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Происхождение морфологических типов галактик*

О.К. Сильченко

Галактики в современной Вселенной имеют очень разные формы: это могут быть одноставные звёздные сфероиды (эллиптические галактики) или сложные системы, обладающие как компактными звёздными сфероидами в центре, так и протяжёнными плоскими звёздными дисками (спиральные и линзовидные галактики). С морфологией галактик коррелируют и другие их физические параметры: скорости вращения, современные темпы звездообразования, возраст звёздного населения. Вопрос происхождения морфологических типов галактик активно обсуждается специалистами все последние сто лет, и доминирующая парадигма всё время меняется. В последние годы, когда стало ясно, что главный фактор эволюции галактик — это постоянный приток вещества извне, именно со свойствами этой внешней аккреции, и с изменением режима аккреции на протяжении миллиардов лет эволюции Вселенной, стало возможно ассоциировать и происхождение морфологических типов галактик.

Ключевые слова: эволюция галактик, морфология галактик, астрономические наблюдения

PACS numbers: 98.52. – b, 98.62. – g, 95.85. – e

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039960>

Содержание

1. Введение (248).
2. Динамика связана со структурой; а вот что обуславливает звездообразование? (249).
3. Современные сценарии происхождения линзовидных галактик (251).
4. Современный сценарий происхождения эллиптических галактик (253).
5. Современный морфологический тип галактики полностью определяется режимом внешней аккреции (254).

Список литературы (255).

1. Введение

Внегалактическая астрономия как область исследования всего, что находится за пределами Млечного Пути, — очень молодая наука по сравнению с физикой и с астрономией "вообще": ей всего 100 лет. Именно 100 лет назад Эдвин Хаббл доказал, что некоторые из туманностей, давно наблюдавшихся астрономами и занесённых в каталоги, на самом деле являются гигантскими звёздно-газовыми системами, расположенными далеко за пределами нашей Галактики. Туманными они выглядят именно потому, что очень далёки и не разрешаются на отдельные звёзды, — звёзды, из которых они состоят, при наблюдениях с Земли сливаются в общий туман. И

тогда же, 100 лет назад, Хаббл по горячим следам своего открытия предложил схему морфологической классификации галактик — классификации их структуры и внешнего вида. Первые принципы разделения на типы он сформулировал в 1926–1927 гг. [1, 2], а окончательный вид "камертон Хаббла" обрёл в его книге "Королевство туманностей" [3]. Собственно, несмотря на попытки многих поколений астрономов усовершенствовать эту схему, с тех пор она не сильно изменилась и по-прежнему выглядит примерно так, как это было 90 лет назад в оригинале книги Хаббла (рис. 1).

Собрав в работе [1] статистику внешнего вида 400 близких галактик, Хаббл первым делом разделил их на эллиптические и спиральные. Различие между первыми и вторыми было самое очевидное: эллиптические галактики (ручка камертона Хаббла) — это сфероиды, с однородным красным звёздным населением, а в спиральных галактиках доминируют протяжённые, довольно тонкие звёздные диски, в которых заметно множество мелко-масштабных деталей, связанных с областями звездообразования. В первую очередь самыми заметными структурами в дисках Хабблом были назначены спиральные ветви, а во вторую очередь — центральные триаксиальные перемычки, бары. Далее, длинные "зубцы" камертона Хаббл разделил на три части, "ранние" (Sa), "промежуточные" (Sb) и "поздние" (Sc). Как он уверяет в [2] — исключительно для удобства статистики. Три основные признака, по которым спиральные галактики относились к "ранним", "промежуточным" или "поздним", были [2]:

- размер центральной сфероидальной звёздной компоненты — балджа;

О.К. Сильченко

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,
Университетский просп. 13, 119234 Москва, Российская Федерация
E-mail: sil@sai.msu.su, olga@sai.msu.su

Статья поступила 30 июня 2025 г.

* Статья написана на основе доклада, представленного на Научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук, 19 марта 2025 г. (см. УФН 196 (3) 238 (2026))

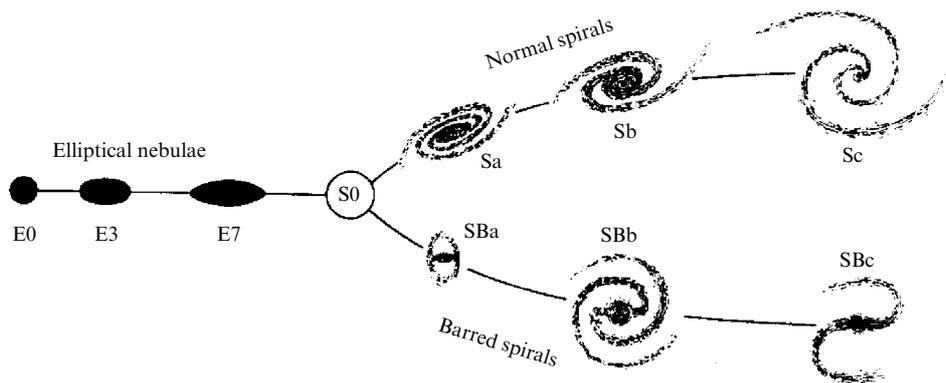


Рис. 1. Классификация морфологических типов галактик по Хаббл — так, как она была предложена им в книге 1936 г. [3].

- степень раскрытости спиральных ветвей;
- степень структурированности (клочковатости?) спиральных ветвей.

И наконец, в 1936 г. между эллиптическими и спиральными галактиками появился ещё один, промежуточный, тип — галактики S0 (см. рис. 1), или линзовидные [3]. Линзовидные галактики по крупномасштабной структуре напоминают спиральные — у них тоже есть протяжённые звёздные диски и концентрированные центральные сфероидальные балджи. Но в дисках линзовидных галактик отсутствуют спиральные рукава, и вообще, своим гладким красноватым видом (а, вероятно, по мысли Хаббла, и свойствами звёздного населения) линзовидные галактики скорее напоминают эллиптические.

Прежде чем перейти к современной оценке различий эллиптических, линзовидных и спиральных галактик, надо ещё раз подчеркнуть, что несмотря на обозначение "ранних", "промежуточных" или "поздних" типов галактик, Хаббл категорически отрицал, что его схема классификации носит эволюционный характер. Он предложил её исключительно для удобства описания статистических свойств структур в галактиках. Однако провокация была настолько качественная, что практически сразу астрономы стали пытаться вложить в схему Хаббла эволюционный смысл. Действительно, может быть, сначала появились "ранние" сфероиды, а потом вокруг них выросли протяжённые диски со спиральными ветвями? Ведь звёздное население сфероидов старше населения спиральных рукавов галактик поздних типов! Но впоследствии, когда набралась статистика по характеристикам галактик ранних типов, выяснилось, что спиральные галактики в среднем менее массивны, чем эллиптические [4]; т.е. если вокруг массивных эллиптических галактик ещё что-то нарастить, конечный вариант никак не будет соответствовать средним характеристикам галактик спиральных. А у космологов, сформулировавших к 1990-м годам свою картину мира, получилось прямо противоположное направление эволюции галактик: сначала, при первых событиях превращения газа в звёзды, должны были родиться звёздные диски (из-за того, что у протогалактик был первичный момент вращения), а уже потом, в процессе встреч и слияний этих дисковых галактик, должны были появиться сфероиды [5]. Эта последовательность превращений впоследствии тоже была отвергнута — из-за целого набора наблюдательных фактов, противоречащих ей.

Так чем же в глобальном масштабе ещё различаются галактики эллиптические, линзовидные и спиральные?

2. Динамика связана со структурой; а вот что обуславливает звездообразование?

1970-е годы были золотым веком наблюдательной внегалактической астрономии. Огромное количество прорывов в понимании галактик было связано с качественно новыми наблюдениями и их интерпретацией. В частности, к концу 1970-х гг. появились первые длиннопелювые спектры эллиптических и дисковых галактик, по которым можно было исследовать их звёздную кинематику [6]; а кинематику спиральных галактик по спектральным наблюдениям газа в дисках галактик начали исследовать ещё раньше [7]. И выяснилось, что дисковые галактики вращаются быстро — практически вся кинетическая энергия их звёзд сосредоточена в упорядоченном круговом вращении дисков. А вот вращение звёздного компонента эллиптических галактик, если и удалось его измерить, оказывалось намного медленнее при той же светимости галактики — основная внутренняя кинетическая энергия сфероидов связана с хаотическими движениями звёзд по всему объёму галактики, с так называемой дисперсией скоростей. Построение звёздодинамических моделей эллиптических галактик доказало, что лишь некоторые из сфероидальных галактик демонстрируют отношение скорости упорядоченного вращения звёздного компонента к дисперсии скоростей звёзд, соответствующее их форме, конкретно, отношению самой короткой оси сфероида к самой длинной (так называемые *oblate* сфероиды); а в самых массивных несферических эллиптических галактиках их трёхмерная структура соответствует форме эллипсоида дисперсии скоростей: самые быстрые хаотические движения направлены как раз вдоль самой длинной оси; в общем случае, эти галактики могут быть триаксиальными [8, 9].

Пользуясь накопленной статистикой по скоростям вращения звёздного компонента галактик различных типов, Майкл Фолл в 1982 г. представил на суд астрономической общественности корреляцию удельного углового момента звёздного тела галактики с её массой — так называемое "масштабное соотношение Фолла" [10]. Как выяснилось, наблюдается тесная степенная зависимость удельного углового момента от звёздной массы галактики, с наклоном в логарифмических единицах около 0,6, и такая корреляция с таким наклоном наблюдается внутри всех морфологических типов галактик. Но вот нуль-пункт у этих зависимостей — разный у разных морфологических типов: самый большой момент при фикси-

рованной массе у спиральных галактик, затем следуют линзовидные, а самый низкий момент — у эллиптических [11]. Более того, если мы у линзовидных галактик выделим только их дисковый компонент, диски S0 галактик по своей динамике окажутся такими же, как и спиральные, — пониженный интегральный момент у них обусловлен присутствием мощных балджей.

Таким образом, главное физическое отличие дисковых галактик от сфероидальных сосредоточено в различии их удельных угловых моментов. Любой эволюционный механизм, описывающий происхождение дисковой или сфероидальной морфологии галактик, должен давать в результате это различие.

А вот внутри широкого класса дисковых галактик основное различие между спиральными и S0 галактиками — в присутствии или отсутствии крупномасштабного звездообразования в диске. В остальном — в общей структуре и в динамике — эти типы галактик похожи. Более того, если мы обратимся к другому известному масштабному соотношению, связывающему интегральный темп звездообразования в галактике с её звёздной массой, к так называемой "главной последовательности" галактик [12], то при сходной звёздной массе линзовидные галактики располагаются значительно ниже, чем спиральные [13]. Про них говорят, что в них "подавлено" (quenched) звездообразование.

В результате ещё на заре внегалактической астрономии был предложен сценарий происхождения линзовидных галактик из спиральных путём удаления газа из диска [14, 15]. Действительно, нет газа — нет и звездообразования, ведь звёзды образуются из газа. А когда подросла статистика распространённости морфологических типов, и обнаружилось, что именно линзовидные галактики составляют большинство в самом плотном окружении — в скоплениях галактик, — тут же и конкретизировались механизмы удаления газа из дисков спиральных галактик, именно связанные с плотным окружением: это либо гравитационный прилив [17], либо газодинамическое воздействие — лобовое давление горячей межгалактической среды [18, 19]. Однако со временем накопились наблюдательные данные, поставившие под сомнения такой простой способ "сделать" дисковую галактику без звездообразования. Во-первых, во многих линзовидных галактиках газ всё же есть [20], а вот звездообразование почему-то ослаблено, и его уровень не соответствует измеренному количеству холодного газа. А во-вторых, большинство линзовидных галактик проживает не в скоплениях, а в поле, а некоторые из них

вовсе изолированы. Осознание этого факта спровоцировало к настоящему моменту "размножение" предлагаемых механизмов остановки звездообразования в дисках линзовидных галактик: у S0 в скоплениях этот механизм может быть один, а у S0 в поле — другой.

Но даже если мы сосредоточимся только на линзовидных галактиках скоплений, всё равно, идея, что это бывшие спиральные галактики, которые потеряли свой газ и остановили звездообразование именно когда попали в скопление, внутрь самого массивного тёмного гало, которое только существует в современной Вселенной, — встречается с трудностями. Под руководством Алана Дресслера в 1990-е годы на хаббловском космическом телескопе осуществлялся ключевой проект по исследованию морфологии галактик в скоплениях на красных смещениях вплоть до $z \approx 0,8$. И действительно, удалось обнаружить то, что ожидалось увидеть в рамках классического сценария: до $z < 0,4$ в скоплениях доминируют линзовидные галактики, а на $z \approx 0,5$ вдруг морфологический состав скоплений скачком меняется: большинство начинают составлять голубые (спиральные?) галактики, а доля линзовидных падает до 15% — как в разреженном поле [21, 22]. При этом доля эллиптических галактик не эволюционирует. Напрашивается очевидная интерпретация: именно на $z \approx 0,5$, когда в рамках стандартной космологической модели начинают "собираться" самые массивные гравитационно-связанные системы (скопления галактик), спиральные галактики аккрецируют на скопления из окружающих областей поля (где спиральных галактик — большинство) и затем, уже в плотном окружении и внутри горячей газовой среды, теряют свой газ и превращаются в спокойные S0s. Да, но на $z \approx 0,5$ мы наблюдаем галактики всего 5 млрд лет назад. Это значит, что в ближней Вселенной, в линзовидных галактиках скоплений звёздные диски должны быть относительно молодыми — ведь, согласно классическому сценарию, в них шло звездообразование только 5 млрд лет назад. Измерить возраст звёздного населения в дисках линзовидных галактик ближних скоплений не очень сложно, нужно всего лишь получить спектры и промоделировать их. И в ближних скоплениях Virgo и Fornax это было сделано. Оказалось, что возраст звёздного населения в дисках линзовидных галактик ближних скоплений — старый, в основном старше 10 млрд лет [23, 24]. Эти галактики не могли быть спиральными на $z = 0,5$. Более того, чем плотнее окружение линзовидных галактик, тем старше их диски (уже наша собранная статистика показана на рис. 2). Молодое звёздное население можно обна-

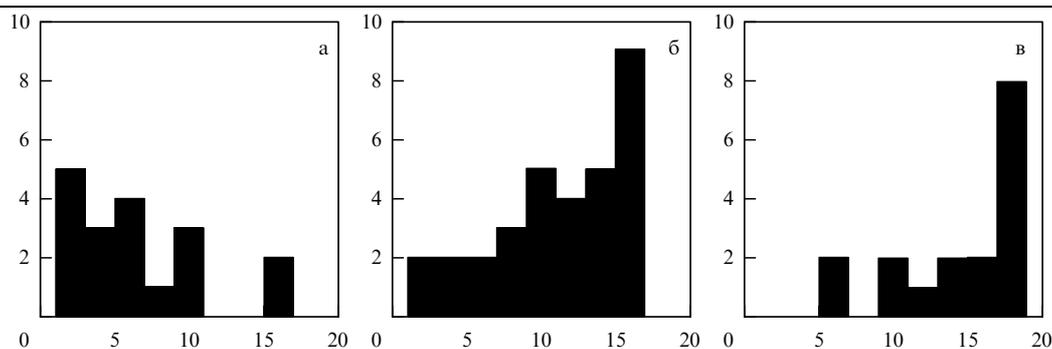


Рис. 2. Гистограммы оценок возрастов (в млрд лет) звёздных дисков линзовидных галактик в окружении разной плотности: (а) изолированные галактики (источник оценок — [25]), (б) галактики в бедных группах (источник оценок — [73]), (в) галактики в скоплении Virgo (источник оценок — [23] и [73]).

ружить в дисках некоторых *изолированных* линзовидных галактик [25], и эти линзовидные галактики в принципе могли быть спиральными немногие миллиарды лет назад. Однако ни близких соседей заметной массы, чтобы обеспечить гравитационное приливное воздействие, ни горячей межгалактической среды, которая такая горячая в скоплениях из-за вириального равновесия внутри очень массивного тёмного гало, вокруг изолированных линзовидных галактик нет; и следовательно, происхождение их морфологического типа не имеет ничего общего с динамическими механизмами, работающими в плотном окружении.

3. Современные сценарии происхождения линзовидных галактик

На самом деле, после 2010 г. классический сценарий удаления первичных запасов газа из дисков спиральных галактик, чтобы сделать из них галактики линзовидные, перестал уже казаться таким актуальным, потому что изменилась глобальная парадигма эволюции дисковых (в первую очередь спиральных) галактик. Если раньше казалось, что вся эволюция дисков галактик заключается в том, чтобы постепенно превратить первичные запасы газа в звёзды, то после 2010 г. развилась, и была принята как целое, картина, в которой "топливом" для звездообразования служит в течение всей жизни галактики *внешний* холодный газ, который постоянно добавляется извне в диск; и, собственно, именно темпом этой аккреции определяется темп звездообразования в диске.

Сама идея необходимости постоянного ламинарного притока газа извне родилась из совокупности наблюдательных данных. Тут стоит упомянуть в первую очередь особенности химической эволюции тонкого звёздного диска Млечного Пути, в котором средняя металличность звёзд не росла последние 8 млрд лет [26], что самым естественным образом было сразу же объяснено [27, 28] постоянным притоком извне малометаллического газа, который перемешивается с собственным газом диска Галактики и разбавляет непрерывно формирующиеся продукты звёздного нуклеосинтеза, неизбежного в случае продолжающегося звездообразования в диске. Также сильно повлияло на парадигму обнаружение весьма короткой временной шкалы исчерпания газа в дисках спиральных галактик ближней Вселенной при современных темпах звездообразования в них [29]. Не останавливать же всё звездообразование через 2 млрд лет (современное время исчерпания газа в спиральных галактиках) после того, как закончатся текущие запасы газа в дисках галактик? Сама идея ламинарной аккреции газа очень понравилась космологам, у которых в моделях на гравитирующие центры всё время аккрецирует окрестная тёмная материя — а где течёт тёмная материя, там за ней должны следовать и барионы. Наблюдательные обзоры далёких галактик позволили установить эволюцию как темпов звездообразования, так и времени исчерпания газа в галактиках на это звездообразование [30], и наблюдаемая эволюция и того, и другого вполне вписалась в численные расчёты "сборки" гало тёмной материи на протяжении последних 13 млрд лет эволюции Вселенной — по крайней мере, их степенные зависимости от $(1+z)$ оказались похожими [31, 32]. Появились гармоничные сценарии равновесного состояния дисков галактик в течение всего времени их существования: сколько

газа натечёт за единицу времени, столько и будет израсходовано на звездообразование, за вычетом галактического ветра [33]. В результате к первому основному фактору эволюции галактик — остановке звездообразования в массивных галактиках под действием возможного внутреннего механизма, связанного с набором массы галактикой, — добавился второй не менее важный фактор — постоянный приток газа извне. Теперь уже для линзовидных галактик нужно было объяснять, почему приток газа в диск, если он такой же, как у спиральных галактик, не приводит к возобновлению звездообразования.

Современные сценарии происхождения линзовидных галактик — множественны. В различных исследованиях, основанных на статистике глобальных свойств S0-галактик ближней Вселенной, предлагаются целые наборы сценариев, связанные с

- гравитационным приливным взаимодействием галактик в окружении средней плотности, а именно в группах [34, 35]; это взаимодействие возмущает газ в дисках галактик, турбулизует его, в результате чего под действием вязкости газовые облака теряют момент и сваливаются в центр галактики, где быстро расходуются на вспышку звездообразования в области балджа;

- слиянием галактик — чаще всего, с поглощением спутников (малый мерджинг); но в определённых орбитальных конфигурациях — и с большим мерджингом, которое динамически нагревает диск, и звёздный, и газовый, утолщает его, что уменьшает объёмную плотность газа, и в конечном счёте приводит к подавлению звездообразования [36, 37];

- и, наконец, с особенностями аккреции, в первую очередь — с её геометрией. Мы [38] находили, что в случае наклонного прихода газа в диск в линзовидной галактике звездообразование в среднем ниже, чем если её газ лежит и вращается внутри звёздного диска галактики (рис. 3). При этом интегральная интенсивность звездообразования в галактике оказывается на порядок — два ниже, чем ожидается для наблюдаемой в ней массы газа. Вероятно, причиной этого может быть то, что в газовом потоке, под углом приходящем в потенциальную яму звёздного диска, развивается ударная волна, которая греет газ и предотвращает его остывание до режима звездообразования. В последние годы, в связи с получением большой статистики по галактикам с рассогласованной кинематикой газа и звёзд в обзоре MaNGA, стали активно развиваться идеи о том, что если в диск галактики приходит так называемый противовращающийся газ, орбитальный спин которого на 180 градусов отличается от спина диска галактики, то его столкновение с "родным" газом галактики приводит к исчезновению момента у обоих, их падению в центр галактики с последующим исчерпанием на центральную вспышку звездообразования [39–41].

Вопрос о том, остаётся ли при этом какая-то значимая роль у окружения галактики, активно обсуждается, и пока не имеет однозначного решения. В некоторых работах роль окружения отрицается [37, 42]. В некоторых статистиках роль плотности окружения, конкретно, роль скоплений и групп, всё же обнаруживается [35, 43]. Мы в своё время отмечали, что в скоплениях, внутри горячего рентгеновского газового гало, внешние холодные потоки не выживают, и аккреция становится невозможна, что позволяет однажды сформировавшимся линзовидным



Рис. 3. Гистограммы оценок интегральных темпов звездообразования (по ультрафиолетовой светимости, данные базы NED) для линзовидных галактик с разной ориентацией глобальных газовых дисков относительно звёздных дисков.

галактикам именно в скоплениях сохранять свой морфологический тип в течение миллиардов лет [44]. Именно с этим связана зависимость возраста звёзд в дисках современных линзовидных галактик от плотности окружения (см. рис. 2). Девять – десять миллиардов лет назад, на красных смещениях больше единицы — как образно выражаются в литературе, в "полдень космического звездообразования" — у галактик наблюдаются толстые, толщиной в килопарсек газовые диски, соответственно, формирующиеся в ту эпоху такие же толстые звёздные диски [45–47]; а характерные времена исчерпания газа и затухания звездообразования на $z = 2$ — всего около полумиллиарда лет [30]. Это значит, что 10 млрд лет назад в ускоренном темпе в массивных дисковых галактиках формировались структуры, которые уже через полмиллиарда лет выглядели как типичные линзовидные галактики. В нашей собственной Галактике, в Млечном Пути существует такая крупномасштабная подструктура — толстый звёздный диск из старых, старше 10 млрд лет, звёзд с повышенным отношением магния к железу, что означает очень короткую эпоху его формирования 10–11 млрд лет назад [48]. А вот тонкий звёздный диск в Млечном Пути начал формироваться только 8–9 млрд лет назад. Это значит, что между $z = 2$ и $z = 1$ Млечный Путь был линзовидной галактикой. Дальнейшая, после $z = 1$, судьба любой дисковой галактики зависит от того, повезёт ли ей встретить источник аккреции внешнего холодного газа. Если она попадает в скопление, в горячую межгалактическую среду, она не будет иметь возможности аккрецировать холодный газ, строить свой тонкий звёздный диск, и навсегда останется линзовидной.

Однако большинство линзовидных галактик проживает всё-таки вне скоплений. Из общих соображений кажется, что при схожем окружении и при схожих массах они также должны аккрецировать внешний холодный газ, как и галактики спиральные. Какие же факторы оказывают решающее влияние на невозможность ламинарного звездообразования в их дисках и формирования тонких звёздных дисков, в которых могла бы развиваться спиральная структура? Один фактор мы [38] уже предложили и обосновали — это геометрия прихода газа, точнее, наклонное, по отношению к звёздному диску, направление прихода внешнего газового потока. Второй вариант режима аккреции внешнего холодного газа, который не приводит к заметному звездообразованию в диске, содержится в остроумном сценарии Пенга и Ренцини [49]. Внешний узконаправленный поток газа

приносит с собой угловой момент, и это орбитальный угловой момент. Если он вдруг оказывается большим — т.е. аккреционный поток падает не прямо на центр галактики, а как бы промахивается мимо центра, — то этот газ не сможет попасть во внутреннюю область диска, он "застрянет" на периферии, сформировав протяжённый газовый диск за пределами звёздного. Именно такие газовые диски и наблюдаются у гигантских линзовидных галактик [50]. То обстоятельство, что этот газ не "поджигается" потенциалом звёздного диска, приводит опять же к повышенной толщине и к пониженной объёмной плотности газа; а эти факторы подавляют звездообразование в экваториальной плоскости галактики.

Пенг и Ренцини [49] высказали идею; а мы недавно нашли реальную линзовидную галактику, которая точно вписывается в этот сценарий [51]. Это галактика NGC 6798. Галактика известна как абсолютно изолированная [52]: она не входит ни в скопления, ни в группы. По морфологической классификации — это линзовидная галактика. Однако у неё есть протяжённый диск нейтрального водорода [53], и в рамках обзора галактик ранних типов методом панорамной спектроскопии ATLAS-3D выяснилось, что во внутренней области газовый диск — причём как диск ионизованного водорода, так и диск холодного газа, нейтрального и молекулярного, — противостоит по отношению к звёздному диску [54]. Далее исследование этой галактики продолжалось в сторону увеличения поля зрения — в идеале хотелось добраться до края диска нейтрального водорода, т.е. до радиуса более 3 угловых минут, или около 30 кпк. Так далеко основной звёздный диск галактики спектральными методами всё же не получилось проследить; но на всём протяжении диска, которое удалось охватить анализом, газ строго противостоит звёздам [55, 56]. Мы [51] по нашим данным и по архивным наблюдениям радиоинтерферометра WSRT проследили пространственную ориентацию плоскости вращения газа: она точно совпала в пространстве с плоскостью внешнего звёздного диска; но только газ при этом вращается навстречу звёздам, угол между векторами их спинов — ровно 180 градусов. Это означает, что газ был аккрецирован в плоскость галактики — но с орбитальным угловым моментом, развернутым на 180 градусов по отношению к собственному угловому моменту галактики. Измеренные по двумерному полю скоростей, в рамках модели кругового вращения, скорости радиального натекания газа за пределами радиуса 5 кпк строго

равны нулю [51, 57]. Это как раз и означает, что аккрецированный газ не попадает во внутренний диск галактики, остаётся на её периферии. Почему? В [58] было показано, что удельный угловой момент газа NGC 6798 в несколько раз превышает ожидания от измеренной в галактике массы холодного газа (согласно ещё одному масштабному соотношению для галактик). То есть это тот самый случай, о котором писали Пенг и Ренцини [49]: слишком большой момент аккрецируемого потока. Ну, и поскольку газ не попадает в области поджатия гравитационным потенциалом звёздного диска, звездообразование в нём также значительно слабее ожидаемого — NGC 6798 попадает на нижний край "зелёной долины" [51]. Вот реальное наблюдаемое подтверждение существования именно такого сценария формирования и продолжительного существования линзовидных галактик ближней Вселенной в рамках данного морфологического типа.

4. Современный сценарий происхождения эллиптических галактик

Начиная с конца 1970-х [59] и до конца 2000-х годов, главным сценарием происхождения эллиптических галактик считался так называемый большой мерджинг — слияние двух дисковых галактик сравнимых масс. Такой сценарий обеспечивал и преобладание хаотических движений звёзд над упорядоченным вращением [60], и корреляцию металличности звёзд с массой галактики [59]. Особенно этот сценарий нравился космологам [5]: в классической модели иерархической эволюции распределения материи во Вселенной как раз такие слияния были главным событием в жизни каждой массивной эллиптической галактики [61, 62]. Однако все изменилось в конце 2000-х годов: появились новые наблюдательные данные, которые заставили полностью пересмотреть концепцию.

Сначала в 2007 г. мы опубликовали исследование градиентов металличности звёздного населения в выборке гигантских эллиптических галактик с круглой формой изофот [63]. Это были глубокие спектральные наблюдения с длинной щелью, полученные на российском шестиметровом телескопе БТА Специальной Астрофизической обсерватории; и именно глубина этих данных и высокая точность измеренных характеристик звёздного населения позволили впервые увидеть излом на радиальной зависимости металличности. До этого из-за невысокой точности измерений исследователи вписывали в облако точек единую степенную зависимость на всём протяжении галактики, и получаемые в логарифмических координатах наклоны, $\sim -0,2 - 0,3 \text{ dex per dex}$ (т.е. падение металличности примерно в 2 раза на отрезке изменения расстояния до центра галактики в 10 раз), не противоречили популярному сценарию. А мы увидели, что в центре градиенты крутые, круче $\sim -0,4 \text{ dex per dex}$, а за пределами половинки эффективного радиуса они "выползают", т.е. фактически сходят на ноль. К тому времени уже существовали обширные выборки модельных эллиптических галактик, с детально посчитанными в рамках ΛCDM -космологии пространственно разрешенными свойствами звёздного населения и выделенными особенностями на эволюционных путях. Аспирантка Мюнхенского центра, где эти расчёты проводились, Чиоки Кобаяши, уже опубликовала работу [64], где показала, что большой мерджинг всегда "замывает"

радиальные градиенты металличности — настолько, что если градиент металличности круче $\sim -0,2 \text{ dex per dex}$, эта галактика *точно* не могла пройти через большой мерджинг, по крайней мере, в последние 10 млрд лет (т.е. после завершения формирования звёздного населения). И сравнив наши результаты с результатами ΛCDM -моделирования, мы сделали вывод в [63], что исследованные нами гигантские эллиптические галактики не могли образоваться в результате большого мерджинга. Нами был предложен двухстадийный сценарий: сначала галактика формирует свою внутреннюю часть звёздного тела в результате так называемого "монолитного коллапса", т.е. сжатия единого газового облака с эффективным быстрым звездообразованием в ходе этого сжатия; а уже потом на эту компактную звёздную "затравку" аккрецируют мелкие спутники, которые застревают во внешних областях из-за своего орбитального углового момента. При таком ходе эволюции все перемешивание, связанное с мерджингом, ограничивается внешними областями галактик, и именно там мы видим плоский градиент металличности, в то время как во внутренней области сохраняется крутой градиент, унаследованный от монолитного коллапса [65]. При этом желательно, чтобы аккрецирующие спутники были без газа, чтобы не омолаживать звёздное население внутренней области галактики.

По чистой случайности именно в 2007–2008 гг. появились и другие наблюдательные аргументы в пользу отказа от сценария одного большого мерджинга в пользу сценария множественного малого мерджинга для типичной эволюции эллиптических галактик. Эти аргументы базировались на наблюдательном исследовании эволюции размера типичной массивной эллиптической галактики. Накопились [66, 67] фотометрические данные для массивных, со звёздной массой до 2×10^{11} солнечных масс, эллиптических галактик на красном смещении 2–3, т.е. для гигантских эллиптических галактик, какими они были 10–11 млрд лет назад; а они кстати уже тогда были без звездообразования. Эти далёкие галактики оказались очень компактными, с типичными эффективными радиусами около 1 кпк [66, 67]. То есть за последние 10 млрд лет массивные эллиптические галактики, не испытывая звездообразования, увеличили свой размер в 5 раз, почти не увеличив свою звёздную массу. Они росли быстрее, чем дисковые галактики со звездообразованием! И этот быстрый рост размера также противоречил сценарию большого мерджинга — поскольку при большом *сухом* мерджинге размер звёздной системы, конечно, тоже растёт, но он растёт строго пропорционально массе. То есть чтобы увеличить большим мерджингом размер звёздной системы в 5 раз, нужно и массу её увеличить в 5 раз (устроить 5 последовательных больших слияний). И тогда для системы, которая имела массу 2×10^{11} солнечных масс на $z = 2$, конечная звёздная масса окажется $> 10^{12}$ солнечных масс. Таких эллиптических галактик в ближней Вселенной нет — разве что единичные случаи в центрах скоплений; а в поле — нет. Пришлось отказываться от сценария большого мерджинга как магистральной линии формирования современных эллиптических галактик. И уже с этой новой стороны, с этой новой аргументацией обратиться к двухстадийному сценарию, в котором последние 10 млрд лет основным механизмом эволюции эллиптических галактик был множественный малый мерджинг.

Три основных механизма, которые могли бы привести к увеличению размера звёздной системы без дополнительного звездообразования в ней, были рассмотрены в заметке Безансон и др. [68]. Этими тремя механизмами являются: большой мерджинг (слияния галактик сравнимых масс), малый мерджинг и вспышка в центре галактики активного ядра, причём лучше с кинематической природой активности (с джетом), которая впрыском дополнительной энергии в окружающую звёздную систему увеличит равновесный (вириальный) размер, соответствующий глубине ямы гравитационного потенциала. Для каждого механизма на масштабирующих соотношениях для эллиптических галактик, известных как для $z = 0$, так и для $z = 2$, рисовались стрелочки — направления эволюции. Было показано, что единственный механизм, который успешно "сажает" далёкие массивные эллиптические галактики на современные масштабные соотношения, — это множественный малый мерджинг. Достаточно за 10 млрд лет "проглотить" 8 спутников, каждый с массой в 10 % от хозяйской галактики, чтобы обеспечить ей необходимую эволюцию размера при скромной эволюции массы.

Множественный малый мерджинг — или поглощение галактик-спутников с массой в 10, или более, раз меньшей, чем масса основной хозяйской галактики — как динамический механизм эволюции, имеет целый ряд преимуществ перед большим мерджингом. Как показано в [69], размер звёздной системы при множественном малом мерджинге растёт пропорционально квадрату массы: чтобы увеличить размер в 4 раза, достаточно набрать дополнительно звёздной массы так, чтобы удвоить исходную. А если предположить, что спутник поглощается не целиком, а предварительно разрывается гравитационными приливными силами на мелкие части и поглощается уже по частям — то степень в зависимости роста размера от роста массы увеличивается до 2,4. При множественном малом мерджинге, как и в реальных массивных галактиках в соответствии с наблюдательными свидетельствами [70], надстраиваются самые внешние области галактики, сохраняя внутреннюю часть массивной эллиптической галактики нетронутой, такой, какой она сформировалась в первичной вспышке звездообразования на $z > 5$ — т.е. изначально крутой градиент металличности во внутренней половине галактики не замывается бурной релаксацией звёздной системы (неизбежной при большом мерджинге). И наконец, динамический "разогрев", т.е. уменьшение удельного углового момента системы, связанного с упорядоченным вращением звёзд, именно при множественном малом мерджинге в несколько раз эффективнее, чем при большом мерджинге [11].

В результате для полной эволюции гигантских эллиптических галактик сейчас принята такая схема (рис. 4). Где-то в совсем раннюю эпоху, на красных смещениях $z > 5$, происходит то, что классики описывали как "моноклитный коллапс": на самом деле, внутри массивного тёмного гало газовое облако с массой протогалактики разбивается на сгустки, и эти сгустки далее в рамках диссипативного коллапса сливаются, падают в центр и очень эффективно формируют звёздную систему — с массой до 10^{11} солнечных масс. Бурное звездообразование турбулизует газ, он теряет момент и натекает на центральную чёрную дыру, поставляя топливо для ядерной активности; в центре галактики зажигается квазар, который греет и разгоняет газ вокруг себя и таким об-

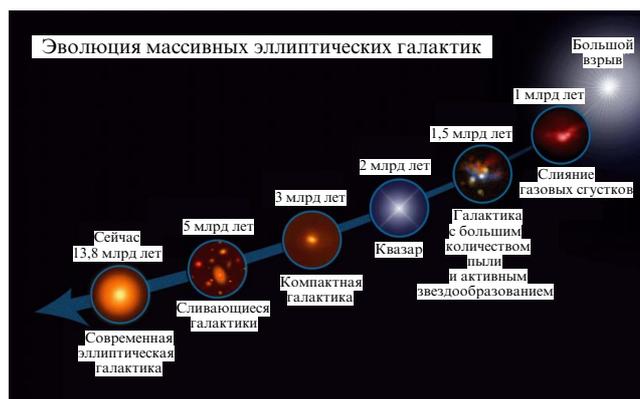


Рис. 4. Современный сценарий эволюции гигантских эллиптических галактик (иллюстрация — из публичной коллекции NASA Image Galleries, перевод и редакция русских подписей — Е.В. Шимановской).

разом останавливает звездообразование. Это сейчас ключевой момент всех моделей формирования массивных галактик, встроенный во все Λ CDM-модели; по-английски это красиво называется feedback от активного ядра. Дело в том, что в современных эллиптических галактиках звёздное население в центре — старое; причём чем массивнее галактика, тем старше звёздное население, и тем выше отношение обилия магния в звёздах к железу (которое характеризует длительность основной эпохи звездообразования — она тем короче, чем выше это отношение). Идея очень хороша: есть тесная корреляция между звёздной массой эллиптической галактики и массой её центральной чёрной дыры; следовательно, чем массивнее галактика, тем ярче будет вспыхнувший в её центре квазар, тем быстрее и эффективнее он остановит звездообразование. В результате к эпохе $z \approx 3$ мы получим компактную звёздную систему без звездообразования. Все основные события в ту раннюю эпоху, $z \approx 4-5$, происходили в центральном килопарсе галактики — и, соответственно, "вылупившаяся" пассивная звёздная система тоже имеет характерный размер 1 кпк. И с тех пор все последние 11 млрд лет на эту затравку падают маленькие спутники, чисто звёздные, без газа, и в этом — вся эволюция гигантской эллиптической галактики (см. рис. 4).

5. Современный морфологический тип галактики полностью определяется режимом внешней аккреции

Что касается аккреции внешнего газа на спиральные галактики, то многие аргументы говорят в пользу того, что она должна происходить на длинной временной шкале строго в плоскости галактического диска, с орбитальным спином, строго со-направленным внутреннему спину галактики. В заметке Пенга и Ренцини [49], для того, чтобы получить качественную оценку, авторы перемножили три эволюционные зависимости параметров спиральных (дисковых) галактик от красного смещения: рост звёздной массы (за счёт звездообразования), наблюдаемый рост радиуса и рост скорости вращения (выделяется из эволюции соотношения Талли–Фишера через зависимость "меры поддержки диска вращением" от z в [71]). У них получилось, что в последние 10 млрд лет угловой

момент спиральных галактик вырос от 30 до 200 раз — в зависимости от принятой космической истории звездообразования. Это наблюдательная оценка, полученная по наблюдаемым темпам эволюции масштабных соотношений для галактик. Чтобы теоретически обосновать такую быструю эволюцию углового момента спиральных галактик в последние пол-жизни Вселенной, как раз и требуется допущение натекания узких газовых потоков извне строго в плоскости галактики. Только такой режим аккреции обеспечивает требуемый рост момента, и он же обеспечивает ламинарное звездообразование в плоскости галактического диска и формирование динамически холодного тонкого звёздного диска, в котором могут развиваться внутренние неустойчивости и формироваться спиральные ветви и центральные перемычки (бары).

Итак, в результате рассмотрения эмпирических сценариев эволюции галактик разных морфологических типов, мы приходим к выводу, что современный морфологический тип галактики полностью определяется режимом аккреции на неё внешнего барионного компонента в последние 10 млрд лет.

- Эллиптические галактики получаются на $z = 0$, если на них аккрецируют чисто звёздные небольшие спутники, лишённые газа; направление аккреции может быть любым, и собственно распределение в пространстве направлений падения спутников будет определять и конечную форму эллиптической галактики — сферическую в случае изотропного распределения и триаксиальную в случае наличия нескольких выделенных направлений прихода спутников.

- Спиральные галактики получаются на $z = 0$, если на них аккрецируют холодные газовые потоки строго в плоскости галактического диска, с небольшим орбитальным спином, со-направленным собственному спину галактики.

- И, наконец, линзовидные галактики получаются во всех остальных случаях: либо когда аккреция холодного газа вообще не идёт (например, в скоплениях галактик), либо когда она идёт, но не в плоскости галактического диска, либо когда она идёт в плоскости галактического диска, но со слишком большим орбитальным моментом, препятствующим попаданию аккрецированного газа в центральную часть звёздного диска. Также и "мокрый" малый мерджинг — поглощение спутников, содержащих кроме звёзд ещё и газ, — тоже приводит к формированию линзовидных галактик.

Собственно, соотношение числа галактик различных морфологических типов в ближней Вселенной — $\text{Sp}:S0:E = 0,75:0,15:0,06$ [72] — очевидно отражает встречаемость различных типов аккреции, которую, в свою очередь, вероятно надо связывать с геометрией и составом элементов крупномасштабной структуры Вселенной (узлов, филаментов и т.д.).

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. Hubble E P *Astrophys. J.* **64** 321 (1926)
2. Hubble E P *The Observatory* **50** 276 (1927)
3. Hubble E P *Realm of the Nebulae* (New Haven, CT: Yale Univ. Press, 1936)
4. Van den Bergh S *Astron. J.* **107** 153 (1994)
5. Baugh C M, Cole S, Frenk C S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **283** 1361 (1996)
6. Illingworth G *Astrophys. J.* **218** L43 (1977)
7. Rubin V C, Ford W K (Jr) *Astrophys. J.* **159** 379 (1970)
8. Binney J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **183** 501 (1978)
9. Schechter P L, Gunn J E *Astrophys. J.* **229** 472 (1979)
10. Fall S M, in *Internal Kinematics and Dynamics of Galaxies* (Intern. Astronomical Union Symp., Vol. 100, Ed. E Athanassoula) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1983) p. 391, DOI:10.1007/978-94-009-7075-5_108
11. Romanowsky A J, Fall S M *Astrophys. J. Suppl.* **203** 17 (2012)
12. Noeske K G et al. *Astrophys. J.* **660** L43 (2007)
13. González Deldago R M et al. *Astron. Astrophys.* **590** A44 (2016)
14. Spitzer L (Jr.), Baade W *Astrophys. J.* **113** 413 (1951)
15. Biermann P, Tinsley B M *Astron. Astrophys.* **41** 441 (1975)
16. Dressler A *Astrophys. J.* **236** 351 (1980)
17. Larson R B, Tinsley B M, Caldwell C N *Astrophys. J.* **237** 692 (1980)
18. Gunn J E, Gott J R (III) *Astrophys. J.* **176** 1 (1972)
19. Засов А В *Письма в Астрон. журн.* **4** 487 (1978); Zsov A V *Sov. Astron. Lett.* **4** 263 (1978)
20. Welch G A, Sage L J, Young L M *Astrophys. J.* **725** 100 (2010)
21. Fasano G et al. *Astrophys. J.* **542** 673 (2000)
22. Wilman D J et al. *Astrophys. J.* **692** 298 (2009)
23. Johnston E J, Aragón-Salamanca A, Merrifield M R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441** 333 (2014)
24. Iodice E et al. *Astron. Astrophys.* **627** A136 (2019)
25. Katkov I Yu, Kniazev A Yu, Sil'chenko O K *Astron. J.* **150** 24 (2015)
26. Twarog B A *Astrophys. J.* **242** 242 (1980)
27. Larson R B *Nature* **236** 21 (1972)
28. Tosi M *Astron. Astrophys.* **197** 47 (1988)
29. Bigiel F et al. *Astrophys. J. Lett.* **730** L13 (2011)
30. Tacconi L J, Genzel R, Sternberg A *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **58** 157 (2020)
31. Genel S et al. *Astrophys. J.* **688** 789 (2008)
32. Speagle J S et al. *Astrophys. J. Suppl.* **214** 15 (2014)
33. Lilly S J et al. *Astrophys. J.* **772** 119 (2013)
34. Bekki K, Couch W J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415** 1783 (2011)
35. Deeley S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **498** 2372 (2020)
36. Eliche-Moral M C et al. *Astron. Astrophys.* **617** A113 (2018)
37. Fraser-McKelvie A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **481** 5580 (2018)
38. Sil'chenko O K, Moiseev A V, Egorov O V *Astrophys. J. Suppl.* **244** 6 (2019)
39. Khoperskov S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **500** 3870 (2021)
40. Han S et al. *Astrophys. J.* **977** 116 (2024)
41. Zhou Y et al. *Astrophys. J.* **977** 62 (2024)
42. Johnston E J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **514** 6141 (2022)
43. Coccato L et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **492** 2955 (2020)
44. Sil'chenko O *Memorie Soc. Astron. Italiana Suppl.* **25** 93 (2013)
45. Reshetnikov V P, Dettmar R-J, Combes F *Astron. Astrophys.* **399** 879 (2003)
46. Elmegreen B G, Elmegreen D M *Astrophys. J.* **650** 644 (2006)
47. Lian J, Luo L *Astrophys. J. Lett.* **960** L10 (2024)
48. Fuhrmann K *Astron. Astrophys.* **338** 161 (1998)
49. Peng Y, Renzini A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **491** L51 (2020)
50. Oosterloo T A et al. *Astron. Astrophys.* **465** 787 (2007)
51. Sil'chenko O K et al. *Astrophys. Bull.* **80** 1 (2025)
52. Караченцева В Е и др. *Астрофиз. бюл.* **65** 1 (2010); Karachentseva V E et al. *Astrophys. Bull.* **65** 1 (2010)
53. Serra P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **422** 1835 (2012)
54. Davis T A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **417** 882 (2011)
55. Katkov I Yu, Sil'chenko O K, Afanasiev V L *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **438** 2798 (2014)
56. Boardman N F et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **471** 4005 (2017)
57. Di Teodoro E M, Peek J E G *Astrophys. J.* **923** 220 (2021)
58. Kurapati S, Chengalur J N, Verheijen M A W *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **507** 565 (2021)
59. Tinsley B M, Larson R B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **186** 503 (1979)
60. Hernquist L *Astrophys. J.* **400** 460 (1992)
61. Kauffmann G, White S D M, Guiderdoni B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **264** 201 (1993)
62. De Lucia G et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **366** 499 (2006)
63. Baes M et al. *Astron. Astrophys.* **467** 991 (2007)
64. Kobayashi Ch *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **347** 740 (2004)
65. Carlberg R G *Astrophys. J.* **286** 403 (1984)
66. Trujillo I et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **382** 109 (2007)

67. Buitrago F et al. *Astrophys. J.* **687** L61 (2008)
68. Bezanson R et al. *Astrophys. J.* **697** 1290 (2009)
69. Naab T, Johansson P H, Ostriker J P *Astrophys. J.* **699** L178 (2009)
70. van Dokkum P G et al. *Astrophys. J.* **709** 1018 (2010)
71. Kassin S A et al. *Astrophys. J.* **758** 106 (2012)
72. Naim A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **274** 1107 (1995)
73. Sil'chenko O K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427** 790 (2012)

The origin of morphological types of galaxies

O.K. Sil'chenko

*Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute,
Universitetskii prosp. 13, 119234 Moscow, Russian Federation
E-mail: sil@sai.msu.su, olga@sai.msu.su*

Galaxies in the modern Universe demonstrate very diverse shapes. They can be one-component stellar spheroids (elliptical galaxies) or complex systems including compact stellar spheroids in the centers and extended flat stellar disks (spiral and lenticular galaxies). The morphology of the galaxies is related with other physical parameters: rotation velocities, current star formation rates, and stellar population ages. The problem of morphological type origin is persistently discussed for the last hundred years, and the dominant paradigm changes every time. Last years it becomes clear that the main agent of galaxy evolution is non-stop outer matter accretion; hence it is just the time to associate the morphological type origin with the properties of this outer accretion and with its secular change during billion years of the Universe evolution.

Keywords: evolution of galaxies, morphology of galaxies, astronomical observations

PACS numbers: **98.52. – b, 98.62. – g, 95.85. – e**

Bibliography — 73 references

Received 30 June 2025

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **196** (3) 248 – 256 (2026)

Physics – Uspekhi **69** (3) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039960>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.03.039960>