

ГАЛАКТИКА: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

Б.М. Шустов

THE GALAXY: PAST, PRESENT, FUTURE

B.M. Shustov

Представлен краткий обзор галактической эволюции на примере нашей галактики, начиная от образования первых звезд ($\sim 10^8$ лет после Большого взрыва) и кончая эпохой угасания галактики через $\sim 10^{13}$ лет.

A brief review of galactic evolution (our Galaxy is considered as an example), from the formation of the first stars ($\sim 10^8$ years after the Big Bang) to the epoch of galaxy extinction by about 10^{13} years is presented.

1. Введение

Астрономия, как и физика, химия, биология и др., давно стала меганаукой. Если попытаться выяснить у астрономов различных специальностей главную цель астрономической науки, то, скорее всего, будут получены довольно разнообразные ответы. И все-таки их можно суммировать: исследование происхождения и эволюции Вселенной составляет стратегическую задачу науки о космосе. Также будет справедливо отметить, что главной частью этой задачи является изучение свойств и истории развития Солнца, Солнечной системы и нашей галактики. Эти исследования теснейшим образом связаны с наиболее важными для человечества вопросами происхождения и развития жизни.

Конечно, в рассматриваемом аспекте и Солнце и небесные тела, входящие в Солнечную систему, для жителей Земли более важны, чем галактика, но по мере проникновения в природу сложных взаимосвязей между различными формами материи и процессами в нашей звездной системе приходит понимание того, что, например, изменения физических и химических параметров и самого Солнца и межзвездного вещества в окрестностях Солнца могут быть связаны с ходом галактической эволюции. Вот лишь несколько вопросов на эту тему.

- Насколько верна теория, согласно которой галактические космические лучи могут определять глобальные климатические изменения на нашей планете?

- Почему у Солнца и других подобных мало проэволюционировавших звезд (т. е. звезд, у которых химический состав в процессе эволюции изменился несущественно) столь велики различия в содержании тяжелых элементов?

- Как связаны свойства Солнечной системы и самого Солнца с его положением близ коротационного радиуса (на этом расстоянии скорость вращения галактики и ее спирального узора совпадают)?

- Связаны ли (и в какой степени) геологические эпохи с процессами взаимодействия Солнца и Солнечной системы с объектами, населяющими галактический диск?

Мы не останавливаемся на астрономических аспектах важнейшей проблемы распространенности жизни в галактике, отметим лишь, что быстрое увеличение в последние годы числа открываемых планет, часть из которых, возможно, пригодна для жизни, может стать лишь первой предпосылкой надви-

гающихся изменений глобальной концепции человеческой цивилизации.

В этой лекции описана эволюция нашей галактики, начиная от самых ранних фаз и кончая очень далеким будущим, когда галактика уже перестанет быть обособленным звездным островом Вселенной. Можно отметить, что до сих пор методами точной науки (в данном случае астрофизики), как правило, рассматривалась лишь предыдущая эволюция Вселенной. Количество научных работ, посвященных рождению и жизни галактики, огромно. Здесь накоплен важнейший материал, и конечно многое отражено в научно-популярных изданиях. Мне кажется естественным в этой лекции опереться на результаты исследований, проведенных мной в Институте астрономии РАН совместно с А.В. Тутуковым, Д.З. Вибе и А.А. Кабановым.

2. Наша галактика

По морфологической классификации наша галактика относится к дисковым (точнее спиральным) галактикам с перемычкой (баром). Число спиралей в галактике – до сих пор предмет научных споров. Чаще всего говорят о двухспиральном узоре. Среди других галактик наш Млечный Путь – довольно крупный и «репрезентативный» объект. Недавние измерения функции светимости галактик показывают, что в галактиках, подобных Млечному Пути, содержится большая часть светящегося вещества во Вселенной. Это дает основания полагать, что результаты исследований, выполненных для нашей галактики, можно отнести к значительной части светящегося вещества во Вселенной.

В нашей галактике выделяют следующие основные структуры.

- *Гало* – сферическая подсистема, размером десятки килопарсек (кпк), общей массой примерно $10^9 M_{\odot}$ (т. е. миллиард масс Солнца). Она содержит шаровые скопления, старые малометаллические звезды, в том числе экстремально низкой металличности. (Все элементы тяжелее гелия в астрофизике называются тяжелыми элементами или металлами. Под металличностью понимают относительное содержание того или иного химического элемента (или совокупности нескольких элементов) по отношению к солнечному значению. Например, если металличность звезды определяется по железу, то она вычисляется так:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}) - \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\odot}$$

где (N_{Fe}/N_H) и $(N_{Fe}/N_H)_\odot$ – отношение концентрации атомов железа к атомам водорода на звезде и на Солнце соответственно).

- *Балдж* – по-русски это «утолщение» в центральной части галактики, несколько кпк, примерно 10^{10} масс Солнца, звезды различных спектральных классов и металличностей.

- *Толстый диск* – шкала высот порядка 1–1.5 кпк, примерно 10^9 масс Солнца, звезды пониженной металличности.

- *Тонкий диск* – шкала высот порядка 100–700 пк, примерно 10^{11} масс Солнца, радиус не менее 20 кпк.

- *Солнце* – звезда диска, 8 кпк от центра галактики, 10 пк над плоскостью диска.

Эти структуры (с указанием характерных размеров и металличности) показаны на рис. 1. Они состоят из барионного (нормального) вещества. По современным представлениям вся галактика, включая протяженную корону, находится в так называемом гало темного вещества (dark matter halo). Чтобы не запутаться в гало, гало галактики часто называют сферической составляющей. Напомним, что темное вещество – одна из главных загадок науки прошлого и, по-видимому, настоящего столетия. Природа его пока неизвестна. Оно проявляет себя только через гравитационное взаимодействие с барионным веществом. Его масса в пределах «нашего» гало темного вещества примерно на порядок больше массы барионов в этом объеме. Эта ситуация типична и для других галактик. Еще один объект, не показанный на рис. 1 – сверхмассивная черная дыра в центре галактики. Ее существование подтверждено лишь недавно, при сверхточных определениях орбит звезд в окрестностях галактического центра по наблюдениям в инфракрасном участке спектра. Масса объекта – почти четыре миллиона масс Солнца.

В таблице приведены основные характеристики галактики. Таблица взята из [Засов, Постнов, 2006]. Массы и светимости приведены в солнечных единицах (M_\odot и L_\odot). Обозначение D_{25} используется для размера галактики, определяемого по изофоте, соответствующей потоку (в видимом диапазоне), 25-ая звездная величина с квадратной угловой секунды.

Сложная структура нашей галактики сформировалась в результате целого набора фундаментальных процессов на протяжении большого промежутка времени. Пока еще нет однозначного мнения о том, как образовались ее основные составляющие (например, толстый диск) и, соответственно, нет полной картины образования и эволюции галактики. Однако важные элементы этой общей картины мы представляем уже достаточно надежно.

Формирование и эволюция галактик – важнейшее направление исследований в современной астрономии. Здесь, и это вообще характерно для астрофизики, велика роль моделирования как метода познания. В следующем разделе мы кратко познакомимся с одним из «уголков кухни» моделирования галактической эволюции.

Важнейшие интегральные характеристики галактик и нашей галактики

Параметр	Основной метод измерения	Интервал значений	Примерное значение для нашей галактики
Диаметр D_{25}	Фотометрия	5–50 кпк	30 кпк
Радиальная шкала диска R_0	Фотометрия	1–7 кпк	3 кпк
Толщина звездного диска	Фотометрия дисков, наблюдаемых «с ребра»	0.3–1 кпк	0.7 кпк
Светимость	Фотометрия	10^7 – $10^{11} L_\odot$	$5 \times 10^{10} L_\odot$
Масса M_{25} в пределах D_{25}	Измерение скоростей газа и/или звезд по эффекту Доплера	10^7 – $10^{12} M_\odot$	$2 \times 10^{11} M_\odot$
Относительная масса газа M_{gas}/M_{25} в пределах D_{25}	Измерение интенсивностей линий нейтрального и молекулярного водорода	0.1–30 %	2 %
Скорость вращения V внешних областей галактик	Измерение скоростей газа и/или звезд по эффекту Доплера	50–300 км/с	220 км/с (для окрестности Солнца)
Период обращения внешних областей галактик	Измерение скоростей газа и/или звезд по эффекту Доплера	10^8 – 10^9 лет	2×10^8 лет (для окрестности Солнца)
Масса центральной черной дыры	Измерение скоростей звезд и газа вблизи ядра; эмпирическая зависимость от центральной дисперсии звезд	3×10^5 – $3 \times 10^9 M_\odot$	$4 \times 10^6 M_\odot$

3. Модели галактической эволюции

Эволюцию галактики описывают с помощью моделей. Модели построены на уравнениях, выражающих законы сохранения массы компонентов галактики (газа, звезд), массы отдельных химических элементов и энергии. В моделях должны быть учтены многие факторы: звезды, газ и пыль в межзвездном пространстве, крупномасштабные галактические структуры и, самое главное, дисковая структура и весьма разнообразные процессы: звездообразование, звездная эволюция, потеря массы звездами и обогащение межзвездного вещества химическими элементами – продуктами звездной эволюции, фазовые переходы в межзвездной среде, тепловые и ионизационные процессы в межзвездной среде, перенос излучения в межзвездной среде, динамические процессы, определяющие эволюцию крупномасштабных галактических структур, и т. д. Можно сказать, что модели галактической эволюции аккумулируют все основные знания, накопленные в астрофизике.

Главной задачей теоретиков является построение полной модели, которая могла бы объяснить весь объем наблюдений, все данные о галактическом прошлом. Получение такого материала (о прошлом) вполне возможно, так как наблюдая галактики, подобные изучаемой, на больших расстояниях или соответственно на больших z , можно получить тем самым сведения о свойствах таких объектов в более раннюю эпоху.

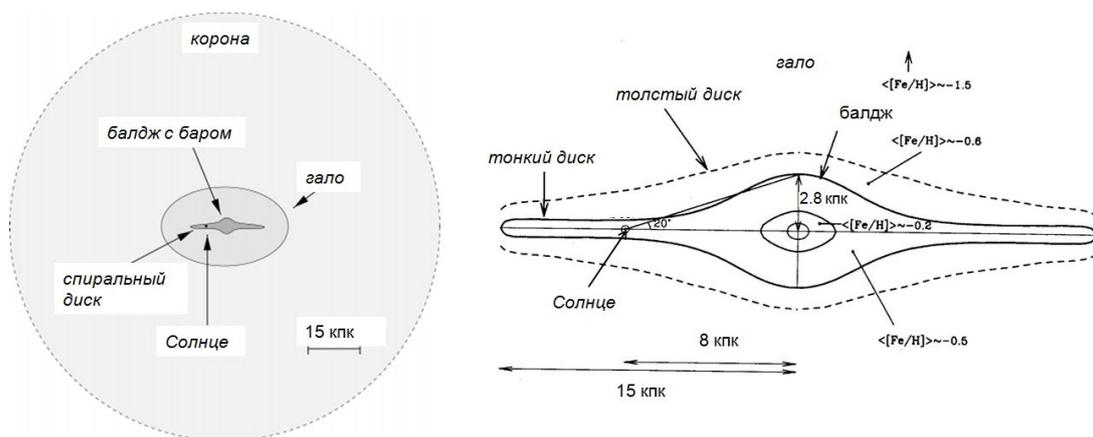


Рис. 1. Основные структурные элементы нашей галактики.

Наиболее естественный тест модели, например для дисковых галактик, – сравнение с параметрами нашей галактики в данную эпоху. Моделей создано много, но как мы уже отмечали, пока еще ни одна из них не может объяснить все факты. Тем более сложно говорить о справедливости результатов, полученных экстраполяционным способом (для прогноза галактического будущего). Однако отметим, что главный элемент модели, теория эволюции звезд, построена к настоящему времени с высокой степенью надежности, и это вселяет уверенность в качественной экстраполяции.

С повышением скорости работы компьютеров все больше распространяются сложные модели галактик – гидродинамические, в которых детально рассматривается эволюция межзвездной среды, или даже модели, в которых движение газа моделируется одновременно с движением звезд (т. е. одновременно решаются уравнения гидродинамики и звездной динамики). Возможно, именно таким моделям принадлежит будущее. Однако пока большей популярностью пользуются модели, которые не требуют ни сложных расчетов, ни значительных компьютерных ресурсов, однако позволяют получать очень интересные результаты. Пример такой модели, позволяющей сконцентрироваться не на сложной технологии моделирования, а на общих физических (и химических) закономерностях галактической эволюции, представлен в [Firmani, Tutukov, 1992; Shustov et al., 1997]. По сравнению с многими принятыми подходами в этой модели учтены все существенные процессы. Например, учет процессов выброса из галактики тяжелых элементов за счет взрывов сверхновых и давления излучения на пыль [Iugumentshev et al., 1990; Шустов, Вибе, 1995] позволил естественно объяснить [Вибе и др., 2001] существование градиента химического состава в галактиках (в центральных областях галактик наблюдаемая металличность в несколько раз выше, чем на периферии), обогащение межгалактического газа тяжелыми элементами [Wiebe et al., 1999] и т. д.

4. Формирование галактики

Вопрос об образовании первых галактик, сформировавшихся спустя несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва (соответствует значению космологического фактора $z \sim 20$), является одним из ключевых в астрофизике. В рамках общепринятой

сейчас космологической модели первые гравитационно-связанные структуры (так называемые маломассивные гало темной материи массой порядка $10^4 M_{\odot}$) образовывались вскоре после Большого взрыва в результате гравитационной неустойчивости флуктуаций плотности. Барийонный газ, средняя плотность которого была на порядок ниже, чем плотность темной материи, «подчинялся» гравитационному воздействию темного вещества, накапливаясь в гало. Структуры, состоящие из темного гало и накопленного в них барийонного газа, часто называют первыми гравитационно-связанными объектами. Иногда их также называют протогалактиками, хотя для галактик эти газовые объекты имели слишком малую массу.

Барийонный газ имел очень специфический химический состав. В общепринятой модели первичного нуклеосинтеза, которая основывается на современной теории элементарных частиц, реакции синтеза легких элементов начались спустя примерно минуту после Большого взрыва. Эти реакции включали образование H, D, T, ^3He , ^4He , ^7Li и, возможно, ^7Be [Горбунов, Рубаков, 2006]. Расчеты показывают, что масса образовавшегося первичного водорода составляла около 76 % от полной массы барийонного вещества Вселенной. Оставшиеся 24 % составляли ^4He и ничтожную долю – более тяжелые элементы. Вещество с таким составом, т. е. практически полностью лишенное тяжелых элементов, часто называют «космологическим». Именно из такого вещества образовались первые звезды (ПЗ) во Вселенной, называемые также «население III».

Газ, накапливавшийся в центрах гало темной материи, имел высокую температуру и не мог эффективно охлаждаться (так как отсутствовали металлы – мощные охладители). Это не позволяло начаться звездообразованию. Только в достаточно массивных гало $\sim 10^5$ – $10^6 M_{\odot}$ газ мог эффективно охлаждаться посредством излучения в линиях молекулярного водорода H₂ и HD до относительно низких температур ~ 50 – 100 K, и именно там начиналось звездообразование [Шустов, 2011].

Отсутствие тяжелых элементов определило одну из главных особенностей ПЗ – их чрезвычайно большую массу (по современным оценкам, они имели массу 100 – $1000 M_{\odot}$ и более). Причиной этого является не только очень малая непрозрачность газа из космологического вещества, обусловившая низ-

кую эффективность охладителей, но и высокий темп аккреции на протозвездное ядро. По-видимому, эпоха ПЗ была очень короткой – время жизни звезд с такой массой составляло несколько миллионов лет, после чего они выбрасывали в окружающую среду продукты звездного нуклеосинтеза, и вновь образующиеся звезды уже имели в своем составе некоторое количество металлов. Что касается времени образования ПЗ, то данные по анизотропии и поляризации реликтового излучения, полученные на спутнике WMAP, позволили определить, что уже на $z \sim 15$ должна была произойти реионизация водорода, а значит, к этому времени существовали источники ионизации – звезды популяции III. Обычно полагают, что ПЗ формировались в периоде $z \sim 30-15$.

Гало темной материи непрерывно сливались между собой, соответственно, сливалось и их барионное содержимое – происходил процесс укрупнения галактик (иерархический рост). Этот процесс продолжается и в наше время, однако на ранних стадиях эволюции Вселенной частота слияний гало была намного выше. При слиянии и из-за приливных взаимодействий гало приобретали угловой момент [Fall, Efstathiou, 1980]. Так появлялись структуры дискового типа, обладающие существенным вращением.

Можно ли с помощью телескопов проникнуть в эту эпоху? В настоящее время эта тема является одной из наиболее популярных в астрофизике. В немалой степени это связано с тем, что современные телескопы, например 10-метровые телескопы им. Кека или Космический телескоп им. Хаббла (КТХ), позволяют разглядеть очень молодые галактики, вплоть до $z \sim 10$. В 2004 г. с помощью КТХ был сфотографирован участок неба (проект Hubble Ultra Deep Field) с эффективной выдержкой около 10^6 с (11.3 сут), что позволило продолжить изучение отдаленных галактик почти вплоть до эпохи образования первых звезд. Впервые были получены изображения протогалактик, первых сгустков материи, которые сформировались спустя всего ~ 500 млн лет после Большого взрыва. Это позволило провести морфологический анализ галактик на очень ранних стадиях развития Вселенной. Хотя с помощью КТХ и инфракрасного телескопа Spitzer удалось увидеть и очень массивную далекую галактику, главный вывод ясен – в ту эпоху доминировали первичные «строительные элементы» – небольшие галактики неправильной формы.

Еще больше ценной информации о первых галактиках могут дать такие телескопы, как ALMA (Atakama Large Millimeter Array) и космический телескоп JWST (James Webb Space Telescope). Они же, по-видимому, помогут обнаружить химические следы существовавших когда-то первых звезд [Кабанов, Шустов, 2011].

5. От прошлого к настоящему

Применив нашу модель [Shustov et al., 1997], мы провели качественный анализ эволюции галактики на большом интервале времени. Результаты проиллюстрированы на рис. 2. Можно выделить три этапа в жизни галактики:

1) эпоха «бурной молодости» – от 10^8

до $\sim 2 \times 10^9$ лет;

2) спокойная эволюция – от 2×10^9 лет до $\sim 10^{11}$ лет;

3) угасание – от 10^{11} до 10^{13} лет.

Первый этап истории галактики – эпоха массового звездообразования, т. е. период, в течение которого основная масса газа из протогалактического облака превратилась в звезды. Согласно данным современных наблюдений, на $z > 5$ существует множество галактик с высокими скоростями звездообразования, превышающими $100 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Опираясь на данные наблюдений этих галактик, можно заключить, что все они проходят через краткую эпоху вспышки звездообразования. Длительность вспышки не превышала 1 млрд лет. О краткости ее свидетельствует химический состав старых объектов галактики. Повышенное содержание в них кислорода по отношению к железу обычно интерпретируется как свидетельство того, что их образование шло в более короткой шкале времени, чем время жизни предсверхновых типа Ia (основных производителей железа), т. е. менее $\sim 5 \cdot 10^8$ лет. Эта величина близка и к времени свободного падения для протогалактического облака. Таким образом, можно выделить первое эволюционное время галактики – порядка 1 млрд лет, эпоху ее формирования и первичного звездообразования.

Дальнейшая глобальная эволюция нашей галактики вплоть до настоящего времени протекала, по-видимому, довольно спокойно, хотя в научной литературе можно встретить гипотезы о нескольких эпизо-

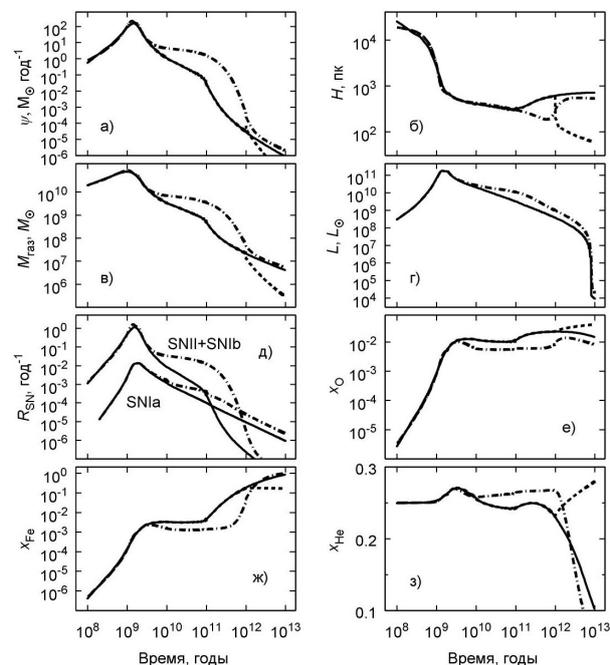


Рис. 2. Эволюция основных параметров галактики от формирования и до финала. Изменения параметров галактики в моделях: эволюция скорости звездообразования (а); полутолщины H газового диска (б); массы газа (в); светимости (г); темпов вспышек сверхновых (д), относительного содержания кислорода (е), железа (ж) и гелия (з) соответственно. Различные варианты линий в каждой панели относятся к различным вариантам использованной модели, что для общего понимания здесь несущественно.

дах вспышечной активности. Газа, т. е. материала, из которого рождаются звезды, становилось все меньше, хотя часть его возвращалась в межзвездное пространство в процессе потери массы звездами и при взрывах звезд, поэтому скорость звездообразования постепенно уменьшалась.

6. Как долго галактика будет галактикой?

Данные наблюдений объектов на больших красных смещениях свидетельствуют в пользу открытости и бесконечного расширения Вселенной. Следовательно, при рассмотрении эволюции галактики мы ограничены сверху лишь временем, когда фундаментальные физические процессы (например, распад протонов и электронов) существенно изменят саму структуру материи. Но для галактики эта шкала ($\sim 10^{33}$ лет) слишком длинна, и ее параметры изменятся кардинальным образом гораздо раньше.

Галактика в известной степени напоминает биологическое сообщество (например, большой лес), в котором отдельные особи живут по сравнению со временем жизни всего сообщества недолго. Среди них есть долгожители и эфемерные создания. Эти отдельные особи рождаются, взрослеют, умирают, но в целом некоторые основные признаки сообщества сохраняются. Подобно тому, как лес многие тысячелетия может оставаться лесом, хотя уже многократно прошел процесс эволюционной замены всех растений, галактика будет выглядеть так, как она выглядит, хотя кругооборот вещества звезды-газ-звезды прошел уже много циклов.

Наиболее важные временные шкалы, характеризующие свойства галактики – шкала глобальных структурных изменений и шкала энерговыделения существенно превышают возраст галактики, оцениваемый в ~ 10 млрд лет.

Шкала энерговыделения определяется процессами протекания ядерных реакций в недрах наиболее многочисленных и долгоживущих маломассивных звезд. Оценить эту шкалу τ_* можно зная массу M_* звезды: τ_* (годы) = $10^{10} / M_*^3$, где масса M_* выражена в массах Солнца. Это выражение следует из расчетов эволюции звезд красных карликов, т. е. наиболее долгоживущих звезд. Считая, что минимальная масса звезды, при которой в ней все еще возможны термоядерные реакции, $M_{low} = 0.07 M_\odot$, получаем $\tau_* \sim 2 \cdot 10^{13}$ лет. Этим временем задана полная продолжительность звездного этапа в жизни галактики, когда происходят изменения в составе и свойствах ее населений. По его завершении галактика состоит только из остывших компактных звездных остатков: белых (точнее, к этому времени уже черных) карликов, нейтронных звезд и черных дыр.

Крупномасштабная структура галактики в рассматриваемый промежуток времени практически не меняется. Верхний предел времени жизни галактики как целого определяется законами звездной динамики. Уже более 50 лет назад известнейшим астрофизиком С. Чандрасекаром [Chandrasekhar, 1943] и позднее советским астрономом К.Ф. Огородниковым [Огородников, 1958] было показано, что изолированная система гравитирующих частиц (звезд) с такими же параметрами, как и наша галактика, ди-

намически релаксирует (в нашем случае это означает существенное изменение структуры) за время, большее 10^{15} лет.

Взаимодействие звезд с облаками межзвездного газа может сократить это время. В современной галактике структура звездного диска в значительной степени определяется именно этим относительно эффективным процессом. Однако в более поздние времена плотность газового компонента уменьшается, и роль облаков перестает быть столь важной. Поэтому считается, что общая структура звездного диска не претерпит существенных изменений как минимум в течение следующих 10^{13} – 10^{14} лет. Затем тесные сближения звезд (точнее их остатков) разделят систему на обширное гало и плотное внутреннее ядро, содержащее сверхмассивную черную дыру.

Эти оценки получены для изолированной галактики. Однако галактика как член местной группы взаимодействует с другими членами группы. В работе [Peebles, 1994] проанализированы орбиты членов местной группы и сделан вывод, что наша галактика и Туманность Андромеды сближаются. При современном расстоянии между ними ~ 0.75 Мпк и лучевой скорости ~ 120 км с⁻¹ галактики через 6 млрд лет сблизятся на 20–400 кпк. Даже если при первом сближении прямого столкновения и не произойдет, рано или поздно динамическое трение приблизит их друг к другу, а через 10^{11} – 10^{12} лет вся местная группа сольется в одну гигантскую звездную систему (ее иногда называют Милкомедой).

7. Будущее галактики

Будущее, мало отличающееся от настоящего, обеспечено галактике еще «десять раз по столько». По прошествии примерно через 10^{11} лет эпоха «почти без перемен» заканчивается, и ход галактической эволюции меняется. Содержание газа, а следовательно и скорость звездообразования, начинает быстро уменьшаться (см. рис. 2). Это связано с тем, что в финальную стадию своей эволюции входят звезды массой около $0.4 M_\odot$, большинство которых образовалось еще в раннюю эпоху. Именно такие и более массивные звезды – основной поставщик газа (материала, из которого образуются новые поколения звезд). Менее массивные звезды живут дольше, они продолжают светить, и поскольку их гораздо больше, чем более массивных звезд, интегральная светимость галактики «ничего не чувствует». Такие маломассивные звезды не способны пополнять межзвездную среду газом в сколько-нибудь заметных количествах, и с завершением эволюции наименее массивных звезд заканчивается звездная эпоха эволюции галактики. Это происходит примерно через 10^{13} лет после образования галактики.

В течение этой самой длительной стадии эволюции галактика тускнеет, краснеет и только отдельные вспышки сверхновых и еще более редкие вспышки при столкновениях звезд в центральных областях галактики как-то разнообразят картину умирания. Интересно, что химический состав межзвездного газа на этой стадии может быть весьма необычным: газ состоит в основном из железа, однако плотность такого газа в десятки тысяч раз меньше, чем наблюдающаяся сейчас. Более подробно картина последних стадий эволюции галактики описана в [Wiebe et al., 2000].

Итак, через 10 триллионов лет галактика погрузится почти в полную темноту, и это будет уже не звездный остров, а кладбище холодных звездных остатков. А пока галактика – одно из самых удивительных и красивых образований во Вселенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вибе, Д.З., Тутуков А.В., Шустов Б.М. Астрон. журн. 2001. Т. 78. С. 977–984.
- Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной. 2006. М.: Физматлит. 464 с.
- Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. 2006. Фрязино: Век 2. 496 с.
- Кабанов А.А., Шустов Б.М. Влияние звезд население III на раннюю эволюцию галактик // Астрон. журн. 2011. Т. 88, № 9. С. 852–864.
- Огородников К.Ф., Динамика звездных систем. М.: Физматлит. 1958. 626 с.
- Шустов Б.М., Вибе Д.З. Астрон. журн. 1995. Т. 72. С. 650–659.
- Шустов Б.М. Первые звезды // Труды 40-й международной студенческой научной конференции «Физика Космоса», Изд-во Уральского университета. Екатеринбург. 2011. С. 241–258.
- Chandasekhar S. Dynamical friction. I. General considerations: the coefficient of dynamical friction // ApJ. 1943. V. 97. P. 255–263.
- Fall S.M., Efstathiou G. Formation and rotation of disc galaxies with haloes // MNRAS. 1980. V. 193. P. 189–206.
- Firmani C., Tutukov A.V. Astron. Astrophys. 1992. V. 264. P. 37–48.
- Igumentshev I.V., Shustov B.M., Tutukov A.V. Astron. Astrophys. 1990. V. 234. P. 396–402.
- Peebles P.J.E. Orbits of the nearby galaxies // ApJ. 1994. V. 429. P. 43–65.
- Shustov B.M., Wiebe D.S., Tutukov A.V. Astron. Astrophys. 1997. V. 317. P. 397–404.
- Wiebe D.S., Tutukov A.V., Shustov B.M. Astron. Astrophys. 1999. V. 345. P. 93–99.
- Wiebe D.S., Tutukov A.V., Shustov B.M. Proc. of the Conference «Future of the Universe. Future of our civilisation». World Scientific Publishing, Singapore / Eds.: V. Burduzha, G. Hozin. 2000. P. 137.

Институт астрономии РАН, Москва