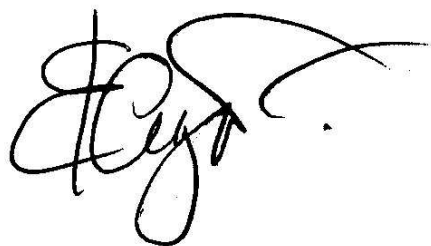


На правах рукописи



Курбатов Евгений Павлович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ
ГАЛАКТИК**

01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте астрономии РАН

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН Шустов Борис Михайлович

Официальные оппоненты

доктор физ.-мат. наук Вибе Дмитрий Зигфридович, ИНАСАН

кандидат физ.-мат. наук Макаров Дмитрий Игоревич, САО РАН

Ведущая организация

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Южный федеральный университет»,
г. Ростов-на-Дону

Защита состоится 22 апреля 2011 года в 15 ч. на заседании диссертационного
совета Д002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН)
в конференц-зале Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) по
адресу: 117810, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу:
г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, с авторефератом диссертации — на сайте
<http://www.asc-lebedev.ru>

Отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53,
ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д002.023.01.

Автореферат разослан 22 марта 2011 года.

Ученый секретарь Диссертационного Совета
д. ф.-м. н.



Ю. А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Галактики представляют собой системы, состоящие из газа, звёзд и тёмного вещества. В различных классификациях по морфологическому типу вводится более десяти типов галактик [1, 2], которые приблизительно можно разделить на эллиптические, дисковые и неправильные. Широкое многообразие типов галактик отражает большое различие условий их формирования и эволюции. Наиболее популярным сейчас сценарием формирования структур является иерархический сценарий в рамках космологической модели Λ CDM, согласно которой вещество во Вселенной представлено барионной и тёмной составляющей (CDM — Cold Dark Matter, холодное тёмное вещество) в отношении по массе, примерно, 1 : 6, а закон расширения Вселенной определяется, главным образом, тёмной энергией, плотность которой составляет более 70% от средней плотности массы-энергии. Формирование структур в иерархическом сценарии происходит путём конденсации и роста начальных космологических возмущений в тёмном веществе и газе на фоне расширяющейся Вселенной. В этом сценарии первые гравитационно связанные объекты — минигало с массами до $10^6 M_{\odot}$ — сливаются, со временем образуя гало тёмного вещества галактиктических скоплений и галактик [3]. Образование галактик происходит в течение всего процесса слияния гало — путём коллапса газа, содержащегося в гало, аккреции газа сформировавшейся галактикой, а также путём слияния галактик [4]. Так, эллиптические галактики, обладающие массой звёздной системы порядка $10^{11} M_{\odot}$ имеют в среднем два значимых, то есть сравнимой массы, предка, а более массивные — до пяти [5]. Несмотря на то, что качественная картина формирования галактик, галактических групп и скоплений представляется ясной, существует ряд вопросов, которые касаются принятой космологической модели и иерархического сценария.

Хотя гало большей массы формируются путём слияний гало меньшей массы (т.н. «bottom-up clustering»), наблюдения показывают, что звёзды в массивных галактиках имеют в среднем больший возраст, чем в галактиках меньших масс (т.н. «down-sizing»), вопреки иерархическому сценарию, который предполагает более позднее формирование массивных гало [6, 7, 8]. В теоретических работах были предложены решения этого противоречия без отказа от модели

Λ CDM — как более тонким расчётом цепочек слияния гало в иерархическом сценарии [9, 10, 5], так и учётом излучения активных ядер массивных галактик [5]. В тех численных моделях, когда в расчёт берётся только лишь аккреция и выброс газа, не удалось добиться соответствия модели с наблюдениями [11].

Наблюдаемое количество маломассивных спутников в окрестности нашей галактики и в локальной группе значительно ниже, чем предсказывается космологической моделью Λ CDM [12, 13]. В рамках модели это может объясняться тем, что частицы тёмного вещества имеют слишком низкую дисперсию скоростей. Предлагаемые решения сводятся к замене холодного тёмного вещества — тёплым (Warm Dark Matter), с бóльшим значением дисперсии скоростей частиц [13, и др.]. Однако, это приводит к смещению момента начала эпохи реионизации, который сильно зависит от количества маломассивных гало [14].

Другой вопрос, который имеет связь с космологией, это проблема углового момента. Чрезмерная диссипация углового момента представляет существенные трудности в попытках смоделировать формирование дисков, которые соответствовали бы типичным наблюдаемым галактикам. Одной из причин этого является большое число маломассивных гало, вовлечённых в динамическое трение с веществом формирующегося диска [15]. Безотносительно космологии, проблема углового момента вызвана как недостаточно высоким разрешением, которое удаётся достигнуть в численных моделях, так и недостатками самих физических моделей аккреции, диссипации и звездообразования [14].

Трудности построения моделей эволюции галактик вызваны сложностью базовых физических процессов. В современных моделях термодинамические свойства и структура газа описываются в терминах функций нагрева и охлаждения [16], и с использованием моделей многофазной межзвёздной среды (МЗС) [17, 18, 19].

Диссипативные процессы в газе могут быть представлены ударными волнами, вязкостью, радиационным нагревом и охлаждением. В современных моделях термодинамические свойства и структура газа описываются в терминах функций нагрева и охлаждения [20, 16], с использованием моделей многофазной межзвёздной среды [17, 18, 19], а также путём использования искусственной вязкости как замены физической вязкости газа и ударных волн [21, 22]. Недостатки этих подходов в том, что в них не учитывается турбулентная структура межзвёздной среды. Действие сверхновых на МЗС в моделях определяет-

ся вкладом в радиационную, тепловую и кинетическую энергию. Баланс между составляющими этого вклада существенным образом влияет на свойства модели [23]. Также определяющим является время диссипации и высвечивания энергии, переданной межзвёздной среде — слишком короткое время высвечивания приводит к сильной фрагментации газа, что усиливает, в частности, проблему углового момента в дисковых галактиках. Свободные параметры моделей нагрева и охлаждения газа, которые предлагались разными авторами, не всегда удаётся обосновать теоретически (см. обзор [16]).

В моделях галактик, в которых используется прямое моделирование МЗС методами газовой динамики, удаётся разрешать области размером не менее 10 пк, в то время, как звездообразование происходит на существенно меньших масштабах. Сложная структура межзвёздной среды и широкий диапазон значений температуры и плотности в ней делает возможным лишь феноменологический подход к описанию звездообразования. В разное время были предложены несколько способов задания скорости образования звёзд в зависимости от параметров межзвёздной среды [24]. В частности, широко используется закон шмидтовского типа [25], полученный на основе наблюдений, где скорость звездообразования пропорциональна некоторой степени плотности. Различие феноменологических моделей и трудности с определениями их параметров из первых принципов говорит о недостаточном понимании всего комплекса физических процессов, происходящих в межзвёздной среде.

Ещё одним фактором, определяющим эволюцию галактик, является обмен веществом галактики с межгалактической средой (МГС). В отличие от изолированных галактик, обмен веществом может оказывать влияние на химический состав МЗС и морфологию галактик, а также на химический состав газа внутри скопления [26]. Можно выделить несколько возможных механизмов потери газа галактикой [27]: галактический ветер, вызванный множественными взрывами сверхновых, лобовое давление, испытываемое галактикой со стороны МГС, приливное воздействие со стороны других галактик в группе, выпаривание газа из галактик посредством взаимодействия с горячей МГС и выдувание пыли давлением излучения звёзд. Множественными событиями аккреции, приводящими к вспышкам звездообразования, можно объяснить наличие нескольких звёздных населений, которое обнаруживается во многих галактиках [28].

В работах, лёгших в основу этой диссертации, были сделаны попытки раз-

вить модели некоторых физических процессов в межзвёздной среде и звёздном населении галактик, оставаясь в рамках простого однозонного подхода, разработанного ранее и освещённого во многих статьях [29, 27, 30, и др.].

Цели диссертации

- исследование химической эволюции Галактики;
- развитие локальной модели звездообразования в галактиках и модели диссипации турбулентной энергии в межзвёздной среде;
- исследование потери звёздной массы на эволюцию карликовых галактик.

Научная новизна

- Найдено объяснение распределения обилия железа в звёздах в зависимости от высоты над плоскостью Галактики. Распределение имеет хорошее согласие с наблюдениями на шкале высоты до 16 кпк. Показано, что низкометаллические звёзды, расположенные на больших высотах, образовались до или в начале формирования галактического диска.
- Предложена локальная модель звездообразования, скорость которого зависит от плотности и средней температуры газа. Модель основана на применении критерия гравитационной неустойчивости Джинса, с возможным обобщением её на те случаи, когда необходимо учитывать вращение галактики, магнитное поле и химический состав газа.
- Развита модель диссипации турбулентной энергии межзвёздной среды, в которой берётся в расчёт структура МЗС. Показаны недостатки подхода к моделированию МЗС, используемого в настоящий момент и обоснована необходимость учёта турбулентной структуры межзвёздной среды. продемонстрированы качественные свойства на примере однозонной модели эволюции галактик.
- В рамках однозонной модели эволюции галактик построен сценарий эволюции Галактики, в котором объясняется особенность в распределении кислорода и железа, наблюдаемая по F- и G-карликам в окрестности Солнца.

- Обнаружен механизм потери массы карликовыми галактиками посредством распада ОВ-ассоциаций и исследованы наблюдательные проявления этого механизма: повышение металличности МГС, увеличение соотношения массы к светимости для галактик.
- Предложено объяснение отсутствию дисковых галактик с абсолютной звёздной величиной выше -13 .

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что низкометаллические звёзды, расположенные на больших высотах, образовались до или в начале формирования диска Галактики.
2. Предложено модельное определение локальной скорости звездообразования и диссипации турбулентной энергии.
3. Показано, что наблюдаемая особенность химических обилий в F- и G-карликах может быть объяснена паузой в звездообразовании, вызванной поглощением нашей Галактикой галактики-спутника.
4. Предложен механизм изменения во времени морфологии изолированных карликовых галактик как результат распада ОВ-ассоциаций.
5. Предложено объяснение отсутствию дисковых галактик со звёздной величиной выше -13 .

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих российских и международных научных конференциях и локальных семинарах:

1. Astronomische Gesellschaft 2005 «Interacting Galaxies», Köln, Germany, September 28–30 2005
2. Конференция молодых учёных, УрГУ, Коуровка, февраль 2007
3. Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, Ukraine, April 23–28 2007

4. Семинар «Субпарсековые структуры в межзвёздной среде», Москва, ГАИШ, 3–4 июля 2007 г.
5. Конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», ПРАО ФИАН, Пущино, 21–23 апреля 2009 г.
6. Conference «Nearby Dwarf Galaxies», SAO, N. Arkhyz, September 14–18 2009
7. Конференция «Химическая и динамическая эволюция галактик», ЮФУ, Ростов-на-Дону, 28–30 сентября 2009

Структура диссертации и объём работы Диссертация состоит введения, из трёх глав и заключения. Объём работы составляет 89 страниц, включая 9 рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы состоит из 114 наименований.

Краткое содержание работы

Ранняя химическая эволюция Галактики

В первой главе представлены результаты исследования ранней истории обогащения Галактики тяжёлыми элементами. Было предпринято исследование эволюции дисковой галактики в модели звездообразования, которое определяется балансом ионизации и рекомбинации. В частности было продемонстрировано, что для самых первых звёзд галактики характерно большое отношение обилий кислорода и железа: $[O/Fe] \approx 2$ при $[Fe/H] \lesssim -5$. Это вызвано уменьшением производства железа и увеличением производства кислорода с ростом начальной массы сверхновой второго типа. В результате, ряд звёзд с малым обилием железа и относительно большим обилием кислорода (G 77-61, HE 0107-5240) могут быть либо первыми звёздами второго поколения, либо звёздами первого поколения, обогащённые продуктами первых сверхновых.

Изучение распределения металлов по высоте над плоскостью Галактики позволило установить совпадение модельного теоретического распределения с наблюдаемым до высоты около 16 кпк. Совпадение говорит в пользу того, что

звёзды с низкой металличностью образовались до или в начале формирования галактического диска.

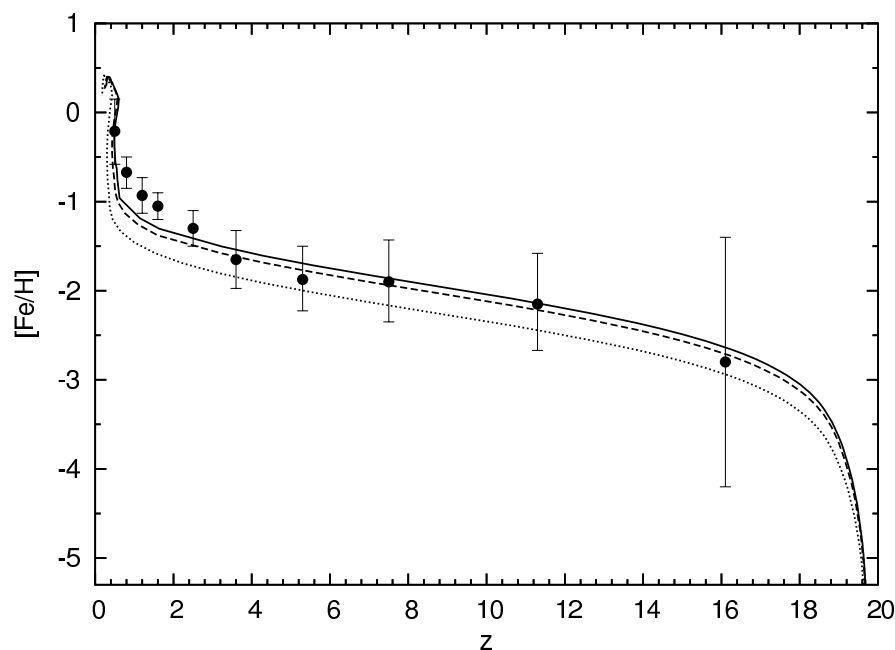


Рис. 1: Распределение обилия железа по высоте над плоскостью Галактики в стандартной модели (сплошная линия) и с учётом потери тяжёлых элементов за счёт взрывов сверхновых второго типа: штриховая линия — доля выбрасываемых тяжёлых элементов составляет 0.16, пунктирная линия — 0.5. Кружками показаны данные наблюдений.

О скорости звездообразования и турбулентной диссипации в моделях галактик

Во второй главе предложена локальная модель звездообразования, в которой учитывается влияние средней температуры МЗС на локальную скорость звездообразования. При построении модели было использовано наблюдаемое распределение турбулентной энергии МЗС на разных масштабах и распределение облаков по массам. Также предложена модель диссипации турбулентной энергии в МЗС посредством механизма столкновения облаков.

В истории звездообразования Нашей Галактики имеется аномалия, видимая по распределению обилий кислорода, железа и других элементов в F- и G-карликах в окрестности Солнца. Эта аномалия может быть интерпретирована как останов процесса звездообразования между окончанием формирования толстого диска и началом формирования тонкого диска в интервале возрастов

звёзд от 8 – 9 до 10 – 12 млрд. лет [31, 32].

Модель звездообразования и диссипации была привлечена к объяснению истории звездообразования в окрестности Солнца. Был рассмотрен сценарий поглощения Нашей Галактикой спутника массой $2 \times 10^{10} M_{\odot}$. Согласно расчётам, останов звездообразования произошёл в момент поглощения спутника, в результате повышения средней температуры МЗС. Свойства модели диссипации турбулентной энергии привели к тому, что остывание газа продолжалось около 1 млрд. лет и в течение этого времени образования звёзд не происходило. Было показано, что в сценарии монолитного коллапса наблюдаемая аномалия отсутствует. На рис. 2 показаны результаты расчёта эволюции химического состава МЗС Галактики по сценарию монолитного коллапса и в рамках предлагаемой модели.

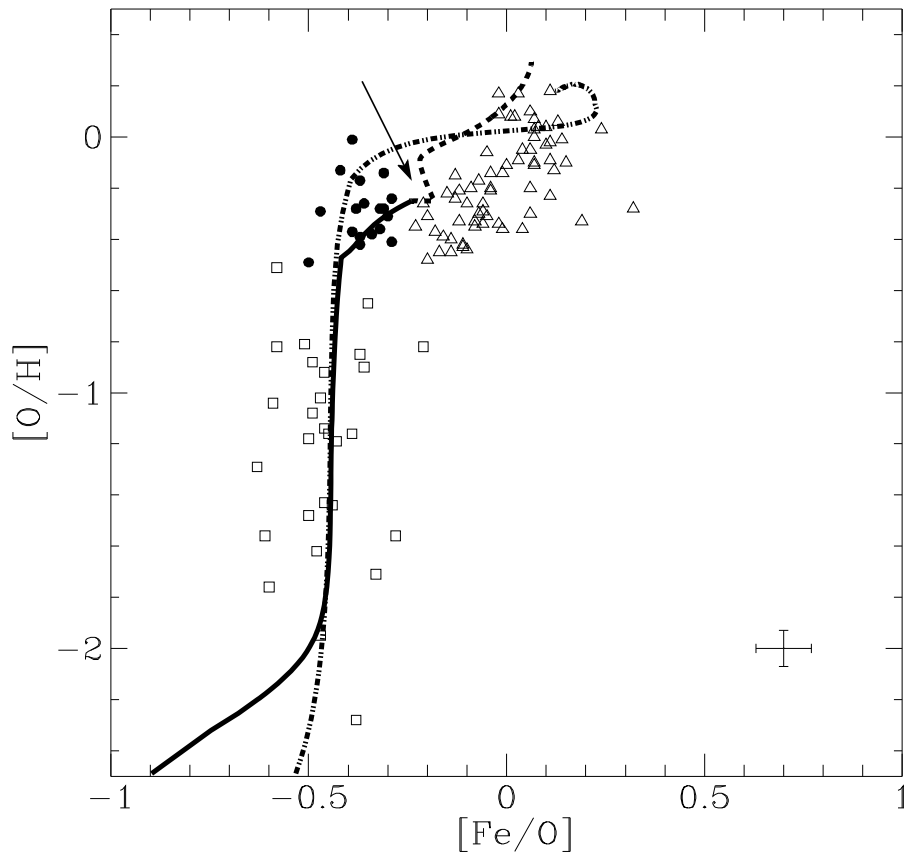


Рис. 2: Эволюция химического состава Галактики в иерархическом сценарии. Стрелкой отмечено положение паузы в звездообразовании. Символами обозначены звёзды гало (квадраты), толстого диска (кружки) и тонкого диска (треугольники). Штриховой линией показан результат расчёта по модели эволюции Галактики в сценарии монолитного коллапса.

Влияние распада ОВ-ассоциаций на эволюцию карликовых галактик

В третьей главе рассмотрено влияние эффектов, вызванных распадом ОВ-ассоциаций, на эволюцию карликовых галактик. Общепринятым является мнение о том, что, большинство звёзд образуется в ассоциациях. ОВ-ассоциации имеют короткое время жизни от момента своего рождения до распада, порядка нескольких миллионов лет. Типичные значения скоростей, которые приобретают звёзды при распаде, по мнению различных авторов и по данным наблюдений составляют величину порядка 10 км/с. Величина вириальной скорости в маломассивных галактиках может быть порядка нескольких км/с, а скорость убегания не превышать 20 км/с. В работе были исследованы наблюдательные проявления эффекта выброса звёзд из карликовых галактик как результат распада ОВ-ассоциаций.

В рамках однозонной модели были произведены расчёты эволюции галактик сфероидальной и дисковой морфологии с массами от $10^{6.5} M_{\odot}$ до $10^{8.5} M_{\odot}$. Расчёты показали, что распад ассоциаций практически не оказывает влияния на эволюцию сфероидальных галактик. Напротив, упорядоченное движение вещества в дисковых галактиках способствует выбросу звёзд. Как следствие, дисковые галактики с массой на момент образования $3 \times 10^7 M_{\odot}$ содержат половину своей массы в звёздах диска и половину — в гало. Светимость гало таких галактик превышает светимость диска в полтора-два раза. Можно считать, таким образом, что изначально дисковые галактики с массой $\lesssim 10^7 M_{\odot}$ в процессе звездообразования меняют свою морфологию на сфероидальную. Это находится в согласии с наблюдениями: в каталоге близких галактик Караченцева [33] галактики дискового типа имеют абсолютную звёздную величину, не превышающую -13 (для значений морфологического индекса от 0 до 7, т.е. включая линзовидные и неправильные галактики, наиболее близкие к дисковым), что соответствует светимости $\sim 10^7 L_{\odot}$ и массе галактики $\sim 10^8 M_{\odot}$. Галактики меньшей светимости и массы относятся к сфероидальному и неправильному типам. В системе с массой $\lesssim 10^5 M_{\odot}$ подавляющая часть звёздной массы покидает не только диск, но и гало галактики. Таким образом, галактики сверхмалых масс, если их образование вообще возможно, могут терять в МГС почти всё звёздное население после первой вспышки звездообразования. В ре-

зультате должно оставаться тёмное гало с обогащённым газом. Этот сценарий может быть важен в применении к проблеме недостающих спутников Галактики. Также эффект выброса звёзд может быть важен в процессе обогащения межгалактической среды продуктами сверхновых.

Публикации по теме работы

Основные результаты и положения диссертационной работы опубликованы в трёх статьях в рецензируемых журналах:

1. Е. П. Курбатов, А. В. Тутуков, Б. М. Шустов «Эволюция галактик и соотношение Талли-Фишера», *Астрон. Журн.*, 2005, том 82, № 7, с. 573–583.
2. Е. П. Курбатов «О скорости звездообразования и турбулентной диссипации в моделях галактик», *Астрон. Журн.*, 2007, том 84, № 12, с. 1059–1069.
3. Е. П. Курбатов «Влияние распада OB-ассоциаций на эволюцию карликовых галактик», *Астрон. Журн.*, 2010, том 87, № 7, с. 646–654.

Список литературы

- [1] *Hubble, E. P.* Extragalactic nebulae. / E. P. Hubble // *Astrophys. J.* — 1926. — Dec. — Vol. 64. — Pp. 321–369.
- [2] Third Reference Catalogue of Bright Galaxies / G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, Jr. et al.; Ed. by G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, Jr. et al. — 1991.
- [3] *Springel, V.* The large-scale structure of the Universe / V. Springel, C. S. Frenk, S. D. M. White // *Nature*. — 2006. — Apr. — Vol. 440. — Pp. 1137–1144.
- [4] *Baugh, C. M.* A primer on hierarchical galaxy formation: the semi-analytical approach / C. M. Baugh // *Reports on Progress in Physics*. — 2006. — Dec. — Vol. 69. — Pp. 3101–3156.
- [5] The formation history of elliptical galaxies / G. De Lucia, V. Springel, S. D. M. White et al. // *MNRAS*. — 2006. — Feb. — Vol. 366. — Pp. 499–509.
- [6] The star-formation history of the Universe from the stellar populations of nearby galaxies / A. Heavens, B. Panter, R. Jimenez, J. Dunlop // *Nature*. — 2004. — Apr. — Vol. 428. — Pp. 625–627.
- [7] The Epochs of Early-Type Galaxy Formation as a Function of Environment / D. Thomas, C. Maraston, R. Bender, C. Mendes de Oliveira // *Astrophys. J.* — 2005. — Mar. — Vol. 621. — Pp. 673–694.
- [8] Keck Spectroscopy of Distant GOODS Spheroidal Galaxies: Downsizing in a Hierarchical Universe / T. Treu, R. S. Ellis, T. X. Liao, P. G. van Dokkum // *Astrophys. J. (Letters)*. — 2005. — Mar. — Vol. 622. — Pp. L5–L8.
- [9] *Mouri, H.* Downsizing of star-forming galaxies by gravitational processes / H. Mouri, Y. Taniguchi // *Astron. and Astrophys.* — 2006. — Nov. — Vol. 459. — Pp. 371–374.
- [10] *Neistein, E.* Natural downsizing in hierarchical galaxy formation / E. Neistein, F. C. van den Bosch, A. Dekel // *MNRAS*. — 2006. — Oct. — Vol. 372. — Pp. 933–948.

- [11] *Firmani, C.* Can galaxy outflows and re-accretion produce the downsizing in specific star formation rate of late-type galaxies? / C. Firmani, V. Avila-Reese, A. Rodriguez-Puebla // *ArXiv e-prints*. — 2009. — Sep.
- [12] Where Are the Missing Galactic Satellites? / A. Klypin, A. V. Kravtsov, O. Valenzuela, F. Prada // *Astrophys. J.*. — 1999. — Sep. — Vol. 522. — Pp. 82–92.
- [13] Dark Matter Substructure within Galactic Halos / B. Moore, S. Ghigna, F. Governato et al. // *Astrophys. J. (Letters)*. — 1999. — Oct. — Vol. 524. — Pp. L19–L22.
- [14] *Piontek, F.* The Angular Momentum Problem in Cosmological Simulations of Disk Galaxy Formation / F. Piontek, M. Steinmetz // *ArXiv e-prints*. — 2009. — Sep.
- [15] *Götz, M.* Galaxy formation: Warm dark matter, missing satellites, and the angular momentum problem / M. Götz, J. Sommer-Larsen // *Astrophys. and Space Sci.*. — 2003. — Apr. — Vol. 284. — Pp. 341–344.
- [16] *Mayer, L.* The formation of disk galaxies in computer simulations / L. Mayer, F. Governato, T. Kaufmann // *Advanced Science Letters*. — 2008. — Jun. — Vol. 1. — Pp. 7–27.
- [17] Chemodynamical Modeling of Dwarf Galaxy Evolution / P. Berczik, G. Hensler, C. Theis, R. Spurzem // *Communications of the Konkoly Observatory Hungary*. — 2003. — Jan. — Vol. 103. — Pp. 155–162.
- [18] Disk Galaxy Formation in a Λ Cold Dark Matter Universe / B. Robertson, N. Yoshida, V. Springel, L. Hernquist // *Astrophys. J.*. — 2004. — May. — Vol. 606. — Pp. 32–45.
- [19] Effects of feedback on the morphology of galaxy discs / T. Okamoto, V. R. Eke, C. S. Frenk, A. Jenkins // *MNRAS*. — 2005. — Nov. — Vol. 363. — Pp. 1299–1314.
- [20] *Springel, V.* The cosmological simulation code GADGET-2 / V. Springel // *MNRAS*. — 2005. — Dec. — Vol. 364. — Pp. 1105–1134.

- [21] *Lucy, L. B.* A numerical approach to the testing of the fission hypothesis / L. B. Lucy // *Astron. J.* — 1977. — Dec. — Vol. 82. — Pp. 1013–1024.
- [22] *Monaghan, J. J.* Smoothed particle hydrodynamics / J. J. Monaghan // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* — 1992. — Vol. 30. — Pp. 543–574.
- [23] *Navarro, J. F.* Simulations of Dissipative Galaxy Formation in Hierarchically Clustering Universes - Part One - Tests of the Code / J. F. Navarro, S. D. M. White // *MNRAS*. — 1993. — Nov. — Vol. 265. — Pp. 271–+.
- [24] *Matteucci, F.* The chemical evolution of the Galaxy / F. Matteucci. — The chemical evolution of the Galaxy / by Francesca Matteucci, Astrophysics and space science library, Volume 253, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-6552-6, 2001, XII + 293 pp., 2001.
- [25] *Schmidt, M.* The Rate of Star Formation. / M. Schmidt // *Astrophys. J.* — 1959. — Mar. — Vol. 129. — Pp. 243–+.
- [26] Chemical enrichment in the cluster of galaxies Hydra A / A. Simionescu, N. Werner, H. Böhringer et al. // *Astron. and Astrophys.* — 2009. — Jan. — Vol. 493. — Pp. 409–424.
- [27] *Shustov, B.* Evolution of disk galaxies and loss of heavy elements into the intracluster medium. / B. Shustov, D. Wiebe, A. Tutukov // *Astron. and Astrophys.* — 1997. — Jan. — Vol. 317. — Pp. 397–404.
- [28] *Makarova, L.* Evolution of Dwarf Galaxies in the Centaurus A Group / L. Makarova, D. Makarov // IAU Symposium / Ed. by J. Davies & M. Disney. — Vol. 244 of *IAU Symposium*. — 2008. — May. — Pp. 326–330.
- [29] *Firmani, C.* Evolutionary models for disk galaxies / C. Firmani, A. Tutukov // *Astron. and Astrophys.* — 1992. — Oct. — Vol. 264. — Pp. 37–48.
- [30] *Вубе, Д. З.* Об эволюции темпа звездообразования в дисковых галактиках / Д. З. Вубе, А. В. Тутуков, Б. М. Шустов // *Астрон. журн.* — 1998. — Т. 75, № 1. — С. 3–13.
- [31] *Fuhrmann, K.* Nearby stars of the Galactic disk and halo / K. Fuhrmann // *Astron. and Astrophys.* — 1998. — Oct. — Vol. 338. — Pp. 161–183.

- [32] *Mashonkina, L.* Barium and europium abundances in cool dwarf stars and nucleosynthesis of heavy elements / L. Mashonkina, T. Gehren // *Astron. and Astrophys.*. — 2000. — Dec. — Vol. 364. — Pp. 249–264.
- [33] A Catalog of Neighboring Galaxies / I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, D. I. Makarov // *Astron. J.*. — 2004. — Apr. — Vol. 127. — Pp. 2031–2068.

Для заметок

Для заметок