

УДК 524.7—52

Ю. И. Изотов

Об образовании голубых компактных карликовых галактик из вещества с первичным химическим составом

Проведено исследование динамической, тепловой и химической эволюции облаков, массы которых $M \sim 10^8 - 10^9 M_{\odot}$, состоящих из вещества с первичным химическим составом и подверженных воздействию внешнего излучения. Показана принципиальная возможность образования голубых компактных карликовых галактик в скоплениях галактик из вещества с первичным химическим составом. При высоких интенсивностях внешнего излучения, например на периферии молодой гигантской галактики, возможно образование звезд малой массы $M < 2 - 3 M_{\odot}$.

ON THE FORMATION OF BLUE COMPACT DWARF GALAXIES FROM MATTER WITH PRIMORDIAL CHEMICAL COMPOSITION, by Izotov Yu. I.—The investigation of dynamical, thermal, and chemical evolution of clouds with masses $M \sim 10^8 - 10^9 M_{\odot}$ and primordial chemical composition in the radiation field is carried out. In this case the formation of blue compact dwarf galaxies is shown to be possible. At high intensities of outer radiation (e. g. at the periphery of young giant galaxy) presumably the stars with low masses $M < 2 - 3 M_{\odot}$ may be formed.

Введение. Образование и эволюция галактик — одна из важных и наиболее сложных проблем астрофизики. В ближайших окрестностях Галактики, по-видимому, не наблюдаются молодые галактики на стадии формирования. Эллиптические и спиральные галактики — это далеко проэволюционировавшие системы, обогащенные тяжелыми элементами и содержащие объекты большого возраста — около 10^{10} лет. В ярчайших неправильных галактиках также наблюдаются старые звезды, возраст которых примерно 10^{10} лет. Возможно, наблюдениями на Космическом телескопе Хаббла удастся обнаружить на красных смещениях $z \sim 3 - 5$ молодые формирующиеся галактики.

Однако в окрестностях Местной группы галактик, скоплении галактик в Деве, наблюдаются голубые карликовые галактики с интенсивным звездообразованием, которые, вероятно, являются эволюционно молодыми [17]. Они характеризуются низкими светимостями (M_B — от -14 до -16^m), большими УФ-избытками ($U - B \sim -0.6^m$), компактностью (линейные размеры примерно 10^3 пк), высоким содержанием газа (10—50 % по массе) и низким содержанием тяжелых элементов (от 1/2 до 1/40 солнечного) [8, 17, 19]. Скорость звездообразования в голубых карликовых галактиках составляет 0.1 — 1 M_{\odot} /год и более, что значительно выше скорости звездообразования в неправильных галактиках [15, 17].

Глубокая фотометрия голубых карликовых галактик в ближнем ИК-диапазоне показывает [17, 18, 22], что в большинстве случаев они содержат звезды поздних спектральных классов и, вероятно, испытывали несколько вспышек звездообразования. Однако известно несколько галактик, в которых старого населения звезд не обнаружено. Это, по-видимому, действительно молодые системы, в которых происходит первая вспышка звездообразования [17, 18]. Кроме того, значительное количество голубых карликовых галактик не удалось зарегистрировать на ИСЗ IRAS в дальнем ИК-диапазоне. Оценки содержания пыли в

I Zw 18 [10, 20] дают значительно меньшую величину, чем содержание тяжелых элементов по оптическим наблюдениям.

В данной работе исследуется возможность образования голубых карликовых галактик из вещества с первичным составом. Известно [5, 6, 12, 13, 16, 24, 26, 27], что тепловая эволюция вещества с первичным химическим составом при температуре $T \leq 10^4$ К определяется молекулярным водородом. Охлаждение первичного вещества молекулами H_2 в догалактическую эпоху было эффективным и способствовало фрагментации газа на облака звездных масс с температурой около 10^2 К. Наша работа отличается от упомянутых выше тем, что в ней исследуется тепловая и химическая эволюция свободно сжимающегося облака, подверженного воздействию излучения уже образовавшихся галактик.

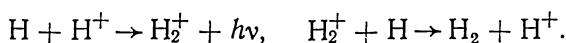
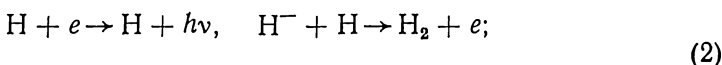
Тепловая и химическая эволюция вещества с первичным химическим составом. В качестве исходной модели выбрано газовое облако, сжимающееся в режиме свободного падения. В начальный момент температура облака $T \sim 10^4$ К, концентрация частиц $n = 10^{-2}$ см $^{-3}$, степень ионизации определяется балансом между процессами ионизации водородом электронным ударом и радиационной рекомбинацией. Масса Джинса при таких условиях равна $10^8 - 10^9 M_\odot$, соответствует массе нейтрального водорода и полной массе голубых компактных карликовых галактик [14].

Плотность облака со временем изменяется по закону [5]:

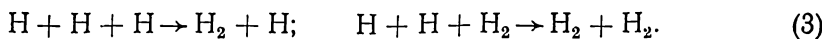
$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{3}{4} \frac{t}{t_{ff}^0} \right)^{-2}, \quad (1)$$

где ρ_0 и $t_{ff}^0 = [3\pi/(32G\rho_0)]^{1/2}$ — плотность и время свободного падения среды в начальный момент $t=0$; G — гравитационная постоянная.

Основные реакции образования молекулярного водорода в первичном веществе [12, 24]:



При высоких плотностях ($n \geq 10^8$ см $^{-3}$), как показано в [23], эффективно образование молекул H_2 при тройных столкновениях:



Система кинетических уравнений, описывающая процесс образования молекулярного водорода при $n \leq 10^8$ см $^{-3}$, имеет такой вид [5]:

$$\frac{dx_i}{dt} = n \left(\sum_{j,k} \alpha_{jk} x_j x_k - x_i \sum_l \alpha_{il} x_l + \sum_m \alpha_m x_m - \alpha_i x_i \right), \quad (4)$$

где $i=1, \dots, 6$; x_i — относительная концентрация частиц i -го вида, а именно атомов водорода H , протонов H^+ и свободных электронов e^- , ионов H^- и H_2^+ , а также молекул H_2 . В выражении (4) α_{jk} , α_{il} — скорости образования и разрушения частиц вида i при двойных столкновениях, α_m , α_i — скорости разрушения частиц излучением. Основные реакции и их скорости приведены в [5].

При $n \geq 10^8$ см $^{-3}$ в (4) учитывались реакции образования H_2 при тройных столкновениях, для которых приняты скорости, приведенные в [23].

Изменение внутренней энергии газа определяется выражением

$$\frac{dE_T}{dt} = -p \frac{dV}{dt} - \Lambda, \quad (5)$$

где $E_T = c_V T$; $c_V \approx (3/2)(R/\mu)$; R , μ , V , p — универсальная газовая постоянная, молекулярная масса, удельный объем и давление газа соответственно; Λ — скорость объемного охлаждения с учетом охлаждения атомарным и молекулярным водородом. При низких плотностях скорости охлаждения атомарным и молекулярным водородом равны [5]:

$$\Lambda_H = 2.10 \cdot 10^{-1} n_{x_e} x_H \exp(-118400/T) \text{ Вт} \cdot \text{г}^{-1}; \quad (6)$$

$$\Lambda_{H_2} = 3.16 \cdot 10^5 n_{x_H} x_{H_2} \exp[-321.5/(\ln T + 3.45)] \text{ Вт} \cdot \text{г}^{-1}.$$

При $n > 10^2 \text{ см}^{-3}$ использовалась скорость охлаждения молекулярным водородом, рассчитанная в [2, 21].

Из (5) находим уравнение изменения температуры газа. С учетом (1)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T}{\mu} \frac{d\mu}{dt} + \frac{T}{t_{ff}^0} \left(1 - \frac{3}{4} \frac{t}{t_{ff}^0}\right)^{-1} - \frac{2}{3} \frac{\mu}{R} \Lambda, \quad (7)$$

где молекулярная масса определяется выражением

$$\mu = (1 + x_e - x_{H_2} + x_{H_2^+})^{-1}. \quad (8)$$

Система уравнений (1), (4) и (7) позволяет исследовать тепловую и химическую эволюцию газового облака с первичным химическим составом при наличии поля излучения других галактик.

Внешнее излучение препятствует образованию молекулярного водорода, разрушая ионы H^- и H_2^+ . Кроме того, излучение на длинах волн $\lambda \approx 110 \text{ нм}$ приводит к фотодиссоциации H_2 [7]. При расчете скорости фотодиссоциации молекулярного водорода учтено поглощение излучения в линиях электронных переходов H_2 . Согласно [1], доля излучения, проникающего на оптическую глубину τ , равна

$$L(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau \leq 0.37, \\ 0.3\tau^{-1.2}, & 0.37 < \tau \leq 100, \\ \frac{1}{\sqrt{\pi\tau} \sqrt{\ln \tau}} \left(0.5 - \frac{0.2693}{\ln \tau} + \frac{0.57287}{\ln^2 \tau} - \frac{1.5663}{\ln^3 \tau}\right), & \tau > 100, \end{cases} \quad (9)$$

где $\tau = k_0 n_{H_2} R$; $k_0 = 10^{-15} \text{ см}^2$ — сечение поглощения при переходе между электронными уровнями H_2 ; R — радиус облака. Нами рассматривается однородное сжатие облака. Однако в действительности коллапс облака негомологичен, и более быстрое увеличение плотности происходит в центре облака. Поэтому основная доля излучения поглощается в центральной, самой плотной части облака и при расчете оптической толщины в каждый момент принимался радиус Джинса для $n(t)$ и $T(t)$, который меньше радиуса облака.

Эволюция облака исследовалась для разных значений потока внешнего излучения $n_{ph} (10^{-14}, 10^{-10}, 10^{-8}, 10^{-6} \text{ и } 10^{-5} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1})$. Для Галактики характерно значение $n_{ph} \sim 10^{-8} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$, в межгалактическом пространстве эта величина на 1—2 порядка меньше [9].

На рисунках 1—3 показаны изменения температуры, относительной концентрации H_2 и массы Джинса для разных значений n_{ph} в зависимости от концентрации частиц n . При малых значениях $n_{ph} \leq 10^{-10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$ излучение не влияет на процесс формирования H_2 , и тепловая эволюция облака с первичным химическим составом совпадает с тепловой эволюцией при отсутствии излучения [5].

При высоких плотностях газа $n > 10^9 \text{ см}^{-3}$ эффективно образование H_2 при тройных столкновениях, и весь водород переходит в молекулярную форму, что приводит к увеличению скорости охлаждения и уменьшению температуры. Последующее увеличение температуры свя-

зано с увеличением непрозрачности во вращательных и колебательных линиях H_2 , обуславливающей уменьшение скорости охлаждения.

Резкое увеличение температуры на последней стадии сжатия облака связано с диссоциацией молекулярного водорода.

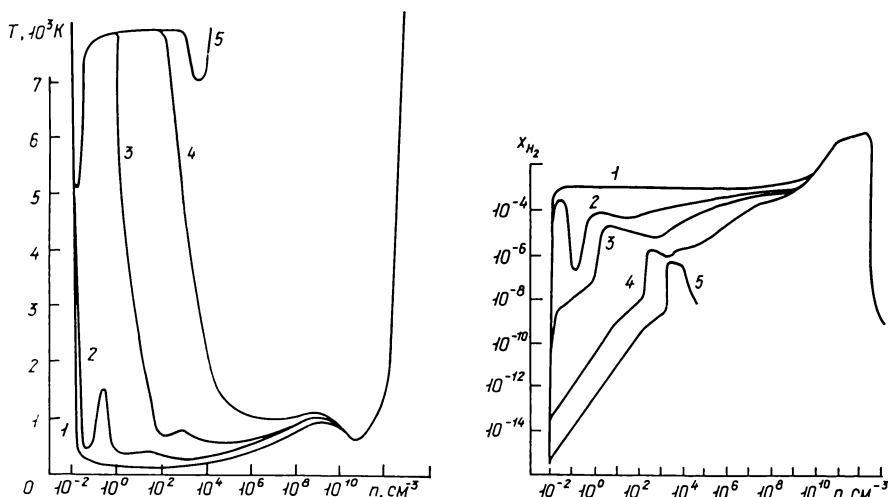
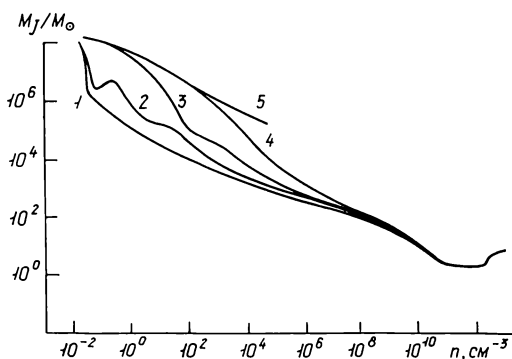


Рис. 1. Зависимость температуры газа T от концентрации частиц n в однородно сжимающемся облаке с первичным химическим составом. Цифры у кривых — значения интенсивности внешнего излучения n_{ph} , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$: 1— 10^{-14} ; 2— 10^{-10} ; 3— 10^{-8} ; 4— 10^{-6} ; 5— 10^{-5}

Рис. 2. Изменение относительной концентрации молекулярного водорода x_H в зависимости от концентрации частиц n (усл. обозначения см. на рис. 1)

При больших интенсивностях внешнего излучения ($n_{ph} > 10^{-10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$), типичных в галактиках и скоплениях галактик, существует критическое значение плотности в облаке, начиная с которого возможно эффективное образование H_2 (рис. 2) и при небольшом увеличении концентрации частиц ($\Delta n/n \leq 2$) происходит резкое (примерно в 100 раз) увеличение относительной концентрации молекулярного водорода, сопровож-

Рис. 3. Зависимость массы Джинса M_J/M_\odot в облаке от концентрации частиц n (усл. обозначения см. на рис. 1)



дающееся быстрым охлаждением газа до $T \sim 10^2 - 10^3$ К. Увеличение относительной концентрации H_2 связано с быстрым увеличением оптической толщины в линиях электронных переходов молекулярного водорода.

При значениях $n_{ph} \sim 10^{-9} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$, характерных для межгалактической среды, масса остывшей центральной части облака составляет примерно $10^6 M_\odot$. Это типичное значение для центральных областей голубых компактных галактик, где происходит процесс активного звездообразования. Характерные плотности остывшего газа составляют около 1 см^{-3} . Тогда размеры центральных областей, в которых происходит звездообразование, составляют примерно 300 пк, что также хорошо согласуется с размерами голубых компактных галактик.

В процессе остывания газа, как отмечалось в [5], возможны развитие тепловой неустойчивости и распад облака на холодные фрагменты массой примерно $10^3 M_{\odot}$, из которых в дальнейшем образуются звезды.

При больших интенсивностях внешнего излучения ($n_{ph} \geq 10^{-8} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$) условия для образования молекулярного водорода и охлаждения газа создаются при $n = 10^2 - 10^4 \text{ см}^{-3}$. В этом случае масса центральной остывающей области $M \approx 10^5 M_{\odot}$, характерные размеры остывающей области $r \sim 5 - 10 \text{ пк}$, что соответствует параметрам шаровых скоплений.

При $n_{ph} \geq 10^{-5} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$ молекулярный водород не образуется, эволюция облака происходит при $T \sim 10^4 \text{ К}$ и согласуется с результатами, полученными в [11, 25].

Образование голубых компактных карликовых галактик и шаровых скоплений. Рассмотрим эволюцию центральной области сжимающегося облака с первичным химическим составом, когда начинается образование звезд. В [3, 4] показано, что из вещества с первичным химическим составом возможно образование массивных звезд, массы которых $M \sim 10^2 M_{\odot}$ и светимости $L \sim 10^6 L_{\odot}$. С образованием таких звезд в центральной части облака появляется дополнительный источник излучения, приводящего к разрушению молекулярного водорода и «испарению» протозвезд (скорость «испарения» зависит от конкретной модели).

Рассмотрим детальнее процесс «испарения» фрагментов. В [3] показано, что в той части протозвезды с первичным химическим составом, где происходит образование молекулярного водорода, плотность изменяется с радиусом по закону $\rho \propto r^{-2.3}$.

Характерное время разрушения молекулярного водорода излучением в слое, оптическая толщина которого $\tau \sim 1$ в линиях электронных переходов, равно

$$\Delta t_{pd} = (\alpha_0 n_{ph})^{-1}. \quad (10)$$

Здесь $\alpha_0 = 1.9 \cdot 10^{-3}$ [5], а линейная толщина слоя протозвезды

$$\Delta r = m_{\text{H}} r^{2.3} / (k_0 \rho_0 r_0^{2.3} x_{\text{H}_2}), \quad (11)$$

где ρ_0 , r_0 — плотность на поверхности протозвезды и ее радиус; x_{H_2} — относительная концентрация H_2 ; m_{H} — масса атома водорода.

Из (10) и (11) находим

$$\Delta r / \Delta t_{pd} = \alpha_0 n_{ph} m_{\text{H}} r^{2.3} / (k_0 \rho_0 r_0^{2.3} x_{\text{H}_2}). \quad (12)$$

Интегрируя (12), получаем выражение для времени фотодиссоциации H_2 в протозвезде

$$t_{pd} = k_0 \rho_0 r_0^{2.3} x_{\text{H}_2} / (\alpha_0 n_{ph} m_{\text{H}} r^{1.3}). \quad (13)$$

Сравним эту величину со временем свободного падения

$$t_{ff} = [3\pi / (32G\rho)]^{1/2}. \quad (14)$$

Очевидно, в звезду перейдет та часть протозвезды, для которой справедливо неравенство $t_{ff} < t_{pd}$. В противном случае происходит фотодиссоциация молекулярного водорода, протозвезда переходит в режим адиабатического сжатия, и коллапс прекращается [4].

Оценим массы фрагментов, переходящих в звезды для разных моделей.

В модели 2 ($n_{ph} = 10^{-10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$) при образовании звезды светимости $L \sim 10^{32} \text{ Вт}$ в центральной части облака массой $M \sim 10^6 M_{\odot}$ и $n \sim 1 \text{ см}^{-3}$ плотность потока излучения от внутреннего источника, диссоциирующего молекулярный водород, равна $10^{-8} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$. Из (13) на-

ходим $t_{pd} = 10^{13}$ с, откуда с помощью (14) получим критическое значение концентрации центральной части протозвезды, успевающей сколлапсировать в звезды. Оно составляет $n_{cr} = 10^4 \text{ см}^{-3}$, что соответствует массе протозвезды $10^3 - 10^4 M_{\odot}$.

Для модели 3 ($n_{ph} = 10^{-8} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$) характерное время фотодиссоциации $t_{pd} = 10^{11}$ с, критическое значение концентрации $n_{cr} = 10^8 \text{ см}^{-3}$ и $M_{cr} = 10^2 M_{\odot}$.

Наконец, в случае модели 4 имеем $t_{pd} \sim 10^9$ с, $n_{cr} \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $M_{cr} = 2 - 3 M_{\odot}$.

Модель 2 соответствует эволюции облака в условиях, типичных для скоплений галактик. В этом случае образование звезд в центральной части облака не влияет на эволюцию других протозвезд, и следует ожидать образования большого количества звезд в центральной части облака массой примерно $10^6 M_{\odot}$ и размерами $10^2 - 10^3$ пк, что соответствует параметрам голубых компактных карликовых галактик.

Модель 4 соответствует условиям на периферии молодой гигантской галактики, в центре которой находится квазар. Такие условия были возможны для Галактики в период ее формирования. В этом случае образовавшаяся в облаке массивная звезда существенно влияет на эволюцию протозвезд, ограничивая массу звезд на уровне $2 - 3 M_{\odot}$. Характерная масса центральной части облака равна $10^5 M_{\odot}$, размеры $r \sim 2 \cdot 10^{19}$ см. Это типичные характеристики для шарового скопления.

Выводы. Проведенное исследование показывает, что в широком интервале интенсивностей поля излучения возможно образование карликовых звездных систем из вещества с первичным химическим составом. Основные результаты работы:

1. Исследована динамическая, тепловая и химическая эволюция облака с первичным химическим составом в поле внешнего излучения. Полная масса облака составляет примерно $10^8 M_{\odot}$. Центральная часть облака массой около $10^6 M_{\odot}$ при образовании молекулярного водорода охлаждается до $T < 10^3$ К. Этот сценарий существенно отличается от рассмотренного в [25], который применим только в случае большой интенсивности внешнего излучения, препятствующего образованию H_2 .

2. Плотность центральной части облака, остывающего под воздействием H_2 , увеличивается с увеличением внешнего излучения. Для условий, типичных для скоплений галактик, характерная концентрация частиц равна примерно 1 см^{-3} , а размеры — около 300 пк. Для условий периферийных областей молодых галактик плотность холодной части облака составляет приблизительно 10^4 см^{-3} , а размеры — примерно 5—10 пк.

3. Показана принципиальная возможность образования голубых карликовых галактик из вещества с первичным химическим составом в скоплениях галактик. В этом случае ожидается образование большого количества звезд в той части облака, которая имеет характерные размеры и массу областей интенсивного звездообразования в голубых компактных галактиках.

4. Показана принципиальная возможность образования шаровых скоплений на периферии молодых галактик. В этом случае образующиеся первыми массивные звезды ограничивают массу звезд, образующихся позднее, на уровне $M < 2 - 3 M_{\odot}$.

В заключение отметим, что рассмотренные модели реализуются, когда начальное внутреннее давление в облаке превышает внешнее. Это условие выполняется в не очень богатых скоплениях галактик, например в скоплении Девы. Определенную роль в эволюции облака могут играть приливные силы. Однако для облаков с $n > 0.01 \text{ см}^{-3}$, находящихся на расстоянии несколько десятков килопарсек от центра галактики массой $M \sim 10^{11} M_{\odot}$, приливные силы не очень существенны. Эволюция облака также слабо зависит от начальных значений n и T .

Наконец, здесь не исследовались процессы фрагментации облака в результате развития тепловой неустойчивости, которые будут рассмотрены в отдельной работе.

Автор благодарит А. Г. Дорошкевича за полезные замечания.

1. Иванов В. В., Щербаков В. Т. Таблицы функций, встречающихся в теории переноса радиационного излучения. II // *Астрофизика*.—1965.—1, вып. 1.—С. 31—38.
2. Изотов Ю. И. Столкнительная диссоциация молекулярного водорода в разреженном газе // *Письма в Астрон. журн.*—1983.—9, № 7.—С. 441—447.
3. Изотов Ю. И. Образование звезд первого поколения. I. Закономерности коллапса протозвезд с первичным химическим составом // *Кинематика и физика небес. тел.*—1987.—3, № 3.—С. 61—66.
4. Изотов Ю. И. Образование звезд первого поколения. II. Максимальные массы звезд // *Там же*.—3, № 4.—С. 30—39.
5. Изотов Ю. И., Колесник И. Г. Кинетика образования молекулярного водорода в первичном веществе Вселенной // *Астрон. журн.*—1984.—61, вып. 1.—С. 24—34.
6. Шекинов Ю. А., Энтель М. Б. Термохимическая эволюция догалактического газа в адиабатической теории происхождения галактик // *Там же*.—1983.—60, вып. 4.—С. 640—647.
7. Dalgarno A., Stephens T. L. Discrete absorption and photodissociation of molecular hydrogen // *Astrophys. J.*—1970.—160, N 2.—P. L107—L109.
8. Dufour R. J. Abundances in dwarf irregular galaxies // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1986.—98, N 608.—P. 1025—1031.
9. Gondhalekar P. M. Diffuse ultraviolet radiation in the intergalactic medium // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1983.—204, N 4.—P. 997—1007.
10. Gondhalekar P. M., Morgan D. H., Dopita M., Ellis R. S. The extremely low dust content of blue compact galaxies: results of IRAS observations // *Ibid.*—1986.—219, N 3.—P. 505—510.
11. Hasegawa T., Yoshii Y., Sabano Y. Thermal evolution of a contracting hydrogen gas cloud // *Astron. and Astrophys.*—1981.—98, N 1.—P. 186—194.
12. Hirasawa T. Formation of protogalaxies and molecular processes in hydrogen gas // *Progr. Theor. Phys.*—1969.—42, N 2.—P. 523—543.
13. Hirasawa T., Aizu K., Taketani M. Formation of galaxies from hydrogen gas // *Ibid.*—1969.—41, N 3.—P. 835—838.
14. Huchtmeier W. K., Richter O. G. H I-observations of galaxies in the Kraan-Korteweg-Tammann catalogue of nearby galaxies. I. The data // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1986.—63, N 2.—P. 323—343.
15. Hunter D., Gallagher J. S. Stellar populations and star formation in irregular galaxies // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1986.—98, N 599.—P. 5—28.
16. Hutchins J. B. The thermal effects of H₂ molecules in rotating and collapsing spheroidal gas clouds // *Astrophys. J.*—1968.—154, N 3.—P. 891—908.
17. Kunth D. Star formation in dwarf galaxies // *Sci. Reps Tohoku Univ. Ser. 8.*—1987.—7, N 3.—P. 353—363.
18. Kunth D., Martin J. M., Mauroquordato S., Vigroux L. Blue compact galaxies: a mixing bag // *Star-forming dwarf galaxies and related objects: Proc. Workshop, Paris, July 1—3, 1985.—Paris, 1986.—P. 89—95.*
19. Kunth D., Sargent W. L. W. I Zw 18 and existence of very metal-poor blue compact dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1986.—300, N 2.—P. 496—499.
20. Kunth D., Sevre F. IRAS observations of blue compact emission line galaxies // *Star-forming dwarf galaxies and related objects: Proc. Workshop, Paris, July 1—3, 1985.—Paris, 1986.—P. 331—349.*
21. Lepp S., Shull J. M. The kinetic theory of H₂ dissociation // *Astrophys. J.*—1983.—270, N 2.—P. 578—582.
22. Loose H. H., Thuan T. X. T. The morphology and structure of blue compact dwarf galaxies from CCD observations // *Star-forming dwarf galaxies and related objects: Proc. Workshop, Paris, July 1—3, 1985.—Paris, 1986.—P. 73—88.*
23. Palla F., Salpeter E. E., Stahler S. W. Primordial star formation: the role of molecular hydrogen // *Astrophys. J.*—1983.—271, N 2.—P. 632—641.
24. Peebles P. J. E., Dicke R. H. Origin of the globular star clusters // *Ibid.*—1968.—154, N 3.—P. 891—908.
25. Silk J. On the fragmentation of cosmic gas clouds. I. The formation of galaxies and the first generation of stars // *Ibid.*—1977.—211, N 3.—P. 638—648.
26. Yoneyama T. On the fragmentation of a contracting hydrogen cloud in an expanding Universe // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1972.—24, N 1.—P. 87—98.
27. Yoshii Y., Sabano Y. Stability of a contracting pre-galactic gas cloud // *Ibid.*—1979.—31, N 2.—P. 505—521.