

УДК 524.3—52

**Образование звезд первого поколения.****I. Закономерности коллапса протозвезд с первичным химическим составом**

Ю. И. Изотов

Проведено численное исследование коллапса протозвезд с первичным химическим составом, охлаждаемых молекулярным водородом. Учтены процессы образования молекул  $H_2$  при тройных столкновениях. Определена структура протозвезды в момент начала формирования звездного ядра. Выполнен анализ зависимости физических характеристик протозвезды от начального содержания молекулярного водорода.

*THE FORMATION OF THE FIRST GENERATION STARS. I. THE COLLAPSE REGULARITIES OF PROTOSTARS WITH PRIMORDIAL CHEMICAL COMPOSITION, by Izotov Yu. I.*— The numerical study of a protostar collapse with primordial chemical composition is made. The protostars are cooled by molecular hydrogen. The structure of the protostar is determined for the moment of the beginning of the star core formation. The analysis of dependence of the protostar physical characteristics on the initial abundance of molecular hydrogen is carried out.

**Введение.** Исследования условий формирования звезд с первичным химическим составом и их начальной функции масс принципиально важны для решения ряда астрофизических задач. В работе [16] показано, что обогащение вещества тяжелыми элементами и вторичная ионизация Вселенной могли быть обеспечены массивными звездами первого поколения. В [16, 22, 23] предприняты попытки объяснить скрытую массу галактик остатками звезд первого поколения. Взаимодействие ударных волн, возникающих при взрывах массивных объектов с первичным химическим составом, с веществом Вселенной привлекается для объяснения формирования крупномасштабной структуры и галактик [21].

В работах [13, 15, 19, 22] проводилось исследование химического состава звезд сферической составляющей Галактики с экстремально малым содержанием тяжелых элементов. Было установлено статистически значимое отсутствие звезд с содержанием металлов  $Z < 10^{-5}$  [15], тогда как охлаждение протозвезд тяжелыми элементами несущественно лишь при  $Z \leq 10^{-6}$  [25]. Обнаружена только одна звезда гало малой массы с содержанием тяжелых элементов  $Z = 6 \cdot 10^{-7}$  [13], которую, вероятно, можно отнести к звездам первого поколения.

Химический состав звезд гало имеет ряд особенностей [11, 12, 17]. В частности, содержания кислорода и магния по отношению к содержанию железа в несколько раз превосходят солнечные значения. Кислород и магний — продукты нуклеосинтеза при эволюции массивных звезд с массами  $M > 10M_{\odot}$ , тогда как железо поставляется в межзвездную среду в основном при вспышках сверхновых I типа.

Таким образом, наблюдательные данные свидетельствуют о том, что функция масс звезд первого поколения отличалась от функции масс звезд с современным химическим составом, в частности, среди звезд первого поколения большую часть составляли массивные звезды. Однако в [23] на основе теоретического исследования предсказано образование из первичного вещества объектов очень малой массы — «юпитеров» — с  $M \sim 0.1M_{\odot}$ , которые могут давать значительный вклад в скрытую массу галактик. Возможность обнаружения «юпитеров» обсуждалась в работе [22].

Одним из основных факторов, определяющих свойства образующихся звезд,—эффективность источников теплоотвода в протозвездах. В протозвездах с первичным химическим составом основным источником отвода энергии является молекулярный водород. Поэтому свойства звезд первого поколения зависят от содержания в протозвездах молекул  $H_2$ .

Расчеты тепловой и химической эволюции однородно сжимающихся облаков с первичным химическим составом [2, 4, 10, 20, 28] показали, что относительные концентрации молекулярного водорода в протозвездах могут достигать величины  $10^{-3}$ .

В [9, 20, 26] сделаны оценки характерных масс протозвезд, охлаждаемых молекулярным водородом. После диссоциации  $H_2$  теплоотвод в протозвезде замедляется. В этот момент минимальная масса протозвезды равна примерно  $10^2 M_{\odot}$ . Однако учет процессов образования молекулярного водорода при тройных столкновениях [24] и более детальное исследование тепловой неустойчивости при диссоциации  $H_2$  [26, 28] дают минимальные массы фрагментов около  $0.1-10 M_{\odot}$ .

Кроме того, сжатие протозвезды не останавливается после диссоциации  $H_2$ , а продолжается при температуре  $T \sim 10^4$  К до достижения плотности  $\rho \sim 10^{-8}$  г·см $^{-3}$ , когда вещество становится непрозрачным для собственного непрерывного излучения [18, 25]. При таких параметрах минимальная масса звезд с первичным химическим составом в модели с последовательной фрагментацией равна приблизительно  $0.1 M_{\odot}$ . Однако это значение массы, по-видимому, сильно занижено, поскольку, как показано в [14, 27], звезды образуются лишь из тех фрагментов, которые в начальной стадии коллапса имели плотность, превышающую на несколько процентов плотность окружающего газа.

Наконец, коллапс протозвезд негомологичен, и свойства звезд зависят от закона распределения плотности по радиусу протозвезды и темпа аккреции вещества оболочки на звездное ядро.

Цель данной работы — численное исследование гидродинамического коллапса протозвезд с первичным химическим составом с учетом реакций образования молекул  $H_2$  при тройных столкновениях и определение структуры протозвезды в момент начала формирования звездного ядра.

**Постановка задачи и начальные модели протозвезд.** Для выяснения основных закономерностей коллапса протозвезд с первичным химическим составом проведены расчеты гидродинамического сжатия для четырех моделей, имеющих массу  $M_{cl} = 200 M_{\odot}$ . Относительные концентрации молекулярного водорода  $x_{H_2}$  в моделях равны 0.5, 0.05, 0.005, 0.001, а элементный состав —  $X=1$ ,  $Y=0$ ,  $Z=0$ .

Система уравнений одномерной газодинамики и разностная схема, применявшаяся в расчетах, приведены в работах [5, 6], функция охлаждения молекулярным водородом рассчитана в [1].

Начальной моделью выбран изотермический шар, сжимающийся квазистатически под действием растущего внешнего давления. В работе [3] показано, что вход изотермического облака в коллапс не зависит от предшествующей квазистатической эволюции и всегда происходит при достижении некоторого критического внешнего давления, когда отношение плотностей в центре и на поверхности изотермического шара равно 14.5.

Скорость охлаждения молекулярным водородом, полученную в работе [1] в диапазоне температур  $T=40-1500$  К, с точностью до 5 % можно аппроксимировать выражением

$$\Lambda = 9.75 \cdot 10^{-18} T^{4.32} \exp[-(91.66/T)^2] x_{H_2} \text{ Вт} \cdot \text{г}^{-1}. \quad (1)$$

Эта формула справедлива для концентрации частиц  $n > 10^4$  см $^{-3}$ .

При высоких плотностях ( $n > 10^8$  см $^{-3}$ ) в протозвезде происходит эффективное образование молекулярного водорода при реакциях  $H+$

$+H+H \rightarrow H_2+H$  и  $H+H+H_2 \rightarrow H_2+H_2$  [24]. Скорости этих реакций равны соответственно

$$\alpha_{H_1} = 5.5 \cdot 10^{-29} T^{-1} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}, \quad \alpha_{H_2} = \alpha_{H_1}/8. \quad (2)$$

Образование молекулярного водорода при тройных столкновениях приводит к существенному увеличению теплоотода из протозвезды и, как

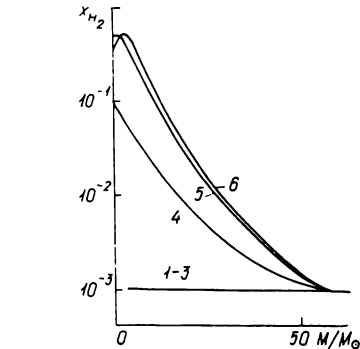
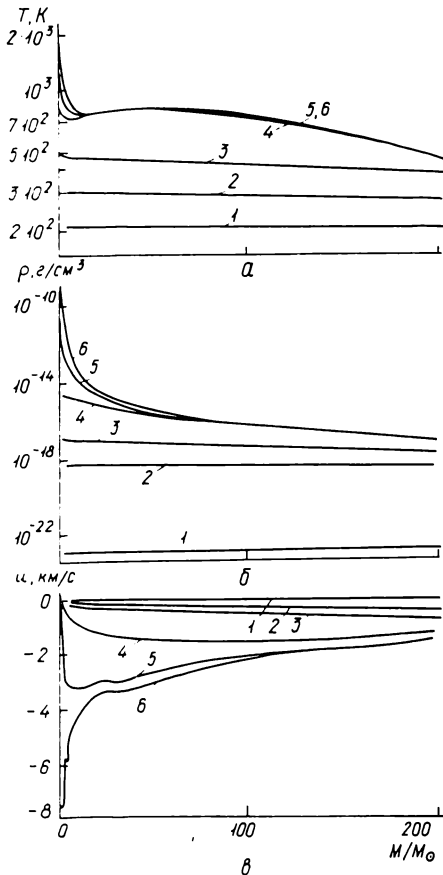


Рис. 2. Изменение с течением времени содержания молекулярного водорода в протозвезде с начальным содержанием  $x_{H_2} = 10^{-3}$  (моменты времени см. рис. 1)

Рис. 1. Распределение (по массе протозвезды  $M$  с начальным содержанием молекулярного водорода  $x_{H_2} = 10^{-3}$ ) температуры  $T$  (а), плотности  $\rho$  (б) и скорости сжатия  $u$  (в) для различных моментов времени (лет): 1—0; 2—6.881 138·10<sup>7</sup>; 3—6.899 981·10<sup>7</sup>; 4—6.904 861·10<sup>7</sup>; 5—6.904 932·10<sup>7</sup>; 6—6.904 941·10<sup>7</sup>

следствие, уменьшает массу формирующейся звезды. Поэтому в расчетах приближенно учтено образование молекул водорода при тройных столкновениях. Характерное время образования  $H_2$

$$t_f = x_{H_2} / [n^2 x_{H_1}^2 (\alpha_{H_1} x_{H_1} + \alpha_{H_2} x_{H_2})], \quad (3)$$

где  $x_{H_1}$ ,  $x_{H_2}$  — относительные концентрации атомарного и молекулярного водорода.

Концентрация молекулярного водорода определялась из выражения

$$n_{H_2} / n_{H_1}^2 = (n_{H_2} / n_{H_1}^2)_{eq} / (1 + t_f / t_{f1}), \quad (4)$$

где  $t_{f1} = (3\pi/32G\rho)^{1/2}$  — время свободного падения слоя с плотностью  $\rho$ ;  $G$  — гравитационная постоянная;  $(n_{H_2} / n_{H_1}^2)_{eq}$  вычислялось по формуле диссоциативного равновесия.

**Закономерности коллапса протозвезд с первичным химическим составом.** Расчеты коллапса протозвезд, охлаждаемых молекулярным водородом, проводились до момента времени, когда в центре протозвезды начинается формирование звездного ядра.

На рис. 1 изображены профили температуры  $T$ , плотности  $\rho$ , скорости сжатия  $u$  в протозвезде с начальным содержанием молекулярного водорода  $x_{H_2} = 10^{-3}$  в зависимости от времени. В начальные мо-

менты времени (кривые 1—3) происходит квазистатическое сжатие протозвезды, которое при достижении критического внешнего давления [3] сменяется гидродинамическим коллапсом. Начиная с этого момента времени сжатие протозвезды неизотермично и роль внешнего давления незначительна.

При достижении плотности  $\rho \sim 10^{-16}$  г·см<sup>-3</sup> в центральной части протозвезды ( $M/M_{\odot} \leq 50$ ) при тройных столкновениях происходит об-

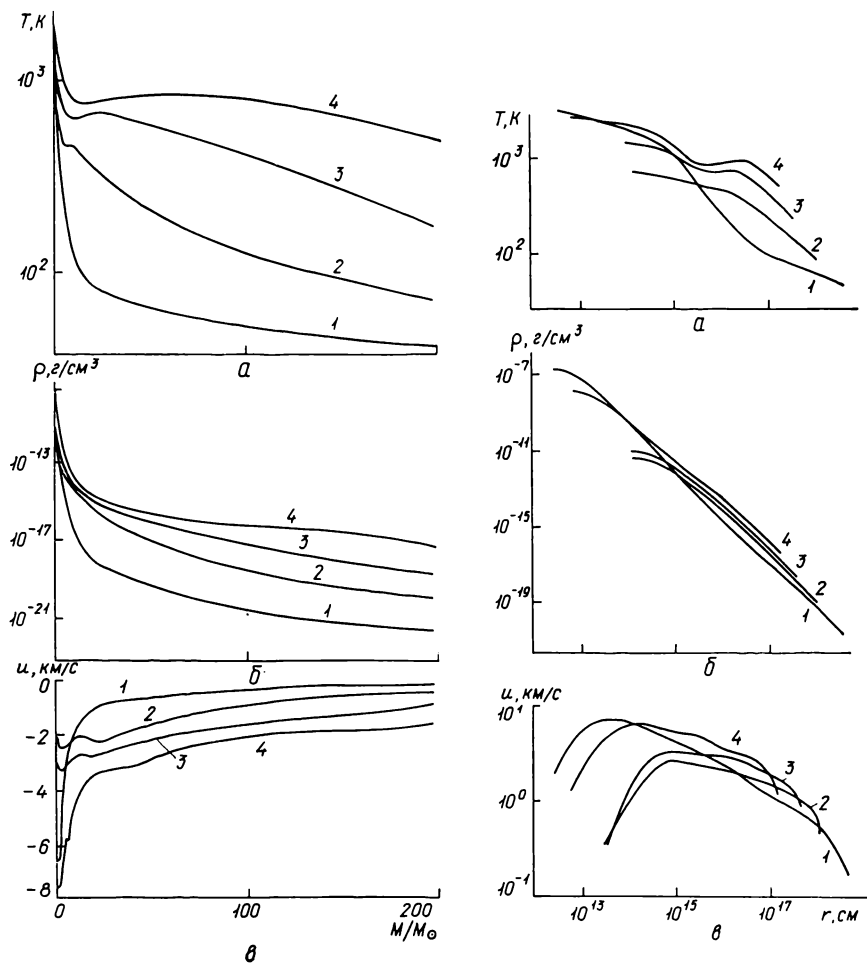


Рис. 3. Зависимость от массы  $M$  температуры  $T$  (а), плотности  $\rho$  (б), скорости сжатия  $u$  (в) в моменты времени, когда начинается формирование звездного ядра для протозвезд со следующим начальным содержанием  $H_2$ : 1— $5 \cdot 10^{-1}$ ; 2— $5 \cdot 10^{-2}$ ; 3— $5 \cdot 10^{-3}$ ; 4— $1 \cdot 10^{-3}$

Рис. 4. Зависимость от радиуса  $r$  температуры  $T$  (а), плотности  $\rho$  (б), скорости сжатия  $u$  (в) для протозвезд с различным начальным содержанием  $H_2$  в моменты времени, когда начинается формирование звездного ядра (цифрами обозначены кривые для тех же моделей, что и на рис. 3)

разование молекулярного водорода. В результате в центре протозвезды ( $M/M_{\odot} < 10$ ) весь водород переходит в молекулярную форму (рис. 2). Образование молекулярного водорода приводит к более эффективному тепловоду в центральных слоях с массой  $M/M_{\odot} < 30$  (рис. 1, а, кривые 4—6) и ускорению их сжатия. При этом температура газа остается почти постоянной. Последующее повышение температуры в центре протозвезды обусловлено самопоглощением излучения в линиях  $H_2$ .

На рис. 3 приведены профили температуры, плотности и скорости сжатия для всех моделей в момент формирования в центре протозвезды звездного ядра. В центральных слоях водород находится в молеку-

лярной форме, поэтому профили температуры, плотности и скорости сжатия в разных моделях различаются мало. Во внешних слоях образование молекулярного водорода не происходит, и модели с меньшим содержанием  $H_2$  характеризуются более высокими значениями  $T$ ,  $\rho$  и  $u$ , а следовательно, и более высоким темпом аккреции вещества.

На рис. 4 изображены профили  $T$ ,  $\rho$  и  $u$  в зависимости от радиуса для всех исследуемых моделей. Во внешних слоях распределение плотности описывается степенным законом, что характерно для автомодельного режима сжатия.

Скорость охлаждения (1) при температурах  $T > 130$  К можно также аппроксимировать степенной зависимостью

$$\Lambda = 6.68 \cdot 10^{-19} T^{1.75} x_{H_2} \text{ Вт} \cdot \text{г}^{-1}. \quad (5)$$

В этом случае, как показано в [7, 8], распределение плотности по радиусу будет также степенным с показателем степени

$$\alpha = 2(\beta - 1)/(\beta - 1.5) = 2.3, \quad (6)$$

где  $\beta = 4.75$ , а скорость сжатия равна

$$u = \delta u_{ff}, \quad (7)$$

где  $\delta = 0.25$ ;  $u_{ff}$  — скорость свободного падения.

Численное исследование дает несколько большее значение  $\alpha = 2.4$  и некоторое увеличение  $\delta$  с уменьшением радиуса  $r$ , что, по-видимому, связано с образованием в центральной области протозвезды молекулярного водорода.

В зоне образования молекулярного водорода распределение плотности также описывается степенным законом с показателем степени, равным 2, поскольку формирование  $H_2$  происходит при почти постоянной температуре. Наконец, в центре протозвезды профиль плотности становится круче вследствие увеличения непрозрачности в линиях  $H_2$ . Масса этой центральной зоны невелика — менее  $1 M_\odot$ .

Таким образом, протозвезда, охлаждаемая молекулярным водородом, в момент начала формирования звездного ядра имеет следующее строение. Внешние слои протозвезды с начальным содержанием молекулярного водорода характеризуются степенным распределением плотности по радиусу  $\rho \sim r^{-\alpha_h}$  (где для протозвезд с температурой  $T \geq 130$  К величина  $\alpha_h = 2.3 - 2.4$ ) и скоростью сжатия  $u = 0.25 u_{ff}$ , что согласуется с автомодельным решением [8].

Начиная с плотности  $\rho \sim 10^{-16}$  г·см<sup>-3</sup> при тройных столкновениях происходит образование молекулярного водорода. Зона образования молекулярного водорода характеризуется постоянной температурой, распределением плотности  $\rho \sim r^{-2}$  и скоростью сжатия  $u = 0.5 u_{ff}$ . Масса этой зоны увеличивается с уменьшением начального содержания  $H_2$  и в модели с  $x_{H_2} = 10^{-3}$  равна примерно  $50 M_\odot$ , а в модели с  $x_{H_2} = 5 \times 10^{-2}$  — около  $10 M_\odot$ . Наконец, в центральной части протозвезды с массой приблизительно  $1 M_\odot$  вещество непрозрачно в линиях вращательно-колебательных переходов  $H_2$ , что приводит к повышению температуры и увеличению крутизны профиля плотности.

Степенное распределение плотности в протозвездах с первичным химическим составом значительно упрощает исследование коллапса протозвезд и позволяет аналитически получить значения масс звезд первого поколения в зависимости от начального содержания молекулярного водорода. Результаты такого исследования приведены во второй части данной работы.

Автор выражает благодарность И. Г. Колеснику за обсуждение результатов исследований.

1. *Изотов Ю. И.* Столкновительная диссоциация молекулярного водорода в разреженном газе // Письма в Астрон. журн.—1983.—9, № 7.— С. 441—444.
2. *Изотов Ю. И., Колесник И. Г.* Кинетика образования молекулярного водорода, термохимическая эволюция вещества протогалактик и характеристики коллапсирующих протозвезд первого поколения.— Киев, 1981.—37 с.— (Препринт / АН УССР. Ин-т теорет. физики; ИТФ—81—84Р).
3. *Изотов Ю. И., Колесник И. Г.* Эволюция изотермических облаков при изменяющемся внешнем давлении // Астрометрия и астрофизика.—1982.— Вып. 46.— С. 3—15.
4. *Изотов Ю. И., Колесник И. Г.* Кинетика образования молекулярного водорода в первичном веществе Вселенной // Астрон. журн.—1984.—61, вып. 1.— С. 24—34.
5. *Колесник И. Г.* Численные исследования коллапса протозвезд. Физическая и математическая постановка задачи. I. Основные уравнения // Астрометрия и астрофизика.—1980.— Вып. 40.— С. 3—18.
6. *Колесник И. Г.* Численные исследования коллапса протозвезд. Физическая и математическая постановка задачи. II. Вычислительные алгоритмы // Там же.—1981.— Вып. 41.— С. 40—58.
7. *Колесник И. Г., Надежин Д. К.* Автомодельный режим гравитационного сжатия протозвезд из молекулярного водорода // Астрон. журн.—1974.—51, вып. 2.— С. 382—387.
8. *Надежин Д. К.* Автомодельное решение для коллапса под действием потерь энергии нейтринным излучением // Там же.—1968.—45, вып. 6.— С. 1166—1176.
9. *Рузмайкина Т. В.* О гипотезе космологического происхождения шаровых скоплений // Там же.—1972.—49, вып. 6.— С. 1229—1237.
10. *Щекинов Ю. А., Энтэль М. Б.* Термохимическая эволюция догалактического газа в адиабатической теории происхождения галактик // Там же.—1983.—60, вып. 4.— С. 640—647.
11. *Barbuу B.* Nitrogen and oxygen as indicators of primordial enrichment // *Astron. and Astrophys.*—1983.—123, N 1.— P. 1—5.
12. *Barbuу B.* Magnesium isotopes in halo stars of various metallicities // *ESO Messenger.*—1984.—N 35.— P. 25—26.
13. *Bessell M. S., Norris J.* The ultra-metal-deficient (population III?) red giant CD—38°245 // *Astrophys. J.*—1984.—285, N 2.— P. 622—636.
14. *Bodenheimer P., Tohline J. E., Black D. C.* Criteria for fragmentation in a collapsing rotating cloud // *Ibid.*—1980.—242, N 1.— P. 209—218.
15. *Bond H. E.* Where is population III? // *Ibid.*—1978.—248, N 2.— P. 606—611.
16. *Carr B. J., Bond J. R., Arnett W. D.* Cosmological consequences of population III stars // *Ibid.*—1984.—277, N 2.— P. 445—469.
17. *Gratton R. G., Ortolani S.* Oxygen abundances in metal poor stars // *ESO Messenger.*—1984.—N 37.— P. 3—5.
18. *Hasegawa T., Yoshii Y., Sabano Y.* Thermal evolution of a contracting hydrogen gas cloud // *Astron. and Astrophys.*—1981.—98, N 1.— P. 189—194.
19. *Hills J. G.* Where are the population III stars? // *Astrophys. J.*—1982.—258, N 2.— P. L67—L69.
20. *Hirasawa T.* Formation of protogalaxies and molecular processes in hydrogen gas // *Progr. Theor. Phys.*—1969.—42, N 3.— P. 523—543.
21. *Ikeuchi S.* Theory of galaxy formation triggered by quasar explosions // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1981.—33, N 2.— P. 211—222.
22. *Karimabadi H., Blitz L.* The detectability of population III «Jupiters» // *Astrophys. J.*—1984.—283, N 1.— P. 169—173.
23. *Kashlinsky A., Rees M. J.* Formation of population III stars and pregalactic evolution // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1983.—205, N 3.— P. 955—971.
24. *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.
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. *Silk J.* The first stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1983.—205, N 2.— P. 705—718.
27. *Tohline J.* The gravitational fragmentation of primordial gas clouds // *Astrophys. J.*—1980.—239, N 2.— P. 417—427.
28. *Yoshii Y., Sabano Y.* Stability of a collapsing pre-galactic gas cloud // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1979.—31, N 3.— P. 505—521.