

# ФИЗИКА ЗВЕЗД

## ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ КОЛЛАПСЕ ПРОТОЗВЕЗД ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Л. Н. Аршуткин, И. Г. Колесник

При коллапсе протозвезд, вследствие увеличения плотности и возрастающего ослабления внешних ионизирующих излучений, ускоряются реакции, способные изменить концентрации элементов, вносящих вклад в объемные потери энергии. В результате будет меняться скорость охлаждения протозвезды, что может проявиться в особенностях динамики гравитационного сжатия. Качественный анализ этой проблемы рассматривается в [4].

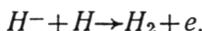
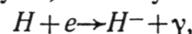
В данной статье приведены результаты количественного исследования кинетики химических превращений при допущении, что протозвезда представляет собой однородный изотермический шар, сжимающийся в режиме свободного падения.

Вычисления проведены для протозвезды, содержащей: 1) водородные атомы  $H$ , положительные ионы  $H^+$ , отрицательные ионы  $H^-$ , молекулы  $H_2$ , молекулярные ионы  $H_2^+$ ; 2) тяжелые элементы; специально рассмотрен ионизованный и нейтральный углерод, являющийся основным поставщиком электронов среди тяжелых элементов; 3) частицы межзвездной пыли. Протозвезда находится в поле ультрафиолетового излучения, космических и рентгеновских лучей. Принимается, что плотность энергии излучений в процессе сжатия не изменяется.

В таблице приведены химические реакции и их скорости, которые учитывались при вычислениях. Особое внимание уделено реакциям, приводящим к образованию молекулярного водорода.

Образование молекул  $H_2$  происходит с наибольшей скоростью на поверхности пылинок (при  $T \approx 10^6$  К,  $r_p = 10^{-5}$  см,  $N_p/N_H \approx 10^{-12}$  имеем  $a_1 = 10^{-17}$  см<sup>3</sup>/сек).

Если пылинки отсутствуют, молекулы  $H_2$  образуются по цепочке



Этот процесс впервые рассмотрел Мак-Доуэлл [12].

Скорость изменения концентрации  $k$ -го элемента ( $N_k$ ) описывается уравнением

$$\frac{dN_k}{dt} = \sum_{\alpha} \varepsilon(k, \alpha) - \sum_{\beta} L(k, \beta),$$

где  $\varepsilon(k, \alpha)$  — скорость образования  $k$ -го элемента в результате  $\alpha$ -реакции;  $L(k, \beta)$  — скорость разрушения  $k$ -го элемента в результате  $\beta$ -реакции.

Выражения для  $\varepsilon$  и  $L$  при парных взаимодействиях частиц имеют вид  $a_i N_i N_j$ , а при взаимодействии частицы с излучением —  $\alpha_\gamma N_i$ .

С учетом реакций, приведенных в табл. 1, получаем следующую систему уравнений для скоростей изменения содержания элементов:

атомов  $H$

$$\begin{aligned} \frac{dx_0}{dt} = & a_3 x_+ N_e + a_5 x_- + 2a_7 y + 2a_{14} x_- x_+ N_p - \\ & - x_0 [a_{18} + a_{19} + a_4 N_e + a_{11} x_- N_p + a_1 N_p + 2a_{22} x_0^2 N_p^2], \end{aligned} \quad (1)$$

Реакция	Скорость реакции	
$2H + \text{пыль} \rightarrow H_2 + \text{пыль}$	$a_1 = \frac{1}{2} \pi r_{\text{п}}^2 \left( \frac{8kT}{\pi m_p} \right)^{1/2} a_{\text{п}} *$	[8]
$H + \gamma \rightarrow H^+ + e^-$	$a_2 = 1.6 \cdot 10^5 T_r \exp(-1.57 \cdot 10^5 / T_r) **$	[16]
$H^+ + e \rightarrow H + \gamma$	$a_3 = 6.2 \cdot 10^{-11} T^{-0.5}$	[16]
$H + e \rightarrow H^- + \gamma$	$a_4 = 6.94 \cdot 10^{-19} T$	[10]
$H^- + \gamma \rightarrow H + e$	$a_5 = 1.53 \cdot 10^{-2} T_r^{2.4} \exp\left(-\frac{8.75 \cdot 10^3}{T_r}\right)$	[14]
$H^- + e \rightarrow H + 2e$	$a_6 = 1.6 \cdot 10^{-6} (1 + 34 T^{-5/2}) \exp\left(-\frac{65}{T_r^{1/2}}\right)$	[10]
$H_2 + \gamma \rightarrow H + H$	$a_7 = 5.12 \cdot 10^7 \exp(-14.4 \cdot 10^5 / T_r)$	[17]
$H + H \rightarrow H_2 + \gamma$	$a_8 = 4.10^{-27}$	[11]
$H_2^+ + e \rightarrow 2H + \gamma$	$a_9 = 10^{-7}$	[17]
$H_2 + e \rightarrow H + H$	$a_{10} = 2.7 \cdot 10^{-8} T^{-3/2} \exp\left(-\frac{4.3}{T}\right)$	[10]
$H + H^- \rightarrow H_2 + e$	$a_{11} = 1.3 \cdot 10^{-9}$	[9]
$H_2^+ + \gamma \rightarrow H + H^+$	$a_{12} = 1.08 \cdot 10^{-13} T_r^{5.34} \exp\left(-\frac{10^4}{T_r}\right)$	[5]
$H + H^+ \rightarrow H_2^+ + \gamma$	$a_{13} = 5 \cdot 10^{-24} T^2$	[7]
$H^+ + H^- \rightarrow H + H + H$	$a_{14} = 1.6 \cdot 10^{-6} T^{-0.45}$	[10]
$H_2 + H \rightarrow H + H + H$	$a_{15} = 2 \cdot 10^{-6} T^{-0.5} \exp\left(-\frac{52000}{T}\right)$	[13]
$H_2 + H^+ \rightarrow H_2^+ + H$	$a_{16} = 1.3 \cdot 10^{-9}$	[10]
$H_2 + H^+ \rightarrow H_2^+ + H$	$a_{17} = 2.6 \cdot 10^2 T^{-0.5} \exp\left(-\frac{2.12}{T}\right)$	[13]
$H + \text{РЛ} \rightarrow H^+ + e^-$	$a_{18} = 8.9 \cdot 10^{-16}$	[15]
$H + \text{КЛ} \rightarrow H^+ + e^-$	$a_{19} = 2 \cdot 10^{-15}$	[15]
$C + \gamma \rightarrow C^+ + e^-$	$a_{20} = 1.4 \cdot 10^{-10}$	[6]
$C^+ + e \rightarrow C + \gamma$	$a_{21} = 10^{-10} T^{-0.5} [1.26 - 0.238 \lg T]$	[6]
$H + H + H \rightarrow H_2 + H$	$a_{22} = 10^{-32}$	[10]
$z + \text{пыль} \rightarrow \text{пыль}$	$a_{23} = \pi r_{\text{п}}^2 \left( \frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} a_{\text{п}}$	

\*  $T$  — температура межзвездного газа,  $a_{\text{п}} = N_{\text{п}} / N_p$ ,  $r_{\text{п}}$  — радиус пылинки;

\*\*  $T_r$  — температура ионизирующего излучения; РЛ — рентгеновский квант; КЛ — частица космических лучей.

положительных ионов  $H^+$

$$\frac{dx_+}{dt} = (a_{18} + a_{19}) x_0 - (a_3 N_e + a_{14} x_- N_p) x_+, \quad (2)$$

отрицательных ионов  $H^-$

$$\frac{dx_-}{dt} = a_4 x_0 N_e - x_- [a_5 + a_{11} x_0 N_p + a_{14} x_+ N_p + a_6 N_e], \quad (3)$$

молекул  $H_2$

$$\frac{dy}{dt} = a_{11} x_0 x_- N_p + a_4 x_0 N_p + a_{22} x_0^3 N_p^2 - a_7 y, \quad (4)$$

молекулярных ионов  $H_2^+$

$$\frac{dy_+}{dt} = a_{13} x_0 x_+ N_p - y_+ [a_{12} + a_9 N_e + a_{16} x_0 N_p], \quad (5)$$

ионов углерода  $C^+$

$$\frac{dx_C}{dt} = a_{20}(1-x_C) - a_{21}x_C N_e. \quad (6)$$

Радиус пылинки увеличивается за счет прилипания к ней тяжелых элементов. Уменьшение радиуса возможно при испарении радикалов и молекул. В этом случае

$$\begin{aligned} \frac{dr_\pi}{dt} = & \frac{1}{\rho_\pi} \left[ \frac{1}{2} \sum \left( \frac{2kTm_p}{\pi} \right)^{1/2} \mu z N_p - \sum m_p \mu \times \right. \\ & \left. \times \exp \left( 2.3026 \left( C - \frac{A}{T} \right) \right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Значения  $A$  и  $C$  брались из книги Каплана и Пикельнера [2, с. 267].

Уравнение для уменьшения содержания тяжелых элементов  $z$  в результате адсорбции на частицы пыли имеет вид:

$$\frac{dz}{dt} = -a_{23} Z N_p. \quad (8)$$

Для концентрации электронов имеем

$$N_e = (\rho/m_p)[1.305 \cdot 10^{-2} Z x_C + x_+ X]. \quad (9)$$

В приведенных выше уравнениях

$$x_0 = \frac{N_H}{N_p}; \quad x_+ = \frac{N_{H^+}}{N_p}; \quad x_- = \frac{N_{H^-}}{N_p}; \quad y = \frac{N_{H_2}}{N_p}; \quad y_+ = \frac{N_{H_2^+}}{N_p}; \quad x_C = \frac{N_{C^+}}{N_C + N_{C^+}}$$

$N_p = X\rho/m_p$  — концентрация протонов. К системе (1)–(9) необходимо добавить уравнения, описывающие изменение плотности и температуры со временем. Как отмечалось, принято  $T = \text{const}$ , а плотность изменяется по закону [3]

$$\rho = \rho_0 / w^3, \quad (10)$$

где  $w = \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \tau \right) \right]^{2/3}$ ;  $\tau = \frac{t}{t_{ff}}$ ;  $t_{ff}$  — время свободного падения.

Система уравнений (1)–(10) решалась численно, неявным методом, описанным Э. Э. Шнолем в [1].

Решения получены для двух вариантов: 1) протозвезды состоит только из газа; 2) протозвезды содержит примесь пылевых частиц. При взаимодействии частиц с межзвездным излучением учтен коэффициент дилиюции  $W$ , который в расчетах принимался равным  $10^{-14}$ . В расчетах принималось  $\rho_0 = 10^{-21} \text{ g/cm}^3$ ,  $X = 0.7$ ,  $Z = 0.02$ ,  $T_r = 10^4 \text{ K}$ ;  $T = 50, 100, 200^\circ \text{ K}$  — в варианте 1,  $T = 10, 20^\circ \text{ K}$  — для варианта 2. Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2.

Начальный рост  $x_-$  и  $y_+$  вызван уменьшающейся относительной ролью фотоионизации при увеличении плотности. Затем, при  $N_p \geq 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , начинается рекомбинация электронов, которая идет значительно быстрее, чем образование  $H_2$  через  $H^-$ . Поэтому в протозвездах этот путь образования молекулярного водорода мало эффективен. Только при  $N_p \geq 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , когда существенную роль начинают играть тройные столкновения, происходит быстрое образование  $H_2$  до равновесной концентрации. Если в веществе есть примесь пылевых частиц, образование молекулярного водорода значительно ускоряется и при  $N_p \geq 10^7 \text{ cm}^{-3}$  практически весь водород переходит в состояние молекул. Пылинки также приводят к обеднению среды тяжелыми элементами, что проявляется в росте  $r_\pi$ . При  $a_\pi = 10^{-12}$  полная адсорбция тяжелых элементов пылинками дает максимальный радиус пылинки  $r_\pi \approx$

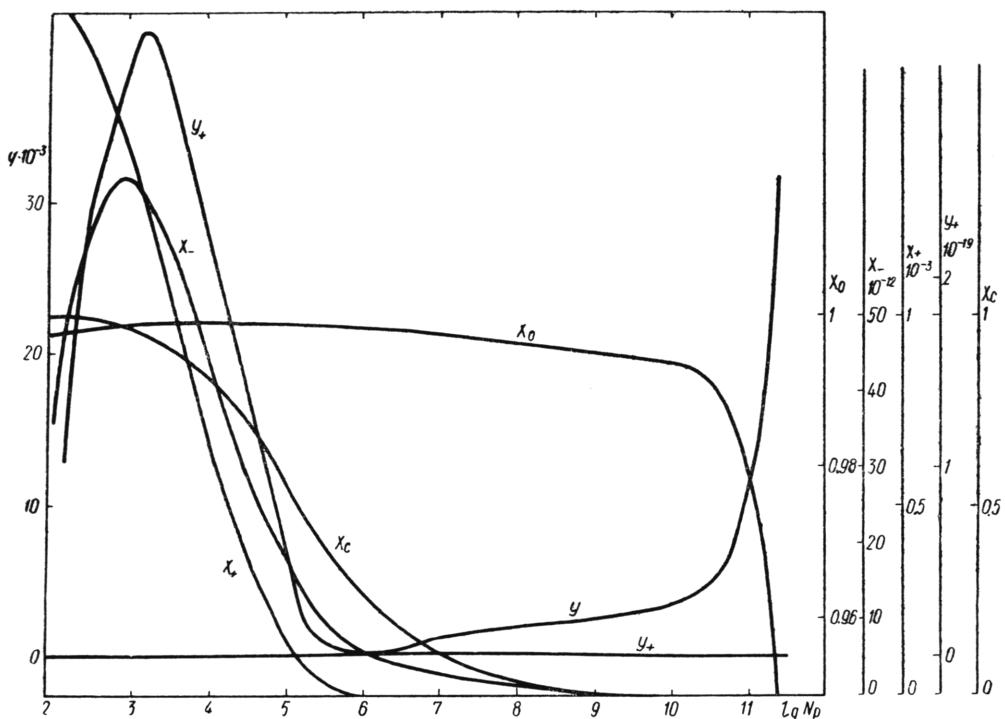


Рис. 1. Зависимость концентраций ионов и молекул от плотности согласно первому варианту решения.

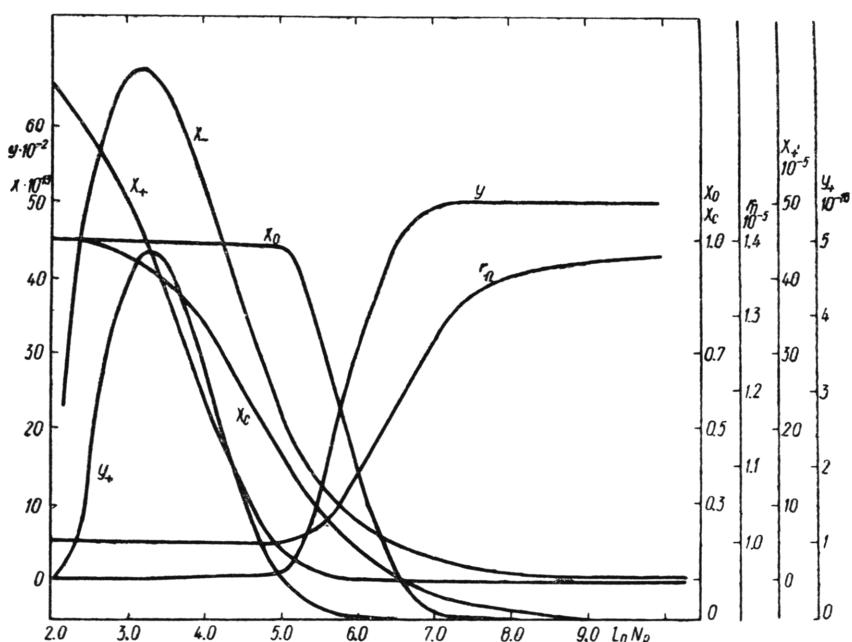


Рис. 2. Зависимость концентраций ионов и молекул от плотности согласно второму варианту решения.

$\simeq 1.4 \cdot 10^{-5}$  см. Приведенные на рис. 1 и 2 зависимости концентраций от плотности малочувствительны к изменению температуры газа.

В наших расчетах плотность ионизирующих излучений предполагалась постоянной. В действительности она является функцией глубины и должна уменьшаться с увеличением плотности. Учет этих факторов вызовет еще более крутой ход процесса рекомбинации и сузит интервал плотностей, в которых происходит переход к стационарным значениям концентраций элементов при высоких плотностях.

Поскольку реальная протозвезда имеет неоднородное распределение плотности, по химическому составу она будет содержать три зоны: внутреннюю — высокой плотности,  $N_p \gtrsim 10^7$  см<sup>-3</sup>, в которой уже прошли все химические реакции; промежуточную, где происходят описанные выше химические превращения; и внешнюю —  $N_p \leq 10^5$  см<sup>-3</sup>, здесь еще важно ионизирующее излучение, и состав протозвезды близок к существующему в обычных межзвездных облаках. Описанная структура влечет за собой соответствующее распределение источников охлаждения, рассмотренных в работе [3].

## ЛИТЕРАТУРА

- Гершберг Р. Е. Некоторые вопросы высвечивания ионизованного водорода, оптически толстого в частотах линий. — Изв. КрАО, 1972, 46.
- Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Межзвездная среда. М., Физматгиз, 1963.
- Колесник И. Г. Гравитационное сжатие протозвезд I. Объемные потери энергии. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, 18. «Наукова думка», Киев, 1973.
- Колесник И. Г. Химические превращения при коллапсе протозвезд. Качественный анализ. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, 28, «Наукова думка», Киев, 1975.
- Оксюк Ю. Д. Фотодиссоциация молекулярного иона водорода. Опт. и спектр., 23, 1967, 213.
- Aapn'estad P. A. Molecular Formation. I. In Normal HI Clouds, Ap. J., Suppl. Ser., 1973, 217, 205.
- Bates D. R. Rate of Rormation of Molecules by Radiative Association. Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 1951, 111, 303.
- De long T. The Density of H<sub>2</sub> Molecules in Dark Interstellar Clouds. Astron. and Astrophys., 1972, 20, 263.
- Dolgarno A., Browne I. C. The Associative Detachment of H and H<sup>-</sup>. — Ap. J., 1967, 149, 231.
- Hirasawa T. Formation of Protogalaxies and Molecular Processes in Hydrogen Gas. Prog. Theor. Phys., 1969, 42, 523.
- Malville T. M. Abundance of Metastable Hydrogen Molecules in the Interstellar Medium. Ap. J., 1964, 139, 198.
- McDowell M. R. On the Formation of H<sub>2</sub> in HI Region. Observatory, 1961, 81, 240.
- Matsuda T., Sato H., Takeda H. Cooling of Pre-Galactic Gas Clouds by Hydrogen Molecule. Prog. Theor. Phys., 1969, 42, 219.
- Chandrasekhar S. On the Continuous Coefficient of the Negative Hydrogen in IV. Ap. J., 1958, 128, 114.
- Silk J., Werner M. W. Heating of HI Regions by Soft X-rays. Ap. J., 1969, 158, 185.
- Spitzer L., Tomasko M. G. Heating of HI Regions by Energetic Particles. Ap. J., 1968, 152, 971.
- Stecher T. P., Williams D. A. Photodestruction of Hydrogen Molecules in HI Regions. Ap. J. 1967, 149, L 29.

Главная астрономическая  
обсерватория АН УССР

Поступила в редакцию  
в апреле 1975 г.

## О ДВУХ ПЕРЕМЕННЫХ В СОЗВЕЗДИИ ОРЛА

**Б. Л. Шаганян, В. Б. Шаганян**

Настоящая работа представляет собой часть исследования всех переменных звезд в поле галактического рассеянного звездного скопления NGC 6830 южной части созвездия Орла и посвящена исследованию фотографического блеска звезд V 462 и V 735 Орла.