

А. Т. САРСЕМБАЕВА, Н. Ж. ТАКИБАЕВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ $H_2^+$ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ $H^-$ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 5000–15000 К

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

*В работе была определена концентрация положительных молекулярных ионов  $H_2^+$  и концентрации отрицательных ионов  $H^-$  при температурах 5000–15000 К.*

**Введение.** Вещество на Солнце находится в состоянии значительной ионизации. Процесс ионизации состоит в том, что при возрастающей энергии движения атомов и энергии световых квантов столкновения атомов между собой и поглощение фотонов могут привести к такому возбуждению атома, когда электрон вовсе покидает его. В результате этого из одного нейтрального атома получаются две заряженные частицы – положительный ион и отрицательный электрон. В этом отношении ионизацию можно рассматривать как своеобразную диссоциацию [1].

Исследование связанно-свободных радиационных переходов в водородной плазме в условиях локального термодинамического равновесия позволяет получать важную информацию о наиболее эффективных источниках непрерывного фотопоглощения в звездных атмосферах. Известно, что в квазиравновесной водородной плазме с эффективной температурой  $T_{eff} \approx 6000$  К (характерной для фотосферы Солнца) основной вклад в поглощение света в видимой области спектра вносит процесс фотоотрыва электрона от отрицательного иона  $H^-$ , концентрация которого мала и составляет  $N_{H^-}/N_H \sim 10^{-8}$  от концентрации нейтрального атома водорода  $H$  [2].

**Концентрация ионов  $H^-$  и  $H_2^+$ .** Концентрация ионов  $H^-$  вычисляется по этой формуле [2]

$$N_{H^-} = \frac{g_{H^-}}{g_e g_H} \left( \frac{2\pi\hbar^2}{m_e kT} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{\epsilon_{H^-}}{kT}\right) N_H N_e, \quad (1)$$

где  $\epsilon_{H^-} = 0.754$  эВ – энергия связи электрона в отрицательном ионе  $H^-$ ;  $g_{H^-} = 1$  – статистический вес состояния,  $g_e = 2$ , а  $g_H = 2$  – статистический вес атома водорода в основном состоянии [2].

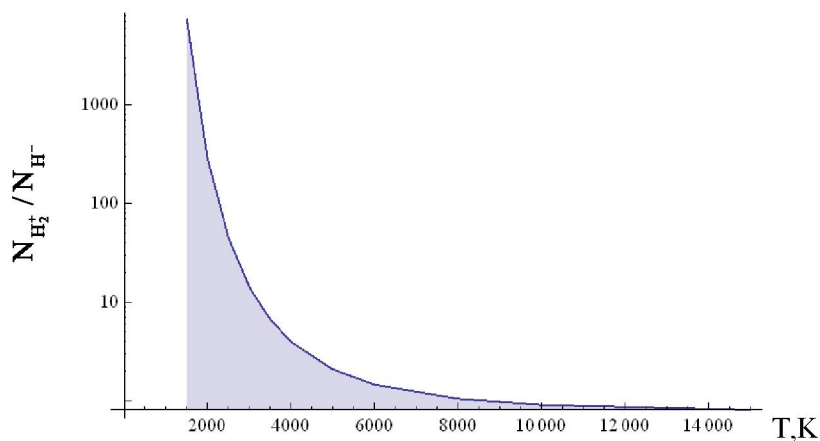
Полная концентрация  $N_{H_2^+} = \sum_{v,j} N_{v,j}$  положительных молекулярных ионов  $H_2^+$  может быть найдена с помощью закона действующих масс

$$N_{H_2^+} = \frac{Z_{v,r} g_{H_2^+}}{\kappa g_H g_{H^+}} \left( \frac{2\pi\hbar^2}{\mu kT} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{D_0}{kT}\right) N_H N_{H^+}. \quad (2)$$

Здесь  $g_H = 2$ ,  $g_{H^+} = 1$ ,  $g_{H_2^+} = 2$ ,  $\kappa = 2$  и  $D_0 = 2.651$  эВ. Для внутренней статистической суммы  $Z = (g_{H_2^+}/\kappa) Z_{v,r}$  здесь используем квантовый результат [4], полученный с помощью имеющихся значений всех колебательно-вращательных уровней энергии иона  $H_2^+$ . В таблице представлены результаты расчетов концентраций ионов  $H_2^+$  и  $H^-$ . Как видно из таблицы, при достаточно высоких температурах  $T \sim 6500$ – $15000$  К полная концентрация  $N_{H_2^+}$  молекулярного иона  $H_2^+$  и концентрация ионов  $H^-$  оказывается одного и того же порядка величины. При понижении температуры концентрация ионов  $N_{H_2^+}$  ионов  $H_2^+$  возрастает и значительно превышает величину  $N_{H^-}$  [3].

**Зависимости относительных концентраций положительных молекулярных ионов  $H_2^+$  и отрицательных ионов  $H^-$  от температуры равновесной водородной плазмы**

T, K	$N_{H_2^+}, cm^3$	$N_{H^-}, cm^3$	$N_{H_2^+}/N_{H^-}$
5000	$3.51818 \times 10^{-21}$	$1.68767 \times 10^{-21}$	2.08464
5500	$2.12707 \times 10^{-21}$	$1.2476 \times 10^{-21}$	1.70493
6000	$1.40478 \times 10^{-21}$	$9.58935 \times 10^{-22}$	1.46494
6500	$9.91281 \times 10^{-22}$	$7.6016 \times 10^{-22}$	1.30404
7000	$7.35903 \times 10^{-22}$	$6.17804 \times 10^{-22}$	1.19116
7500	$5.68402 \times 10^{-22}$	$5.12505 \times 10^{-22}$	1.10907
8000	$4.53073 \times 10^{-22}$	$4.32488 \times 10^{-22}$	1.0476
8500	$3.70447 \times 10^{-22}$	$3.70276 \times 10^{-22}$	1.00046
9000	$3.09269 \times 10^{-22}$	$3.20954 \times 10^{-22}$	0.963593
9500	$2.62698 \times 10^{-22}$	$2.81182 \times 10^{-22}$	0.934263
10000	$2.26406 \times 10^{-22}$	$2.48636 \times 10^{-22}$	0.910592
11000	$1.74206 \times 10^{-22}$	$1.99028 \times 10^{-22}$	0.875284
12000	$1.39074 \times 10^{-22}$	$1.63467 \times 10^{-22}$	0.850777
13000	$1.14202 \times 10^{-22}$	$1.37062 \times 10^{-22}$	0.833214
14000	$9.58806 \times 10^{-23}$	$1.16883 \times 10^{-22}$	0.820313
15000	$8.19463 \times 10^{-23}$	$1.01088 \times 10^{-22}$	0.810643



Отношение полной концентрации  $N_{H_2^+} = \sum_{v,j} N_{v,j}$  положительных молекулярных ионов  $H_2^+$  к концентрации отрицательных ионов  $H^-$  в зависимости от температуры равновесной водородной плазмы. Принято, что концентрация электронов и протонов равны  $N_e = N_{H^+}$

**Заключение.** В статье определена концентрация положительных молекулярных ионов  $H_2^+$  и концентрации отрицательных ионов  $H^-$  в зависимости от температуры равновесной водородной плазмы. Было показано, что при достаточно высоких температурах  $T \sim 6500-15000$  K полная концентрация  $N_{H_2^+}$  молекулярного иона  $H_2^+$  и концентрация ионов  $H^-$  оказывается одного и того же порядка величины. При понижении температуры концентрация ионов  $N_{H_2^+}$  ионов  $H_2^+$  возрастает и значительно превышает величину  $N_{H^-}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. – М.: Наука, 1977.
- 2 Лебедев В.С., Пресняков Л.П., Собельман И.И. Радиационные переходы молекулярного иона  $H_2^+$  // УФН. – 2003. – Т. 173, № 5.
- 3 Лебедев В.С. Связанно-свободные и свободно-свободные фотопереходы в квазиравновесной водородной плазме // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. – Сер. Б, Т. V-1, Ч. II, Раздел IV, Гл. 6, С. 75-105. М.: Янус-К, 2007.
- 4 Термодинамические свойства индивидуальных веществ / Под ред. Л. В. Гурвича и др. – Т. I. – М.: Наука, 1978.

*A. T. Sarsembayeva, N. Zh. Takibayev*

$H_2^+$  ОҢ МОЛЕКУЛАЛЫҚ ИОННЫҢ ЖӘНЕ  $H^-$  ТЕРІС ИОННЫҢ 5000–15000 К  
ТЕМПЕРАТУРА АРАЛЫҒЫНДАҒЫ КОНЦЕНТРАЦИЯСЫН АНЫҚТАУ

Жұмыста  $H_2^+$  оң молекулалық ионның және  $H^-$  теріс ионның 5000–15000 К температура аралығындағы концентрациясы анықталды.

*A. T. Sarsembayeva, N. Zh. Takibayev*

DEFINITION OF POSITIVE  $H_2^+$  AND NEGATIVE  $H^-$  MOLECULAR IONS  
AT TEMPERATURES 5000–15000 K

In this paper has been certain concentration of positive molecular ions  $H_2^+$  and concentration of negative ions  $H^-$  at temperatures 5000–15000 K.