

А. А. АКОПЯН, Ю. К. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН

РАСЧЕТЫ ДИССОЦИАТИВНОГО РАВНОВЕСИЯ В АТМОСФЕРАХ ХОЛОДНЫХ ГИГАНТОВ

Приводятся расчеты содержания молекул H_2 , H_2O , CO в атмосферах холодных гигантов.

О наличии молекул в атмосферах холодных звезд известно еще со времени первых спектральных астрономических наблюдений. Однако роль молекул в формировании спектра холодных звезд выявилась достаточно полно лишь в 60-е гг. в результате инфракрасных наблюдений. Так, в [1] было показано, что в ближнем ИК диапазоне распределение энергии излучения холодных звезд определяется, в основном, колебательно-вращательным спектром таких молекул, как CO и H_2O . Эти и последующие инфракрасные наблюдения стимулировали многочисленные работы по теоретическим расчетам содержания молекул в атмосферах холодных звезд. В результате этих расчетов, выяснилось, что молекулы вносят весьма значительный вклад в непрозрачность звездного вещества и учет молекул необходим для построения моделей атмосфер холодных звезд. В связи с этим возникает необходимость расчета содержания молекул в звездных атмосферах, т. е. при различных температурах, электронных и газовых давлениях, химических составах. Довольно подробные таблицы такого рода содержатся в [2]. На основе этих данных были получены оценки содержания молекул в атмосферах холодных звезд, выявлены зависимости содержания молекул от оптической глубины, эффективной температуры, ускорения силы тяжести, химического состава. Однако теорию строения атмосфер холодных звезд в настоящее время никак нельзя считать завершенной. Продолжается пересмотр физических основ теории, в частности, уточняется роль конвективного переноса, рассчитываются новые модели. Для сравнения результатов этих расчетов с наблюдениями, необходимы данные о содержании молекул в звездных атмосферах. Однако использование для расчета содержания молекул таблиц [2] не всегда приводит к удовлетворительному результату. Дело в том, что интерполяция приведенных в [2] данных сразу по нескольким параметрам: температуре, давлению и химическому составу, весьма затруднительна, так как содержания некоторых молекул крайне чувствительны к этим параметрам. Поэтому в настоящее время разработаны программы расчета содержания молекул в атмосферах звезд, учитывающие большое количество молекул [3]. Эти расчеты основываются на предположении о диссоциативном равновесии, которое в стационарных звездах действительно имеет место [2]. Задача расчета содержания молекул сводится при этом к решению системы уравнений для относительных содержаний атомов наиболее распространенных элементов H , C , O , N . Как показали расчеты, в большинстве практически важных случаев нет необходимости включать в систему уравнений большое количество молекул: достаточно 10 наиболее распространенных. Исходя из этого, в данной

работе для исследования распределения молекул в атмосферах холодных гигантов составлена сравнительно несложная программа, реализуемая на микроЭВМ, и дающая достаточно точные результаты. В этой программе для расчета диссоциативного равновесия используется следующая система уравнений:

$$P(C) + P(C^+) + P(CO) + P(CN) + P(HCN) + 2P(C_2H_2) + P(CH_4) = A[P(H) + P(H^+) + 2P(H_2)]$$

$$P(N) + P(N^+) + 2P(N_2) + P(CN) + P(HCN) = B[P(H) + P(H^+) + 2P(H_2)]$$

$$P(O) + P(O^+) + P(CO) + P(OH) + P(H_2O) = C[P(H) + P(H^+) + 2P(H_2)] \quad (1)$$

$$P_g - P_e = P(H) + P(H^+) + P(C) + P(C^+) + P(O) + P(O^+) + P(N) + P(N^+) + P(H_2) + P(OH) + P(H_2O) + P(CO) + P(N_2) + P(CN) + P(HCN) + P(C_2H_2) + P(CH_4),$$

где P_g , P_e — соответственно полное газовое и электронное давление, A , B , C — содержания атомов C , N и O соответственно, рассчитанных на 1 атом водорода, P — парциальные давления соответствующих атомов, ионов и молекул. Предполагая наличие термодинамического равновесия, можно преобразовать систему (1) к следующему виду:

$$P(C)[1 + F(C)] + \frac{P(C)P(O)}{K(CO)} + \frac{P(C)P(N)}{K(CN)} + \frac{P(H)P(C)P(N)}{K(HCN)K(CN)} + \frac{2P(C)^2P(H)^2}{K(C_2H_2)K(C_2H)K(C_2)} + \frac{P(C)P(H)^4}{K(CH_4)K(CH_3)K(CH_2)K(CH)} =$$

$$= A \left\{ P(H)[1 + F(H)] + \frac{2P(H)^2}{K(H_2)} \right\}$$

$$P(N)[1 + F(N)] + \frac{2P(N)^2}{K(N_2)} + \frac{P(C)P(N)}{K(CN)} + \frac{P(H)P(C)P(N)}{K(HCN)K(CN)} =$$

$$= B \left\{ P(H)[1 + F(H)] + \frac{2P(H)^2}{K(H_2)} \right\} \quad (2)$$

$$P(O)[1 + F(O)] + \frac{P(C)P(O)}{K(CO)} + \frac{P(O)P(H)}{K(OH)} + \frac{P(H)^2P(O)}{K(H_2O)K(OH)} =$$

$$= C \left\{ P(H)[1 + F(H)] + \frac{2P(H)^2}{K(H_2)} \right\}$$

$$P_g - P_e = P(H)[1 + F(H)] + P(C)[1 + F(C)] + P(N)[1 + F(N)] + P(O)[1 + F(O)] + \frac{P(H)^2}{K(H_2)} + \frac{P(O)P(H)}{K(OH)} + \frac{P(H)^2P(O)}{K(H_2O)K(OH)} + \frac{P(C)P(O)}{K(CO)} + \frac{P(N)^2}{K(N_2)} + \frac{P(C)P(N)}{K(CN)} + \frac{P(H)P(C)P(N)}{K(HCN)K(CN)} + \frac{P(C)^2P(H)^2}{K(C_2H_2)K(C_2H)K(C_2)} + \frac{P(C)P(H)^4}{K(CH_4)K(CH_3)K(CH_2)K(CH)},$$

где F —степень ионизации соответствующих элементов т. е. отношение числа ионов данного элемента к полному числу его атомов, K —констант диссоциации соответствующих молекул. Степень ионизации определяется по формуле [4]

$$\frac{N^+}{N} = \frac{U^+}{U} \frac{(2\pi m)^{3/2} (kT)^{5/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{\chi}{kT}\right), \quad (3)$$

где U^+ , U —функции распределения, χ —потенциал ионизации. Для расчета констант диссоциации K двухатомных молекул мы использовали следующую приближенную полуэмпирическую формулу:

$$\lg K = -\frac{5040\Delta E}{T} + 1.5\lg T + \lg(1 - e^{-\frac{h\nu c}{kT}}) + C, \quad (4)$$

где ΔE —энергия диссоциации, ν —фундаментальная частота. Значения ΔE , ν и C для учитываемых в (1) молекул приводятся в табл. 1. Постоянные диссоциации многоатомных молекул определялись с помощью следующих полуэмпирических приближенных формул:

Таблица 1

Мол.	ΔE	ν	C
H ₂	4.476	4277.3	6.785
OH	4.400	3652.4	6.445
CO	11.09	2156.75	7.986
CN	8.200	2055.56	7.286
CH	3.47	2797.3	6.320
C ₂	6.120	1841.37	7.589
N ₂	9.758	2345.15	7.614

$$\lg K(\text{H}_2\text{O}) = -\frac{5040}{T} \Delta E + 2\lg T - \lg(1 - e^{-\frac{h\nu c}{kT}})^d + \lg \prod_{i=1}^3 (1 - e^{-\frac{h\nu_i c}{kT}})^{d_i} + C, \quad (5)$$

$$\lg K(\text{HCN}) = -\frac{5040}{T} \Delta E + 2.5\lg T - \lg(1 - e^{-\frac{h\nu c}{kT}})^{d'} + \lg \prod_{i=1}^3 (1 - e^{-\frac{h\nu_i c}{kT}})^{d_i} + C, \quad (6)$$

$$\lg K(\text{CN}_2) = -\frac{5040}{T} \Delta E + 2.5\lg T - \lg(1 - e^{-\frac{h\nu c}{kT}})^{d'} + \lg \prod_{i=1}^3 (1 - e^{-\frac{h\nu_i c}{kT}})^{d_i} + C, \quad (7)$$

$$\lg K(\text{CH}_3) = -\frac{5040}{T} \Delta E + 2\lg T - \lg \prod_{i=1}^3 (1 - e^{-\frac{h\nu_i c}{kT}})^{d'_i} + \lg \prod_{i=1}^4 (1 - e^{-\frac{h\nu_i c}{kT}})^{d_i} + C, \quad (8)$$

$$\lg K(\text{CH}_4) = -\frac{5040}{T} \Delta E + 2.5\lg T - \lg \prod_{i=1}^4 (1 - e^{-\frac{h\nu_i c}{kT}})^{d'_i} + \lg \prod_{i=1}^4 (1 - e^{-\frac{h\nu_i c}{kT}})^{d_i} + C. \quad (9)$$

Принятые значения констант, входящих в формулы (5—9), приводят в табл. 2.

Для тех многоатомных молекул, физические константы которых неизвестны, мы использовали формулы, полученные интерполяцией экспериментальных данных [2]:

Молекулы	ω^1	d^1	ω	d	C_0	ΔE
H_2O	5255.07	1	5314.78 2322.94 5470.03	1 1 1	4.28	5.1
HCN	2055.56	1	2041.2 711.7 3368.6	1 2 1	4.95	4.94
CH_2	2797.3	1	3100 3060 1200	1 1 2	2.82	4.35
CH_2	3100 3060 1200	1 1 2	1225 3130 2940	2 2	5.24	4.8
CH_4	1225 3130 2940	2 2 1	2914.2 3020 1526 1306.2	1 3 2 3	5.04	4.38

$$\lg K(C_2H_2) = 3.549 - 1.07375x - 5.4779 \cdot 10^{-4}(x^3 - 10) + 1.0398 \cdot 10^{-3}(x^3 - 17.8x) - 2.654 \cdot 10^{-4}(x^4 - 25x^2 + 72), \quad (10)$$

$$\lg K(C_2H) = 0.55073 - 1.20113x + 5.25 \cdot 10^{-3}(x^2 - 10) - 1.3733 \cdot 10^{-3} \times (x^3 - 17.8x) + 3.01 \cdot 10^{-4}(x^4 - 25x + 72). \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) обозначено $x = 5 \cdot \left(\frac{5040}{T} - 1 \right) - 5$. Для ре-

шения системы нелинейных алгебраических уравнений (2) воспользуемся методом Ньютона [5]. Представим систему уравнений (2) в виде:

$$f_i(P(H), P(C), P(N), P(O)) = 0 \quad i=1, 2, 3, 4, \quad (12)$$

Предположим, что $P^0(H)$, $P^0(C)$, $P^0(N)$, $P^0(O)$ — некоторое приближенное решение системы (12). В качестве такого приближенного решения для достаточно глубоких слоев атмосферы можно взять:

$$P^0(H) = \frac{1}{(1+A+B+C)(1+F(H))} \cdot P_g, \quad (13)$$

$$P^0(C) = \frac{A}{(1+A+B+C)(1+F(C))} \cdot P_g, \quad (14)$$

$$P^0(N) = \frac{B}{(1+A+B+C)(1+F(N))} \cdot P_g, \quad (15)$$

$$P^0(O) = \frac{C}{(1+A+B+C)(1+F(O))} \cdot P_g. \quad (16)$$

Точное решение системы (12) можно представить в виде

$$P(H) = P^0(H) + \Delta P(H), \quad P(C) = P^0(C) + \Delta P(C), \quad P(N) = P^0(N) + \Delta P(N), \\ P(O) = P^0(O) + \Delta P(O).$$

Разлагая f_i в ряд Тейлора и ограничиваясь первым членом разложения, получим вместо (2) систему линейных алгебраических уравнений:

$$f_i(P^0(H), P^0(C), P^0(N), P^0(O)) + \frac{\partial f_i}{\partial P(H)} \Delta P(H) + \frac{\partial f_i}{\partial P(C)} \Delta P(C) + \frac{\partial f_i}{\partial P(N)} \Delta P(N) + \frac{\partial f_i}{\partial P(O)} \Delta P(O) = 0, \quad (17)$$

где производные $\frac{\partial f_i}{\partial P(H)}$, $\frac{\partial f_i}{\partial P(C)}$, $\frac{\partial f_i}{\partial P(N)}$ и $\frac{\partial f_i}{\partial P(O)}$ имеют следующий вид:

$$\frac{\partial f_1}{\partial P(H)} = 4A \frac{P^0(H)}{K(H_2)} + A(1+F(H)) - \frac{P^0(C)P^0(N)}{K(HCN)K(CN)} - \frac{4P^0(C)P^0(H)}{K(C_2H_2)K(C_2H)K(C_2)} - \frac{4P^0(C)P^0(H)^2}{K(CH_4)K(CH_3)K(CH_2)K(CH)}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial P(C)} = -\frac{P^0(O)}{K(CO)} - (1+F(C)) - \frac{P^0(H)P^0(N)}{K(HCN)K(CN)} - \frac{P^0(N)}{K(CN)} - \frac{4P^0(C)P^0(H)^2}{K(C_2H_2)K(C_2H)K(C_2)} - \frac{P^0(H)^4}{K(CH_4)K(CH_3)K(CH_2)K(CH)}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial P(N)} = -\frac{P^0(C)}{K(CN)} - \frac{P^0(H)P^0(C)}{K(HCN)K(CN)}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial P(O)} = -\frac{P^0(C)}{K(CO)}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial P(H)} = \frac{P^0(C)P^0(N)}{K(HCN)K(CN)} - B(1+F(H)) - \frac{4BP^0(H)}{K(H_2)} \quad (22)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial P(C)} = \frac{P^0(H)P^0(N)}{K(HCN)K(CN)} + \frac{P^0(N)}{K(CN)}, \quad (23)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial P(N)} = (1+F(N)) + \frac{4P^0(N)}{K(N_2)} + \frac{P^0(H)P^0(C)}{K(HCN)K(CN)} + \frac{P^0(C)}{K(CN)}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial P(O)} = 0, \quad (25)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial P(H)} = \frac{P^0(O)}{K(OH)} + \frac{2P^0(O)P^0(H)}{K(H_2O)K(OH)} - C(1+F(H)) - 4C \frac{P^0(H)}{K(H_2)} \quad (26)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial P(C)} = \frac{P(O)}{K(CO)}, \quad (27)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial P(N)} = 0, \quad (28)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial P(O)} = (1 + F(O)) + \frac{P^0(C)}{K(CO)} + \frac{P^0(H)}{K(OH)} + \frac{P^0(H)^2}{K(OH)K(H_2O)}, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_4}{\partial P(H)} = & \frac{2P^0(H)P^0(O)}{K(OH)K(H_2O)} + \frac{2P^0(H)}{K(H_2)} + \frac{P^0(O)}{K(OH)} + 1 + F(H) + \\ & \frac{P^0(C)P^0(N)}{K(HCN)K(CN)} + \frac{2P^0(C)^2P^0(H)}{K(C_2H_2)K(C_2H)K(C_2)} + \\ & \frac{4P^0(C)P^0(H)^2}{K(CH_4)K(CH_3)K(CH_2)K(CH)}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_4}{\partial P(C)} = & \frac{P^0(O)}{K(CO)} + 1 + F(C) + \frac{P^0(H)P^0(N)}{K(HCN)K(CN)} + \frac{P^0(N)}{K(CN)} + \\ & \frac{2P^0(C)P^0(H)^2}{K(C_2H_2)K(C_2H)K(C_2)} + \frac{P^0(H)^4}{K(CH_4)K(CH_3)K(CH_2)K(CH)}, \end{aligned} \quad (31)$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial P(N)} = 1 + F(N) + \frac{2P^0(N)}{K(N_2)} + \frac{P^0(H)P^0(C)}{K(HCN)K(CN)} + \frac{P^0(C)}{K(CN)}, \quad (32)$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial P(O)} = \frac{P^0(H)^2}{K(OH)K(H_2O)} + \frac{P^0(H)}{K(OH)} + \frac{P^0(C)}{K(CO)} + 1 + F(O). \quad (33)$$

Система уравнений (17) решается методом последовательного приближения, начиная с самого глубокого слоя рассматриваемой модели: начальные значения $P^0(H)$, $P^0(C)$, $P^0(N)$, $P^0(O)$ принимаются согласно (13—16) и вычисляются коэффициенты уравнений системы (7) по формулам (18—33). Система (17) решается относительно $\Delta P(H)$, $\Delta P(C)$, $\Delta P(N)$, $\Delta P(O)$. После чего вычисляется следующее приближение $P'(H) = P^0(H) + \Delta P(H)$, $P'(C) = P^0(C) + \Delta P(C)$, $P'(N) = P^0(N) + \Delta P(N)$, $P'(O) = P^0(O) + \Delta P(O)$ и расчеты повторяются для этого нового приближения. Для достижения точности порядка 10^{-5} достаточно нескольких приближений. Начиная с третьего слоя для оценки первого приближения используется экстраполяция второго порядка или экспоненциальная экстраполяция.

С помощью вышеизложенного алгоритма нами составлена программа для расчета содержаний молекул на ЭВМ «Электроника-60». Используя эту программу, мы рассчитали химический состав атмосфер звезд, различных спектральных типов и классов светимости. Для расчетов были использованы модели атмосфер [6—9]. Эти модели описывают атмосферы звезд, отличающихся эффективными температурами, ускорениями силы тяжести, отношениями содержания углерода к содержанию кислорода, относительными содержаниями тяжелых элементов получены распределения в атмосферах звезд содержания различных молекул. Мы не будем приводить здесь эти распределения, так как такого рода данные неоднократно публиковались (см. напр. [10]). Имея в виду, что конечной целью расчетов химического состава звездных атмосфер является их сопоставление с наблюдательными данными, мы решили использовать полученные распределения молекул для оценки наблюдаемых величин: содержания различных молекул в обращающемся слое звезд. Такие оценки делались неоднократно различными авторами (см. напр. [3]). Однако наши резуль-

Таблица 3

Т _{эфф.}	lgg	lg N (H)	lg N (H ₂)	lg N(H ₂ O)	lg N (CO)
1	2	3	4	5	6
2750	0.5	23.748 26.176	23.322 24.946	20.041 20.915	20.544 22.781
2750	1.0	23.255 25.948	23.301 24.697	20.041 21.033	20.322 22.569
2750	1.5	22.903 25.702	23.342 24.857	20.041 21.155	20.255 22.262
2750	2.0	22.556 25.441	23.380 24.828	20.041 21.262	20.255 22.164
3000	0.0	25.690 26.412	24.255 24.778	20.000 20.286	22.279 22.982
3000	0.5	25.176 26.188	23.973 24.739	20.000 20.420	21.778 22.769
3000	1.0	24.756 25.960	23.813 24.697	20.079 20.561	21.398 22.555
3000	1.5	23.987 25.726	23.431 24.648	20.041 20.688	20.716 22.342
3000	2.0	23.431 25.483	23.332 24.609	20.041 20.823	20.380 22.137
3200	0.0	26.699 26.405	24.663 24.543	19.756 19.724	23.301 22.968
3200	0.5	26.255 26.185	24.568 24.538	19.949 19.937	22.833 22.755
3200	1.0	25.623 25.961	24.255 24.505	19.982 20.107	22.204 22.540
3200	1.5	25.041 24.732	23.954 24.468	19.991 20.274	21.653 22.328
3200	2.0	24.477 25.498	23.681 24.442	19.996 20.441	21.146 22.117
3400	0.0	>26.716 26.380	24.301 24.201	19.041 19.000	23.230 22.938
3400	0.5	26.491 26.170	24.332 24.236	19.332 19.281	23.041 22.730
3400	1.0	26.255 25.954	24.362 24.250	19.568 19.526	22.813 22.519
3400	1.5	26.041 25.731	24.380 24.260	19.806 19.772	22.613 22.310
3400	2.0	25.462 25.504	24.204 24.248	19.954 19.972	22.041 22.100
3600	0.0	26.663 26.336	23.898 23.816	18.255 18.243	23.114 22.889
3600	0.5	26.447 26.135	23.968 23.879	18.591 18.561	22.940 22.689

1	2	3	4	5	6
3600	1.0	26.230 25.923	24.041 23.932	18.898 18.869	22.756 22.487
3600	1.5	25.060 25.715	24.079 23.473	19.204 19.161	22.556 22.281
3600	2.0	25.785 25.498	24.114 24.000	19.462 19.429	22.342 22.076
3800	0.0	26.623 26.270	23.415 23.347	17.362 17.352	22.991 22.816
3800	0.5	26.398 26.076	23.519 23.449	17.748 17.732	22.826 22.625
3800	1.0	26.176 25.879	23.623 23.542	18.114 18.105	22.653 22.433
3800	1.5	25.973 25.679	23.708 23.621	18.491 18.459	22.462 22.236
3800	2.0	25.771 25.473	23.778 23.689	18.820 18.792	22.279 22.037
4000	0.0	>26.557 26.212	22.964 22.883	16.519 16.501	22.839 22.730
4000	2.0	25.708 25.427	23.398 23.318	18.079 18.072	22.204 21.982
2500	0.0	23.398 26.404	23.279 25.193	20.079 21.259	20.342 23.004
2500	0.5	22.643 26.168	23.398 25.146	20.114 21.378	20.301 22.794
2500	1.0	22.255 25.920	23.431 25.114	20.114 21.484	20.301 22.588

таты не повторяют эти оценки. Дело в том, что количество молекул в обрабатываемом слое зависит от его протяженности, а последняя, в свою очередь, зависит от длины волны, на которой этот слой наблюдается. Предполагая в дальнейшем исследовать полосы поглощения молекулы СО в ближнем инфракрасном диапазоне, мы рассчитали содержания молекул СО, Н₂О, Н₂ в обрабатываемом слое различных звезд, причем за нижнюю границу этого слоя принята глубина, на которой оптическая толщина, отсчитываемая от поверхности на $\lambda=2.4$ мкм, становится равной 0.6. Для сравнения рассчитаны также содержания молекул на стандартной частоте до глубины $\tau \approx 0.6$. Результаты этих расчетов приводятся в табл. 3 для моделей [6], в табл. 4, 5 и 6—для моделей [8], [7] и [9], соответственно*. Эти данные дают представление об интенсивности полос поглощения СО в звездах различных классов, а также о зависимости интенсивности этих полос от содержания тяжелых элементов и от отношения содержания углерода к содержанию кислорода.

Используя шкалу Цудзи [11] для красных гигантов и интерполируя данные табл. 3, мы оценили также содержания молекул Н₂, СО,

* Во всех таблицах первым приводится значение $\lg N$ на длине волны $\lambda=2.4$ мкм.

О в разных спектральных классах. Эти данные приводятся в табл. Результаты расчетов содержания других молекул в атмосферах звезд будут приведены в следующих работах.

Таблица 4

$T_{\text{эф}}$	$\lg g$	$\lg N (H)$	$\lg N (H_2)$	$\lg N (H_2O)$	$\lg N (CO)$
2000	-2.0	21.307 23.670	23.398 24.656	20.279 21.556	20.431 21.703
2000	-1.0	20.477 22.883	23.431 24.686	20.322 21.569	20.462 21.714
2500	-1.0	22.633 25.967	23.204 24.918	20.114 21.407	20.301 22.762
2500	0.0	21.875 24.667	23.279 24.570	20.146 21.451	20.301 21.806
3000	0.0	23.987 26.235	23.279 24.907	20.041 20.968	20.886 22.998
3000	1.0	22.987 25.642	23.114 24.722	19.996 21.140	20.255 22.459
3000	1.0	22.954 25.831	23.176 24.690	20.079 20.934	20.301 22.614
3500	0.5	26.301 26.247	24.477 24.461	19.929 19.924	23.041 22.985
3500	1.5	25.041 25.775	23.826 24.510	19.987 20.490	21.806 22.544
4000	1.0	26.230 25.949	23.380 23.303	17.774 17.754	22.845 22.671

Ա. Ա. ՀԱԿՈՐՅԱՆ, ՅՈՒ. Կ. ՄԵԼԻԿ-ԱԼԱՎԵՐԴԻԱՆ

ՍԱՌԸ ԱՍՏՂԵՐՈՒՄ ԴԻՍՈՑԻԱՏԻՎ ՀԱՎԱՍԱՐԱԿՇՈՒՄՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐԸ

Բերվում են սառը աստղերի մոդելներում միավոր մակերեսով մթնոլորտային սլան մեջ H_2 , H_2O , CO մոլեկուլների հաշվարկված քանակները:

A. A. HAKOPIAN, YU. K. MELIK-ALAVERDIAN

DISSOCIATION EQUILIBRUM CALCULATIONS IN COOL GIANT STARS

Molecular column densities of H_2 , H_2O , CO in a variety of cool stellar model atmospheres are presented.

$T_{\text{эфф}}$	$\lg \kappa$	C O	$\lg N (H)$	$\lg N (H_2)$	$\lg N (H_2O)$	$\lg N (CO)$
2500	0.0	0.6	<23.800 26.398	<23.500 25.185	<20.250 21.224	<20.700 22.999
2500	0.0	0.95	>23.000 26.066	>24.300 26.364	>20.100 22.159	>20.400 23.511
2500	0.0	1.0	25.580 25.802	26.813 26.890	20.061 20.173	23.892 23.978
2500	0.0	1.05	26.851 25.750	27.079 26.915	18.279 17.901	24.255 24.000
2500	0.0	2.0	26.851 25.690	27.000 26.868	17.176 16.996	23.204 23.954
2750	0.0	1.02	26.785 25.878	26.769 26.674	18.255 17.716	24.000 23.779
3000	0.0	0.6	25.697 26.407	24.255 24.778	20.000 20.286	22.279 22.977
3000	0.0	0.95	24.079 26.349	24.230 25.579	20.079 21.167	20.398 23.224
3000	0.0	1.0	26.806 26.191	26.140 26.063	19.161 19.013	23.724 23.357
3000	0.0	1.02	26.756 26.129	26.160 26.129	17.628 16.978	23.690 23.376
3000	0.0	1.02	26.763 26.134	26.158 26.123	17.614 16.818	23.699 23.374
3000	0.0	1.05	26.732 26.120	26.114 26.092	17.286 16.501	23.663 23.349
3000	0.0	2.0	26.531 26.004	26.241 26.240	16.188 15.923	23.593 23.422
3000	2.0	1.02	25.929 25.129	25.663 25.493	18.362 17.390	23.000 22.649
3250	0.0	1.0	26.763 26.361	25.413 25.378	18.250 18.163	23.531 23.212
3500	0.0	0.6	26.690 25.832	24.097 23.496	18.652 18.167	23.176 22.386
3500	0.0	0.95	<26.700 26.372	24.255 24.203	18.155 18.137	23.342 23.125
3500	0.0	1.0	<26.700 26.353	24.719 24.704	17.377 17.325	23.362 23.139
3500	0.0	1.05	26.623 26.305	23.926 23.876	16.398 16.146	23.379 23.079
3500	0.0	2.0	26.580 26.220	23.204 23.107	15.398 14.896	23.204 22.984

Таблица 6

$T_{\text{э(н)}}$	lgg	[A/H]	lg N (H)	lg N (H ₂)	lg N (H ₂ O)	lg N (CO)
1	2	3	4	5	6	7
3750	0.75	0.0	26.176 26.094	23.924 23.915	19.792 19.791	22.708 22.646
3750	0.75	-0.5	26.362 26.288	24.230 24.224	19.833 19.830	22.903 22.842
3750	0.75	-2.0	25.255 26.855	24.869 25.177	20.000 20.555	21.845 23.422
3750	0.75	-1.0	26.398 26.479	24.531 24.550	19.949 19.951	22.954 23.038
3750	1.50	0.0	25.881 25.801	24.000 23.995	19.806 19.805	22.431 22.363
3750	1.50	-0.5	25.602 25.995	24.146 24.347	19.991 20.032	22.204 22.563
3750	1.50	-1.0	— 26.173	— 24.697	— 20.465	— 22.751
3750	1.50	-1.0	24.845 26.183	23.778 24.703	20.000 20.354	21.462 22.760
3750	1.50	-2.0	— 26.539	— 25.346	— 21.129	— 23.142
3750	2.25	0.0	25.415 25.493	24.041 24.084	19.940 19.944	22.000 22.076
3750	2.25	-0.5	24.716 25.685	23.748 24.456	19.996 20.323	21.362 22.283
3750	2.25	-1.0	24.000 25.866	23.477 24.813	20.000 20.762	20.778 22.487
3750	2.25	-2.0	— 26.193	— 25.332	— 21.383	— 22.848
3750	2.25	-0.30	— 26.487	— 25.762	— 21.896	— 23.176
4000	0.75	0.0	26.230 25.999	23.204 23.186	18.208 18.207	22.568 22.510
4000	0.75	-0.5	26.431 26.200	23.544 23.508	18.342 18.336	22.813 22.726
4000	0.75	-1.0	26.633 26.402	23.903 23.855	18.592 18.591	23.041 22.938
4000	0.75	-2.0	26.940 26.793	24.591 24.552	19.204 19.190	23.447 23.341
4000	1.50	0.0	25.903 25.704	23.342 23.311	18.505 18.502	22.322 22.243
4000	1.50	-0.5	26.114 25.902	23.690 23.656	18.690 18.683	22.568 22.448
4000	1.50	-1.0	26.301 26.094	24.041 24.006	19.146 19.146	22.778 22.644

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7
4000	1.50	-1.0	26.301 26.010	24.041 24.016	19.041 19.027	22.792 22.651
4000	1.50	-2.0	26.531 26.487	24.070 24.725	19.844 19.845	23.079 23.049
4000	1.50	-3.0	25.903 26.791	24.431 25.360	19.964 20.794	22.462 23.371
4000	2.25	0.0	25.591 25.411	23.477 23.443	18.771 18.768	22.079 21.965
4000	2.25	0.5	25.792 25.607	23.815 23.814	19.114 19.099	22.301 22.168
4000	2.25	1.0	25.899 25.748	24.230 24.203	19.740 19.739	22.447 22.368
4000	2.25	-2.0	25.556 26.170	24.301 24.877	19.949 20.459	22.146 22.762
4000	2.25	-3.0	25.079 26.454	23.964 25.381	19.962 21.175	21.690 23.072
4000	3.00	0.0	25.240 25.110	23.602 23.575	19.119 19.118	21.785 21.684
4000	3.00	0.5	25.415 25.303	23.987 23.958	19.591 19.597	21.991 21.840
4000	3.00	-1.0	25.176 25.486	24.114 24.318	19.959 20.066	21.806 22.091
4000	3.00	-2.0	24.954 25.825	24.000 24.863	19.571 20.755	21.602 22.461
4000	3.00	-3.0	24.663 26.111	23.792 25.309	19.982 21.320	21.322 22.780
4500	0.75	-3.0	26.740 26.685	23.690 23.681	17.505 17.503	23.146 23.139

Таблица 7

Спектр	T_{eff}	$\lg g$	$\lg N (H)$	$\lg N (H_2)$	$\lg N (H_2O)$	$\lg N (CO)$
M0 III	3900	0.88	25.891	23.398 23.317	17.691 17.681	22.594 22.402
M1 III	3800	0.87	26.234 25.930	23.596 23.518	18.019 18.008	22.698 22.483
M2 III	3700	0.69	26.339 26.029	23.777 23.692	18.297 18.276	22.815 22.582
M3 III	3600	0.44	26.473 26.159	21.960 23.871	18.551 18.523	22.961 22.713
M4 III	3500	0.44	26.300	21.115 21.022	18.748 18.705	23.121 22.856
M5 III	3400	0.21	26.483	21.493 24.866	19.299 19.258	23.403 23.041
M6 III	3200	0.5	27.143 26.625	21.758 21.550	19.563 19.511	23.769 23.181

Апрель 1987

ЛИТЕРАТУРА

1. N. J. Woolf, M. Schwarzschild, W. K. Rose, *Astrophys. J.*, **146**, 833, 1964
2. T. Tsuji, *Ann. Tokyo Astron. Obs.*, **9**, 1, 1964.
3. H. R. Johnson, R. F. Beebe, C. Sueden C., *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **29**, 123, 1975.
4. К. У. Ахмед. Астрофизические величины, М. Мир, 1977.
5. Г. Корн, Г. Корн. Справочник по математике, М. Наука, 1984.
6. H. R. Johnson, A. P. Bernat, B. Krupp, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **42**, 507, 1980
7. H. R. Johnson, *Astrophys. J.*, **260**, 251, 1982
8. J. Auman, *Astrophys. J.*, **137**, 799, 1969.
9. R. A. Bell, K. Eriksson, B. Gustafsson, A. Nordlund, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **23**, 371, 1976
10. F. Querci, M. Querci, T. Tsuji, *Astron. Astrophys.*, **31**, 265, 1974.
11. T. Tsuji, *Astr. Astrophys.*, **62**, 29, 1978.