

УДК: 524.575—36

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИ
УГЛЕРОДА В МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКАХ

А. Н. АРШУТКИН

Поступила 16 мая 1984

Принята к печати 3 ноября 1984

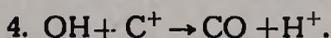
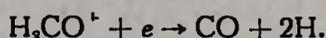
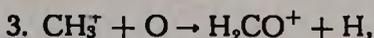
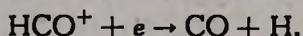
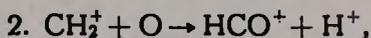
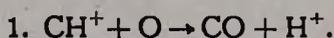
Рассчитаны концентрации атомов и молекул, важных для теплового баланса межзвездных облаков, как функции от оптической толщины для плотностей $10-10^4 \text{ см}^{-3}$ и температур $10-100 \text{ К}$. Основное внимание уделено изменению концентраций C^+ , C и CO . Показано, что при низких температурах $T \leq 30 \text{ К}$ в области $N \sim (1-2) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ образуется значительное количество нейтрального углерода. При более высоких температурах формируется мало атомарного углерода. Область эффективного образования окиси углерода слабо зависит от плотности и температуры газа и лежит в узком интервале $N \sim (2-6) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Возможен небольшой рост содержания CO в условиях диффузных облаков.

При исследовании структуры межзвездного облака необходимо знать концентрации атомов и молекул, участвующих в процессах нагрева и охлаждения. Содержание таких элементов, как C^+ , C , CO , определяет скорость охлаждения в типичных межзвездных облаках. При больших плотностях вклад в охлаждение могут вносить и другие, менее распространенные молекулы: H_2O , OH , HCO^+ . Проблеме межзвездной химии посвящено много работ. Имеется ряд исследований, включающих сотни реакций (см., например, [1, 2]). Много внимания уделено исследованию образования молекул окиси углерода [3, 4]. Но пользоваться этими данными при моделировании строения межзвездного облака трудно в связи с тем, что большинство расчетов выполнено, как правило, для ограниченных физических условий. Поэтому каждая модель облака требует одновременного самосогласованного определения химического состава.

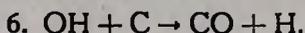
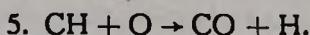
В данной работе приводятся результаты вычислений содержания важных для теплового равновесия атомов и молекул как функции от оптической глубины для широкого интервала плотностей и температур. Основное внимание уделяется балансу между C^+ , C и CO .

Образование окиси углерода в условиях как диффузных, так и плотных межзвездных облаков исследовано достаточно детально. В диффуз-

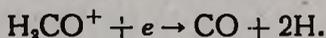
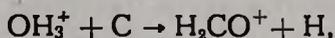
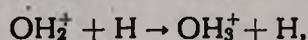
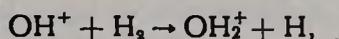
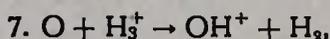
ных облаках синтез CO на поверхности пылинок неэффективен [3]. Основные пути образования молекулы при $n \lesssim 500 \text{ см}^{-3}$ согласно [5] следующие:



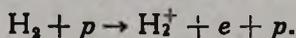
С ростом оптической толщины наряду с 1—4 следует учитывать реакции между нейтральными элементами:



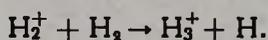
При увеличении плотности ($n \gtrsim 10^3 \text{ см}^{-3}$) и ослаблении потока ультрафиолетового излучения важную роль играют цепочки реакций, связанные с ионом H_3^+ [5]:



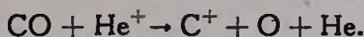
Источником ионизации в отсутствие ультрафиолетового излучения являются космические лучи:



За этой реакцией быстро следует



В наружных областях межзвездного облака молекулы CO и молекулы, через которые образуется CO, быстро разрушаются фотодиссоциацией. В более глубоких слоях следует учитывать разрушение CO ионами гелия:



Ионы He^+ образуются при взаимодействии атомов гелия с космическими лучами.

Для вычислений отобраны 74 реакции с участием H , H^+ , H_2 , H_2^+ , He , He^+ , C , C^+ , O , O_2^+ , N , CO , CH , CH^+ , OH , H_2CO^+ , CH_2^+ , CH_3^+ , OH^+ , OH_2^+ , OH_3^+ , H_2O , NO , CN , CN^+ , NH , HCO^+ . В табл. 1 приведены химические реакции и их скорости.

Скорость фотодиссоциации H_2 зависит от интенсивности межзвездного поля излучения в диапазоне λ 912—1110 Å и определяется выражением:

$$\eta(z) = \sum_i k_i h_i \int_0^\infty I(\nu, z) \sigma_i(\nu) d\nu.$$

Здесь k_i — вероятности диссоциации [17], σ_i — сечения возбуждения, $I(\nu, z)$ — интенсивность излучения в частоте ν на глубине z . Остальные скорости фотореакций вычисляются по приближенным формулам согласно [16]. Скорость ионизации космическими лучами принимается равной $5 \cdot 10^{-17} \text{ с}^{-1}$. Глубина проникновения мягких космических лучей с энергией 2 МэВ соответствует $N \sim 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ [18]. Так как в расчетах рассматриваются плотности на луче зрения, превышающие эту величину, учитывается ослабление потока космических лучей при $N > 10^{21} \text{ см}^{-2}$.

Характерные времена рассматриваемых химических процессов не превышают времени существования межзвездных облаков. Наиболее медленный процесс — образование молекулы H_2 имеет характерное время $\approx 10^6$ лет. Время жизни молекулярных облаков по крайней мере на порядок превышает эту величину. Поэтому содержание элементов будем определять из условия химического равновесия.

Система уравнений химического равновесия записывается в виде:

$$\sum_j E_{ij}(\rho, T, z) - \sum_j L_{ij}(\rho, T, z) = 0. \quad (1)$$

Здесь E и L — скорости образования и разрушения j -го элемента, которые в общем случае зависят от плотности ρ , температуры T и глубины z .

Уравнения баланса (1) для всех атомов, ионов и молекул образуют систему нелинейных алгебраических уравнений. Порядок системы может быть уменьшен из того условия, что полное содержание каждого химического элемента должно быть фиксированным и равным космической рас-

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ И ИХ СКОРОСТИ

№		α (см ³ с ⁻¹)	Литература
1	2	3	4
1	$\text{HCO}^+ + e \rightarrow \text{CO} + \text{H}$	$1.5 \cdot 10^{-5} T^{-0.5}$	[6]
2	$\text{H}_2\text{CO}^+ + e \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}$	$6 \cdot 10^{-7}$	[7]
3	$\text{CH}^+ + e \rightarrow \text{C} + \text{H}$	$1 \cdot 10^{-7}$	[5]
4	$\text{CH}_2^+ + e \rightarrow \text{CH} + \text{H}$	$1 \cdot 10^{-6}$	[8]
5	$\text{CH}_3^+ + e \rightarrow \text{CH} + 2\text{H}$	$3 \cdot 10^{-7}$	[7]
6	$\text{OH}_2^+ + e \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	$3 \cdot 10^{-7}$	[5]
7	$\text{OH}_3^+ + e \rightarrow \text{OH} + 2\text{H}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	[7]
8	$\text{OH}_3^+ + e \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$6.5 \cdot 10^{-7}$	[7]
9	$\text{C}^+ + e \rightarrow \text{C} + h\nu$	$10^{-11} (12.6 - 2.38 \lg T) / T^{0.5}$	[5]
10	$\text{H}_3^+ + e \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	[7]
11	$\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}$	$5 \cdot 10^{-9}$	[9]
12	$\text{OH}^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{H}$	$3 \cdot 10^{-7}$	[5]
13	$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$4.1 \cdot 10^{-7}$	[7]
14	$\text{CN}^+ + e \rightarrow \text{C} + \text{N}$	$1 \cdot 10^{-6}$	[1]
15	$\text{He}^+ + e \rightarrow \text{He} + h\nu$	$10^{-11} (11.4 - 2.24 \lg T) T^{-0.5}$	[11]
16	$\text{H}^+ + e \rightarrow \text{H} + h\nu$	$10^{-11} (11.4 - 2.24 \lg T) T^{-0.5}$	[11]
17	$\text{O}^+ + e \rightarrow \text{O} + h\nu$	$10^{-11} (12.6 - 2.38 \lg T) T^{-0.5}$	[5]
18	$\text{H} + p \rightarrow \text{H}^+ + e + p$	$1.5 \zeta (\text{с}^{-1})$	[12]
19	$\text{He} + p \rightarrow \text{He}^+ + p + e$	1.5ζ	[12]
20	$\text{H}_2 + p \rightarrow \text{H} + \text{H} + p$	1.15ζ	[12]
21	$\text{H}_2 + p \rightarrow \text{H}_2^+ + e + p$	2.3ζ	[12]
22	$\text{H}_2 + p \rightarrow \text{H} + \text{H}^+ + p + e$	0.046ζ	[12]
23	$\text{OH} + \text{C}^+ \rightarrow \text{CO} + \text{H}^+$	$2 \cdot 10^{-9} (\text{см}^3 \text{с}^{-1})$	[7]
24	$\text{NO} + \text{C}^+ \rightarrow \text{CO} + \text{N}^+$	$1 \cdot 10^{-9}$	[3]
25	$\text{NO} + \text{C}^+ \rightarrow \text{NO}^+ + \text{C}$	$1 \cdot 10^{-9}$	[7]
26	$\text{H} + \text{C}^+ \rightarrow \text{CH}^+ + h\nu$	$5 \cdot 10^{-19} T^{0.5}$	[11]
27	$\text{CH} + \text{C}^+ \rightarrow \text{C}_2^+ + \text{H}$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]
28	$\text{H}_2 + \text{C}^+ \rightarrow \text{CH}_2^+ + h\nu$	$1 \cdot 10^{-16}$	[1]
29	$\text{NH} + \text{C}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{CN}$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]
30	$\text{H}_2 + \text{O}^+ \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H}$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]
31	$\text{CO} + \text{He}^+ \rightarrow \text{C}^+ + \text{O} + \text{He}$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]
32	$\text{CN} + \text{He}^+ \rightarrow \text{C}^+ + \text{N} + \text{He}$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]
33	$\text{CO} + \text{H}_3^+ \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}_2$	$1.4 \cdot 10^{-9}$	[7]
34	$\text{C} + \text{H}_3^+ \rightarrow \text{CH}^+ + \text{H}_2$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]
35	$\text{OH} + \text{H}_3^+ \rightarrow \text{OH}_2^+ + \text{H}_2$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]
36	$\text{O} + \text{H}_3^+ \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H}_2$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4
37	$H_2 + H_2^+ \rightarrow H_3^+ + H$	$1.95 \cdot 10^{-9}$	[7]
38	$H + H_2^+ \rightarrow H_2 + H^+$	$6 \cdot 10^{-10}$	[1]
39	$N + H_3^+ \rightarrow N^+ + H_2$	$1 \cdot 10^{-9}$	[1]
40	$OH + H^+ \rightarrow OH^+ + H$	$1 \cdot 10^{-9}$	[7]
41	$CN + H^+ \rightarrow CN^+ + H$	$1 \cdot 10^{-9}$	[1]
42	$NO + H^+ \rightarrow NO^+ + H$	$1.9 \cdot 10^{-9}$	[7]
43	$H + H^+ \rightarrow H_2^+ + h\nu$	$5 \cdot 10^{-24} T^2$	[13]
44	$O + H^+ \rightarrow O^+ + H$	$7 \cdot 10^{-10} \exp(-232/T)$	[14]
45	$H_2 + CH^+ \rightarrow CH_2^+ + H$	$1 \cdot 10^{-9}$	[1]
46	$O + CH^+ \rightarrow CO + H^+$	$1 \cdot 10^{-9}$	[15]
47	$N + CH^+ \rightarrow CN + H^+$	$1 \cdot 10^{-9}$	[15]
48	$H + CH_2^+ \rightarrow CH^+ + H_2$	$1 \cdot 10^{-9}$	[15]
49	$H_2 + CH_2^+ \rightarrow CH_3^+ + H$	$7.2 \cdot 10^{-10}$	[1]
50	$O + CH_3^+ \rightarrow H_2CO^+ + H$	$1 \cdot 10^{-9}$	[1]
51	$C + OH_3^+ \rightarrow H_2CO^+ + H$	$1 \cdot 10^{-9}$	[1]
52	$C + OH_3^+ \rightarrow HCO^+ + H_2$	$2 \cdot 10^{-9}$	[7]
53	$H_2 + OH_2^+ \rightarrow OH_3^+ + H$	$6.1 \cdot 10^{-10}$	[1]
54	$H_2 + OH^+ \rightarrow OH_2^+ + H$	$1.05 \cdot 10^{-9}$	[7]
55	$CO + h\nu \rightarrow C + O$	$5 \cdot 10^{-12} \exp(-3A_\nu)(c^{-1})$	[16]
56	$CH + h\nu \rightarrow CH^+ + e$	$2.89 \cdot 10^{-10} \exp(-2.75A_\nu)$	[16]
57	$CH + h\nu \rightarrow C + H$	$1.4 \cdot 10^{-10} \exp(-1.54A_\nu)$	[16]
58	$OH + h\nu \rightarrow O + H$	$1.5 \cdot 10^{-10} \exp(-3.09A_\nu)$	[16]
59	$C + h\nu \rightarrow C^+ + e$	$1.31 \cdot 10^{-10} \exp(-2.42A_\nu)$	[16]
60	$H_2 + h\nu \rightarrow H + H$	γ	
61	$NH + h\nu \rightarrow N + H$	$1 \cdot 10^{-11} \exp(-4A_\nu)$	[3]
62	$CN + h\nu \rightarrow C + N$	$4 \cdot 10^{-11} \exp(-4A_\nu)$	[3]
63	$H_2O + h\nu \rightarrow OH + H$	$3.2 \cdot 10^{-10} \exp(-1.63A_\nu)$	[16]
64	$CH + O \rightarrow CO + H$	$4 \cdot 10^{-11} (\text{см}^3 \text{ с}^{-1})$	[7]
65	$CH + N \rightarrow CN + H$	$4 \cdot 10^{-11}$	[7]
66	$OH + C \rightarrow CO + H$	$4 \cdot 10^{-11}$	[7]
67	$OH + N \rightarrow NO + H$	$5.3 \cdot 10^{-11}$	[7]
68	$OH + O \rightarrow O_2 + H$	$5 \cdot 10^{-11}$	[10]
69	$NH + C \rightarrow CN + H$	$4 \cdot 10^{-11}$	[7]
70	$NH + O \rightarrow NO + H$	$4 \cdot 10^{-11}$	[7]
71	$H + H + \text{пыль} \rightarrow H_2 + \text{пыль}$	$3 \cdot 10^{-18} T^{0.5}$	[15]
72	$C + H + \text{пыль} \rightarrow CH + \text{пыль}$	$1 \cdot 10^{-18} T^{0.5}$	[15]
73	$O + H + \text{пыль} \rightarrow OH + \text{пыль}$	$1 \cdot 10^{-18} T^{0.5}$	[15]
74	$N + H + \text{пыль} \rightarrow NH + \text{пыль}$	$1 \cdot 10^{-18} T^{0.5}$	[15]

пространенности. Таким образом, для каждого химического элемента вводится уравнение вида:

$$x_A = \sum_j n_j x(A), \quad (2)$$

где x_A — космическая распространенность элемента A , $x(A)$ — относительное обилие молекул, содержащих n элементов A . К этим уравнениям следует также отнести уравнение баланса заряда:

$$x_e = \sum_j x_j^+.$$

В системе, имеющей N атомов и молекул, число уравнений равновесия становится равным $N_S = N - N_r$, где N_r — число уравнений типа (2). Полагается, что N_S уравнений включают в себя в качестве искомым величин только N_S молекул, так как содержания других молекул могут быть получены из уравнений (2). Полученная система нелинейных алгебраических уравнений представляется как

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_{N_S}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_S. \quad (3)$$

где x_i — содержание i -ой молекулы.

Решение такой системы находится численно методом Ньютона для систем нелинейных алгебраических уравнений. Для численного расчета необходимо задать приближенные значения величин x_i . Начальное распределение искомым величин получаем из уравнений химического равновесия (1), учитывая только наиболее эффективные процессы на глубине $z = 0$. Например, молекулы H_2 в этом случае образуются, главным образом, на пылинках и разрушаются ультрафиолетовым излучением звезд. Учитывая, что $\eta(0) \sim 10^{-10} \text{ с}^{-1}$, получаем $x(H_2) \simeq 3 \cdot 10^{-8} n T^{0.5}$. Таким образом, найдены выражения для всех учитываемых в расчетах молекулы:

$$x(H) = 1 - 2x(H_2),$$

$$x(H^+) = 5 \cdot 10^{-8} \{ [T^{0.5} (0.6 \cdot x(H) + x(H_2)) / n + 1]^{0.5} + x_C \},$$

$$x_e = x(H^+) + x_C, \quad x(C) = 0.9 x_e / (1.1 \cdot T^{0.5} + 0.9 x_e n),$$

$$x(C^+) = x_C - x(C),$$

$$x(H_2^+) = [2.3 \cdot 10^{-7} x(H_2) + 5 \cdot 10^{-15} \cdot T^2 n x(H) x(H^+)] / [0.6 x(H) + 2x(H_2)] n,$$

$$x(H_3^+) = 0.02 \cdot x(H_2) x(H_2^+) / x_e,$$

$$x(O^+) = 7 \cdot x_o \exp(-232/T) x(H^+) / [20 \cdot x(H_2) + x_e T^{-0.5} + 7 \exp(-232/T) x(H^+)],$$

$$\begin{aligned}
 x(\text{O}) &= x_{\text{O}} - x(\text{O}^+), \quad x(\text{He}^+) = 1.275 \cdot 10^{-7} T^{0.5} / x_e n, \\
 x(\text{He}) &= x_{\text{He}} - x(\text{He}^+), \quad x(\text{N}) = x_{\text{N}}, \quad x(\text{NH}) = 10^{-7} T^{0.5} x(\text{N}) x(\text{H}) n, \\
 x(\text{NO}) &= 0.02 x(\text{O}) x(\text{NH}) / x_e, \quad x(\text{NO}^+) = 7.3 \cdot 10^{-3} x(\text{NO}), \\
 x(\text{CH}_2^+) &= 10^{-7} x(\text{C}^+) x(\text{H}_2) / [x_e + 10^{-3} x(\text{H}) + 7.2 \cdot 10^{-4} x(\text{H})], \\
 x(\text{CH}_3^+) &= 2.4 \cdot 10^{-3} x(\text{H}_2) x(\text{CH}_2^+) / x_e, \quad x(\text{CH}) = 3.3 \cdot 10^3 x_e x(\text{CH}_2^+) n, \\
 x(\text{CH}^+) &= [7 \cdot 10^{-10} x(\text{H}) x(\text{C}^+) n + 2 \cdot 10^{-3} x(\text{CH})] / [x_e n + 0.01 \cdot x(\text{H}_2) n], \\
 x(\text{CN}) &= [2n x(\text{NH}) x(\text{C}^+) + n x(\text{N}) x(\text{CH}^+)] / [0.04 + x(\text{H}^+) n], \\
 x(\text{CN}^+) &= 10^{-3} \cdot x(\text{H}^+) x(\text{CN}) / x_e, \\
 x(\text{OH}^+) &= 0.02 \cdot x(\text{H}_2) x(\text{O}^+) / (0.01 \cdot x(\text{H}_2) + 3 \cdot x_e), \\
 x(\text{OH}_2^+) &= 0.01 \cdot x(\text{H}_2) x(\text{OH}^+) / (6.1 \cdot 10^{-3} \cdot x(\text{H}_2) + 3 \cdot x_e), \\
 x(\text{OH}_3^+) &= 3 \cdot 10^{-4} \cdot x(\text{H}_2) x(\text{OH}_2^+) / x_e, \quad x(\text{H}_2\text{O}) = 2.2 \cdot 10^3 \cdot x(\text{OH}_3^+) x_e n, \\
 x(\text{OH}) &= [3 \cdot x_e x(\text{OH}_2^+) + 10^{-11} T^{0.5} x(\text{H}) x(\text{O})] / \\
 &\quad [0.02 x(\text{C}^+) + 0.01 \cdot x(\text{H}^+) + 10^{-4} / n], \\
 x(\text{H}_2\text{CO}^+) &= 1.67 \cdot 10^{-3} x(\text{O}) x(\text{CH}_3^+) / x_e, \\
 x(\text{CO}) &= 50 \cdot x(\text{O}) x(\text{CH}^+) n + 100 \cdot x(\text{OH}) x(\text{C}^+) n, \\
 x(\text{HCO}^+) &= 4.2 \cdot 10^{-3} \cdot x(\text{CO}) x(\text{H}_3^+) / x_e.
 \end{aligned}$$

Здесь x_{C} , x_{N} , x_{O} , x_{He} — космические распространенности соответствующих элементов.

В работе распространенность элементов принимается по данным Мортонa [19]: $\text{C}/\text{H} = 7.34 \cdot 10^{-5}$, $\text{O}/\text{H} = 1.76 \cdot 10^{-4}$, $\text{N}/\text{H} = 2.14 \cdot 10^{-5}$, полагая, что часть тяжелых элементов осаждена на пылинки.

Решая систему (3) получаем химический состав для заданных величин плотности n , температуры T и глубины z . Расчеты проведены для однородной изотермической полубесконечной среды. Величины n менялись в пределах 10 — 10^4 см $^{-3}$, температуры — в интервале 10 — 100 К. Для каждого значения n и T химический состав рассчитывался как функция от плотности на луче зрения до $N = 4 \cdot 10^{22}$ см $^{-2}$, что соответствует визуальному поглощению $A_V \approx 25$.

На рис. 1 показана зависимость относительного содержания атомов и молекул от N для $n = 100$ см $^{-3}$ и $T = 50$ К. Доля большинства нейтральных молекул начинает заметно увеличиваться при $N \gtrsim (2 - 4) \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$. Величина $x(\text{CO})$ в этой области увеличивается с $\sim 2 \cdot 10^{-9}$ до $\sim 10^{-7}$, но при дальнейшем росте N выходит на полочку и практически не меняется до $N \sim 10^{21}$ см $^{-2}$. В области $N \sim (1 - 4) \times 10^{21}$ см $^{-2}$ происходит резкое увеличение содержания CO и при $N \gtrsim 4 \cdot 10^{21}$ см $^{-2}$ практически весь углерод связан в молекулы окиси углерода.

Рассмотрим вкратце реакции, определяющие образование СО. При малых оптических толщинах основной вклад вносят ион-молекулярные реакции

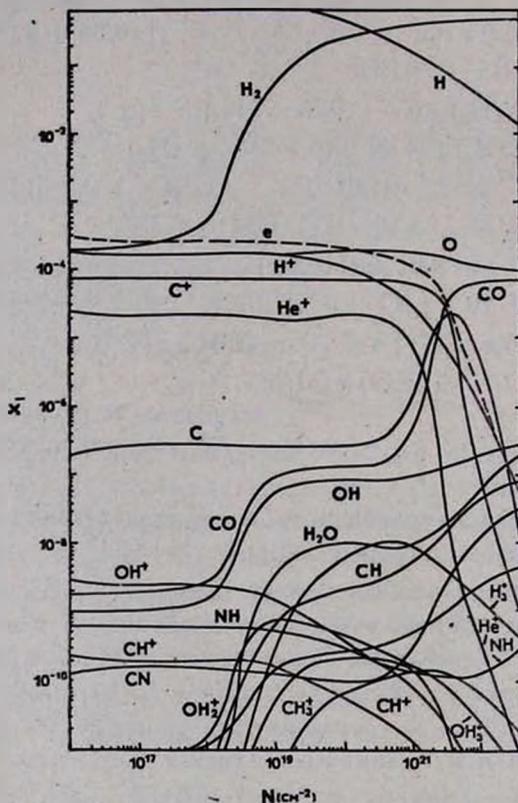
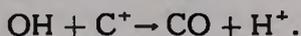
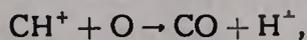
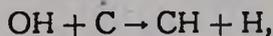


Рис. 1. Содержания атомов и молекул x_i в зависимости от N для $n=100 \text{ см}^{-3}$, $T=50 \text{ К}$.

При $N > 10^{19} \text{ см}^{-2}$ содержание CH^+ уменьшается (см. рис. 1) и основным источником образования СО становится реакция с ОН. При $N \geq (2-4) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ с ослаблением потока внешних ионизирующих излучений заметно падает концентрация ионов и основной вклад в образование окиси углерода дают реакции:



Как видим, концентрация CO в значительной степени определяется концентрацией OH.

Содержание большинства нейтральных молекул растет с увеличением N и таких молекул, как OH, H₂O, CH, достигает величины 10^{-7} при $N \geq 10^{23}$ см⁻². Относительная концентрация молекулярных ионов увеличивается при $N \geq 4 \cdot 10^{18}$ см⁻², достигает максимума в области $N \sim 10^{21}$ см⁻² и уменьшается при больших N . Доля молекулярного водорода растет при $N > 2 \cdot 10^{18}$ см⁻² и в области $N > 2 \cdot 10^{20}$ см⁻² молекул H₂ становится больше атомов H.

С точки зрения энергетики межзвездных облаков представляет интерес исследование изменения относительных концентраций C, C⁺, O, CO.

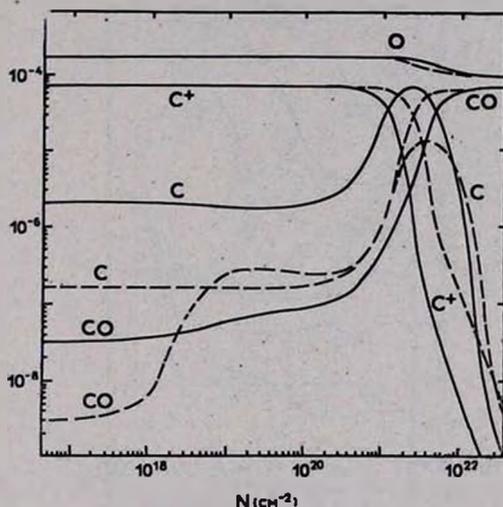


Рис. 2. Изменение содержания C⁺, C и CO в зависимости от N для $n=10^3$ см⁻³, $T=10$ К (сплошные кривые) и для $n=100$ см⁻³, $T=70$ К (пунктирные кривые).

На рис. 2 приведена зависимость содержания этих элементов от плотности на луче зрения для двух случаев: 1) $n=10^3$ см⁻³, $T=10$ К и 2) $n=100$ см⁻³, $T=70$ К. Видно, что до $N \sim 5 \cdot 10^{20} - 10^{21}$ см⁻² углерод в основном находится в ионизованном состоянии. На больших глубинах ($N > 10^{21}$ см⁻²) в результате поглощения ультрафиолетового излучения углерод нейтрализуется. При низких температурах ($T \lesssim 30$ К) в широком диапазоне плотностей в области $N \sim (1-3) \times 10^{21}$ см⁻² выделяется зона нейтрального углерода. При $N \gtrsim 3 \cdot 10^{21}$ см⁻² преобладающим становится доля молекул окиси углерода. Таким образом, при низких температурах можно выделить три зоны: 1) $N \lesssim 10^{21}$ см⁻² — зона ионизованного углерода, 2) $N \sim (1-3) \cdot 10^{21}$ см⁻² —

зона нейтрального углерода, 3) $N \geq 3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ зона молекул окиси углерода.

Однако зона нейтрального углерода не всегда отчетливо выделена. При температурах $T \gtrsim 30 \text{ К}$ непосредственно за зоной C^+ следует зона CO . Граница перехода лежит в области $N \sim (2-4) 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (рис. 2). Содержание нейтрального углерода в этой области повышается, но не превосходит величины $\sim 10^{-5}$.

Следовательно, только в случае, если температура газа в области $N \sim (1-4) 10^{21} \text{ см}^{-2}$ достаточно низка ($T \sim 10-20 \text{ К}$), зона нейтрального углерода хорошо выделена. В противном случае нейтральный углерод в больших количествах не образуется. Этот вывод справедлив для всего диапазона рассматриваемых плотностей.

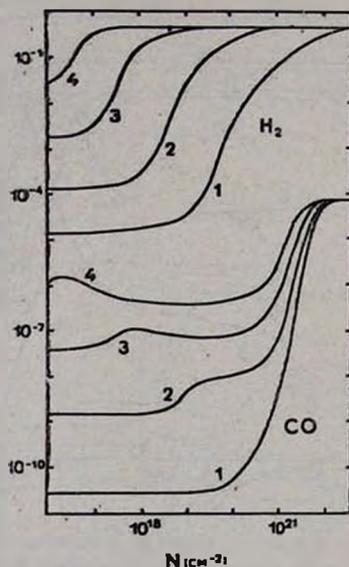


Рис. 3. Содержание CO и H_2 в зависимости от N при $T=30 \text{ К}$ для различных плотностей: 1 — $n=10 \text{ см}^{-3}$, 2 — $n=10^2 \text{ см}^{-3}$, 3 — $n=10^3 \text{ см}^{-3}$, 4 — $n=10^4 \text{ см}^{-3}$.

На рис. 3 приведены зависимости $x(\text{CO})$ и $x(\text{H}_2)$ от N при $T=30 \text{ К}$ для набора плотностей. Видно, что область эффективного образования окиси углерода слабо зависит от n . С ростом плотности от 10 см^{-3} до 10^4 см^{-3} граница, где величина $x(\text{CO})$ становится больше 10^{-5} сдвигается незначительно: с $N \sim 7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ до $\sim 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Образование молекулярного водорода, наоборот, заметно зависит от плотности газа.

С ростом температуры газа при заданной плотности молекулы CO образуются в более наружных слоях (рис. 4), но сдвиг по N незначителен.

На малых оптических глубинах, при $N \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ имеется область, где зависимость содержания окиси углерода от температуры заметнее. При $T \sim 10 - 20 \text{ К}$ величина $x(\text{CO})$ практически не меняется с ростом N , вплоть до $N \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ и начинает увеличиваться только на больших глубинах. При температурах $T > 30 \text{ К}$ в области $N \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ происходит заметный рост относительной концентрации CO. Например, при $T = 70 \text{ К}$ содержание окиси углерода в этой области достигает величины $\sim 3 \cdot 10^{-7}$.

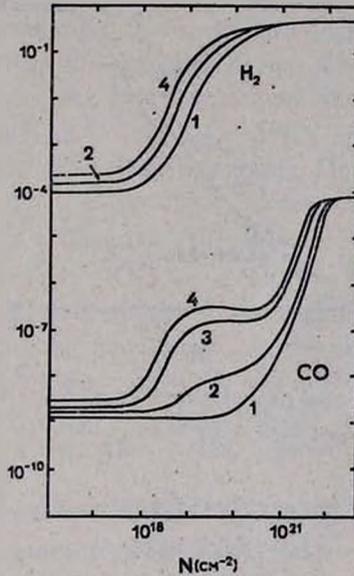


Рис. 4. Содержание CO и H_2 в зависимости от N при $l=100 \text{ см}^{-3}$ для различных температур: 1 — $T=10 \text{ К}$; 2 — $T=30 \text{ К}$; 3 — $T=50 \text{ К}$; 4 — $T=70 \text{ К}$.

Таким образом: 1) зона эффективного образования молекул CO лежит в довольно узком интервале $N \sim (2 - 6) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и слабо зависит от плотности и температуры газа. Этот вывод справедлив для $l \sim 10 - 10^4 \text{ см}^{-3}$ и $T \sim 10 - 100 \text{ К}$; 2) при температурах $T > 30 \text{ К}$ происходит заметное образование окиси углерода вплоть до $x(\text{CO}) \sim 10^{-6}$ при $T = 100 \text{ К}$ и $l = 100 \text{ см}^{-3}$ на малых оптических толщинах — $N \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, соответствующих условиям в диффузных облаках.

Сравнение полученных данных с другими работами показывает, в основном, качественное согласие результатов. На рис. 5 приведены зависимости содержания окиси углерода от N в модели облака с градиентом плотности, полученные в настоящих расчетах и вычисленные де Йонгом и др. [10].

Сравним полученные результаты с данными наблюдений. Согласно работам [20, 21] в ряде диффузных облаков обнаружено небольшое количество окиси углерода. В этих облаках величина $N(\text{CO})$ в среднем $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Примем, что характерные величины плотности на луче зрения через все облако N и плотность газа n для диффузных облаков составляют соответственно $\sim 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и $\sim 50 \text{ см}^{-3}$. Тогда для типичного диффузного облака на основе вычисленных результатов получаем $N(\text{CO}) \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

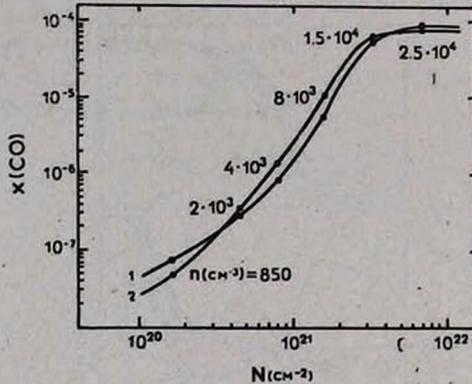


Рис. 5. Зависимость содержания окиси углерода от N в модели облака с градиентом плотности: 1 — полученная в настоящих расчетах; 2 — по работе [10].

В этих же условиях происходит значительный рост содержания молекул OH : при $N \geq 10^{19} \text{ см}^{-2}$ доля OH достигает величины $\sim 10^{-7}$. Образуется гидроксил главным образом путем рекомбинации на поверхности пылинок. Для типичного диффузного облака получаем $N(\text{OH}) \sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$. В работе Диккея и др. [22] для 16 диффузных облаков по наблюдениям OH в линии 18 см получена средняя величина $N(\text{OH}) \sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

На основе исследования ряда темных облаков Дикман [23] показал, что для этих облаков в области $1 < A_V < 10$ отношение $N(^{13}\text{CO})/A_V$ постоянно и составляет примерно $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} m^{-1}$. Это означает, что при $A_V > 1$ содержание окиси углерода достигает насыщения и не меняется с дальнейшим ростом оптической толщины. Принимая $\tau(V) = 5 \cdot 10^{-22} \text{ см}^{-2}$ из условия $A_V > 1$ получаем, что содержание окиси углерода должно достигнуть насыщения при $N > 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Эта величина хорошо согласуется с расчетной (см., например, рис. 5).

Предполагая, что в плотных межзвездных облаках $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO} \approx 90$ [23] и учитывая, что $A_V \approx 1.086 N \tau(V)$, из соотношения

$N(^{13}\text{CO})/A_V \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ м}^{-1}$ получаем $x(^{13}\text{CO}) \approx 7 \cdot 10^{-5}$. Такое содержание окиси углерода примерно соответствует космической распространенности углерода по данным Мортонa [19]. Этот факт свидетельствует в пользу того, что в плотных облаках в областях $A_V > 1$ практически весь углерод в газовой фазе связан в молекулы CO.

В проведенных расчетах не учитывалось образование молекул O_2 , которые могут синтезироваться в большом количестве при больших оптических толщинах и плотностях [10]. Поэтому равновесное содержание атомарного кислорода при $N \geq 10^{22} \text{ см}^{-2}$ может быть меньше, чем получено в расчетах. Однако на содержание молекул CO это не должно оказывать заметного влияния, потому что окись углерода образуется до насыщения в более разреженных и наружных слоях, чем молекула O_2 .

Таким образом, в данной работе на основе численных расчетов получены зависимости содержания C^+ , C, CO, OH и других молекул от плотности газа, температуры и оптической толщины. Показано, что: 1) в условиях диффузных облаков и оболочек молекулярных облаков, при $T > 50 \text{ K}$ и $n \sim 50 \text{ см}^{-3}$, в области $N \geq 10^{19} \text{ см}^{-2}$ происходит небольшой рост содержания молекул CO до $x(\text{CO}) \sim 10^{-6}$; 2) в межзвездных облаках область эффективного образования окиси углерода до насыщения слабо зависит от плотности и температуры газа и лежит в довольно узком интервале $N \sim (2-6) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$; 3) в области $N \sim (1-4) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ основная часть углерода находится в C1. При температурах $T \geq 30-40 \text{ K}$ зона нейтрального углерода выделяется недостаточно четко.

Полученные результаты могут быть использованы при построении моделей межзвездных облаков и расчете интенсивностей и контуров возникающих радиолиний.

Главная астрономическая
обсерватория АН УССР

STUDY OF CARBON MONOXIDE FORMATION IN INTERSTELLAR CLOUDS

L. N. ARSHUTKIN

The abundance of atoms and molecules which are important in thermal balance of interstellar clouds was calculated as a function of optical depth over the wide range of densities ($10-10^4 \text{ cm}^{-3}$) and temperatures ($10-100 \text{ K}$). Prime attention was given to variations of C^+ , C, and CO concentrations. It has been shown that at low tempera-

tures ($T \lesssim 30$ K) in the range of particle column density $N \sim (1 - 2) 10^{21}$ cm^{-2} the main bulk of carbon is in the form of neutral atomic carbon. But at temperatures greater than 30 K insufficient neutral carbon is formed. The region of complete formation of CO depends slightly on gas density and temperature, and lies in a narrow range of particle column densities $(2 - 6) 10^{21}$ cm^{-2} . Slight increase of CO abundance is possible in diffuse clouds.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Iglesias, Ap. J., 218, 697, 1977.
2. S. S. Prasad, W. T. Huntress Jr. Ap. J. Suppl. ser., 43, 1, 1930.
3. M. Oppenheimer, A. Dalgarno, Ap. J., 200, 419, 1975.
4. Y. P. Viala, C. M. Walmsley, Astron. Astrophys., 50, 1, 1976.
5. H. Suzuki, S. Miki, K. Sato, M. Kiguchi, J. Nakagawa, Progr. Theor. Phys., 56, 1111, 1976.
6. P. M. Mul, J. W. McGowan, Ap. J. Lett., 227, L157, 1979.
7. E. Herbst, W. Klemperer, Ap. J., 185, 505, 1973.
8. A. Dalgarno, M. Oppenheimer, Ap. J., 192, 597, 1974.
9. P. M. Solomon, M. W. Werner, Ap. J., 165, 41, 1971.
10. T. de Jong, A. Dalgarno, W. Boland, Astron. Astrophys., 91, 68, 1980.
11. W. H. Smith, H. S. Liszt, B. L. Lutz, Ap. J., 183, 69, 1973.
12. A. E. Glassgold, W. D. Langer, Ap. J., 186, 859, 1973.
13. D. R. Bates, M. N. RAS, 3, 303, 1951.
14. G. B. Field, G. Stetgman, Ap. J., 166, 59, 1971.
15. P. A. Aannestad, Ap. J. Suppl. ser., 25, 205, 1973.
16. J. H. Black, A. Dalgarno, Ap. J. Suppl. ser., 34, 405, 1977.
17. A. S. Allison, A. Dalgarno, J. Quant. Spectroscop. Radiat. Transfer., 9, 1543, 1969.
18. И. Г. Колесник, Астрометрия и астрофизика, 28, 79, 1976.
19. D. C. Morton, Ap. J. Lett., 193, L35, 1974.
20. G. R. Knapp, M. Jura, Ap. J., 209, 782, 1976.
21. I. Kazes, J. Crovisier, Astron. Astrophys., 101, 401, 1981.
22. J. M. Dickey, J. Crovisier, I. Kazes, Astron. Astrophys., 98, 271, 1981.
23. L. L. Dickman, Ap. J. Suppl. ser., 37, 407, 1978.