



# Влияние вариации элементного состава газа на молекулярную кинетику

О.П. Воробьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева, Москва



Низкая эффективность перемешивания металлов в межзвездном газе приводит к тому, что в среде долгое время сохраняются неоднородности в их пространственном распределении. В этой работе исследовано влияние вариаций содержания кислорода и углерода на химическую и тепловую эволюцию газа в плотных облаках за фронтом ударной волны от сверхновых.

## Модель

Для моделирования тепловой и химической эволюции молекулярного газа за фронтом ударной волны использовался программный пакет KROME. Химическая кинетика рассчитывается для лагранжева элемента газа и включает в себя 37 компонент, объединенных 260 реакциями в газовой фазе:  $H$ ,  $H^+$ ,  $H^-$ ,  $H_2$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $He$ ,  $He^+$ ,  $He^{++}$ ,  $C$ ,  $C^+$ ,  $C^-$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2$ ,  $O$ ,  $O^+$ ,  $O^-$ ,  $OH$ ,  $OH^+$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2O^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $CO$ ,  $HCO$ ,  $HOC^+$ ,  $HCO^+$ ,  $CO^+$ ,  $Si$ ,  $Si^+$ ,  $Si^{++}$ . В уравнении для температуры учитываются основные процессы охлаждения и нагрева, присущие плотным молекулярным облакам. Скорость УВ меняется в пределах 5–15 км/с, плотность газа в пределах  $10^3$ – $10^5$  см<sup>-3</sup>. Распространенности C и O варьируются в пределах  $\pm 0.3$  dex от солнечных значений: например, распространенность углерода  $[C/H]$  меняется от  $0.7 \cdot 10^{-4}$  до  $2.8 \cdot 10^{-4}$ . Коэффициент экстинкции менялся от  $A_V = 0.1$  (слабо экранированный газ) до 10 (сильное экранирование), скорость ионизации  $\zeta_{H_2} = 10^{-17}$ – $10^{-15}$  с<sup>-1</sup>, УФ-поле  $G = 1$ – $10 G_0$ , где  $G_0 = 1.7$  – поток излучения в МЗС в единицах Хаббл-Флюкса.

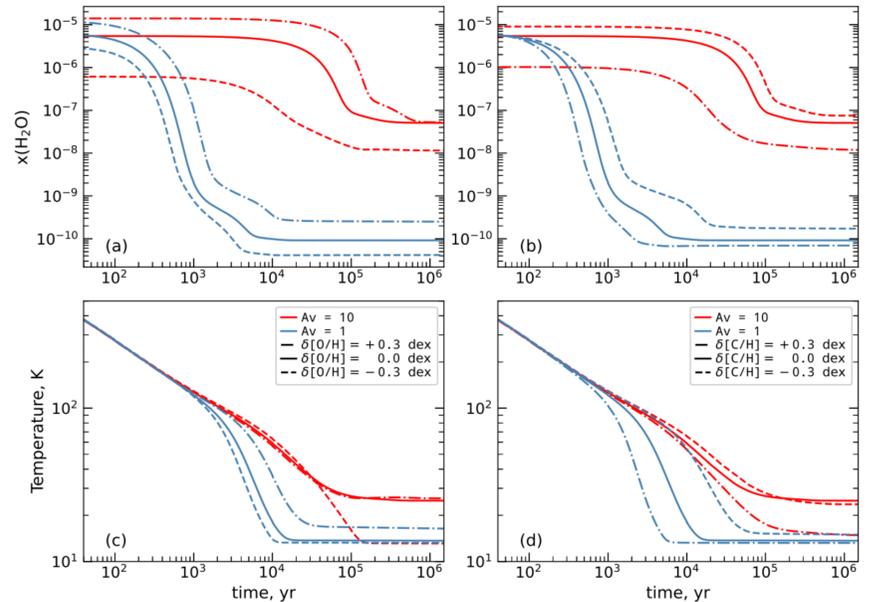


Рис. 1. Эволюция относительной концентрации молекул воды  $x(H_2O) = n(H_2O)/n(H)$  (панели a,b) и температуры газа (панели c,d) при вариации распространенности  $\delta[X/H] = \pm 0.3$  dex для кислорода (панели a,c) и углерода (панели b,d) в газе с плотностью  $n_H = 10^4$  см<sup>-3</sup>, за фронтом ударной волны со скоростью 15 км/с и находящимся в поле внешнего излучения с потоком  $1G_0$  и его ослаблении для значений экстинкции  $A_V = 1$  и 10. Скорость ионизации космическими лучами равна  $\zeta_H = 10^{-17}$  с<sup>-1</sup>.

На рисунке 1 можно видеть, что рост содержания кислорода на 0.3 dex приводит к увеличению доли молекул  $H_2O$  в газе с  $A_V = 10$  почти в три раза в период до  $t \leq 10^5$  лет по сравнению с эволюцией для солнечного значения. При этом такое же уменьшение содержания кислорода проявляется в падении  $x(H_2O)$  почти на порядок. При увеличении  $[C/H]$  концентрация молекул воды падает почти в 5 раз, а при уменьшении незначительно растет (рис. 1b). Аналогичные отклонения видны и на рис. 2, где приводятся концентрации молекул  $H_2O$ ,  $CO$  и  $HCO^+$  в зависимости от  $A_V$  через 1000 лет после прохождения ударной волны.

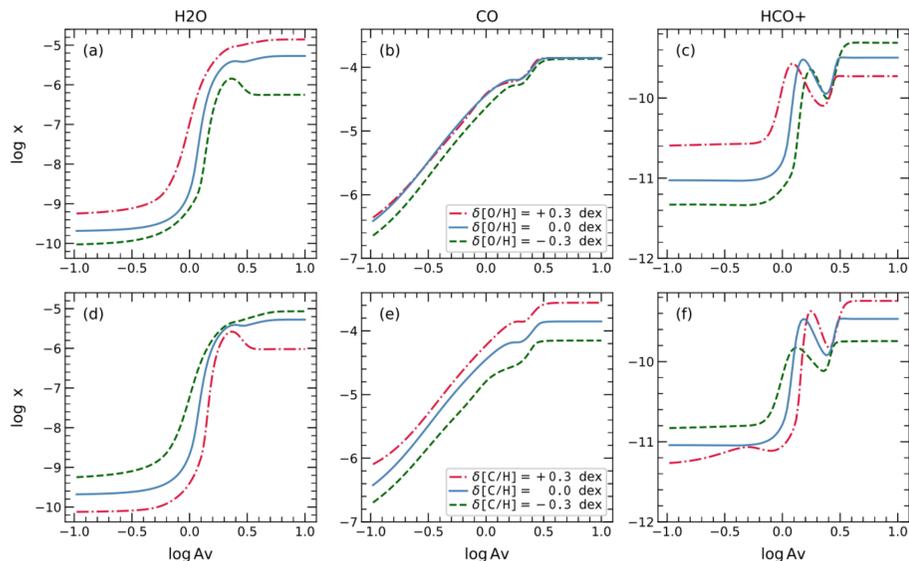


Рис. 2. Концентрация молекул  $H_2O$ ,  $CO$  и  $HCO^+$  в зависимости от экстинкции  $A_V$  для вариации распространенности  $\delta[X/H] = \pm 0.3$  dex для кислорода (панели a-c) и углерода (панели d-f) в газе с плотностью  $10^4$  см<sup>-3</sup> через 1000 лет после прохождения ударной волны со скоростью 15 км/с и находящимся в поле внешнего поля излучения с потоком  $1G_0$  и его ослаблении для значений экстинкции  $A_V = 1$  и 10. Скорость ионизации космическими лучами равна  $\zeta_{H_2} = 10^{-17}$  с<sup>-1</sup>.

## Влияние внешних условий

На рисунке 3 показан относительный прирост концентрации молекул воды за фронтом ударной волны со скоростью 15, 9 и 5 км/с. Горизонтальная линия  $x(\delta[X/H]) - x(0) = 0$  соответствует нулевому отклонению от значения концентрации молекул при солнечном составе. Показана зависимость прироста концентрации  $H_2O$  при варьировании распространенности C и O от концентрации при солнечных значениях C и O. Вдоль линий меняется  $A_V$  от 0.1 до 10. Видно, что при некоторых значениях параметров концентрация воды может отклоняться почти на 2 порядка.

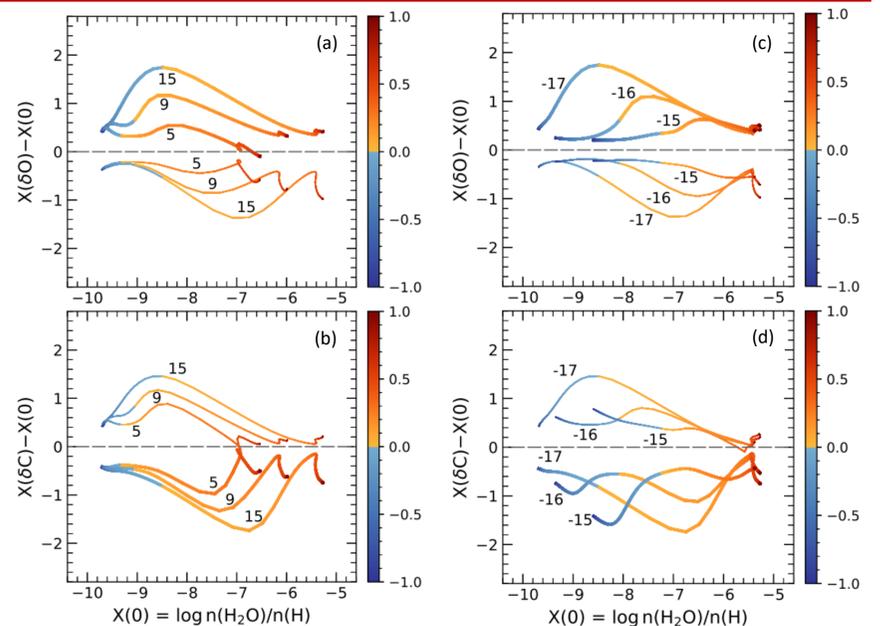
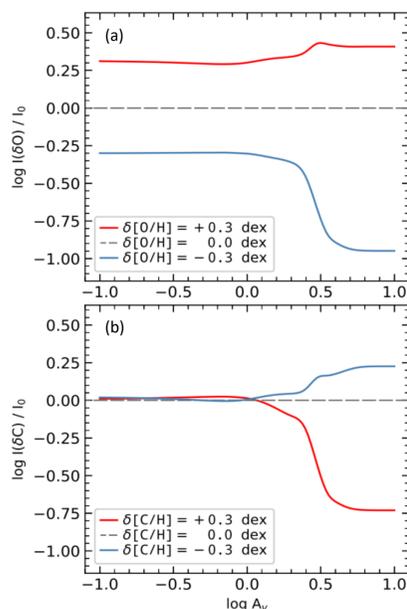


Рис. 3. Прирост концентрации  $H_2O$  при вариации содержания кислорода на  $\delta[O/H] \pm 0.3$  dex (панель a) и углерода  $\delta[C/H] \pm 0.3$  dex (панель b) относительно газа с солнечными значениями распространенности элементов при соответствующем значении  $A_V$ . Сама величина экстинкции  $A_V$  меняется от 0.1 до 10 и показана цветовой шкалой. Толстые линии соответствуют увеличению  $\delta[X/H]$  на 0.3 dex, тонкие – уменьшению. Показаны значения через 1000 лет после прохождения ударной волны со скоростью 15, 9 и 5 км/с (линии отмечены соответствующими числами). Плотность  $n_H = 10^4$  см<sup>-3</sup>,  $\zeta_{H_2} = 10^{-17}$ . Справа (панели c и d) то же, что и для скорости ударной волны 15 км/с и темпа ионизации космическими лучами  $\zeta_{H_2} = 10^{-17}, 10^{-16}, 10^{-15}$  с<sup>-1</sup> (метки соответствуют логарифму  $\zeta_{H_2}$ ).

Рис. 4. Отношение интенсивности излучения молекул воды в линии 557 ГГц при вариации содержания кислорода на  $\delta[O/H] \pm 0.3$  dex (панель a) и углерода  $\delta[C/H] \pm 0.3$  dex (панель b) к величине  $I_0$  для солнечных значений распространенности элементов в слое газа, находящегося во внешнем поле излучения с потоком  $1G_0$ , ослабленном поглощением в  $\exp(-A_V)$  раз. Темп ионизации космическими лучами  $\zeta_{H_2} = 10^{-17}$  с<sup>-1</sup>. Интенсивности рассчитаны для слоя газа с плотностью  $n = 10^4$  см<sup>-3</sup>, нагретого ударной волной со скоростью 15 км/с в течение 1000 лет. Распределения температуры и концентрации для газа, остывающего за фронтом ударной волны, получены в KROME. Эмиссионная способность газа вычислена с помощью пакета для расчета радиационного переноса RADMC-3D.



## Результаты

- изменения концентраций молекул  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $HCO^+$  и других не пропорциональны вариации содержания кислорода и углерода;
- концентрация молекул воды возрастает при увеличении  $[O/H]$ , а при более высоком значении  $[C/H]$  падает;
- прирост концентрации молекул  $HCO^+$  к значению при эволюции для солнечного химического состава изменяет знак в зависимости от величины экстинкции
- отклонения концентраций молекул воды падают при уменьшении скорости ударной волны, а также при росте потока УФ-излучения и темпа ионизации космическими лучами, и нелинейно зависят от концентрации газа.