

ВЛИЯНИЕ ТЕМПОВ РЕАКЦИЙ С ФОТОНАМИ, ПОРОЖДЕННЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ, НА СОСТАВ ГАЗА И ЛЬДА В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

Л. Н. Цвикки¹, Т. С. Молярова²

¹Уральский федеральный университет, ²Институт астрономии РАН

Характерный для протопланетных дисков рост пыли может приводить к изменению темпов химических реакций в них. С помощью астрохимического моделирования протопланетного диска (код ANDES) анализируется, как на содержание химических соединений в газовой и ледяной фазе влияет повышение размера пыли и темпов реакций с фотонами, порожденными космическими лучами. Показано, что увеличение темпов реакций существенно влияет на соотношение C/O в газовой фазе в области около 20 а. е. и на соотношение C/O в ледяной фазе внутри 6 а. е.

IMPACT OF RATES OF REACTIONS WITH COSMIC RAY INDUCED PHOTONS ON GAS AND ICE COMPOSITION IN PROTOPLANETARY DISCS

L. N. Zwicky¹, T. S. Molyarova²

¹Ural Federal University, ²Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

Dust growth characteristic of protoplanetary discs can affect chemical reaction rates. Using astrochemical model of protoplanetary disc (ANDES code) we analyse how gas- and ice-phase abundances of species are influenced by an increase in both dust size and rates of reactions with cosmic ray induced photons. We find that the elevated reaction rates considerably influence C/O ratio in the gas at ~ 20 au and C/O ratio in the ice inside 6 au.

Введение

Отдельное место среди химических реакций в межзвездной среде занимают реакции с космическими лучами и фотонами, порожденными космическими лучами (далее — ФКЛ). Они особенно важны в областях, недоступных для межзвездного ультрафиолетового излучения, в частности, в протопланетных дисках. Присутствующая в межзвездной среде пыль эффективно поглощает ФКЛ, поэтому темпы реакций с ФКЛ (далее ФКЛ-реакций) зависят от свойств пыли. В первом приближении можно считать, что они прямо пропорциональны ее среднему размеру [1]. В современных астрохимических моделях используются темпы ФКЛ-реакций, рассчитанные для плотных межзвездных облаков [2, 3]. Однако в протопланетных дисках пыль способна достигать больших размеров, и, следовательно, темпы ФКЛ-реакций там тоже должны быть выше.

Целью данной работы является оценка влияния вызванного ростом пыли изменения темпов ФКЛ-реакций на химический состав протопланетного диска. На основе астрохимического моделирования проводится анализ изменений в составе газа и льда, выявляются цепочки реакций, ответственные за эти изменения.

Анализ

В данной работе используется двумерная модель квазистационарного протопланетного диска ANDES [4] с модификациями, сделанными в работе [5], и дополнительным ограничением на темпы поверхностных реакций.

Для анализа влияния темпов ФКЛ-реакций варьировались два параметра модели: средний размер пыли и множитель темпов ФКЛ-реакций. Значения этих параметров для рассмотренных моделей указаны в таблице.

Набор моделей

Название модели	Средний размер пыли, мкм	Множитель темпов ФКЛ-реакций
Модель I	0.035	1
Модель II	0.35	1
Модель III	0.35	10

Характеристики пыли в модели I соответствуют классической для МЗС модели MRN [6], а темпы ФКЛ-реакций взяты из работы [7]. В модели II увеличен только размер пыли, она нужна чтобы отделять эффекты, которые проявляются при росте пыли независимо от ФКЛ-реакций. В модели III дополнительно к размеру пыли повышены темпы ФКЛ-реакций пропорционально среднему размеру пыли [1].

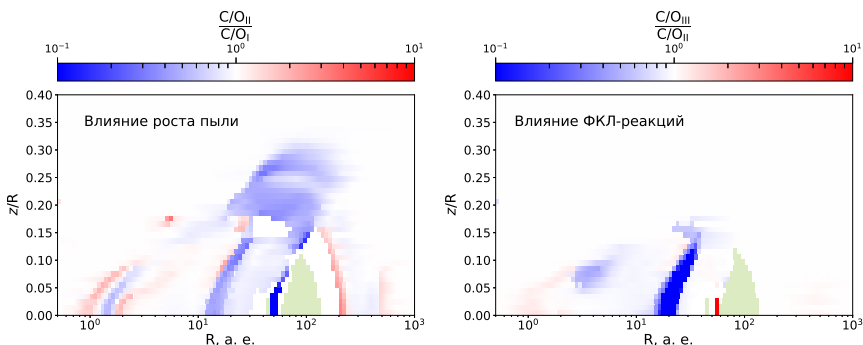
В предыдущей нашей работе по этой тематике [1] изменения в химическом составе диска были проанализированы на основе степени ионизации среды и массовой доли льдов по отношению к пыли. Здесь в качестве характеристики химического состава вещества мы рассматриваем соотношение C/O в газовой и ледяной фазе. Под соотношением C/O понимается отношение суммарной концентрации углерода во всех углеродсодержащих соединениях (n_C) к суммарной концентрации кислорода во всех кислородсодержащих соединениях (n_O) в некоторой точке диска. При расчете соотношения C/O в газовой или ледяной фазе берутся соединения только в данной фазе.

Считается, что соотношение C/O является лучшим индикатором процесса формирования планет [8]. Изменения в C/O в рамках данной модели имеет смысл рассматривать отдельно только для C/O в газе и C/O на пыли, так как общее элементное соотношение C/O остается всегда ≈ 0.4 во всем диске (вещество не перемещается в пространстве в рамках модели). В газовой и ледяной фазах по отдельности C/O может изменяться за счет перехода углеродсодержащих и кислородсодержащих соединений из одной фазы в другую.

Для соотношений C/O в газовой и ледяной фазе были построены распределения по диску отношений их значений в одной модели к значениям в другой модели. На рисунке приведен пример такого распределения для соотношения C/O в газе. Далее были выделены области, в которых значения параметра наиболее заметно отличаются между моделями (на порядок и более). Для этих областей был проведен детальный анализ темпов происходящих химических реакций, были идентифицированы цепочки химических реакций, ответственные за разницу между моделями.

Результаты

Как видно из рисунка, рост пыли влияет на соотношение C/O в газе не более чем в два-три раза. В то же время в узкой области на ≈ 20 а. е. вблизи плоскости диска заметно влияние увеличения темпов ФКЛ-реакций. В этой области C/O падает более чем



Пространственное распределение отношения соотношения C/O в газе в различных моделях на момент времени 1 млн лет. Отношение модели II к модели I (слева), модели III к модели II (справа). Зеленым закрашены области, где содержание и кислорода, и углерода в газофазных соединениях меньше их начальных содержаний в тысячу раз в обеих моделях

на порядок за счет значительного увеличения количества молекулярного кислорода и озона в газовой фазе. Рост содержания озона связан с повышением темпа формирования его прекурсора — атомарного кислорода на пыли — во множестве ФКЛ-реакций. Подобным же образом из-за повышенного содержания O на пыли возрастает содержание молекулярного кислорода в газе.

Соотношение C/O на пыли при повышении темпов ФКЛ-реакций уменьшается на порядок и более в области до ≈ 6 а. е. вблизи плоскости диска за счет фотодиссоциации ледяного $\text{H}_2\text{C}_3\text{O}$ на C_2H_2 и CO, чьи температуры десорбции ниже температуры пыли в этой области. При этом рост пыли вызывает увеличение C/O на пыли в области до ≈ 2 а. е. благодаря образованию сложных углеродсодержащих молекул, а в области от ≈ 2 до ≈ 6 а. е. вызывает уменьшение C/O на пыли вследствие смещения линий льдов.

Таким образом, увеличение темпов ФКЛ-реакций приводит к заметным изменениям соотношения C/O и в газовой, и в ледяной фазе. Его влияние на степень ионизации и массовую долю льдов в протопланетном диске было рассмотрено в работе [1].

В целом влияние ФКЛ-реакций на химический состав протопланетного диска ощутимо. Представляется целесообразным учет в астрохимических моделях протопланетных дисков изменений в темпах этих реакций вследствие роста пыли.

Работа поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (20-1-2-20-1).

Библиографические ссылки

- [1] Цвижки Л. Н., Молярова Т. С. Влияние темпов реакций с фотонами, порожденными космическими лучами, на химический состав протопланетных дисков // В печати. — 2021.
- [2] McElroy D., Walsh C., Markwick A. J. et al. The UMIST database for astrochemistry 2012 // Astron. Astrophys. — 2013. — Vol. 550. — P. A36.
- [3] Wakelam V., Loison J. C., Herbst E. et al. The 2014 KIDA Network for Interstellar Chemistry // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 2015. — Vol. 217. — P. 20.
- [4] Akimkin V., Zhukovska S., Wiebe D. et al. Protoplanetary Disk Structure with Grain Evolution: The ANDES Model // Astrophys. J. — 2013. — Vol. 766.

- [5] *Molyarova Tamara, Akimkin Vitaly, Semenov Dmitry et al.* Gas Mass Tracers in Protoplanetary Disks: CO is Still the Best // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 849. — P. 130.
- [6] *Mathis J. S., Rumpl W., Nordsieck K. H.* The size distribution of interstellar grains // *Astrophysical Journal.* — 1977. — Vol. 217. — P. 425–433.
- [7] *Gredel R., Lepp S., Dalgarno A., Herbst E.* Cosmic-Ray-induced Photodissociation and Photoionization Rates of Interstellar Molecules // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 347. — P. 289.
- [8] *Cridland A. J., Eistrup C., Dishoeck E. F. van.* Connecting planet formation and astrochemistry. Refractory carbon depletion leading to super-stellar C/O in giant planetary atmospheres // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 627. — P. A127.