

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ОБЛАСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

А. Г. Пазухин^{1,2}, И. И. Зинченко^{1,2}, Е. А. Трофимова¹

¹Институт прикладной физики РАН, ²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

При помощи 30-м радиотелескопа IRAM были проведены наблюдения нескольких областей образования массивных звезд на длинах волн 2 и 3–4 мм, включающие переходы дейтерированных молекул DCN, DCO⁺, DNC. Полученные данные позволяют оценить кинетическую температуру газа в источниках по наблюдавшимся линиям молекул CH₃CCH. Оценены лучевые концентрации молекул в не-ЛТР приближении. В результате были получены корреляции относительного содержания молекул и степени фракционирования дейтерия от температуры.

DEUTERIUM FRACTION IN MASSIVE STAR FORMING REGIONS

A. G. Pazukhin^{1,2}, I. I. Zinchenko^{1,2}, E. A. Trofimova¹

¹Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, ²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

With the IRAM-30m telescope, we observed several massive star forming regions in the lines of the transitions of deuterated molecules DCO⁺, DCN, DNC in the 2 and 3–4 mm wavelength range. The obtained data allow us to estimate the kinetic temperature of the gas in the sources by the observed lines of molecules CH₃CCH. Estimates of the column density in the non-LTE approximation are obtained. As a result, a correlation was found between the relative abundances molecules and the deuterium fractionation degree with temperature.

В 2019 г. при помощи 30-м радиотелескопа IRAM И. И. Зинченко и Е. А. Трофимовой были проведены наблюдения нескольких областей образования массивных звезд на длинах волн 2 и 3–4 мм (табл. 1).

Таблица 1. Список источников (d — расстояние до объектов, R — расстояния от центра Галактики до источника) [1–3]

Объект	Координаты	d , кпк	R , кпк	Размер карты
G121.30+0.66	00 ^h 36 ^m 47.5 ^s +63°29′02.1″	0.93	8.64	200″ × 200″
S187	01 ^h 23 ^m 15.4 ^s +61°49′43.1″	1.03	10.65	200″ × 200″
G173.48+2.45	05 ^h 39 ^m 12.9 ^s +35°45′54.0″	2.30	12.29	200″ × 200″
DR21(OH)	20 ^h 39 ^m 00.6 ^s +42°22′48.9″	1.50	8.05	200″ × 400″
IRAS23116+6111	23 ^h 13 ^m 44.7 ^s +61°28′09.7″	2.80	11.33	200″ × 240″

Для обработки были использованы спектры молекул DCN, DCO⁺, DNC в двух переходах $J = 1-0$ и $J = 2-1$ и в переходах $J = 1-0$ Н¹³СО⁺, Н¹³СН, НН¹³С (табл. 2).

Все карты были приведены к одинаковому разрешению $\sim 38''$. Кинетическая температура определялась методом вращательных диаграмм в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР) [4] по переходам CH₃CCH $J = 5-4$ ($K = 0-3$) и $J = 9-8$ ($K = 0-3$). Считалось, что газ плотный, $n(\text{H}_2) \gtrsim 10^4 \text{ см}^{-3}$, и оптическая толщина мала. Стоит отметить, что для объектов S187, G173.48+2.45 линии CH₃CCH оказались слабыми, поэтому получить оценки кинетической температуры не удалось. Для G173.48+2.45

бралась оценка кинетической температуры по аммиаку [5]. Интенсивность приводилась к температуре в главном лепестке: $T_{mb} = \frac{F_{eff}}{B_{eff}} T_A^*$. Полученные спектры были аппроксимированы гауссианой.

Таблица 2. Список наблюдаемых молекул

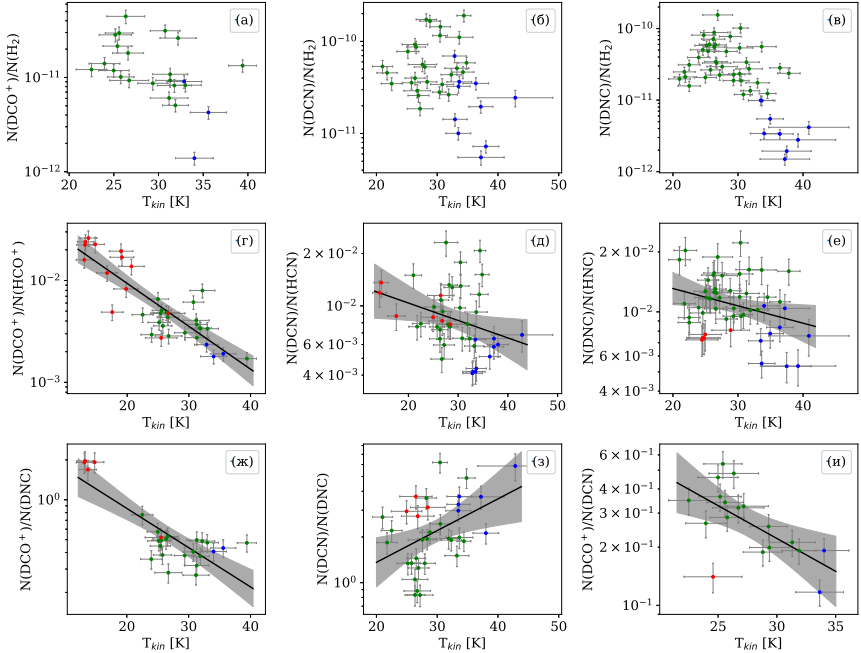
Молекула	Переход	Частота, МГц	E_u/k , К
DCO ⁺	$J = 1 - 0$	72 039.354	3.5
	$J = 2 - 1$	144 077.319	10.4
DCN	$J = 1 - 0$	72 414.694	3.5
	$J = 2 - 1$	144 828.002	10.4
DNC	$J = 1 - 0$	76 305.699	3.7
	$J = 2 - 1$	152 609.744	10.9
H ¹³ CN	$J = 1 - 0$	86 339.921	4.1
H ¹³ CO ⁺	$J = 1 - 0$	86 754.288	4.2
HN ¹³ C	$J = 1 - 0$	87 090.825	4.2
CH ₃ CCH	$J_K = 5_3 - 4_3$	85 442.601	77.3
	$J_K = 5_2 - 4_2$	85 450.766	41.2
	$J_K = 5_1 - 4_1$	85 455.667	19.5
	$J_K = 5_0 - 4_0$	85 457.300	12.3
	$J_K = 9_3 - 8_3$	153 790.772	101.9
	$J_K = 9_2 - 8_2$	153 805.461	65.8
	$J_K = 9_1 - 8_1$	153 814.276	44.1
	$J_K = 9_0 - 8_0$	153 817.215	36.9

Данные взяты из каталога CDMS <https://cdms.astro.uni-koeln.de>

Для расчета лучевых концентраций в не-ЛТП-приближении была использована программа RADEX [6]. Входными параметрами являются кинетическая температура, плотность $n(\text{H}_2)$, ширина (FWHM) и интенсивность спектральной линии. Варьируя значение отношения интегральных интенсивностей переходов $2-1/1-0$ и значение кинетической температуры, можно получить плотность $n(\text{H}_2)$. Таким образом, для каждого отношения переходов $2-1$ и $1-0$ молекул DCN, DCO⁺, DNC были получены значения плотности $n(\text{H}_2)$. Используя вычисленные $n(\text{H}_2)$, были получены лучевые концентрации интересующих нас молекул. С помощью программы RADEX можно получить оценки оптической толщины линий, результаты которых показали значения $\sim 10^{-2}$, то есть линии можно считать оптически тонкими, что позволяет исследовать весь газ на луче зрения. Для оценки количества молекул HCO⁺, HCN, HNC были использованы обладающие малой оптической толщиной линии H¹³CO⁺, H¹³CN, HN¹³C и зависимость отношения изотопов $\frac{^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}} = 4.7 \frac{R}{R_{\text{кпк}}} + 25.05$ [7]. Значения лучевой концентрации $N(\text{H}_2)$ взяты из данных наблюдений пыли Ni-GAL на телескопе Herschel [8, 9]. В итоге были получены оценки относительного содержания дейтерированных молекул и отношения лучевых концентраций, построены графики зависимости от кинетической температуры (см. рисунок). При оценках зависимостей мы предполагаем стационарные физические условия и стационарную химию источников.

Заключение

Содержание DCO⁺, DCN и DNC по отношению к основным изотопологам составляет $\sim 10^{-2}$ при температурах 20 К и падает с ростом температуры (см. рисунок, $e-e$). Полученные результаты согласуются с химическими моделями [10], согласно которым при температурах $\gtrsim 20$ К разрушается ион H₂D⁺, участвующий в образовании дейтерированных



Зависимости относительного содержания дейтерированных молекул DCN, DCO⁺, DNC и различные отношения лучевых концентраций от кинетической температуры. Зелеными точками выделены значения для источника DR21(OH), синим — IRAS23116+6111, красным — G173.48+2.45. Линейная аппроксимация производилась при значениях уровня значимости $p < 0.05$

соединений. Молекула DCN может образовываться при температурах $\gtrsim 80$ K в реакциях с CH₂D⁺, в результате содержание DCN по отношению к DNC с увеличением температуры возрастает (см. рисунок, з).

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант 17-12-01256, 22-22-00809).

Библиографические ссылки

- [1] *Rygl K. L. J., Brunthaler A., Reid M. J. et al.* Trigonometric parallaxes of 6.7 GHz methanol masers // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 511. — P. A2. 0910.0150.
- [2] *Rygl K. L. J., Brunthaler A., Sanna A. et al.* Parallaxes and proper motions of interstellar masers toward the Cygnus X star-forming complex. I. Membership of the Cygnus X region // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 539. — P. A79. 1111.7023.
- [3] *Fich M., Blitz L.* Optical H II regions in the outer Galaxy. // *Astrophys. J.* — 1984. — Vol. 279. — P. 125–135.
- [4] *Bergin Edwin A., Goldsmith Paul F., Snell Ronald L., Ungerechts Hans.* CH₃C₂H as a Temperature Probe in Dense Giant Molecular Cloud Cores // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 431. — P. 674.

- [5] *Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S., Wielen M., Henkel C.* Ammonia in dense clumps of filament WB 673 // INASAN Science Reports. — 2020. — Vol. 5. — P. 207–210.
- [6] *Tak F. F. S. van der, Black J. H., Schöier F. L. et al.* A computer program for fast non-LTE analysis of interstellar line spectra. With diagnostic plots to interpret observed line intensity ratios // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 468, № 2. — P. 627–635. 0704.0155.
- [7] *Liu Tie, Wu Yuefang, Zhang Huawei.* Gaseous CO Abundance—An Evolutionary Tracer for Molecular Clouds // *Astrophys. J. Lett.* — 2013. — Vol. 775, № 1. — P. L2. 1306.0046.
- [8] *Marsh K. A., Whitworth A. P., Lomax O.* Temperature as a third dimension in column-density mapping of dusty astrophysical structures associated with star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 454, № 4. — P. 4282–4292. 1509.08699.
- [9] *Marsh K. A., Whitworth A. P., Lomax O. et al.* Multitemperature mapping of dust structures throughout the Galactic Plane using the PPMAP tool with Herschel Hi-GAL data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 471, № 3. — P. 2730–2742. 1707.03808.
- [10] *Turner B. E.* Deuterated Molecules in Translucent and Dark Clouds // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2001. — Vol. 136, № 2. — P. 579–629.