

АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ И УСТОЙЧИВОСТИ В ОБЛАСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗД БОЛЬШОЙ МАССЫ

А. Г. Пазухин^{1,2}, И. И. Зинченко¹

¹*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,*

²*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского*

Анализ устойчивости молекулярных облаков имеет первостепенное значение в изучении процессов звездообразования. Параметр вириала, который сравнивает массу вириала с фактической массой, обеспечивает один из способов оценить устойчивость к коллапсу. Малые значения параметра наблюдаются для областей образования звезд большой массы, что может свидетельствовать о более быстрой эволюции во время коллапса. В работе используются данные наблюдений в диапазоне 3 мм, полученные с помощью 30-м телескопа IRAM для пяти областей образования массивных звезд (L1287, S187, S231, DR21(OH), NGC7538). Для оценки кинетической температуры использовались отношения интегральных интенсивностей переходов $J = 1-0$ молекул HCN и HNC и их ^{13}C изотопологов. Для оценки лучевой концентрации $N(\text{H}_2)$ и массы объектов использовались данные излучения пыли на 850 мкм JCMT-SCUBA. Дисперсия скоростей оценивалась по спектрам $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$. В результате массы облаков составляют $\approx 65-5635 M_\odot$, размер объектов $\approx 0.08-0.27$ пк, полная дисперсия скоростей $\text{H}^{13}\text{CO}^+ \approx 0.25-3.44$ км/с. Все источники имеют вириальный параметр $\alpha_{vir} < 2$, что указывает на гравитационную связанность источников и возможность их коллапса (энергия гравитационной связи выше кинетической энергии) при отсутствии дополнительной поддержки, например, со стороны магнитного поля.

ANALYSIS OF KINEMATICS AND STABILITY IN HIGH-MASS STAR FORMATION REGIONS

A. G. Pazukhin^{1,2}, I. I. Zinchenko¹

¹*Federal Research Center Institute of Applied Physics RAS,*

²*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

The analysis of molecular cloud stability is crucial in the study of star formation. One way to estimate the stability to collapse is through the virial parameter, which compares the virial mass with the actual mass. High-mass star forming regions often exhibit small values of the parameter, which may indicate faster evolution during collapse. In this work, we use observational data in the 3 mm wavelength obtained with the IRAM 30 m telescope towards five high-mass star forming regions (L1287, S187, S231, DR21(OH), NGC7538). The integral intensity ratios of transition $J = 1-0$ of the HCN and HNC molecules and their ^{13}C isotopologues is used to estimate the kinetic temperature. Dust emission data at 850 μm JCMT-SCUBA is used to found the $N(\text{H}_2)$ column density and source masses. The velocity dispersion is estimated from the $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$ spectra. In the results masses are $\approx 65-5635 M_\odot$, source sizes are $\approx 0.08-0.27$ pc, total velocity dispersions of $\text{H}^{13}\text{CO}^+ \approx 0.25-3.44$ km s^{-1} . Virial parameters of sources are $\alpha_{vir} < 2$, which indicates gravitationally bound of sources and might be collapsing (the gravitational binding energy is higher than the kinetic energy) if no additional support, such as from magnetic field.

Анализ устойчивости молекулярных облаков имеет первостепенное значение в изучении процессов звездообразования. Параметр вириала, который сравнивает массу вириала

с фактической массой, обеспечивает один из способов оценить устойчивость к коллапсу. Малые значения параметра наблюдаются для областей образования звезд большой массы, что может свидетельствовать о более быстрой эволюции во время коллапса [1].

В 2019 г. с помощью 30-м телескопа IRAM были проведены наблюдения пяти областей образования звезд большой массы на длинах волн 2 и 3–4 мм. Выбор источников основан на результатах предыдущих исследований [2]. Список источников приведен в таблице. Позиция источника связана с координатами наблюдаемых мазеров H₂O [3]. Позиция L1287 соответствует инфракрасному источнику IRAS 00338+6312. Позиция S187 связана с пиком излучения пыли и молекулы N₂H⁺ [4], а также позицией звезды до главной последовательности S187Hα [5]. В качестве индикатора распределения H₂ в источнике были использованы данные излучения пыли на 850 мкм JCMT-SCUBA [6].

Для оценки лучевой концентрации $N(\text{H}_2)$ по данным излучения пыли была использована следующая формула [7]:

$$N_{\text{H}_2}[\text{cm}^{-2}] = \eta \frac{F_\nu^{\text{beam}}}{B_\nu(T_{\text{dust}})\Omega\kappa_\nu\mu_{\text{H}_2}m_{\text{H}}} = 2.02 \times 10^{25} (e^{14.39/(\lambda T_{\text{dust}})} - 1) \frac{\lambda^3 F_\nu^{\text{beam}}}{\kappa_\nu \theta^2}, \quad (1)$$

где отношение масс газа к пыли $\eta = 100$; $B_\nu(T)$ — функция Планка; F_ν^{beam} — плотность потока излучения в Ян/луч; Ω — телесный угол; T_{dust} — температура пыли; m_{H} — масса водорода; θ — ширина луча по половинной мощности в угловых секундах; λ — длина волны (мм) и средний молекулярный вес $\mu_{\text{H}_2} = 2.8$. Непрозрачность пыли $\kappa_\nu = 1.82 \text{ cm}^2/\text{г}$ на 850 мкм [8]. Температура пыли T_{dust} принималась равной 20 К. В предположении, что источник имеет гауссову форму, были получены оценки радиусов источников R . Карты распределения лучевой концентрации $N(\text{H}_2)$ и результаты подгонки функции Гаусса представлены на рисунке. Тогда массу источника можно оценить путем интегрирования лучевой концентрации $N(\text{H}_2)$ по эллипсу, полученному в результате подгонки функцией Гаусса:

$$M = \mu_{\text{H}_2}m_{\text{H}} \int N_{\text{H}_2} dA. \quad (2)$$

О динамике газа в источнике можно судить по прямым измерениям ширины (Δv). Ширина линий была получена путем подгонки спектров профилем Гаусса. Полная дисперсия скорости газа (σ_{tot}) может быть получена из дисперсии скорости наблюдаемого перехода молекулы i ($\sigma_{\text{obs},i} = \Delta v_i/\sqrt{8 \ln 2}$) через нетепловую компоненту газа

$$\sigma_{\text{nt}}^2 = \sigma_{\text{obs},i}^2 - \sigma_{\text{th},i}^2, \quad (3)$$

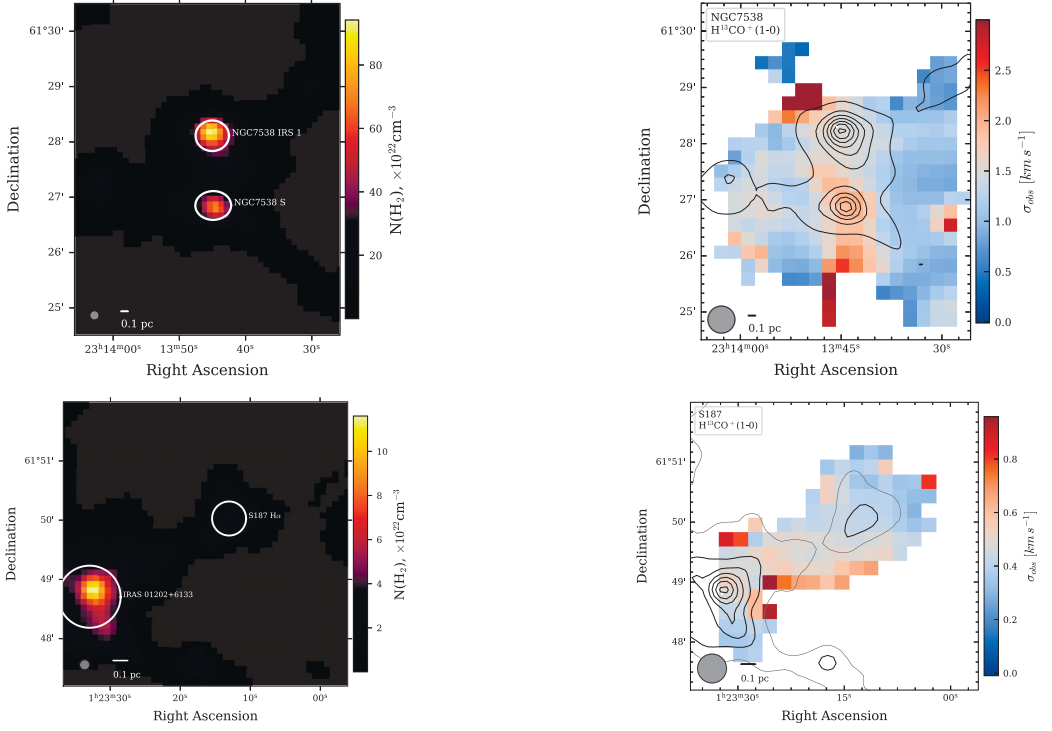
где $\sigma_{\text{th},i} = \sqrt{k_{\text{B}}T_{\text{kin}}/\mu_i m_{\text{p}}}$; μ_i — молекулярный вес для наблюдаемого соединения ($\mu(\text{H}^{13}\text{CO}^+) = 30$); m_{p} — масса протона; k_{B} — постоянная Больцмана и T_{kin} — кинетическая температура газа. Карты распределения наблюдаемой дисперсии скорости σ_{obs} для H¹³CO⁺(1-0) представлены на рисунке. Используя тепловую дисперсию скорости газа

$$c_{\text{s}} = \sigma_{\text{th,gas}} = \sqrt{\frac{k_{\text{B}}T_{\text{kin}}}{\mu_{\text{p}}m_{\text{p}}}}, \quad (4)$$

где средний молекулярный вес для частицы $\mu_{\text{p}} = 2.37$, можем получить полную дисперсию скорости газа

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_{\text{nt}}^2 + c_{\text{s}}^2. \quad (5)$$

Для оценки кинетической температуры использовались отношения интегральных интенсивностей переходов $J = 1-0$ молекул HCN и HNC и их ¹³C изотопологов [9]. Результаты оценок взяты из работы [10].



Карты для источников NGC7538 (верхние панели) и S187 (нижние панели). На левом рисунке показано распределение лучевой концентрации $N(\text{H}_2)$ по данным излучения пыли на 850 мкм. На правом рисунке показано распределение дисперсии скоростей σ_{obs} для H^{13}CO^+ , контурами показано распределение $N(\text{H}_2)$. В левом нижнем углу каждого из рисунков указан масштаб и размер луча диаграммы направленности

Наконец, были получены оценки параметра вириала [11]:

$$\alpha_{vir} = \frac{5\sigma_{tot}^2 R}{GM}, \quad (6)$$

где G — гравитационная постоянная и радиус облака, полученный по результатам гауссовой подгонки $R = 0.5\sqrt{FWHM_x \times FWHM_y}$. Кроме того, можно определить вириальную массу как

$$M_{vir} = \frac{5\sigma_{tot}^2 R}{G}. \quad (7)$$

Полученные оценки параметров облаков приведены в таблице.

В результате массы облаков составляют $\approx 65\text{--}5635 M_\odot$, размер объектов $\approx 0.08\text{--}0.27$ пк, полная дисперсия скоростей $\text{H}^{13}\text{CO}^+ \approx 0.25\text{--}3.44$ км/с. Все источники имеют вириальный параметр $\alpha_{vir} < 2$, что указывает на гравитационную связанность источников и возможность их коллапса (энергия гравитационной связи выше кинетической энергии) при отсутствии дополнительной поддержки, например, со стороны магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-22-00809.

Объект	α_{2000} ($^{\circ} \text{ } ^{\prime} \text{ } ^{\prime\prime}$)	δ_{2000} ($^{\circ} \text{ } ^{\prime} \text{ } ^{\prime\prime}$)	d (кпк)	R (пк)	$\langle \sigma_{tot} \rangle$ (км c^{-1})	$\langle T_{kin} \rangle$ (K)	M_{vir} (M_{\odot})	M_{obs} (M_{\odot})	α_{vir}
L1287	00:36:47.5	63:29:02.1	0.93	0.08	1.06	25	85	159	0.7
S187 H α	01:23:15.4	61:49:43.1	1.0	0.14	0.25	20	33	65	0.6
IRAS 01202+6133	01:23:32.2	61:48:49.5	1.0	0.25	0.31	25	76	456	0.2
S231	05:39:12.9	35:45:54.0	2.3	0.21	1.9	23	383	953	0.5
DR21(OH)	20:39:00.6	42:22:48.9	1.5	0.21	1.37	30	275	3840	0.1
NGC 7538 IRS 1	23:13:44.7	61:28:09.7	2.8	0.27	3.44	40	893	5635	0.2
NGC 7538 S	23:13:44.8	61:26:51.0	2.8	0.27	2.44	30	631	3894	0.2

Библиографические ссылки

- [1] *Kauffmann J., Pillai Th., Goldsmith P. F.* Low Virial Parameters in Molecular Clouds: Implications for High-mass Star Formation and Magnetic Fields // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 779, № 2. — P. 185.
- [2] *Trofimova E. A., Zinchenko I. I., Zemlyanukha P. M., Thomasson M.* A Survey of High Mass Star Forming Regions in the Lines of Deuterated Molecules // *Astr. Rep.* — 2020. — Vol. 64, № 3. — P. 244–258.
- [3] *Ladeyschikov D. A., Bayandina O. S., Sobolev A. M.* Online Database of Class I Methanol Masers // *Astron. J.* — 2019. — Vol. 158, № 6. — P. 233.
- [4] *Zinchenko I., Caselli P., Pirogov L.* Chemical differentiation in regions of high-mass star formation — II. Molecular multiline and dust continuum studies of selected objects // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 395. — P. 2234–2247.
- [5] *Zavagno A., Deharveng L., Caplan J.* A new young stellar object in the S 187 complex : photometry and spectroscopy // *Astron. Astrophys.* — 1994. — Vol. 281. — P. 491–504.
- [6] *Di Francesco J., Johnstone D., Kirk H. et al.* The SCUBA Legacy Catalogues: Submillimeter-Continuum Objects Detected by SCUBA // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2008. — Vol. 175, № 1. — P. 277–295.
- [7] *Kauffmann J., Bertoldi F., Bourke T. L. et al.* MAMBO mapping of Spitzer c2d small clouds and cores // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 487, № 3. — P. 993–1017.
- [8] *Ossenkopf V., Henning Th.* Dust opacities for protostellar cores. // *Astron. Astrophys.* — 1994. — Vol. 291. — P. 943–959.
- [9] *Hacar A., Bosman A. D., van Dishoeck E. F.* HCN-to-HNC intensity ratio: a new chemical thermometer for the molecular ISM // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 635. — P. A4.
- [10] *Pazukhin A. G., Zinchenko I. I., Trofimova E. A. et al.* Variations of the HCO⁺, HCN, HNC, N₂H⁺, and NH₃ deuterium fractionation in high-mass star-forming regions // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2023. — Vol. 526, № 3. — P. 3673–3696.
- [11] *Bertoldi F., McKee Ch. F.* Pressure-confined Clumps in Magnetized Molecular Clouds // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 395. — P. 140.