

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СГУСТКОВ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S254—S258

Е. А. Попова¹, Д. А. Ладейщиков¹, М. С. Кирсанова², А. М. Соболев¹

¹Уральский федеральный университет,

²Институт астрономии Российской академии наук

Работа посвящена исследованию физических параметров газопылевых сгустков в области звездообразования S254—S258. Были определены лучевые концентрации молекулярного газа, массы сгустков и оптические толщины линий-трассеров плотного газа. Для вычисления физических параметров использованы различные линии молекулы CO, излучение в континууме на 1.1 мм и карты поглощения в ближнем ИК-диапазоне. Дополнительно использованы данные по излучению молекул CS и HCO⁺, охватывающие часть изучаемой области. В работе сделаны выводы о распределении плотного газа в области звездообразования. Значения физических параметров, полученных в разных трассерах газа и пыли, имеют различия, причины которых рассмотрены в работе.

PHYSICAL PARAMETERS OF MOLECULAR CLUMPS IN THE S254—S258 STAR FORMATION REGION

E. A. Popova¹, D. A. Ladeyschikov¹, M. S. Kirsanova², A. M. Sobolev¹

¹Ural Federal University,

²Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

This research is focusing on studying of physical parameters in the S254—S258 star-formation complex. The following parameters were derived: column densities, clump masses, and high-density tracers optical depth, including CS and HCO⁺ molecules. Different gas and dust tracers maps were used, including CO molecular lines, Bolocam 1.1 mm continuum emission and near-infrared extinction map. We also used the available CS and HCO⁺ data, which cover part of the S254-S258 region to make conclusions regarding the distribution of high-density gas. The resulted values of physical parameters obtained through different tracers are slightly different. The discussion about the possible reason for the difference is provided.

Размер исследуемой области звездообразования S254—S258 составляет 21' × 15'. В ней проявляются разнообразные структуры, среди которых присутствуют молекулярные сгустки, крупномасштабные волокна и диффузный газ. В работе проведен анализ карт различных трассеров газа и пыли, а также построенных по ним карт лучевых концентраций и масс на пиксель. Из последних также определены массы сгустков путем интегрирования по занимаемой ими площади.

На картах лучевой концентрации, полученных по данным со спутника Herschel [1], проявляются следующие яркие газопылевые сгустки в области звездообразования S254-S258: S258, G192.63+0.00, S255N, S256-south, G192.75-0.08 и G192.69-0.25. Сгустки выделены в тех областях, в которых присутствуют молодые звездные скопления по данным Spitzer. Сгусток G192.75-0.00, который не имеет выраженного излучения в данных Herschel, также был взят для рассмотрения, поскольку он содержит яркие пики в линиях CO и на карте поглощения. В рамках настоящей работы исследованы только те молекулярные сгустки, которые ассоциированы со скоплениями молодых звездных объектов (МЗО) из работы [2].

Границы сгустков определялись лучевой концентрацией молекулы H₂ по карте Herschel либо контурами численности МЗО на уровне пяти звезд пк⁻² в случае G192.75-0.00 в связи

со слабым излучением в этой карте. Расстояние до области S254-S258 принято равным 1.59 кпк.

Для оценки лучевой концентрации необходимо знание температуры возбуждения и оптической толщины, которые могут быть однозначно определены при использовании по крайней мере двух линий (основной и ее менее обильной изотопической разновидности). В случае с линиями трассеров высокоплотного газа CS(2–1) и HCO⁺(1–0) расчеты были выполнены не для всех сгустков, а для пяти положений с доступными спектрами в линиях C³⁴S(2–1) и H¹³CO⁺(1–0). В работе также использовались данные трассирующих газ промежуточной плотности молекул ¹²CO и ¹³CO в переходах (1–0) из работы [2] и (2–1) из работы [3].

Оптическая толщина (в центре линии и интегральная) оценивались из следующих соотношений температур главного луча и соответственно интегральных температур по формулам (1):

$$\frac{T_{\text{mb[isotope]}}}{T_{\text{mb[main]}}} = \frac{1 - e^{-\tau_0/R}}{1 - e^{-\tau_0}}; \quad \frac{\int T_{\text{mb[isotope]}}}{\int T_{\text{mb[main]}}} = \frac{1 - e^{-\int \tau/R}}{1 - e^{-\int \tau}}, \quad (1)$$

здесь τ_0 — оптическая толщина в центре линии и $\int \tau$ — интегральная оптическая толщина. Отношение обилий принято равным R(³⁴S)/R(³²S) = 22 и R(¹²C)/R(¹³C) = 80.

Температура возбуждения была получена из численного решения уравнения переноса излучения: $T_{\text{mb}} = (J_\nu(T_{\text{ex}}) - J_\nu(T_{\text{bg}}))(1 - \exp(-\tau_0))$, где $J_\nu(T) = (h\nu/k)/(\exp(h\nu/[kT]) - 1)$ — модифицированная функция Планка и $T_{\text{bg}} = 2.7$ К для микроволнового фона.

Непосредственно лучевая концентрация рассчитывалась в предположении ЛТР с применением подхода, описанного в работе [4], с помощью такого выражения (2):

$$N = \frac{\tau}{1 - \exp(-\tau)} \frac{3h}{8\pi^3 S \mu^2} \frac{Q_{\text{rot}}}{g_J} \frac{\exp(-\frac{E_{\text{tr}}}{kT_{\text{ex}}})}{\exp(\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}) - 1} \frac{1}{f} \int \tau d\nu, \quad (2)$$

где $S = J^2/(J[2J+1])$ для CS и HCO⁺; $S = J^2/([2J+1])$ для CO; $g_J = 2J+1$; вращательная функция распределения $Q_{\text{rot}} \simeq kT_{\text{ex}}/h/B + 1/3$; фактор заполнения диаграммы принят равным $f = 1$.

Получившиеся значения лучевых концентраций CS и HCO⁺ для этих направлений находятся в пределах $N = 0.10 - 6.31 \times 10^{14}$ см⁻² для внешних и внутренних частей скопления S255N соответственно. Для CO лучевую концентрацию считали по переходу (1–0), поскольку его оптическая толщина меньше и он менее подвержен эффекту насыщения. С учетом соотношения обилий молекул [CO]/[H₂] = 8×10^{-5} вычисленные значения лучевой концентрации CO используются для определения N(H₂).

Лучевая концентрация N(H₂) рассчитывается также из теплового излучения Volocam 1.1 мм согласно работе [5] по формуле $N(\text{H}_2) = 2.19 \times 10^{22} [e^{13.0/T_d} - 1] S_{1.1}$ (см⁻²), где $S_{1.1}$ — плотность потока на 1.1 мм в Ян, а T_d — температура пыли. Таким образом, значение лучевой концентрации газа по данным Volocam зависит от температуры пыли, которая меняется с положением.

Карты поглощения в ближнем ИК-диапазоне A_J, созданные при помощи метода NICEST [6] по фотометрии звезд из UKIDSS и 2MASS, тоже применены для расчета лучевой концентрации. Для этого было использовано следующее соотношение между поглощением в ИК-диапазоне и лучевой концентрацией: $N(2\text{H} + \text{H}_2)/A_V = 1.87 \times 10^{21}$ (см⁻²mag⁻¹) [7]. Следует отметить, что в расчет лучевой концентрации из поглощения входят многие неопределенности, которые могут изменять коэффициент конверсии. Карты поглощения, как и данные Herschel, трассируют как ионизованный, так и молекулярный газ.

В свою очередь, для расчета массы, приходящейся на пиксель, из лучевых концентраций использовалась формула $M = N \mu_{\text{H}_2} m_{\text{H}} A$, где $\mu_{\text{H}_2} = 2.8$ — средний молекулярный вес

Параметры сгустков в регионе S254–S258

Название	Масса сгустка, M_{\odot}					$N(H_2), \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$				
	Herschel		A _J	CO	Bolocam	Herschel		A _J	CO	Bolocam
	70–500 μm	160–500 μm	1–0	1–0	1.1 мм	70–500 μm	160–500 μm	1–0	1–0	1.1 мм
S255N	1285	2812	1700	2638	875	19.34	39.96	26.35	47.56	13.51
S256-south	1399	2158	2267	2669	170	12.12	17.56	19.41	23.64	1.45
G192.63-0.00	431	621	616	886	62	8.13	11.11	11.44	16.19	1.2
S258	218	399	445	524	117	8.31	14.31	16.35	18.94	4.59
G192.75-0.08	339	603	676	576	64	8.69	14.5	18.12	10.84	1.66
G192.69-0.25	117	219	135	117	15	7.23	12.81	8.44	9.27	0.96
G192.75-0.00	34	92	89	71	2	3.28	8.23	7.96	7.97	0.2

межзвездной среды; m_H — это масса атома водорода; A — размер пикселя карты в cm^2 . Параметры сгустков (массы и лучевые концентрации) по различным трассерам приведены в таблице и согласуются с данными в работах [3] и [2].

Все имеющиеся данные использовались для анализа распределения вещества в регионе. Мы разделили скопления на два основных типа: основное облако газа и изолированные сгустки. Скопления S258, G192.63-0.00, S255N и S256-south имеют газовые мосты, т. е. они непрерывно связаны между собой в линиях CO и картах поглощения, поэтому могут рассматриваться как различные части одного молекулярного облака. Скопления G192.75-0.08, G192.69-0.25 и G192.75-0.00 расположены на некотором расстоянии от основного облака и не имеют газовых мостов к основному облаку по всем доступным трассерам (мы не предполагаем данными по высокоплотному газу между ними). Их можно рассматривать как изолированные сгустки.

Проанализированы карты трассеров высокой плотности (карты в линиях $\text{HCO}^+(1-0)$ и $\text{CS}(2-1)$) для областей III S258, S256, S255, S257 и звездных скоплений G192.75-0.08, G192.63-0.00, S256-south. Они подтверждают наличие плотного газа в рассматриваемых областях. Кроме того, данные в линии HCO^+ показывают наличие непрерывной связи между скоплениями S255N и S256-south на уровне 6σ . Наличие газа высокой плотности в среде между сгустками говорит о том, что эти скопления могут быть физически и эволюционно связаны между собой. Между областями III S255 и S258 не зарегистрировано такой связи с достаточным уровнем сигнала, — эти регионы могут быть эволюционно не связаны друг с другом. Карта лучевой концентрации CO показывает диффузное излучение в среде между областями III S255 и S258. Однако это излучение может быть вызвано большой протяженностью газа вдоль луча зрения, что приводит к высоким значениям лучевой концентрации.

Из анализа масс и лучевых концентраций каждого скопления обнаружено, что во всех трассерах газа, за исключением Bolocam, они имеют значительную корреляцию. По данным Bolocam, лучевая концентрация занижена из-за влияния температуры холодных сгустков, входящей в расчеты. По карте Herschel наибольшие значения лучевой концентрации обнаружили в направлении сгустка S255N. Наиболее массивные сгустки — S255N (1285 M_{\odot}) и S256-south (1399 M_{\odot}). Они содержат 70 % от массы наших отобранных сгустков и 28 % массы всего изучаемого региона, содержащего все другие сгустки и среду между ними. При этом область, занимаемая сгустками, составляет только 12 % изучаемого региона.

Скопления S256-south и G192.75-0.08 проявляются на карте Bolocam на уровне 2–3 σ , но другие трассеры проявляют относительно яркое излучение, связанное с этими скоплениями. Слабое излучение Bolocam в скоплении S256-south и G192.75-0.08 можно объяснить низкой средней температурой пыли в этих областях (13–16 K) по сравнению с другими областями (19–20 K для S255N и S258). Физическая интерпретация состоит в том, что карта Bolocam показывает нагретую пыль, которая определяет общую поступающую энергию от источников тепла. Излучение HCO^+ показывает области фотодиссоциации, т. е. обна-

руживает УФ-излучение от источников тепла. Интенсивность излучения $\text{HCO}^+(1-0)$ почти одинакова для регионов S258 и S256-south ($T_{\text{mb}} = 1.5$ К). Однако излучение Bolocam ярче в S258. Поэтому можно сделать вывод, что источник нагрева в области НИ S258 создает больше теплового излучения, чем в области НИ S256, что может быть связано с различием спектральных классов источников нагрева либо с несколькими источниками нагрева в регионе НИ S258. Скопление МЗО там может содержать несколько звезд, которые не продуцируют интенсивное УФ-излучение, а только нагревают окружающий газ. Это излучение может привести к более высокой температуре пыли в области S258 по сравнению с S256-south и более яркому излучению Bolocam на 1.1 мм. Однако для прояснения ситуации требуется больше данных для регионов S258 и S256-south.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-02-00917.

Библиографические ссылки

- [1] *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.
- [2] *Chavarría L. A., Allen L. E., Hora J. L. et al.* Spitzer Observations of the Massive Star-forming Complex S254-S258: Structure and Evolution // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 682. — P. 445–462.
- [3] *Bieging J. H., Peters W. L., Vila Vilaro B. et al.* Sequential Star Formation in the Sh 254-258 Molecular Cloud: Heinrich Hertz Telescope Maps of CO J = 2-1 and 3-2 Emission // *Astron. J.* — 2009. — Vol. 138. — P. 975–985.
- [4] *Mangum J. G., Shirley Y. L.* How to Calculate Molecular Column Density // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2015. — Vol. 127. — P. 266.
- [5] *Bally J., Aguirre J., Battersby C. et al.* The Bolocam Galactic Plane Survey: $\lambda = 1.1$ and 0.35 mm Dust Continuum Emission in the Galactic Center Region // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 721. — P. 137–163.
- [6] *Juvela M., Montillaud J.* Near-infrared extinction with discretised stellar colours // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 585. — P. A78.
- [7] *Bohlin R. C., Savage B. D., Drake J. F.* A survey of interstellar H I from Lambda absorption measurements. II. // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 224. — P. 132–142.