

Физические параметры молекулярных сгустков в области звездообразования S254-S258

Е. А. Попова¹, Д. А. Ладейщиков¹, М. С. Курсанова², А. М. Соболев¹

¹Уральский федеральный университет
²Институт астрономии РАН

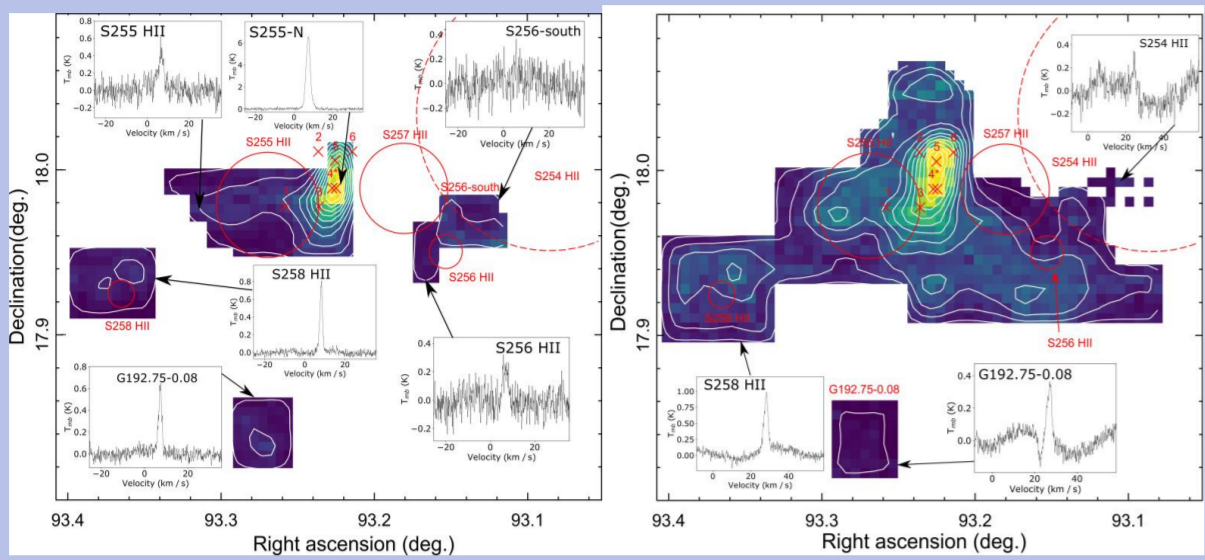


Рисунок 2. Карты интегральной антенной температуры линий CS(2-1) (панель слева) и HCO⁺(1-0) (панель справа). Красными окружностями показаны видимые размеры областей НН на изображениях DSS-R. Спектры для некоторых направлений показаны во врезках. Контуры для линии HCO⁺(1-0) (панель справа) нанесены от 0,6 К км с⁻¹ до 5,6 К км с⁻¹ с шагом 0,45 К км с⁻¹. Для карты в линии CS(2-1) (панель слева) контуры нанесены от 0,56 К км с⁻¹ до 9,13 К км с⁻¹ с шагом 0,78 К км с⁻¹.

В работе были определены лучевые концентрации и массы газа по различным трассерам газа и пыли, в том числе по излучению различных линий молекулы CO, поглощению света в ближнем ИК-диапазоне и излучению пыли по данным Bolocam и Herschel. Карты лучевых концентраций, полученные по ним, представлены на Рисунке 1. По линиям-трассерам плотного газа CS(2-1) и HCO⁺(1-0) получены оценки оптической толщины и температуры возбуждения в отдельных направлениях (на Рисунке 2 они показаны крестами).

Здесь были исследованы молекулярные сгустки, связанные со скоплениями МЗО из работы [1]. Границы сгустков получены из контуров лучевой концентрации по данным ViaLactea (Herschel) [1]: 5,8 × 10²¹ см⁻² для S258, G192.63-0.00, G192.75-0.08, G192.69-0.25 и 8,9 × 10²¹ см⁻² для областей S255N и S256-south. В связи с отсутствием излучения Herschel в сгустках G192.75-0.00 и G192.54-0.15 использованы контуры плотности МЗО на уровне пяти звезд пк⁻² из работы [1] как границы этих сгустков. Расстояние до региона S254-S258 принято равным 1,59 кпк.

По имеющимся данным было проанализировано распределение вещества в регионе S254-S258 и степень соответствия найденных физических параметров по различным трассерам.

Трассеры высокоплотного газа: CS, HCO⁺. Расчет лучевой концентрации. Оптическая толщина

Для расчёта лучевой концентрации молекул необходимо знание по крайней мере двух линий (основная и менее обильная изотопическая разновидность) для однозначного определения температуры возбуждения и оптической толщины. В нашем случае мы имеем карты CS и HCO⁺, но данные по линиям молекул H¹³CO⁺ и C³⁴S доступны только для шести положений вблизи центрального яркого скопления S255N. Таким образом, лучевая концентрация может быть рассчитана однозначно только в направлении с доступными значениями интенсивностей линий молекул C³⁴S и H¹³CO⁺.

В Таблице 1 представлены наблюдаемые параметры линий C³⁴S и H¹³CO⁺ вместе с данными CS и HCO⁺ для одинаковых направлений для сравнения интенсивностей, что позволяет рассчитать лучевые концентрации и оптические толщины линий. Каждая точка наблюдений, представленная в Таблице 1, также обозначена крестом на Рисунке 2.

В работе была получена оценка оптической толщины в центре линии из отношения интенсивностей $T_R(C^{34}S)/T_R(CS)$ и $T_R(H^{13}CO^+)/T_R(HCO^+)$ с использованием следующей формулы (1):

$$\frac{T_R(C^{34}S, H^{13}CO^+)}{T_R(CS, HCO^+)} = \frac{1 - e^{-\tau_0/R}}{1 - e^{-\tau_0}}, \quad (1)$$

где τ_0 это оптическая толщина в центре линии. Аналогичная формула использована для расчёта интегральной оптической толщины, но с использованием интегральной антенной температуры. Отношение обилий принято равным $R(C^{34}S)/R(CS) \approx 22$ и $R(H^{13}CO^+)/R(HCO^+) \approx 80$. Температура возбуждения получена из численного решения уравнения переноса излучения: $T_{mb} = [J_\nu(T_{ex}) - J_\nu(T_{bg})] / (1 - \exp(-\tau_0))$, где J_ν - модифицированная функция Планка $J_\nu(T) = (h\nu/k) / \exp(h\nu/kT) - 1$.

Лучевая концентрация CS и HCO⁺ в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР) была рассчитана с использованием подхода, описанного в [5].

$$N_{thin} = \frac{3h}{8\pi^3 S \mu^2 R_i} \times \frac{Q_{rot}}{g_l g_k g_b} \times \frac{\exp(-E_{up}/kT_{ex})}{\exp(-h\nu/kT_{ex}) - 1} \times \frac{1}{J_\nu(T_{ex}) - J_\nu(T_{bg})} \int T_{mb} dv, \quad (2)$$

где $S = J/J(1 + J)$, $g_l = 2l + 1$, $g_k = 1$, $g_b = 1$, вращательная функция распределения $Q_{rot} \approx kT_{ex}/hB + 1/3$ и модифицированная функция Планка $J_\nu(T)$. Фактор заполнения диаграммы принят равным $f = 1$, $T_{bg} = 2,7$ К. Так как линии CS и HCO⁺ являются оптически толстыми ($\tau \geq 1$), в расчёт лучевой концентрации введён фактор коррекции оптической толщины из [6]: $N_{tot} = N_{thin} / (1 - \exp(-\tau))$, где τ - интегральная оптическая толщина. Вращательная константа B_{rot} и дипольный момент μ были взяты из базы данных Кельна для молекулярной спектроскопии, энергия верхнего уровня E_u берется из базы данных атомов и молекул Лейдена. Результаты расчетов лучевой концентрации в направлении 5 точек для молекул CS и HCO⁺ представлены в Таблице 1.

Данные ¹³CO(2-1) и ¹³CO(1-0). Температура возбуждения. Определение массы сгустков

Расчет лучевой концентрации CO выполнен с помощью той же техники, которая описана выше. В формуле 2 для молекулы CO мы используем значение $S = J/J(1 + J)$, как описано в [5]. В первую очередь оба перехода молекулы CO: (1-0) [1] и (2-1) [3] были использованы для получения независимых оценок температуры возбуждения и оптической толщины. Температура возбуждения определена из оптически толстой линии ¹³CO ($\tau \gg 1$) с помощью решения уравнения переноса излучения:

$$T_{ex} = T_0 / \ln \left(1 + \frac{T_0}{T_B^2 + T_0 / (e^{T_0/T_{bg}} - 1)} \right), \quad (3)$$

где T_B^2 - яркостная температура линии ¹³CO в пике. Коэффициент $T_0 = h\nu/k$ равен 5,53 К для линии ¹³CO(1-0) и 11,06 К для линии ¹³CO(2-1). В данном случае принят во внимание микроволновый фон $T_{bg} = 2,7$ К. Здесь считается, что $T_B = T_{mb}$, так как средний размер источника в линиях излучения молекулы ¹³CO и ¹³CO больше чем размер диаграммы направлений. Оценка оптической толщины (пиковый и интегральный) произведена по отношению интенсивностей линий ¹³CO(1-0) и ¹³CO(2-1) с использованием формулы (1).

Анализ полученных значений оптических толщин указывает, что переход (1-0) является более оптически тонким, а значит он более глубоко отражает структуру молекулярного облака. Именно данные в переходе (1-0) будут использоваться для оценки лучевой концентрации CO.

Лучевая концентрация CO рассчитана по формуле (2) для перехода (1-0) с использованием фактора коррекции оптической толщины. Перевод из N(CO) в N(H₂) произведён с помощью отношения обилия $[CO]/[H_2] = 8 \times 10^{-5}$. Масса для каждого пикселя карты рассчитана по следующему выражению: $M = N(H_2) \mu_{H_2} m_{H_2} A$, где $\mu_{H_2} = 2,8$ - это средний молекулярный вес межзвездной среды, m_{H_2} - это масса атома водорода, A - площадь одного пикселя в см². Массы молекулярных сгустков рассчитаны с помощью интегрирования карт масс на пиксель по контурам сгустков.

Данные в континууме на 1.1 мм (Bolocam)

Лучевая концентрация, рассчитанная из излучения пыли на 1.1 мм, зависит от температуры пыли, которая меняется с положением. Это приводит к существенным различиям между лучевой концентрацией по данным Bolocam и другими трассерами. Мы полагаем, что газ и пыль связаны столкновительно, т.е. делаем упрощающее предположение, что $T_d = T_k$. Затем мы использовали формулы для расчёта лучевой концентрации газа использовав формулу из [7].

$$N(H_2) = 2,19 \times 10^{22} [e^{13,0/T_d} - 1]^{-1} S_{1.1} (cm^{-2}), \quad (4)$$

где $S_{1.1}$ это плотность потока в Ян на 1.1 мм.

Поглощение света в ближнем ИК-диапазоне

Карты поглощения так же были использованы для расчета лучевой концентрации газа в области S254-S258. Они были построены по фотометрическим данным обзоров UKIDSS и 2MASS в ближнем инфракрасном диапазоне с помощью метода NICEST, реализация которого описана в работе [8]. Метод основан на сравнении наблюдаемых цветов в полосах J, H и K с собственными цветами звезд без поглощения. Для перевода из поглощения в лучевую концентрацию газа использовано соотношение $N(H_2 + H) / A_V = 1,87 \times 10^{21} (cm^{-2} mag^{-1})$ [9]. Следует отметить, что карты поглощения, как и данные Herschel, трассируют как ионизованный и молекулярный газ (H₂ + H). Поэтому между массой газа по линиям CO, которые трассируют только молекулярный газ (H₂) и массой газа по поглощению может быть расхождение. Различные параметры сгустков по разным трассерам приведены в Таблице 2 и на рисунке 3.

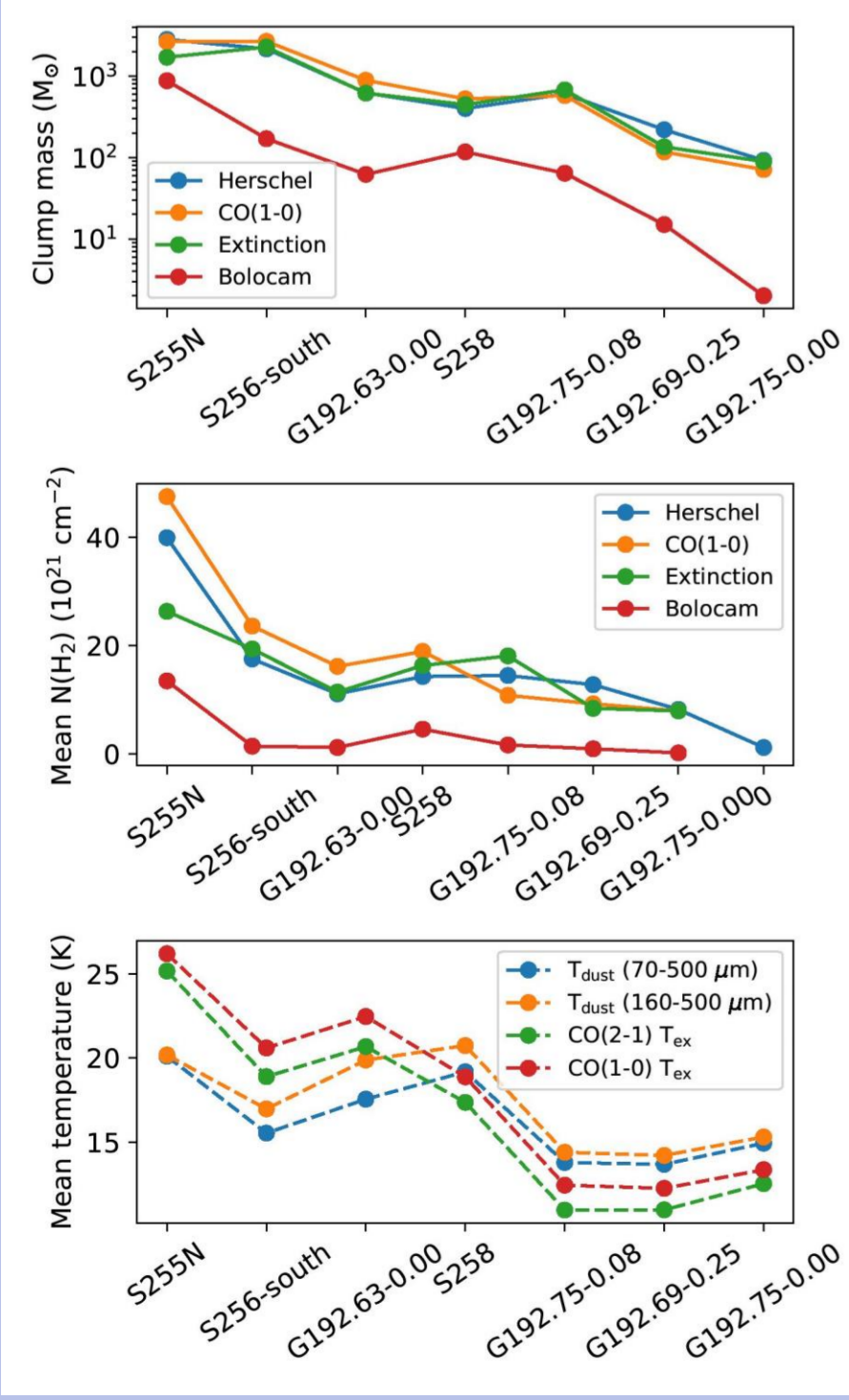


Рисунок 3. Массы (верхняя панель), средние лучевые концентрации (средняя панель) и средние температуры (нижняя панель) молекулярных сгустков, ассоциированных со звездными скоплениями в регионе S254-S258.

Таблица 2. Массы, средние лучевые концентрации и оценки температур молекулярных сгустков в области звездообразования S254-S258 из различных трассеров газа и пыли.

Название сгустка	N(H ₂), 10 ²¹ cm ⁻²				
	Herschel		A _J	CO	Bolocam
	70-500 μm	160-500 μm		(1-0)	1.1 мм
S255N	19.34	39.96	26.35	47.56	13.51
S256-south	12.12	17.56	19.41	23.64	1.45
G192.63-0.00	8.13	11.11	11.44	16.9	1.2
S258	8.31	14.31	16.35	18.94	4.59
G192.75-0.08	8.69	14.5	18.12	10.84	1.66
G192.69-0.25	7.23	12.81	8.44	9.27	0.96
G192.75-0.00	3.28	8.23	7.96	7.97	0.20

Название сгустка	Масса сгустка, M _☉				
	Herschel		A _J	CO	Bolocam
	70-500 μm	160-500 μm		(1-0)	1.1 мм
S255N	1285	2812	1700	2638	875
S256-south	1399	2158	2267	2669	170
G192.63-0.00	431	621	616	886	62
S258	218	399	445	524	117
G192.75-0.08	339	603	676	576	64
G192.69-0.25	117	219	135	117	15
G192.75-0.00	34	92	89	71	2

Название сгустка	T _{mb} , K			T _{ex} , K	
	70-500 μm	160-500 μm		(1-0)	(2-1)
S255N	20.11	20.18	26.21	25.18	
S256-south	15.53	16.97	20.6	18.89	
G192.63-0.00	17.55	19.88	22.47	20.68	
S258	19.18	20.74	18.88	17.36	
G192.75-0.08	13.78	14.39	12.43	10.95	
G192.69-0.25	13.67	14.2	12.24	10.96	
G192.75-0.00	14.93	15.3	13.35	12.56	

Распределение вещества в регионе по различным трассерам

Скопления были разделены на два основных типа: основное облако газа и изолированные сгустки. Скопления S258, G192.63-0.00, S255N и S256-south имеют газные мосты в картах CO и поглощения, т.е. они непрерывно связаны между собой. Таким образом, они могут рассматриваться как различные части главного молекулярного облака в области S254-S258. Скопления G192.75-0.00, G192.69-0.25 и G192.75-0.08 расположены на некотором расстоянии от основного молекулярного облака и не имеют газовых мостов к основному облаку по всем доступным трассерам (¹³CO(1-0), ¹³CO(2-1), поглощение, ViaLactea, Bolocam). Поэтому эти скопления могут рассматриваться как изолированные сгустки по имеющимся данным. Но при появлении данных по излучению плотного газа в пространстве между сгустками данный вывод может быть пересмотрен.

Были проанализированы карты трассеров высокой плотности (карты в линиях HCO⁺(1-0) и CS(2-1)) для областей НН 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 5σ. Наличие газа высокой плотности в среде между сгустками говорит о том, что эти скопления могут быть физически и эволюционно связаны между собой. Между областями НН 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 НН 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 массы всех скоплений во всех трассерах газа за исключением Bolocam имеют значительную корреляцию. Оценка массы и лучевой концентрации из излучения Bolocam значительно ниже из-за влияния температуры - более холодные сгустки имеют меньшую интенсивность излучения. Таким образом, лучевая концентрация по ним занижена. Наибольшие значения лучевой концентрации обнаружены в направлении сгустка S255N (среднее значение составляет 4,0 × 10²² см⁻² по данным CO и Herschel). Наиболее массивные сгустки это S255N и S256-south (~2600 M_☉ по данным CO).

Скопления S256-south и G192.75-0.08 проявляются на карте Bolocam на уровне 2-3σ, но другие трассеры проявляют относительно яркое излучение, связанное с этими скоплениями. Слабое излучение Bolocam в скоплениях S256-south и G192.75-0.08 может объясняться низкой средней температурой пыли в этих областях (13-15 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. обнаруживает УФ-излучение от источников тепла. Интенсивность излучения HCO⁺(1-0) почти одинакова как для регионов S258 и S256-south (T_{mb} = 1.5 K). Однако, излучение Bolocam ярче в S258. Поэтому можно сделать вывод, что источник нагрева в области НН S258 создает больше теплового излучения, чем в области НН S256, что может быть связано с различием спектральных классов источников нагрева либо с несколькими источниками нагрева в регионе НН 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.

Список литературы:

- 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.
- Marsh K. A., Whitworth A. P., Lomax O. M. 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.
- 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.
- Ginsburg A., Glenn J., Rosolowsky E. et al. The Bolocam Galactic Plane Survey. IX. Data Release 2 and Outer Galaxy Extension // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* - 2013. - Vol. 208. - P. 14.
- Mangum J. G., Shirley Y. L. How to Calculate Molecular Column Density // *Public. Astron. Soc. Pacific.* - 2015. - Vol. 127. - P. 266.
- Goldsmith P., Langer W. Population Diagram Analysis of Molecular Line Emission // *Astrophys. J.* - 1999. - Vol. 517. - P. 209-225.
- Bally J., Aguirre J., Battersby C. et al. The Bolocam Galactic Plane Survey: λ = 1.1 and 0.35 mm Dust Continuum Emission in the Galactic Center Region // *Astrophys. J.* - 2010. - Vol. 721. - P. 137-163.
- Juvela M., Montillaud J. Near-infrared extinction with discretised stellar colours // *Astron. Astrophys.* - 2016. - Vol. 585. - P. A78.
- Bohlin R. C., Savage B. D., Drake J. F. A survey of interstellar H I from Alpha absorption measurements. II // *Astrophys. J.* - 1978. - Vol. 224. - P. 132-142.