

СТРУКТУРА ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Результаты работы космического телескопа им. Гершеля подтвердили давнюю идею о том, что межзвездные молекулярные облака имеют волокнистую структуру. Было обнаружено, что волокна в молекулярных облаках имеют одинаковую толщину в наиболее плотной их части. Образование волокон — это необходимая стадия, которую проходит межзвездный газ в процессе звездообразования.

Results of Hershel space telescope have confirmed an idea about filamentary structure of interstellar clouds. Shapes of the filaments are quasi-universal and have same radius of flat region in their densest part. Apparently that formation of the filaments is an essential phase of star formation process.

Введение

Межзвездные молекулярные облака неоднородны. Исследования их крупно- и мелкомасштабной структуры ведутся уже несколько десятилетий. Прорывным результатом последних лет стало фактически открытие и определение физических параметров волокнистой структуры молекулярных облаков (filaments). Этот прорыв был совершен в ходе обзора пояса Гулда космическим инфракрасным (ИК) телескопом им. Гершеля (*Herschel* Gould Belt Survey, [1]). Результаты наблюдений говорят о том, что образованию дозвездных ядер (prestellar cores) предшествуют гравитационное сжатие и фрагментация волокон [2]. Само образование волокон может быть необходимой стадией эволюции молекулярных облаков на пути к образованию в них звезд [2, 3].

Физические свойства волокон

Отличительное свойство волокон в молекулярных облаках — это универсальность их свойств. Для того чтобы восстановить распределение вещества в волокне по его ИК-изображениям в диапазоне от 70 до 500 мкм, применяют следующую процедуру. Для каждого

пикселя на изображении полагают, что распределение интенсивности излучения по частоте I_ν зависит только от температуры пыли T_d и ее оптических свойств τ_ν следующим образом: $I_\nu = B_\nu(T_d)(1 - e^{-\tau_\nu})$. Затем подбирают параметры T_d и τ_ν так, чтобы теоретическое распределение I_ν совпадало с наблюдаемым в каждом пикселе [4].

В результате данной процедуры в волокне выделяют наиболее плотную центральную часть — хребет. Эту одномерную структуру окружает газ, плотность которого спадает по мере удаления от хребта. Радиальный профиль волокна может быть с хорошей точностью приближен формулой для цилиндра

$$\rho(r) = \frac{\rho_c}{[1 + (r/R_{\text{flat}})^2]^{\frac{p}{2}}},$$

где полуширина хребта волокна R_{flat} практически универсальна для областей образования звезд разных масс и составляет около 0.1 пк, а наклон $p \sim 2$ [3]. Длина волокон варьируется от 2 до примерно 10 пк.

Волокна в областях образования звезд малых масс отличается значительно меньшей массой газа в единице длины, чем в областях образования массивных звезд. Например, в области образования звезд малых масс в направлении созвездия Муха масса в единице длины $M_{\text{line}} = 20\text{--}30 M_\odot/\text{пк}$ [5], а в массивном NGC 6334 $M_{\text{line}} = 500\text{--}2000 M_\odot/\text{пк}$ [3].

Гравитационное сжатие и фрагментация

Наблюдения показывают, что «Гершель» обнаружил дозвездные ядра и признаки звездообразования в тех волокнах, где масса молекулярного газа на единицу длины превышает критическое значение $M_{\text{line}} > M_{\text{crit}} = 2c_s^2/G$, где c_s — скорость звука, а G — гравитационная постоянная [2]. В этом случае волокно становится гравитационно неустойчивым для радиального сжатия и фрагментации вдоль волокна [6]. Для молекулярного облака с типичной температурой газа $T_{\text{gas}} = 10$ К, $c_s = 0.2$ км/с и $M_{\text{crit}} = 16 M_\odot/\text{пк}$. Далее, следуя выкладкам из работы [7], можно подсчитать пороговое значение лучевой концентрации молекулярного водорода, при которой волокно становится гравитационно неустойчивым: $N_{\text{H}_2}^0 = 8 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. В волокнах из созвездия Муха среднее значение $N_{\text{H}_2} < N_{\text{H}_2}^0$, но присутствуют фрагменты с более высокой N_{H_2} . Параметры этих волокон

и их структура не противоречат модели цилиндра, сжатого внешним давлением [5]. В области NGC 6334 $N_{\text{H}_2} \gg N_{\text{H}_2}^0$ и наблюдается несколько очагов звездообразования, в том числе с массивными звездами.

Характерный размер и турбулентное происхождение волокон

Анализ изображений «Гершеля» показал, что помимо гравитационно-связанных волокон существуют также и несвязанные в полупрозрачных (translucent) облаках, например, в направлении Полярной звезды [8]. Поэтому было высказано предположение, что не сила гравитации играет основную роль в формировании волокон, а крупномасштабные турбулентные движения, см., напр., [7]. Наблюдения радиолиний молекулы CO показал, что в масштабе 0.1 пк структура скоростей в молекулярных облаках становится связной, а в пределах фактора 2 этот масштаб соответствует шкале, на которой турбулентность переходит из сверхзвукового в дозвуковой режим, напр., [9]. Волокна могут быть образованы в результате сжатия молекулярных облаков ударными волнами в тех местах, где фронты распространения волн пересекаются. Сжатие при этом максимальное, а дисперсия скоростей минимальна. Наблюдатель видит эти места как волокна со связной структурой скоростей, причем ширина спектральных линий будет практически постоянной по всей длине волокон [9].

Гравитационно-несвязанные волокна со средней $N_{\text{H}_2} < N_{\text{H}_2}^0$ (или $M_{\text{line}} < 16 M_{\odot}/\text{пк}$) могут в дальнейшем разрушаться из-за воздействия новых ударных волн. Для типичного значения дисперсии скоростей в областях образования массивных звезд $\sigma = 0.3$ км/с и толщины волокна 0.1 пк это время составляет примерно 300 000 лет [7], что существенно меньше времени существования молекулярных облаков. Было высказано предположение, что внешнее давление способно предотвратить разрушения таких волокон. Возможно, это одна из причин того, что наблюдаются гравитационно-несвязанные волокна.

Наблюдения гравитационно-связанных волокон показали, что, по-видимому, происходит рост линейной массы M_{line} со временем из-за аккреции на центральные части волокон окружающего газа. Перпендикулярно хребту волокна наблюдаются «струйки» газа или субволокон, через которые и происходит рост его массы [10]. При

этом аккрецировавший газ сжимается и волокно сохраняет толщину ≈ 0.1 пк. При моделировании волокон в форме сжимающихся цилиндров с физическими условиями, типичными для молекулярных облаков нашей Галактики, численное значение длины волны Джинса оказывается близко к 0.1 пк [11].

Одновременно с крупномасштабной аккрецией газа на гравитационно-связанное волокно и его сжатием происходит также фрагментация волокна с образованием квазисферических дозвездных ядер [6]. Последующий локальный коллапс ядер происходит быстрее, чем сжатие волокна как целого, напр., [12], поэтому вполне естественно, что вдоль волокон наблюдаются области образования звезд.

Функция масс

Предполагая, что звезды образуются в волокнах, можно ожидать, что особенности фрагментации волокон должны объяснять вид начальной функции масс звезд и функции масс плотных дозвездных ядер. Последняя имеет пик на значении массы $0.6 M_{\odot}$. Оно хорошо согласуется с джинсовской массой для фрагментации и локального коллапса в волокне, которое находится на грани гравитационной связности и имеет ширину 0.1 пк и $M_{\text{line}} = 16 M_{\odot}/\text{пк}$. Кроме того, наблюдения «Гершеля» показали, что медиана проекции расстояния между плотными ядрами 0.09 пк в волокнах в направлении созвездия Орла грубо согласуется с оценкой джинсовской длины для волокна в «критических» условиях (см. предыдущий раздел). Степенной закон начальной функции масс звезд $dN/dM \sim M^{-2.35}$ близок к распределению масс ядер в волокнах, найденных «Гершелем» в поясе Гулда [1]. Степенной закон $M^{-2.5}$ имеет функция масс плотных ядер в результате фрагментации неоднородных молекулярных облаков с начальным спектром флуктуаций плотности $P(k) \sim k^{-1.5}$ в расчетах [13]. Результаты наблюдений «Гершеля» же показали, что флуктуации лучевой концентрации молекул водорода N_{H_2} имеют близкий спектр $P(k) \sim k^{-1.6}$ [14]. Таким образом, часть вопросов о происхождении начальной функции масс нашла ответы.

Образование волокнистых молекулярных облаков

Идея об образовании волокон — резервуаров сжатого газа — в результате действия турбулентности в молекулярных облаках проливает свет на начальные условия звездообразования: место и функцию масс. Однако при этом остается открытым вопрос о происхождении самих неоднородных молекулярных облаков волокнистой формы. В работе [10] было показано, что образование облаков происходит при многократном прохождении ударных волн по межзвездному изначально атомарному газу. Источниками ударных волн являются расширяющиеся оболочки сверхновых и областей НШ. В моделях образования намагниченных облаков ожидается, что они образуются только в тех местах, где направление магнитного поля параллельно направлению распространения ударных волн. Поэтому лишь в ограниченной части старого остатка сверхновой или оболочки области НШ могут образоваться молекулярные облака. Поскольку в Галактике много расширяющихся оболочек, то вполне естественно обнаруживать в наблюдениях молекулярные облака на их пересечении, как происходит, например, в комплексе звездообразования S231—S235 [15, 16].

Заключение

Идеи о том, что молекулярные облака обладают волокнистой структурой и что в них присутствуют когерентные по скорости участки, идентифицированные сегодня с хребтами волокон, были высказаны примерно 20 лет назад. Но только с проявлением высококачественных наблюдательных данных эти идеи нашли подтверждение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16—02—00834 А.

Библиографические ссылки

1. *André P., Di Francesco J., Ward-Thompson D. et al.* From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 27—51.

2. *André P., Men'shchikov A., Bontemps S. et al.* From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L102.
3. *André P., Revéret V., Könyves V. et al.* Characterizing filaments in regions of high-mass star formation: High-resolution submillimeter imaging of the massive star-forming complex NGC 6334 with ArTéMiS // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 592. — P. A54.
4. *Könyves V., André P., Men'shchikov A. et al.* The Aquila prestellar core population revealed by Herschel // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L106.
5. *Kainulainen J., Hacar A., Alves J. et al.* Gravitational fragmentation caught in the act: the filamentary Musca molecular cloud // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A27.
6. *Inutsuka S.-i., Miyama S. M.* A Production Mechanism for Clusters of Dense Cores // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 480. — P. 681–693.
7. *Arzoumanian D., André P., Peretto N., Könyves V.* Formation and evolution of interstellar filaments. Hints from velocity dispersion measurements // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 553. — P. A119.
8. *Men'shchikov A., André P., Didelon P. et al.* Filamentary structures and compact objects in the Aquila and Polaris clouds observed by Herschel // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L103.
9. *Goodman A. A., Barranco J. A., Wilner D. J., Heyer M. H.* Coherence in Dense Cores. II. The Transition to Coherence // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 504. — P. 223–246.
10. *Inutsuka S.-i., Inoue T., Iwasaki K., Hosokawa T.* The formation and destruction of molecular clouds and galactic star formation. An origin for the cloud mass function and star formation efficiency // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 580. — P. A49.
11. *Inutsuka S.-I., Miyama S. M.* Self-similar solutions and the stability of collapsing isothermal filaments // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 388. — P. 392–399.
12. *Pon A., Johnstone D., Heitsch F.* Modes of Star Formation in Finite Molecular Clouds // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 740. — P. 88.
13. *Inutsuka S.-i.* The Mass Function of Molecular Cloud Cores // *Astrophys. J. Lett.* — 2001. — Vol. 559. — P. L149–L152.

14. *Roy A., André P., Arzoumanian D. et al.* Possible link between the power spectrum of interstellar filaments and the origin of the prestellar core mass function // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 584. — P. A111.
15. *Kirsanova M. S., Wiebe D. S., Sobolev A. M. et al.* Physical conditions in star-forming regions around S235 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 437. — P. 1593–1608.
16. *Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Tsvilev A. P., Sobolev A. M.* Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 // *Astrophysical Bulletin.* — 2016. — Vol. 71. — P. 208–224.