

# МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ВОЛОКНА

**И. И. Зинченко**

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

В последние годы сильно возрос интерес к изучению межзвездных волокон, поскольку благодаря полученным на новых инструментах наблюдательным данным стало понятно, что они играют ключевую роль в процессах звездообразования. К настоящему времени идентифицированы сотни волокон, проведены детальные исследования ряда из них. В данном обзоре суммируются основные результаты наблюдений межзвездных волокон, описываются теоретические модели, в которых рассматриваются строение волокон, их устойчивость и эволюция, а также механизмы образования.

# INTERSTELLAR FILAMENTS

**I. I. Zinchenko**

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*

In recent years, interest in studying interstellar filaments has greatly increased, because, thanks to the observational data obtained with new instruments, it became clear that they play a key role in the star formation processes. To date, hundreds of filaments have been identified, detailed studies have been conducted on a number of them. This review summarizes the main results of observations of interstellar filaments, and also describes theoretical models that consider the structure of filaments, their stability and evolution, as well as the mechanisms of formation.

## Введение

В последние годы взгляды на то, как происходит образование звезд в межзвездных облаках, претерпели существенные изменения. Это произошло благодаря появлению большого массива новых наблюдательных данных, в первую очередь полученных на космической обсерватории “Herschel” [1]. Стало понятно, что огромную роль

в процессе звездообразования играют волокна, которые повсеместно наблюдаются в межзвездных облаках [2]. В результате появилась новая парадигма звездообразования, согласно которой именно межзвездные волокна играют ключевую роль в образовании звезд [2, 3].

В настоящем обзоре суммируются основные наблюдательные данные о межзвездных волокнах, в том числе полученные с участием автора, а также рассматриваются теоретические модели образования и эволюции волокон.

## Наблюдения

Хотя, как отмечено выше, интерес к межзвездным волокнам был сильно подогрев результатами обсерватории “Herschel”, волокнистые структуры наблюдались и исследовались в межзвездной среде много раньше (см, например, обзоры в [2, 4]). Они видны в оптических изображениях темных туманностей, в структуре облаков нейтрального атомарного водорода, наблюдаемых в линии 21 см, в молекулярных облаках разного типа. Волокнистая структура выделяется и в облаках, где нет признаков активного звездообразования (например, [5]), что указывает на ее появление до начала данного процесса. В то же время в местах пересечения волокон часто регистрируются очаги звездообразования.

Наблюдения волокон на обсерватории “Herschel” были сосредоточены на сравнительно близких к нам объектах. В дальнейшем были проведены исследования волокнистых структур на масштабах Галактики, в частности, на основе анализа данных обзора ASTROGAL [6]. В этой работе было идентифицировано около 500 волокнистых структур на расстояниях до  $\sim 12$  кпк.

Характерной особенностью волокон в близких к нам облаках является постоянство их толщины ( $\sim 0.1$  пк) в разных объектах [2]. Однако более далекие волокна, идентифицированные в упомянутом обзоре [6], имеют в среднем существенно большую толщину:  $\sim 0.5$  пк. В то же время в туманности Ориона выделены и значительно более тонкие структуры шириной  $\sim 0.035$  пк [7]. Еще более тонкое волокно, шириной  $\sim 0.01$  пк, зарегистрировано нами в области S255IR [8, 9].

Во многих случаях наблюдаются примыкающие к волокнам нитевидные структуры, ориентированные почти перпендикулярно волокну. Наблюдения показывают, что их ориентация примерно совпадает с направлением магнитного поля [2]. Предполагается, что вдоль этих линий окружающее вещество стекает к волокну.

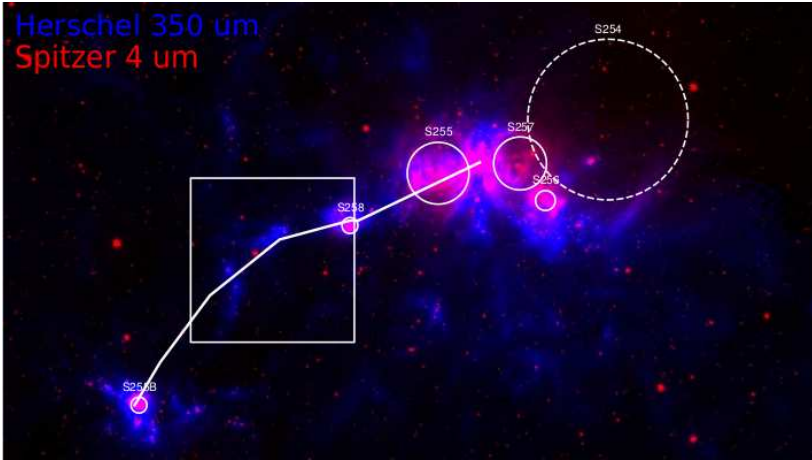


Рис. 1. Общий вид комплекса звездообразования S254–S258 на двух волнах ИК-диапазона. Кругами отмечены зоны H II, белая линия показывает траекторию, вдоль которой строилась диаграмма позиция–скорость на рис. 2, прямоугольником выделена исследовавшаяся область. Рисунок взят из работы [13]

Гравитационная устойчивость волокон определяется величиной массы на единицу длины. Критическое значение зависит от скорости звука, которая, в свою очередь, зависит от температуры. На устойчивость волокна влияют также турбулентность и магнитное поле [10]. Среди исследованных волокон есть как те, у которых масса на единицу длины превышает критическое значение, так и объекты с обратным отношением этих величин.

Довольно часто наиболее активное звездообразование наблюдается на концах волокон (например, [11]). По-видимому, это связано с эффектами конечного размера волокна (в отличие от бесконечного цилиндра).

В качестве примера исследований межзвездного волокна можно привести наши работы по изучению такой структуры в комплексе звездообразования S254–S258 [12, 13]. На рис. 1 представлен общий вид данного комплекса в ИК-диапазоне, прямоугольником выделена исследовавшаяся область [13].

Данная область была исследована в различных молекулярных линиях, в частности, в линиях CO,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ , CS,  $\text{NH}_3$ . Эти данные свидетельствуют, что волокно представляет собой единую структуру

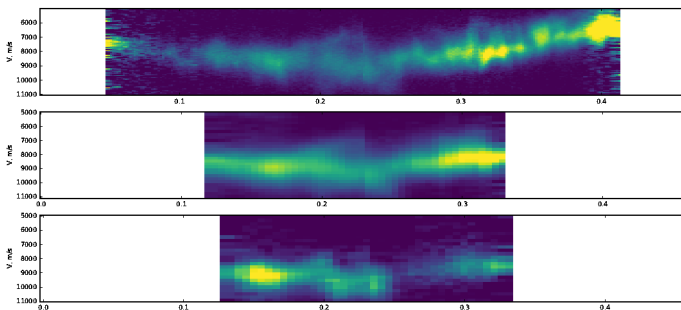


Рис. 2. Диаграммы позиция—скорость в линиях  $^{13}\text{CO}(2-1)$ ,  $^{13}\text{CO}(1-0)$  и  $\text{CS}(2-1)$  (сверху вниз) вдоль траектории, показанной на рис. 1. Рисунок взят из работы [13]

с плавным изменением скорости вдоль оси (рис. 2). Подобный вид диаграммы позиция—скорость скорее всего указывает на продольный коллапс волокна к центральному массивному сгустку [14, 15].

Масса волокна на единицу длины превышает критическое значение, что указывает на его гравитационную неустойчивость. Толщина волокна по наблюдениям в линии  $^{13}\text{CO}(2-1)$  оказалась около 1 пк, что заметно больше типичных значений. По наблюдениям в линии  $\text{CS}(2-1)$ , которая является индикатором плотного газа, выделено несколько плотных сгустков с массами 30–160  $M_{\odot}$ . Оценки вириального параметра показывают, что сгустки гравитационно неустойчивы. Наблюдения в ИК-диапазоне показывают, что сгустки ассоциируются с молодыми звездными скоплениями [12].

Детальный анализ ИК-изображений и карт в линии CO позволил также выделить нитевидные структуры (“striations”), расположенные под большими углами к волокну [16]. Дисперсия скоростей газа возрастает в местах их примыкания к волокну, что указывает на вероятный приток вещества к волокну вдоль этих нитей. Профили линий CO имеют характерную асимметрию, свидетельствующую о радиальном падении вещества на волокну. В целом данный объект является хорошим примером межзвездного волокна, находящегося на стадии начала формирования звездных скоплений.

## Модели

Теоретические модели посвящены вопросам равновесной структуры волокон, их устойчивости, фрагментации, а также механизмам образования волокон.

Задача о гидростатическом равновесии бесконечного самогравитирующего изотермического цилиндра была решена много лет назад [17, 18]. Радиальный профиль плотности дается выражением

$$\rho(r) = \frac{\rho_c}{\left[1 + (r/R_0)^2\right]^{p/2}}, \quad (1)$$

где  $\rho_c$  — центральная плотность;  $R_0$  — радиус центральной плоской части. Теоретическое значение  $p$  для изотермического цилиндра равно 4. В то же время наблюдения дают значения, близкие к 2 [2]. Причиной расхождений может быть неизотермичность волокон. Величина  $R_0$  составляет

$$R_0 = \frac{c_s^2}{G\Sigma_0}, \quad (2)$$

где  $c_s$  — скорость звука;  $G$  — гравитационная постоянная;  $\Sigma_0$  — поверхностная плотность [19, 20].

Критическое значение массы на единицу длины равно

$$M_{\text{line,c}} = \frac{2c_s^2}{G}. \quad (3)$$

С учетом нетепловых движений скорость звука надо заменить на  $\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{c_s^2 + \sigma_{\text{NT}}^2}$  [10]. Волокна, у которых масса на единицу длины превышает критическое значение, фрагментируют и коллапсируют по радиусу. Длина Джинса вдоль оси составляет [19, 20]

$$\lambda_c = 3.94 \frac{c_s^2}{G\Sigma_0}. \quad (4)$$

Более реалистичные модели волокон учитывают также внешнее давление [21]. При этом несколько меняется теоретический закон распределения плотности. В некоторых случаях наблюдения хорошо описываются моделью ограниченного внешним давлением волокна, окруженного оболочкой низкой плотности [11].

Что касается механизмов образования волокон, то многочисленные исследования показывают, что они возникают естественным

образом в результате сверхзвуковой турбулентности и воздействия ударных волн (например, [2, 22]). Волокна также возникают в результате фрагментации плоских листообразных структур (например, оболочек вокруг зон Н II, старых остатков сверхновых и т. п.).

Ряд работ посвящен механизмам образования примыкающих к волокнам нитевидных структур, по которым, как представляется, окружающее вещество может стекать на волокно (“striations”). Недавний анализ нескольких возможных механизмов показал, что наиболее вероятным является нелинейное взаимодействие МГД волн [23].

## Заключение

Наблюдательные и теоретические исследования межзвездных волокон продемонстрировали, что они играют очень важную роль в процессе звездообразования. Получен уже довольно большой объем наблюдательных данных о волокнах как в сравнительно близких, так и в весьма удаленных областях. Тем не менее остается еще немало нерешенных вопросов, которые требуют как дальнейших детальных наблюдений межзвездных волокон, так и теоретического анализа.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-12-01256 (анализ данных наблюдений), а также гранта РФФИ 18-02-00660 (рассмотрение теоретических моделей).

## Библиографические ссылки

1. *Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al.* Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L1. 1005.5331.
2. *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. 1312.6232.
3. *Соболев А. М.* Современные парадигмы образования звезд в галактике // *Физика космоса : тр. 46-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 30 янв.—3 февр. 2017 г.).* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — P. 111.
4. *Myers Philip C.* Filamentary Structure of Star-forming Complexes // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 700. — P. 1609–1625. 0906.2005.

5. *Ward-Thompson D., Kirk J. M., André P. et al.* A Herschel study of the properties of starless cores in the Polaris Flare dark cloud region using PACS and SPIRE // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L92. 1005.2519.
6. *Li G.-X., Urquhart J. S., Leurini S. et al.* ATLASGAL: A Galaxy-wide sample of dense filamentary structures // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 591. — P. A5. 1604.00544.
7. *Hacar A., Tafalla M., Forbrich J. et al.* An ALMA study of the Orion Integral Filament. I. Evidence for narrow fibers in a massive cloud // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 610. — P. A77. 1801.01500.
8. *Zinchenko I., Liu Sheng-Yuan, Su Yu-Nung, Zemlyanukha P.* Multiline observations of S255IR with ALMA // *IAU Symposium* / ed. by Maria Cunningham, Tom Millar, Yuri Aikawa. — 2018. — Vol. 332. — P. 270–273.
9. *Zinchenko I., Liu Sh.-Y., Su Yu-N., Wang Yu.* Disks and outflows in the S255IR area of high mass star formation from ALMA observations // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2018. — Vol. 18. — P. 093.
10. *Fiege Jason D., Pudritz Ralph E.* Helical fields and filamentary molecular clouds - I // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2000. — Vol. 311. — P. 85–104. astro-ph/9901096.
11. *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.
12. *Samal M. R., Ojha D. K., Jose J. et al.* Star formation in the filament of S254-S258 OB complex: a cluster in the process of being created // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 581. — P. A5.
13. *Ryabukhina O. L., Zinchenko I. I., Samal M. R. et al.* Study of the filamentary infrared dark cloud G192.76+00.10 in the S254-S258 OB complex // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2018. — Vol. 18. — P. 095.
14. *Peretto N., Fuller G. A., André P. et al.* SDC13 infrared dark clouds: Longitudinally collapsing filaments? // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 561. — P. A83. 1311.0203.
15. *Kirsanova M. S., Salii S. V., Sobolev A. M. et al.* Molecular gas in high-mass filament WB673 // *Open Astronomy.* — 2017. — Vol. 26. — P. 99–105.
16. *Рябухина О. Л., Зинченко И. И., Соболев А. М.* Поиск и исследование нитевидных структур в области G192.76+00.10 // *Физика космоса : тр. 47-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 29 янв.—2 февр. 2018 г.)*. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — С. 184–185.
17. *Stodólkiewicz J. S.* On the Gravitational Instability of Some Magneto-Hydrodynamical Systems of Astrophysical Interest. Pt. 3. // *Acta Astronomica.* — 1963. — Vol. 13. — P. 30–54.

18. *Ostriker J.* The Equilibrium of Polytropic and Isothermal Cylinders // *Astrophys. J.* — 1964. — Vol. 140. — P. 1056.
19. *Larson R. B.* Cloud fragmentation and stellar masses // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1985. — Vol. 214. — P. 379–398.
20. *Hartmann L.* Flows, Fragmentation, and Star Formation. I. Low-Mass Stars in Taurus // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 578. — P. 914–924. [astro-ph/0207216](#).
21. *Fischera J., Martin P. G.* Physical properties of interstellar filaments // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 542. — P. A77. [1204.3608](#).
22. *Inoue Tsuyoshi, Hennebelle Patrick, Fukui Yasuo et al.* The formation of massive molecular filaments and massive stars triggered by a magnetohydrodynamic shock wave // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* — 2018. — Vol. 70. — P. S53.
23. *Tritsis Aris, Tassis Konstantinos.* Striations in molecular clouds: streamers or MHD waves? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462. — P. 3602–3615.