

## ДИСКИ И БИПОЛЯРНЫЕ ИСТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

Ключевым вопросом для понимания механизмов образования массивных звезд является наличие околозвездных дисков. В последнее время, благодаря появлению новых инструментов, были получены убедительные свидетельства присутствия таких дисков у звезд с массами до  $\sim 30\text{--}60 M_{\odot}$ . Признаком дисковой аккреции являются также биполярные истечения. В данном обзоре мы приводим результаты исследований дисков и биполярных истечений в областях образования массивных звезд.

The key question for understanding mechanisms of high mass star formation is the presence of circumstellar disks. Recently, due to new instruments available, convincing evidences for existence of such disks around stars with the masses up to  $\sim 30\text{--}60 M_{\odot}$  have been obtained. Bipolar outflows can also serve as indicators of the disk accretion. In this review we present results of the studies of disks and bipolar outflows in regions of high mass star formation.

### Введение

Хорошо установлено, что процесс образования звезд с массой порядка солнечной включает в себя формирование диска, дисковую аккрецию и возникновение высокоскоростных биполярных истечений вдоль оси (например, [1, 2]).

Что касается массивных звезд ( $M \gtrsim 8\text{--}10 M_{\odot}$ ), то вопрос о механизмах их формирования менее ясен. В таких звездах ядерные реакции начинаются еще в процессе накопления массы. Радиационное давление излучения массивной протозвезды может остановить дальнейшую аккрецию. Проблема в том, как избежать фрагментации массивного протозвездного ядра. Рассматриваются различные сценарии процесса образования массивных звезд [3], включая такие экзотические, как слияние звезд малой массы [4].

Естественно, для ответа на возникающие вопросы требуется как развитие теоретических моделей, так и наблюдения, которые могли бы их подтвердить. Ключевым является вопрос о наличии дисков вокруг молодых массивных (прото)звезд и их свойствах. Кроме того, важно понять, какие механизмы приводят к появлению наблюдаемых биполярных истечений от таких объектов, связаны ли они с дисковой аккрецией или нет.

Наблюдательные исследования областей образования массивных звезд затрудняются тем обстоятельством, что они находятся далеко от нас ( $\sim 1$  кпк и дальше). Требуемое угловое разрешение может быть достигнуто только с помощью интерферометров. Введенная недавно в строй Большая Миллиметровая/субмиллиметровая решетка в Атакаме (ALMA) является сейчас основным инструментом для исследования таких объектов, с ее помощью уже получены первые интересные результаты. Исследования дисков вокруг массивных звезд ведутся и на других интерферометрах (SMA, NOEMA, ATCA, VLA). Ниже мы приведем некоторые результаты таких исследований, в частности, полученные нами данные.

## **Наблюдения дисков и биполярных потоков в областях образования массивных звезд**

Попытки наблюдений дисков вокруг массивных звезд предпринимались уже достаточно давно. Первые наблюдения довольно большой выборки (12 объектов) были выполнены в работе [5] при помощи ATCA (Australia Telescope Compact Array) в высоковозбужденных линиях аммиака. Признаки вращения были обнаружены в половине источников, но нигде не было явных свидетельств кеплеровского характера вращения.

В последние годы появились данные высокого качества с ALMA, SMA и VLA. В частности, в работе [6] приводятся результаты наблюдений на ALMA массивной протозвезды AFGL 4176. Получены убедительные свидетельства наличия массивного ( $M \sim 10 M_{\odot}$ ) диска, вращающегося по кеплеровскому закону вокруг центрального объекта с массой  $\sim 25 M_{\odot}$  (звезда класса O7).

В недавней работе [7] получены данные о наличии диска с массой  $2-3 M_{\odot}$  вокруг звезды с массой  $\sim 30-60 M_{\odot}$  G11.92-0.61 MM2. На сегодняшний день это, видимо, наиболее массивная звезда с обнаруженным диском. В линии CO наблюдается биполярное истечение в

направлении, перпендикулярном плоскости диска. Наблюдения проводились на SMA с разрешением  $\sim 0.5''$ .

При помощи интерферометрии в среднем ИК диапазоне на VLTI/MIDI проведен обзор 24 объектов промежуточной и большой массы с целью поиска околозвездных дисков [8]. Почти во всех объектах обнаружены вытянутые структуры. Однако неясно, относятся ли они к дискам или к истечениям. Размеры этих структур составляют  $\lesssim 100$  а. е.

Нами при помощи SMA проведены детальные исследования комплекса звездообразования S255 [9, 10]. Он состоит из двух основных массивных сгустков — S255IR и S255N, которые находятся на разных стадиях эволюции. Наблюдения с разрешением  $\sim 0.4''$  выявили в S255IR вращающийся диск вокруг молодой массивной звезды с массой  $\sim 20 M_{\odot}$  (рис. 1). Закон вращения может быть кеплеровским, хотя угловое разрешение недостаточно для надежных выводов. Масса горячего ( $\sim 150$  K) газа в диске невелика,  $\sim 0.3 M_{\odot}$ .

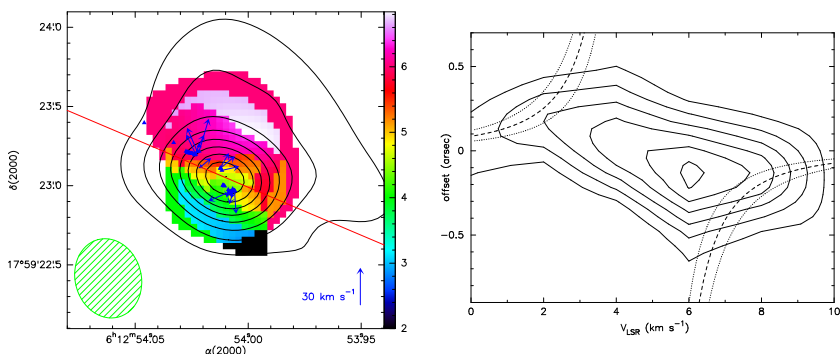


Рис. 1. Слева — карта распределения скоростей в S255IR-SMA1 по наблюдениям линии  $4_2 - 3_1$  E  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Контурсы — изофоты излучения в континууме на волне 1.2 мм. Синие треугольники — мазеры  $\text{H}_2\text{O}$ . Стрелками показаны их собственные движения. Прямая линия — ось джета, наблюдаемого в ИК диапазоне. Справа — диаграмма позиция—скорость для той же линии вдоль сечения, перпендикулярного оси джета. Штриховые линии соответствуют кеплеровскому вращению вокруг объекта с массой  $20 M_{\odot}$  и углом наклона диска  $25^\circ$ . Пунктирные линии соответствуют углам наклона  $25 \pm 5^\circ$ . Рисунки взяты из работы [10]

Интересно, что угол наклона диска, полученный из диаграммы позиция—скорость (рис. 1), не согласуется с найденным из недавних

наблюдений собственных движений мазеров в этой области методом РСДБ [11]. Из этой работы следует, что угол наклона гораздо больше и диск должен быть виден скорее с ребра. Изображение в среднем ИК диапазоне [8] также соответствует сильно наклоненному диску. Нужно, однако, учесть, что размер диска, видимого в ИК диапазоне, на порядок меньше наблюдаемого в молекулярных линиях. Не исключено, что ориентация «внутреннего» и «внешнего» дисков различны. Такое предположение делалось и в нашей работе [10]. Из наблюдений молекулярных линий следует, что фактор заполнения диаграммы направленности очень мал ( $\sim 0.2$ ). Для диска, видимого «плашмя», это может указывать на его сильно неоднородную (фрагментарную) структуру. К этому вопросу мы вернемся позже.

От этого диска наблюдаются высокоскоростные биполярные истечения, которые наиболее вероятно ускоряются ударными волнами, возникающими при эпизодических выбросах вещества из центра (рис. 2). По данным SMA, прослеживаются по крайней мере два таких события с интервалом в несколько тысяч лет [10]. Более старое протяженное истечение наблюдается в линиях CO (рис. 2, слева). В линиях HCN, HCO<sup>+</sup> и CS, которые возбуждаются при более высоких концентрациях газа, чем CO, видно более компактное истечение, ассоциирующееся с излучением в ИК линии ионизованного железа (рис. 2, справа). Последнее возникает на фронтах ударных волн. Упомянутые выше РСДБ наблюдения мазеров H<sub>2</sub>O [11] указывают на еще одно, совсем недавнее подобное событие. Это согласуется с представлением о фрагментарной структуре диска, что ведет к эпизодической аккреции. Это представление подкрепляется недавними наблюдениями вспышки метанольного мазера в этом объекте [12], а также вспышкой в ИК диапазоне [13].

Вторая массивная конденсация в этом комплексе звездообразования, S255N, по всем признакам находится на более ранней стадии эволюции [14]. Высокая светимость в ИК диапазоне [15], наличие ультракомпактной зоны Н II [16] и метанольного мазера I класса на частоте 44 ГГц [17] указывают на формирование массивных звезд. В работах [9, 14] сообщалось о наблюдениях высокоскоростных истечений в этой области, однако увидеть вращение центрального сгустка не удалось. Недавно более тщательный анализ имеющихся данных показал, что в центре имеется вытянутая структура, имеющая признаки вращения вокруг оси, примерно перпендикулярной направлению биполярного истечения (рис. 3) (см.: Землянуха и др., готовится к печати). Распределение яркости и кривая вращения указывают на

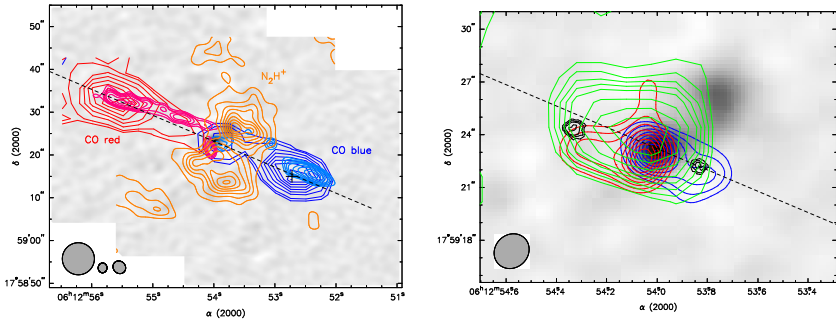


Рис. 2. Слева — карты излучения в крыльях линии CO(3–2) по наблюдениям на 30-м телескопе IRAM (толстые контуры) и на SMA (тонкие контуры). Фон — излучение в континууме на волне 0.8 мм. Показаны также контуры излучения в линии N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3–2). Справа — карты излучения в крыльях линии HCO<sup>+</sup>(4–3) на фоне излучения в континууме на волне 0.8 мм. Черные контуры показывают компактные области излучения Fe II. Приведены также контуры излучения в континууме на частоте 15 ГГц по архивным данным VLA. Штриховая линия показывает ось джета. Рисунки взяты из работы [10]

то, что молекулярное излучение, вероятно, формируется в видимом с ребра торе диаметром несколько тысяч а. е. вокруг (прото)звезды. Любопытно, что оценка массы по кривой вращения дает довольно низкую величину, что не согласуется с приведенными выше аргументами в пользу присутствия массивной протозвезды.

Вообще, высокоскоростные биполярные истечения наблюдаются повсеместно в областях образования массивных звезд [18]. Для них справедливы примерно те же закономерности, что и для истечений при формировании звезд с массой порядка солнечной. Есть и свои особенности, например, увеличение угла раскрытия с ростом светимости. В то же время механизмы образования истечений, видимо, могут быть разными.

## Модели

Имеется несколько основных видов моделей формирования биполярных молекулярных потоков [18, 19]. В одних из них ускорение молекулярного газа производится быстрыми джетами, которые формируются в аккреционных дисках вокруг протозвезд. Другие моде-

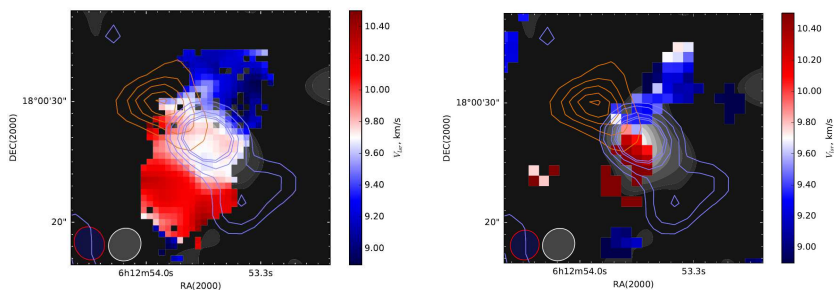


Рис. 3. Карты распределения лучевой скорости в S255N в линиях  $\text{NH}_3$  (1,1) (слева) и  $\text{C}^{34}\text{S}(6-5)$  (справа) на фоне излучения в континууме на волне 1.2 мм. Контурсы — изофоты излучения в крыльях линии  $\text{CO}(2-1)$ , которые показывают излучение высокоскоростного газа (Землянуха и др.).

ли объясняют ускорение молекулярного газа звездным ветром. Еще один класс моделей («циркуляционный») предполагает, что молекулярное истечение представляет собой вещество окружающего облака, падавшее на центральную протозвезду и отброшенное от нее магнитогидродинамическими силами. Разные модели предсказывают разную морфологию истечений и разные зависимости физических параметров от расстояния до центрального источника. Сравнение с наблюдениями показывает, что в разных случаях предпочтительными оказываются разные модели. Например, истечения от наиболее массивных протозвезд с большим углом раскрытия, по-видимому, лучше описываются моделью звездного ветра, а многие высококоллимированные истечения от протозвезд меньшей массы — моделями, где основную роль играет головная ударная волна джета. Они также хорошо согласуются с наблюдениями объектов Хербига—Аро и излучения молекулярного водорода в этих областях. Вообще, наиболее адекватными, видимо, являются комбинированные модели, которые включают в себя как компоненту, связанную с джетом, так и более медленный звездный ветер.

Имеется ряд работ, посвященных моделированию образования массивных звезд через дисковую аккрецию (см., например, [20, 21] и ссылки в них). Они показывают, что такой процесс возможен вплоть до самых больших наблюдаемых масс. Хотелось бы отметить недавнюю работу [22], где на основе численного гидродинамического моделирования показано, что такие диски могут иметь сильно неодно-

родную фрагментарную структуру, что приводит к эпизодической аккреции в согласии с упомянутыми выше наблюдениями S255IR.

## Заключение

Появляется все больше свидетельств того, что формирование массивных звезд происходит путем дисковой аккреции. Диски, по видимому, сильно неоднородны, что ведет к эпизодической аккреции и проявляется в виде эпизодических вспышек и выбросов вещества.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-02-06098.

## Библиографические ссылки

1. *McKee C. F., Ostriker E. C.* Theory of Star Formation // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2007. — Vol. 45. — P. 565–687. 0707.3514.
2. *Inutsuka S.-I., Machida M., Matsumoto T. et al.* Low-Mass Star Formation: From Molecular Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks // EAS Publications Series : EAS Publications Series. — 2016. — Vol. 75. — P. 219–226.
3. *Tan J. C., Beltrán M. T., Caselli P. et al.* Massive Star Formation // Protostars and Planets VI. — 2014. — P. 149–172. 1402.0919.
4. *Bonnell I. A., Bate M. R., Zinnecker H.* On the formation of massive stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1998. — Vol. 298. — P. 93–102. arXiv:astro-ph/9802332.
5. *Beuther H., Walsh A. J., Longmore S. N.* Hot High-Mass Accretion Disk Candidates // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 2009. — Vol. 184. — P. 366–386. 0909.0691.
6. *Johnston K. G., Robitaille T. P., Beuther H. et al.* A Keplerian-like Disk around the Forming O-type Star AFGL 4176 // Astrophys. J. Lett. — 2015. — Vol. 813. — P. L19. 1509.08469.
7. *Ilee J. D., Cyganowski C. J., Nazari P. et al.* G11.92-0.61 MM1: a Keplerian disc around a massive young proto-O star // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 462. — P. 4386–4401. 1608.05561.
8. *Boley P. A., Linz H., van Boekel R. et al.* The VLTI/MIDI survey of massive young stellar objects. Sounding the inner regions

- around intermediate- and high-mass young stars using mid-infrared interferometry // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A24. 1308.4282.
9. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 755. — P. 177. 1206. 5906.
  10. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 810. — P. 10. 1507.05642.
  11. *Burns R. A., Handa T., Nagayama T. et al.* H<sub>2</sub>O masers in a jet-driven bow shock: episodic ejection from a massive young stellar object // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 460. — P. 283–290. 1604.05682.
  12. *Fujisawa K., Yonekura Y., Sugiyama K. et al.* A flare of methanol maser in S255 // *The Astronomer's Telegram.* — 2015. — Vol. 8286.
  13. *Stecklum B., Caratti o Garatti A., Cardenas M. C. et al.* The methanol maser flare of S255IR and an outburst from the high-mass YSO S255IR-NIRS3 - more than a coincidence? // *The Astronomer's Telegram.* — 2016. — Vol. 8732.
  14. *Wang Y., Beuther H., Bik A. et al.* Different evolutionary stages in the massive star-forming region S255 complex // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 527. — P. A32. 1011.3575.
  15. *Cyganowski C. J., Brogan C. L., Hunter T. R.* Evidence for a Massive Procluster in S255N // *Astron. J.* — 2007. — Vol. 134. — P. 346–358. 0704.0988.
  16. *Kurtz S., Churchwell E., Wood D. O. S.* Ultracompact H II regions. 2: New high-resolution radio images // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1994. — Vol. 91. — P. 659–712.
  17. *Kurtz S., Hofner P., Álvarez C. V.* A Catalog of CH<sub>3</sub>OH 7<sub>0</sub>-6<sub>1</sub> A<sup>+</sup> Maser Sources in Massive Star-forming Regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2004. — Vol. 155. — P. 149–165.
  18. *Arce H. G., Shepherd D., Gueth F. et al.* Molecular Outflows in Low- and High-Mass Star-forming Regions // *Protostars and Planets V.* — 2007. — P. 245–260. astro-ph/0603071.
  19. *Cabrit S., Raga A., Gueth F.* Models of Bipolar Molecular Outflows // *Herbig-Haro Flows and the Birth of Stars* / ed. by



B. Reipurth, C. Bertout : IAU Symposium. — 1997. — Vol. 182. — P. 163–180.

20. *Kuiper R., Klahr H., Beuther H., Henning T.* Three-dimensional Simulation of Massive Star Formation in the Disk Accretion Scenario // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 732. — P. 20. 1102.4090.
21. *Klassen M., Pudritz R. E., Kuiper R. et al.* Simulating the Formation of Massive Protostars. I. Radiative Feedback and Accretion Disks // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 823. — P. 28. 1603.07345.
22. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Kuiper R., Kley W.* On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 464. — P. L90–L94. 1609.03402.