

ПРОТОЗВЕЗДНЫЕ ДЖЕТЫ И ИСТЕЧЕНИЯ

И. И. Зинченко

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А. В. Гапонова-Грехова РАН*

В данном обзоре описываются биполярные протозвездные высококоллимированные быстрые ионизованные джеты и более медленные молекулярные истечения. Джеты и истечения играют важнейшую роль в процессе звездообразования, унося избыточный угловой момент из системы, без чего образование звезды было бы просто невозможно. Приводятся основные наблюдательные характеристики этих явлений и описываются основные модели их формирования.

PROTOSTELLAR JETS AND OUTFLOWS

I. I. Zinchenko

*Federal Research Center A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences*

This review describes bipolar protostellar highly collimated fast ionized jets and slower molecular outflows. Jets and outflows play a crucial role in the process of star formation, carrying away excess angular momentum from the system, without which star formation would simply be impossible. The main observational characteristics of these phenomena are given and the main models of their formation are described.

Введение

Узконаправленные (высококоллимированные) выбросы части аккрецируемого вещества с большой скоростью вдоль оси вращения (джеты) сопровождают процесс дисковой аккреции в астрономических объектах разного типа — от протозвезд до активных ядер галактик. Масштабы этих явлений и скорости выбросов в разных объектах отличаются на порядки, но физические механизмы могут быть похожи.

В протозвездных объектах, которые в основном и обсуждаются в данном обзоре, помимо джетов (например, [1, 2]) наблюдаются также более медленные и обычно не столь коллимированные истечения молекулярного газа (например, [3–5]). Считается, что джеты и истечения играют важнейшую роль в процессе звездообразования, унося избыточный угловой момент из системы, без чего образование звезды было бы просто невозможно (стоит отметить, что возможны и другие механизмы отвода углового момента).

Ниже описываются основные наблюдаемые характеристики этих явлений, а также модели их формирования.

Наблюдения джетов и истечений

В начале 50-х гг. прошлого века были обнаружены так называемые объекты Хербига — Аро [6, 7]. Позже выяснилось, что эти объекты представляют собой части истечения вещества из молодых (прото)звезд.

С развитием возможностей наблюдений спектральных линий в миллиметровом диапазоне длин волн по наблюдениям линий CO были обнаружены биполярные истечения молекулярного газа из молодых звездных объектов [8]. Скоро стало понятно, что такие истечения повсеместно сопровождают процесс звездообразования.

Джеты представляют собой высококоллимированные струи частично ионизованного газа, которые, как правило, состоят из последовательности сгустков. Их излучение наблюдается на волнах от низкочастотного радиодиапазона до гамма-лучей. Основные характеристики их радиоизлучения обсуждаются в работе [9]. В большинстве случаев наблюдается тормозное излучение ионизованного газа. Недавно при помощи низкочастотной антенной решетки LOFAR впервые удалось зарегистрировать радиоизлучение джета на столь низкой частоте, как 149 МГц [10]. При этом наблюдался излом в спектре, соответствующий переходу от оптически тонкой излучающей среды к оптически толстой. В результате удалось определить меру эмиссии, электронную концентрацию и массу ионизованного газа.

Однако в ряде случаев излучение отдельных сгустков имеет нетепловой характер, соответствующий синхротронному механизму излучения, на что указывают спектральный индекс и линейная поляризация излучения (например, [11, 12]). Это свидетельствует о наличии релятивистских электронов. Более того, наблюдается рентгеновское излучение впереди пика в радиодиапазоне [13] и даже гамма-излучение джетов с энергией до нескольких ГэВ [14, 15]. Это указывает на разогрев газа до миллионов К и на возможность ускорения частиц в джетах до очень высоких энергий. Недавние наблюдения синхротронного излучения джета от МЗО малой массы DG Tau A на частоте 152 МГц при помощи LOFAR выявили низкочастотный загиб в спектре, который лучше всего объясняется эффектом Разина — Цитовича [16].

В излучении ионизованных джетов наблюдаются линии различных атомов и ионов в УФ, оптическом и ближнем ИК-диапазонах, в частности линии H α , FeII и др. С джетами также часто ассоциируется излучение молекул SiO в миллиметровом диапазоне длин волн. Наблюдения спектральных линий позволяют определить скорости движения джетов вдоль луча зрения. Кроме того, в ряде случаев по наблюдениям в разные эпохи удается измерить собственные движения сгустков в джете. Радиальные и поперечные скорости сравнимы и составляют обычно сотни км/с.

Важным результатом явилось обнаружение вращения джетов. Признаком вращения является поперечный градиент лучевой скорости. Такие градиенты наблюдались в оптических спектрах на HST [17], но более надежно они видны в наблюдениях молекулярных линий, прежде всего SiO, на ALMA (например, [18]).

Как отмечалось выше, помимо высококоллимированных быстрых джетов наблюдаются более медленные истечения, с более широким углом раскрыва. В случае протозвезд малой массы часто видно и то и другое. В то же время такая комбинация редко наблюдается у массивных протозвезд. В качестве примеров можно привести Ser A HW2 [19], S255 NIRS3 [20], G18.88MME [21].

Наблюдениям биполярных молекулярных истечений посвящена обширная литература. Подробные обзоры можно найти, например, в работах [3, 5]. Существуют корреляции между массой, силой и механической светимостью истечений с одной стороны и болометрической светимостью центрального источника — с другой. Во многих случаях наблюдается «хаббловский» закон зависимости скорости от расстояния, т. е. скорость истечения пропорциональна расстоянию от источника. Угол раскрыва истечения увеличивается по мере эволюции и с ростом массы протозвезды. У массивных звезд он очень велик ($\gtrsim 90^\circ$).

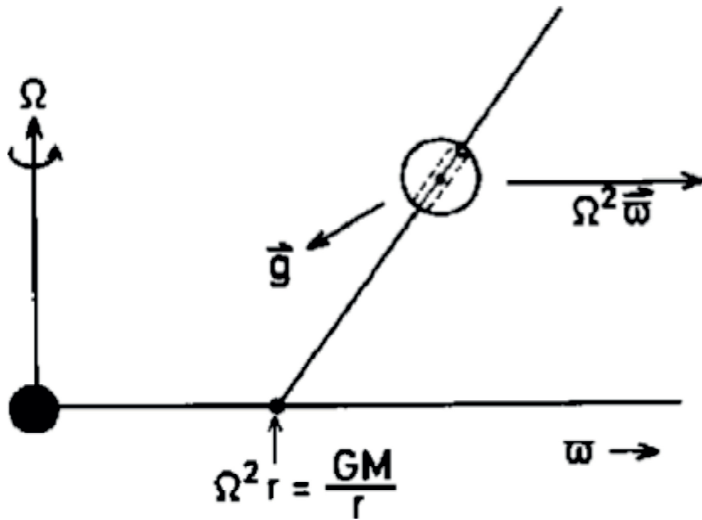


Иллюстрация механизма магнитоцентробежного ускорения («бусинка на проволоке») [23]

Модели

В основе практически всех моделей формирования джетов — магнитоцентробежный механизм ускорения заряженных частиц над поверхностью аккреционного диска. Такова, например, модель Блэнфорда — Пэйна [22], предложенная для джетов активных ядер галактик. При совсем других масштабах подобный механизм может действовать и в протозвездных объектах. Наглядная иллюстрация этого механизма приведена на рисунке.

Существуют две основные разновидности такой модели: модель так называемого X-ветра [24] и модель дискового ветра (например, [25]). Основная разница между ними в том, что в первой модели основную роль играет магнитное поле звезды и истечение вещества происходит в основном из области коротации, где магнитное поле звезды наиболее эффективно взаимодействует с диском. Во второй модели формирование джета происходит за счет остаточного магнитного поля самого диска и область, откуда происходит истечение вещества, гораздо шире.

Магнитное поле у поверхности диска является полоидальным. Но по мере удаления от диска оно закручивается вместе с истекающим веществом, появляется тороидальная компонента, которая обеспечивает коллимацию джета. Данные о вращении джетов в сочетании с предположением о сохранении углового момента [26] позволяют оценить радиус области запуска джета в диске. Эти оценки указывают скорее на дисковый ветер, хотя X-ветер не исключен в некоторых случаях.

Существует несколько моделей формирования биполярных молекулярных истечений (например, [3]). Одна из самых популярных и хорошо согласующихся с наблюдениями — модель увлечения молекулярного газа ударной волной, создаваемой быстрым джетом. В частности, она хорошо воспроизводит «хаббловский» закон зависимости скорости от расстояния в истечениях. Однако эта модель имеет и проблемы, например, с объяснением кинетического момента в истечениях. Существует модель широкоугольного ветра, но наиболее близкой к реальности, видимо, является композитная модель «двойного ветра», в которой есть и быстрый джет, и медленный ветер с широким углом раскрыва. Такая картина находит все больше наблюдательных подтверждений, в том числе в областях образования массивных звезд (например, [21]).

Наконец, отметим, что в настоящее время проводятся интересные лабораторные эксперименты по моделированию астрофизических джетов с использованием масштабных соотношений между параметрами лабораторной и астрофизической плазмы (например, [27]).

Заключение

Исследования ионизованных джетов и более медленных молекулярных истечений от протозвезд продолжают уже не одно десятилетие в разных диапазонах длин волн. Джеты и истечения наблюдаются на самых ранних этапах звездообразования и играют важнейшую роль в этом процессе. К настоящему времени предложены модели этих явлений, которые достаточно хорошо объясняют основные наблюдаемые характеристики. В то же время более глубокое понимание механизмов формирования джетов и истечений требует дальнейших исследований с лучшими спектральным разрешением и чувствительностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FFUF-2024-0028.

Библиографические ссылки

- [1] *Anglada G., Rodríguez L. F., Carrasco-González C.* Radio jets from young stellar objects // *Astron. Astrophys. Rev.* — 2018. — Vol. 26, № 1. — P. 3. 1806.06444.
- [2] *Ray T. P., Ferreira J.* Jets from young stars // *New Astronomy Reviews.* — 2021. — Vol. 93. — P. 101615. 2009.00547.
- [3] *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.
- [4] *McKee C. F., Ostriker E. C.* Theory of Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 565–687. 0707.3514.
- [5] *Frank A., Ray T. P., Cabrit S. et al.* Jets and Outflows from Star to Cloud: Observations Confront Theory // *Protostars and Planets VI* / ed. by Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, Thomas Henning. — 2014. — P. 451. 1402.3553.
- [6] *Herbig G. H.* The spectra of two nebulous objects near NGC 1999. // *Astrophys. J.* — 1951. — Vol. 113. — P. 697–699.
- [7] *Haro G.* Herbig’s nebulous objects near NGC 1999. // *Astrophys. J.* — 1952. — Vol. 115. — P. 572.
- [8] *Snell R. L., Loren R. B., Plambeck R. L.* Observations of CO in L1551-Evidence for stellar wind driven shocks // *Astrophys. J. Lett.* — 1980. — Vol. 239. — P. L17–L22.
- [9] *Reynolds S. P.* Continuum Spectra of Collimated, Ionized Stellar Winds // *Astrophys. J.* — 1986. — Vol. 304. — P. 713.
- [10] *Coughlan C. P., Ainsworth R. E., Eisloffel J. et al.* A LOFAR Detection of the Low-mass Young Star T Tau at 149 MHz // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 834, № 2. — P. 206. 1611.03282.
- [11] *Osorio M., Díaz-Rodríguez A. K., Anglada G. et al.* Star Formation Under the Outflow: The Discovery of a Non-thermal Jet from OMC-2 FIR 3 and Its Relationship to the Deeply Embedded FIR 4 Protostar // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 840, № 1. — P. 36. 1703.07877.
- [12] *Obonyo W. O., Lumsden S. L., Hoare M. G. et al.* A multi-epoch study of radio continuum emission from massive protostars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Vol. 501, № 4. — P. 5197–5211. 2012.12822.

- [13] *Rodríguez-Kamenetzky A., Carrasco-González C., González-Martín O. et al.* Particle acceleration in the Herbig-Haro objects HH 80 and HH 81 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 482, № 4. — P. 4687–4696. 1811.08868.
- [14] *Yan Da-Hai, Zhou Jia-Neng, Zhang Peng-Fei.* Detection of Gamma-Rays from the Protostellar Jet in the HH 80-81 System // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2022. — Vol. 22, № 2. — P. 025016. 1908.10994.
- [15] *de Oña Wilhelmi Emma, López-Coto Rubén, Su Yang.* High-energy gamma-ray emission powered by a young protostar: the case of S255 NIRS 3 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2023. — Vol. 523, № 1. — P. 105–110. 2305.04571.
- [16] *Feeney-Johansson A., Purser S. J. D., Ray T. P. et al.* The First Detection of a Low-frequency Turnover in Nonthermal Emission from the Jet of a Young Star // *Astrophys. J. Lett.* — 2019. — Vol. 885, № 1. — P. L7. 1910.09479.
- [17] *Bacciotti F., Ray Th. P., Mundt R. et al.* Hubble Space Telescope/STIS Spectroscopy of the Optical Outflow from DG Tauri: Indications for Rotation in the Initial Jet Channel // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 576, № 1. — P. 222–231. astro-ph/0206175.
- [18] *Lee Chin-Fei, Ho Paul T. P., Li Zhi-Yun et al.* A rotating protostellar jet launched from the innermost disk of HH 212 // *Nature Astronomy.* — 2017. — Vol. 1. — P. 0152. 1706.06343.
- [19] *Torrelles J. M., Patel N. A., Curiel S. et al.* A wide-angle outflow with the simultaneous presence of a high-velocity jet in the high-mass Cepheus A HW2 system // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 410, № 1. — P. 627–640. 1008.2262.
- [20] *Zinchenko I. I., Liu Sheng-Yuan, Su Yu-Nung et al.* Dense Cores, Filaments, and Outflows in the S255IR Region of High-mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2020. — Vol. 889, № 1. — P. 43. 1911.11447.
- [21] *Zinchenko I. I., Dewangan L. K., Baug T. et al.* ALMA discovery of a dual dense probably rotating outflow from a massive young stellar object G18.88MME // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Vol. 506, № 1. — P. L45–L49. 2106.09626.
- [22] *Blandford R. D., Payne D. G.* Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1982. — Vol. 199. — P. 883–903.
- [23] *Spruit H. C.* Magnetohydrodynamic jets and winds from accretion disks // *Evolutionary Processes in Binary Stars* / ed. by Ralph A. M. J. Wijers, Melvyn B. Davies, Christopher A. Tout : NATO Advanced Study Institute (ASI) Series C. — 1996. — Vol. 477. — P. 249–286.
- [24] *Shu F., Najita J., Ostriker E. et al.* Magnetocentrifugally Driven Flows from Young Stars and Disks. I. A Generalized Model // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 429. — P. 781.
- [25] *Pudritz R. E., Norman C. A.* Bipolar hydromagnetic winds from disks around protostellar objects // *Astrophys. J.* — 1986. — Vol. 301. — P. 571–586.
- [26] *Anderson J. M., Li Zhi-Yun, Krasnopolsky R., Blandford R. D.* Locating the Launching Region of T Tauri Winds: The Case of DG Tauri // *Astrophys. J. Lett.* — 2003. — Vol. 590, № 2. — P. L107–L110. astro-ph/0304127.
- [27] *Hartigan P., Foster J. M., Wilde B. H. et al.* Laboratory Experiments, Numerical Simulations, and Astronomical Observations of Deflected Supersonic Jets: Application to HH 110 // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 705, № 1. — P. 1073–1094. 0910.0318.