

АККРЕЦИОННЫЕ ВСПЫШКИ МАССИВНЫХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ЭКЗОПЛАНЕТЫ

А. М. Соболев

Уральский федеральный университет

Показано, что масса сгустка, аккрецированного при вспышке в массивном молодом звездном объекте G358.93-0.03, зарегистрированной в ходе мониторинга мазерного излучения метанола и последующих наблюдений в дальнем инфракрасном диапазоне, соответствует массе планеты. Рассматривается возможность определения частоты выпадения сгустков на массивные молодые звездные объекты из окружающих их протопланетных дисков по изображениям джетов.

ACCRETION BURSTS OF MASSIVE YOUNG STELLAR OBJECTS AND EXOPLANETS

A. M. Sobolev

Ural Federal University

It has been shown that the mass of a clump accreted during an outburst in the massive young stellar object G358.93-0.03, detected during the monitoring of methanol maser emission and subsequent observations in the far infrared, corresponds to the mass of the planet. The possibility of determining the frequency of the fallout of clumps on massive young stellar objects from the surrounding protoplanetary disks from the images of jets is considered.

Введение

Исследования аккреционных вспышек в массивных молодых звездных объектах (MYSO) начались после открытия почти совпадающих во времени вспышек в объектах S255IR-NIRS3 [1] и NGC6334I-MM1 [2]. Увеличение светимости, наблюдаемое в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах длин волн в S255IR-NIRS3 и в субмиллиметровом диапазоне в NGC6334I-MM1, является прямым доказательством повышенной скорости аккреции. Информация об аккреционных вспышках молодых звездных объектов напрямую связана с исследованием структуры их околосветных дисков, в частности, процессов формирования неоднородностей, из которых впоследствии образуются планеты.

Аккреционные вспышки в массивных звездах часто сопровождаются вспышками мазерного излучения метанола. Обнаружение и исследование аккреционных вспышек является одной из основных задач Организации по мониторингу мазеров (Maser monitoring organization, M2O), созданной для координации мониторинга мазеров на однозеркальных телескопах и интерферометрических наблюдений вспыхивающих объектов.

Аккреционные процессы сопровождаются истечениями. Протозвездные истечения и струи являются частью механизма аккреции-сброса, которые уносят угловой момент аккрецированной материи и тем самым предотвращают раскручивание аккрецирующей протозвезды до скорости разрушения. Если процессы аккреции имеют эпизодический характер, то истечения имеют характер эпизодических выбросов. Таким образом, исследование истечений содержит сведения о характере и истории аккреции.

Протопланета в диске массивной звезды G358.93-0.03?

В середине января 2019 г. было объявлено о вспышке мазерной линии СН₃ОН с частотой 6.7 ГГц в G358.93-0.03 (далее — G358) [3]. После этого M2O впервые организовала обширную кампанию наблюдений, которая оказалась чрезвычайно успешной. Благодаря немедленному отклику было обнаружено беспрецедентное количество мазерных линий, включая многочисленные новые переходы [4–6], и были обнаружены новые виды мазеров [7]. Интерферометрические изображения в субмиллиметровом спектральном диапазоне с использованием интерферометров ALMA и SMA точно определили MYSO, с которым связаны вспыхивающие мазеры [5]. Было предположено, что самый яркий источник континуума MM1, который оказался горячим молекулярным ядром, испытал аккреционную вспышку. Впервые впечатляющее подтверждение этого события было получено с помощью интерферометрических наблюдений с высоким угловым разрешением мазерного излучения метанола на частоте 6.7 ГГц, которые выявили распространение мазерных пятен наружу, отслеживая распространение теплового излучения, исходящего от вспышки [8]. Последующие наблюдения в дальнем инфракрасном диапазоне на SOFIA дали возможность зарегистрировать увеличение потока и подтвердить, что вспышка мазеров в G358 вызвана аккреционным событием [9].

В этой работе также проведена оценка массы аккрецированного сгустка, равная $M_{\text{mass}} = 5.3(+11.1, -4.4)10^{-4} M_{\odot}$. Это значение говорит о том, что во время короткой вспышки G358 MM1 аккрецировал около 0.6 массы Юпитера, то есть планетную массу. Отметим, что ранее произведенная планетная оценка массы аккрецированного сгустка (0.3 массы Юпитера) во время события в NGC6334I-MM1 [2] в последнее время была пересмотрена в сторону существенного увеличения до значений звездных масс 0.1–0.3 $M_{\odot}$ [10]. Таким образом, необходимы дополнительные подтверждения полученного планетного значения оценки массы аккрецированного фрагмента в G358 MM1. Первый аргумент: вспышка в G358 MM1 закончилась и энергетические оценки останутся неизменными. Однако этот аргумент не избавляет нас от неопределенности, связанной с другими допущениями. Другой аргумент основан на отличительных особенностях мазерного излучения в момент вспышки в G358 MM1. В работе [11] было показано, что при аккреции больших фрагментов фотосферное излучение звезды (основной источник нагрева во время вспышки G358 MM1 [9]) становится менее жестким. Исследования мазерного излучения в момент вспышки G358 MM1 привели к обнаружению новых мазерных переходов в крутильно возбужденных состояниях, которые не были обнаружены ранее [4, 5]. Это свидетельствует о том, что во время вспышки G358 MM1 излучение было более жестким, что поддерживает гипотезу об аккреции фрагмента планетной массы и верности проведенной оценки.

О частоте аккреционных вспышек массивных звезд

В данный момент наблюдательные данные о вспышках массивных молодых звезд в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах имеют недостаточную статистику для исследования явления и определения частоты аккреционных вспышек. Перспективный подход был предложен в работе [11], посвященной моделированию динамики аккреционных дисков. Частоту выпадения сгустков предложено оценивать на основе информации об истечениях и джетах. В этой работе было обращено внимание на то, что джеты присутствуют в окрестностях ряда молодых массивных звезд, на что указывают наблюдения в инфракрасном и радиодиапазонах (например, инфракрасный обзор [12] и обзоры в радио [13, 14]). Исследования джетов дают ценную информацию о частоте выпадения сгустков, поскольку их изображения содержат сведения об истории выбросов,

связанных с аккреционными вспышками. Рассмотрение изображений джетов показало удовлетворительное согласие с результатами теоретических расчетов, которые достаточно хорошо воспроизводят аккрецию фрагментов вещества, имеющих звездные массы, но не отражают ситуацию с фрагментами планетарных масс. Таким образом, существующая наблюдательная информация о джетах находится в соответствии с предположением о том, что джеты возникают только при аккреции фрагментов звездных масс и не воспроизводят полную картину, при которой происходит аккреция фрагментов планетарных масс. При этом в предыдущем разделе было показано, что фрагменты планетарных масс в аккреционных дисках массивных молодых звездных объектов присутствуют и соответствующая аккреционная вспышка наблюдалась в G358-MM1.

В работе [15] рассматриваются модели дисков вокруг массивных молодых звезд. Показано, что в этих объектах могут происходить вспышки с параметрами, близкими к наблюдаемым в G358-MM1 и S255IR, происхождение которых связано с приливным разрушением планет. При этом вопрос о том, как часто могут происходить такие события, в работе не затрагивался. Расчеты, приведенные в предыдущем разделе, показывают, что аккреция фрагмента массой в доли массы Юпитера приводит к изменениям светимости звезды, дающим мощную вспышку мазерного излучения метанола на частоте 6.7 ГГц. Длительность таких вспышек составляет месяцы, и они должны регистрироваться в рамках обширных регулярных мониторингов метанольных мазеров, проводимых в Хартебестхуке [16], Торуне [17] и Ибараки [18] в течение десяти и более лет. Тем не менее за время наблюдений было зарегистрировано только несколько вспышек большой интенсивности. При этом одна из них соответствовала аккреции фрагмента звездной массы, в ходе которой мог образоваться джет. Поэтому, несмотря на малую статистику, мы приходим к заключению, что частота выпадения сгустков на молодые звездные объекты из аккреционных дисков массивных звезд незначительно больше, в пределах порядка величины, частоты выпадения, определенной по джетам, а именно — несколько десятилетий для небольших фрагментов и тысячелетия для выпадения крупных фрагментов в соответствии с работой [11].

Работа выполнена при поддержке проекта Минобрнауки «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет» (№ 075-15-2020-780, договор 780-10/2).

Библиографические ссылки

- [1] *Stecklum Bringfried, Caratti o Garatti Alessio, Cardenas Maria Concepcion 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. — P. 1.
- [2] *Hunter T. R., Brogan C. L., MacLeod G. et al.* An Extraordinary Outburst in the Massive Protostellar System NGC6334I-MM1: Quadrupling of the Millimeter Continuum // *Astrophys. J. Lett.* — 2017. — Vol. 837, № 2. — P. L29. 1701.08637.
- [3] *Sugiyama Koichiro, Saito Yu, Yonekura Yoshinori, Momose Munetake.* Bursting activity of the 6.668-GHz CH₃OH maser detected in G 358.93-00.03 using the Hitachi 32-m // *The Astronomer's Telegram*. — 2019. — Vol. 12446. — P. 1.
- [4] *Breen S. L., Sobolev A. M., Kaczmarek J. F. et al.* Discovery of Six New Class II Methanol Maser Transitions, Including the Unambiguous Detection of Three Torsionally Excited Lines toward G 358.931-0.030 // *Astrophys. J. Lett.* — 2019. — Vol. 876, № 2. — P. L25. 1904.06853.
- [5] *Brogan C. L., Hunter T. R., Townner A. P. M. et al.* Sub-arcsecond (Sub)millimeter Imaging of the Massive Protocluster G358.93-0.03: Discovery of 14 New Methanol Maser Lines Associated with a Hot Core // *Astrophys. J. Lett.* — 2019. — Vol. 881, № 2. — P. L39. 1907.02470.

- [6] *MacLeod G. C., Sugiyama K., Hunter T. R. et al.* Detection of new methanol maser transitions associated with G358.93-0.03 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 489, № 3. — P. 3981–3989. 1910.00685.
- [7] *Chen Xi, Sobolev Andrej M., Ren Zhi-Yuan et al.* New maser species tracing spiral-arm accretion flows in a high-mass young stellar object // *Nature Astronomy.* — 2020. — Vol. 4. — P. 1170–1176.
- [8] *Burns R. A., Sugiyama K., Hirota T. et al.* A heatwave of accretion energy traced by masers in the G358-MM1 high-mass protostar // *Nature Astronomy.* — 2020. — Vol. 4. — P. 506–510.
- [9] *Stecklum B., Wolf V., Linz H. et al.* Infrared observations of the flaring maser source G358.93-0.03. SOFIA confirms an accretion burst from a massive young stellar object // *Astron. Astrophys.* — 2021. — Vol. 646. — P. A161. 2101.01812.
- [10] *Hunter T. R., Brogan C. L., De Buizer J. M. et al.* The Extraordinary Outburst in the Massive Protostellar System NGC 6334 I-MM1: Strong Increase in Mid-Infrared Continuum Emission // *Astrophys. J. Lett.* — 2021. — Vol. 912, № 1. — P. L17. 2104.05187.
- [11] *Meyer D. M. A., Vorobyov E. I., Elbakyan V. G. et al.* Parameter study for the burst mode of accretion in massive star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Vol. 500, № 4. — P. 4448–4468. 2011.05017.
- [12] *Caratti o Garatti A., Stecklum B., Linz H. et al.* A near-infrared spectroscopic survey of massive jets towards extended green objects // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 573. — P. A82. 1410.4041.
- [13] *Purser S. J. D., Lumsden S. L., Hoare M. G., Kurtz S.* A Galactic survey of radio jets from massive protostars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Vol. 504, № 1. — P. 338–355. 2103.08990.
- [14] *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.
- [15] *Elbakyan Vardan G., Nayakshin Sergei, Vorobyov Eduard I. et al.* Accretion bursts in high-mass protostars: A new test bed for models of episodic accretion // *Astron. Astrophys.* — 2021. — Vol. 651. — P. L3. 2106.08734.
- [16] *Goedhart S., Gaylard M. J., Walt D. J. van der.* Long-term monitoring of 6.7-GHz methanol masers // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 355, № 2. — P. 553–584.
- [17] *Szymczak M., Hrynek G., Kus A. J.* A survey of the 6.7 GHz methanol maser emission from IRAS sources. I. Data // *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* — 2000. — Vol. 143. — P. 269–301.
- [18] *Sugiyama Koichiro, Yonekura Yoshinori, Motogi Kazuhito et al.* Flux Monitoring of 6.7 GHz Methanol Maser to Systematically Research Periodic Variations Using the Hitachi 32-m // *Publication of Korean Astronomical Society.* — 2015. — Vol. 30, № 2. — P. 129–131.