

УДК 524.3-54

Моделирование падения струи на протопланетный диск

Григорьев В.В., Демидова Т.В.

ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория» РАН

Аннотация: Численное моделирование показало, что на ранних этапах эволюции протопланетного диска молодой звезды в его окрестностях могут сохраняться остатки протозвездного облака в виде сгустков вещества. Аккреция таких сгустков на протопланетный диск может происходить в непосредственной близости от звезды. В процессе падения на протопланетный диск компактное облако вытягивается в струю газа, столкновение которой с диском приводит к искажению его плоскости, а также ряду фотометрических особенностей, которые могут быть обнаружены в наблюдениях. Для исследования данного процесса произведено трехмерное газодинамическое моделирование падения конечной струи газа, сравнимой по массе с Юпитером, на протопланетный диск, вращающийся вокруг звезды, похожей на Солнце. Столкновение струи с протопланетным диском происходит на расстоянии ~ 7 а.е. от звезды. В расчетах учитывались вязкость и теплопроводность газа. В ходе динамической эволюции внутренние области исходного диска были деформированы с образованием внутреннего наклоненного к первоначальной плоскости диска меньшего размера. Были проанализированы особенности данного процесса: угол наклона внутреннего диска и его эволюция, темп аккреции внутрь области 0.2 а.е., форма дисков.

Ключевые слова: численная газодинамика, протопланетные диски, звезды типа Т Тельца.

1. Математическая модель и инструментарий

При помощи свободного пакета численного моделирования PLUTO¹ [1] были решены стандартные уравнения газодинамики (уравнение неразрывности, уравнение движения, уравнение сохранения энергии) при помощи метода конечных объемов (метод Годунова). Решение производилось в сферической системе координат (R, θ, φ) : $144 \times 60 \times 144$ ячеек в области $[0.2; 107.2]$ а.е. $\times [15; 165]^\circ \times [0; 360]^\circ$. Использовалось приближение идеального газа ($\gamma = 7/5$).

Граничные условия устанавливались следующие: на границе минимального R устанавливалось равенство тепловых турбулентных потоков, непрерывность вязкого турбулентного потока, сохранение энергии. На границе максимального R – фиксированные значения макропараметров газа, соответствующих начальному распределению. Границы по θ – свободные, по φ – периодические. Была использована согласованная модель транспортных коэффициентов (вязкости и теплопроводности): учитывались молекулярные составляющие (модель твердых сфер), плазменные [2], а также турбулентные [3]. Начальные условия (распределение плотности, температуры газа, начальных скоростей) задаются аналогично [4].

В нулевой момент времени струя газа задается в виде сгустка конкретной массы, равной 1 массе Юпитера (2×10^{27} кг), расположенной в пределах одной ячейки на

¹<https://plutocode.ph.unito.it/>

радиальном расстоянии 20 а.е. от звезды. Начальные скорости соответствуют движению материальной точки по параболической траектории в сторону звезды. Перицентрическое расстояние (ближайшая точка орбиты к звезде) составляет 7.4 а.е. Далее в ходе расчетов такой сгусток вытягивается в струю газа вдоль своей траектории. Важно рассмотреть два случая траектории, т.к. парабола может пересекать плоскость либо в одной точке (например, если перицентр и точка пересечения совпадают, далее – ОП), либо в двух (когда перицентр отстоит на 30° от одной из точек пересечения, далее – ДП). В данной работе были рассмотрены два случая траектории (ОП и ДП), наклоненной под углом 45° к плоскости диска, при этом движение струи газа и диска было противоположно направлено.

Численные расчеты производились с использованием ресурсов МСЦ РАН – филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН¹ [5].

2. Результаты моделирования и их анализ

Расчеты показывают, что движение струи происходит по траектории, близкой к параболической, однако, оно все же отличается от движения материальной точки в гравитационном потенциале звезды. Для случаев и однократного, и двукратного пересечения плоскости диска центр масс струи первый раз пересекает эту плоскость на 0.2 года позже, чем предсказывает баллистическое приближение. Это происходит в виду того, что сгусток рассеивается, часть газа перетекает в соседние ячейки, более близкий к звезде участок струи движется быстрее, чем более далекий.

Однако второе пересечение центром масс струи плоскости диска в случае ДП происходит на 0.3 года раньше (в момент времени 14.6 лет), чем предсказывает баллистическое приближение (в момент времени 14.9 лет). Это связано с тем, что в ходе первого пересечения происходит активное взаимодействие двух потоков вещества (диска и струи), их взаимное торможение и нагрев, т.е. энергия движения газа переходит во внутреннюю энергию. Тем самым, фактически, центр масс переходит на иную траекторию движения, несколько отличающуюся от начальной параболы. В случае ОП падение струи газа вызывает спиральную волну плотности, распространяющуюся по диску, тогда как в случае ДП ввиду наличия двойного пересечения получаются две спиральные волны плотности, которые, слившись вблизи звезды, могут значительно исказить плоскость диска. Для визуализации этого явления можно построить поверхность максимальной плотности (т.е. провести поверхность через точки, для которых вторая производная плотности по координате z будет нулевой). В случае неискаженного диска она совпадет с изначальной плоскостью xy , искажение же будет иметь наклон к этой плоскости.

Геометрический анализ этой искаженной части показывает, что с течением времени внутренний диск эволюционирует: увеличивается в размерах (за 50 лет увеличился с 7 до 9 а.е.), поворачивается относительно вертикальной оси (меняется азимут нормали Φ_n), меняется наклон i_n . Подобные структуры именуется варпами (warps), и имеют наблюдательные проявления в виде теней на внешних областях протопланетного диска как, например, у звезды CQ Tau [6]. В таблице 1 приведена зависимость угла наклона i_n внутреннего диска к плоскости xy и азимута нормали Φ_n к внутреннему диску на момент времени t от начала расчетов.

На рис. 1 показано данное искажение (отображена поверхность максимальной плотности), представляющее собой внутренний диск, на момент времени 80 лет от

¹<https://www.jssc.ru/>

Таблица 1. Эволюция ориентации внутреннего диска в течение 50 лет.

t , годы	50	60	70	80	90	100
$i_n, ^\circ$	21.7	20.5	21.2	20.9	23.6	20.2
$\Phi_n, ^\circ$	107.1	97.8	114.2	116.6	107.5	103.3

начала расчетов для случая ДП.

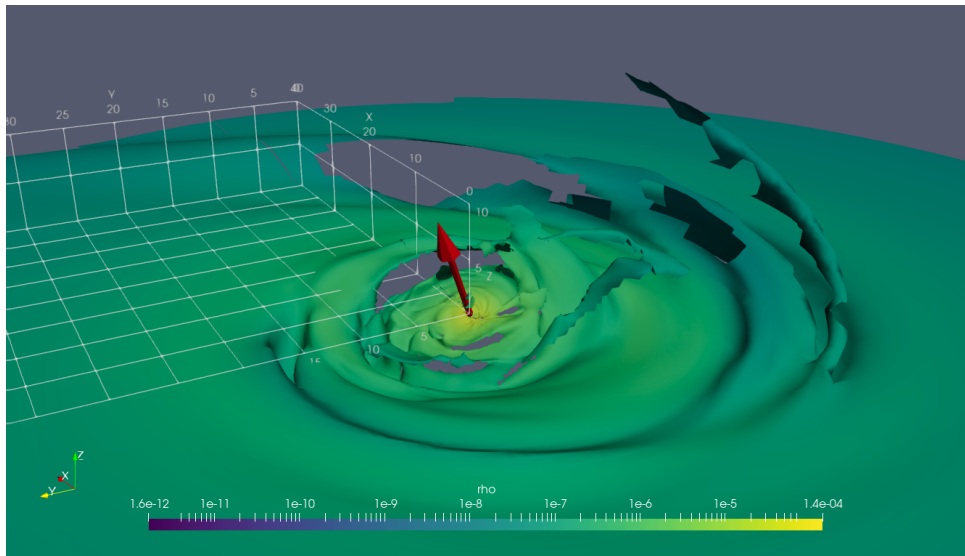


Рис. 1. Поверхность максимальной плотности на момент 80 лет от начала расчетов для случая двукратного пересечения траекторией струи плоскости диска.

На рис. 1 наглядно виден наклон области диска в пределах 20 а.е. по отношению к внешней части диска. Величина плотности (ρ) показана в единицах 6×10^{-7} г/см³. Для масштаба показан координатный параллелепипед. Красной стрелкой отмечена нормаль к внутренней искаженной области (warp).

Как было отмечено выше, в ходе столкновения струи газа с диском происходит торможение вещества, в связи с чем ожидается движение части этого вещества в сторону звезды. При падении этого вещества на звезду (аккреции) можно ожидать: всплеск аккреционной активности звезды, которая порождает, вспышку ее блеска, изменение формы отдельных спектральных линий. На эти характеристики в первую очередь влияет темп аккреции (количество вещества, упавшего на звезду в единицу времени).

Анализ показывает, что внутрь области 0.2 а.е. около звезды происходит резкое увеличение темпа аккреции как в случае ОП (с 1.6×10^{19} до 4×10^{20} г/с) так и в случае ДП (с 1.6×10^{19} до 1.4×10^{21} г/с) за время порядка нескольких лет. Это напоминает вспышку типа FU Ori [7].

3. Заключение

В работе было продемонстрировано, что модель падения газовой струи на протопланетный диск способна объяснить ряд наблюдательных особенностей различных молодых звезд: яркую вспышку типа FU Ori, вызванную аккрецией вещества, наличие внутреннего диска, как, например, у звезды CQ Tau. Кроме того, отмечено, что внутренний диск, образовавшийся в ходе столкновения струи с протопланетного диском для случая двойного пересечения, (варп) со временем меняет свои геометрические характеристики.

Литература

1. Mignone A., Bodo G., Massaglia S., et al. PLUTO: A Numerical Code for Computational Astrophysics // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2007. 170, 228. doi:10.1086/513316
2. Брагинский С.И. Явление переноса в плазме // *Вопросы теории плазмы*. Под ред. М.А. Леонтовича. М. : Госатомиздат, 1963. Вып. 1. С. 183–272.
3. Shakura N.I., Sunyaev R.A. Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astronomy and Astrophysics*. 1973. 24, 337.
4. Demidova T.V., Grinin V.P. Clumpy Accretion in Pre-main-sequence Stars as a Source of Perturbations in Circumstellar Disks // *The Astrophysical Journal*. 2022. 930, 111. DOI 10.3847/1538-4357/ac53a6
5. Savin G.I., Shabanov B.M., Telegin P.N., Baranov A.V. Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences: Present and Future // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019. 40. DOI: 10.1134/S1995080219110271
6. Eisner J.A., Lane B.F., Hillenbrand L.A. et al. Resolved Inner Disks around Herbig Ae/Be Stars // *The Astrophysical Journal*. 2004. 613, 2. DOI: 10.1086/423314
7. Herbig G.H. Eruptive phenomena in early stellar evolution // *The Astrophysical Journal*. 1997. 217. DOI: 10.1086/155615

MSC 85A30

Simulation of stream falling onto a protoplanetary disk

V.V. Grigoryev, T.V. Demidova

Crimean astrophysical observatory

Abstract: Numerical modeling has shown that in the early stages of the evolution of the protoplanetary disk of a young star, remnants of a protostellar cloud in the form of clumps of matter can be preserved in its vicinity. The accretion of such clumps onto a protoplanetary disk may occur in the immediate vicinity of the star. In the process of falling onto a protoplanetary disk, a compact cloud is pulled into a stream of gas, the collision of which with the disk leads to distortion of its plane, as well as a number of photometric features that can be detected in observations. To study this process, a three-dimensional gas dynamic simulation was performed of the fall of a finite stream of gas, comparable in mass to Jupiter, onto a protoplanetary disk orbiting a Sun-like star. The collision of the stream with the protoplanetary disk occurs at a distance of ~ 7 au from the star. The calculations took into account the viscosity and thermal conductivity in the gas. During the dynamic evolution, the inner regions of the original disk were deformed, forming an inner disk of a smaller size inclined to the original plane. The features of this process were analyzed: the angle of inclination of the inner disk and its evolution, the rate of accretion into the 0.2 au region, and the shape of the disks.

Keywords: numerical gas dynamics, protoplanetary disks, T Tauri stars.

References

1. Mignone A., Bodo G., Massaglia S., et al. PLUTO: A Numerical Code for Computational Astrophysics // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2007. 170, 228. doi:10.1086/513316
2. Braginskii S.I. Transport Processes in a Plasma // Reviews of Plasma Physics. 1965.1.
3. Shakura N.I., Sunyaev R.A. Black holes in binary systems. Observational appearance // Astronomy and Astrophysics. 1973. 24, 337.
4. Demidova T.V., Grinin V.P. Clumpy Accretion in Pre-main-sequence Stars as a Source of Perturbations in Circumstellar Disks // The Astrophysical Journal. 2022. 930, 111. DOI 10.3847/1538-4357/ac53a6
5. Savin G.I., Shabanov B.M., Telegin P.N., Baranov A.V. Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences: Present and Future // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2019. 40. DOI: 10.1134/S1995080219110271
6. Eisner J.A., Lane B.F., Hillenbrand L.A. et al. Resolved Inner Disks around Herbig Ae/Be Stars // The Astrophysical Journal. 2004. 613, 2. DOI: 10.1086/423314
7. Herbig G.H. Eruptive phenomena in early stellar evolution // The Astrophysical Journal. 1997. 217. DOI: 10.1086/155615