

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и
исследовательской деятельности ФГАОУ

«Южный федеральный университет»

доктор химических наук

А. В. Метелица



2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
"Южный федеральный университет"

Диссертация «Динамические процессы в газопылевых протопланетных дисках» выполнена в отделе радиофизики и космических исследований Научно-исследовательском институте физики Южного федерального университета.

В период подготовки диссертации соискатель Воробьев Эдуард Игоревич работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Южный федеральный университет" (до 2006 г. – Ростовский государственный университет), в Научно-исследовательском институте физики, в отделе радиофизики и космических исследований в период с 1999 г. по 2002 г. – в должности младшего научного сотрудника, с 2002 до 2005 гг. - в должности научного сотрудника, с 2005 г. по 2010 г. - в должности старшего научного сотрудника и с 2010 г. по настоящее время - в должности ведущего научного сотрудника.

В 1992 г. с отличием окончил Ростовский государственный университет по специальности «Физика».

В период с 1993 по 1997 гг. обучался в аспирантуре Ростовского государственного университета.

Защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Влияние звездообразования на крупномасштабные процессы в галактиках» по специальности 01.03.02. – астрофизика, радиоастрономия 19 октября 2001 г. в диссертационном совете при Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН), г. Нижний Архыз.

В период с 2003 по 2009 гг. проходил стажировку в Университете Западного Онтарио, г. Лондон, Канада и в Институте Вычислительной Астрофизики, г. Галифакс, Канада. В период с 2011 по 2016 гг. проходил стажировку в Институте астрофизики при Венском университете, г. Вена, Австрия.

По итогам обсуждения диссертации «Динамические процессы в газопылевых протопланетных дисках» на объединенном семинаре кафедры физики космоса ЮФУ и отдела космических исследований НИИ физики Южного федерального университета принято следующее заключение:

Актуальность исследований:

Исследование околозвездных газопылевых дисков играет ключевую роль в понимании того, как образуются звезды и планеты. Известно, что звезды образуются в результате гравитационного коллапса компактных газопылевых дозвездных конденсаций. Однако большая часть вещества дозвездной конденсации, прежде чем попасть на протозвезду, образует околозвездный газопылевой диск благодаря сохранению углового момента падающего на протозвезду вещества. Аккреция вещества из диска на протозвезду может иметь существенное влияние, как на последующую эволюцию протозвезды, так и на динамические, тепловые и химические процессы в самом диске. Для изучения характера протозвездной аккреции необходима разработка специальных численных методов, способных моделировать сложные физические процессы и цепочки обратной связи в диске. Более того, именно в молодых (так называемых протопланетных)

дисках начинается процесс образования планет, либо в результате гравитационной неустойчивости, либо в результате слипания пылевых частиц, либо в результате комбинации этих двух процессов. Благодаря высоким технологиям и современным телескопам количество обнаруженных планет вне Солнечной системы (экзопланеты) исчисляется тысячами, включая экзопланеты, по своим физическим характеристикам сильно отличающиеся от планет Солнечной системы. Разнообразие свойств и характеристик обнаруженных экзопланет подразумевает разнообразие форм и физических условий в протопланетных дисках, в котором они образуются и эволюционируют. Действительно, протопланетные диски не являются некими статичными объектами; они образуются, эволюционируют, взаимодействуют с окружающей средой и диссипируют, во многом определяя архитектуру и временной масштаб, на которых образуются планетарные системы. Наблюдения газопылевого диска у системы HL Тельца на интерферометре ALMA показали наличие ряда концентрических ярких колец, разделенных темными дугообразными промежутками, характерных для процесса планетообразования, но совершенно неожиданных принимая во внимание молодой (менее одного миллиона лет) возраст данной системы. Таким образом, исследование протопланетных дисков и, в частности, разработка усовершенствованных теоретических и численных моделей, позволяющих моделировать околозвездные газопылевые диски начиная с самых ранних стадий эволюции приобретает особую актуальность.

Новизна полученных результатов:

Диссертация посвящена изучению динамических процессов в протозвездных и протопланетных дисках вокруг молодых звезд различной массы и металличности. Подобные исследования характеризуются широким спектром эволюционных времен от нескольких тысяч до миллиона лет и пространственных масштабов от одной десятой до тысяч астрономических единиц, что требует разработки специализированных численных гидродинамических моделей. В диссертации представлен численный

гидродинамический код FEOSAD в приближении тонкого диска, способный исследовать формирование и эволюцию дисков на больших пространственных и временных масштабах и учитывающая наиболее значимые физические процессы в молодых газопылевых дисках, включая динамику и рост пылинок, эффекты магнитного поля и фазовые превращения летучих соединений. Проверка кода выполнена на стандартных тестах, включая распад разрыва, а также тест на сохранение полного углового момента.

Разработка уникального численного комплекса для расчета формирования и длительной эволюции газопылевого диска позволили сделать ряд важных открытий в области ранней эволюции молодых звездных объектов. Исследована авторская модель вспышечной моды аккреции на протозвезду, вызванная падением плотных газовых сгустков, образующихся в диске в результате гравитационной фрагментации. Впервые установлено, что вспышки аккреции и светимости, вызванные падением сгустков, могут рассматриваться как универсальный механизм протозвездной аккреции, который может влиять на эволюцию протозвезд и их дисков независимо от их массы или химического состава среды, в которой они формируются. Показано, что проблему светимости, согласно которой средняя светимость протозвездных объектов в молодых областях звездообразования на порядок величины меньше, чем предсказанная теоретически на основе модели сферического коллапса протозвездного облака, можно разрешить в рамках модели переменного темпа аккреции вещества из диска на протозвезду, типичного для гравитационно неустойчивых дисков. Разработан гибридный сценарий образования изолированных коричневых карликов и очень маломассивных звезд, основанный на выбросе массивных газовых сгустков из фрагментирующих протозвездных дисков в результате эффекта гравитационной пращи. Впервые показана возможность прямого детектирования газовых сгустков в гравитационно неустойчивых дисках при наблюдениях в тепловом излучении пыли на интерферометре ALMA.

Показано, что газовые сгустки, образующиеся в результате гравитационной фрагментации протозвездных дисков на ранних стадиях эволюции, могут избежать падения на протозвезду в результате радиальной миграции и в последующем сформировать планеты-гиганты и коричневые карлики на орбитальных расстояниях от десятков до сотен астрономических единиц. Установлено, что размер пылевых частиц может достигать нескольких сантиметров, а в дисках с пониженной турбулентной вязкостью дорастать до метровых валунов уже на ранней внедренной стадии эволюции диска.

Научная и практическая ценность:

Автором диссертации выполнен системный анализ динамических процессов в околозвездных газопылевых дисках, существенно расширивший наши представления о физике процессов, происходящих на ранних стадиях эволюции данных объектов. Проведенная работа привела к открытию вспышечной моды аккреции вещества из диска на протозвезду в гравитационно неустойчивых дисках, которая в настоящее время является одной из общепринятых моделей объяснения вспышек светимости у звезд типа FU Ориона. Более того, обнаружено, что та же самая модель гравитационной неустойчивости и фрагментации диска работает в околозвездных дисках вокруг массивных звезд, что может объяснить недавно детектированные вспышки светимости у данного класса звезд. Таким образом, разрабатываемая в проекте модель вспышек аккреции и светимости может носить универсальный характер. Исследования гравитационной неустойчивости дисков позволили открыть такие явления, как выброс газовых сгустков из диска с последующим сжатием и образованием изолированных коричневых карликов. Полученные теоретические модели гравитационно неустойчивых дисков использованы для прямого сравнения с наблюдениями на ведущих мировых телескопах (ALMA, JVLA, SUBARU), а также для обоснования подачи наблюдательных заявок с зарубежными коллегами. Разработанная гидродинамическая модель FEOSAD эволюции газопылевого диска используется несколькими российскими и

международными группами для моделирования динамической и химической эволюции диска (ИНАСАН РАН, г. Москва; Университет Западного Онтарио, г. Лондон, Канада; Челябинский государственный университет, г. Челябинск). Разработанная численная модель также послужила основой для кандидатской диссертационной работы «Влияние аккреции на раннюю эволюцию звезд (суб-)солнечной массы» Элбакяна В. Г. и планируемой к защите кандидатской диссертационной работы «Динамика и эволюция пыли в гравитационно-неустойчивых протозвёздных дисках» Скляревского А. М.

Полнота опубликования научных результатов. Научный вклад, внесенный диссертантом в опубликованные работы

В диссертации представлено две единоличных работы автора и 33 совместные работы. В совместных работах вклад автора является либо ведущим, либо равным вкладу других авторов. В список положений, выносимых на защиту, включены лишь те результаты и выводы, в которых вклад автора является основным.

Результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. *Vorobyov E. I., Zakhochay O. V., Dunham M. M.* “Fragmenting protostellar discs: properties and observational signatures” // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, Volume 433, 3256 (первый квартал)
2. *Dunham M. M., Vorobyov E. I., Arce H. R.* “On the reliability of protostellar disc mass measurements and the existence of fragmenting discs” // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, Volume 444, 887 (первый квартал)
3. *Dong R., Vorobyov E. I., Pavlyuchenkov Y., et al.* “Signatures of gravitational instability in resolved images of protostellar disks” // *Astrophysics Journal*, 2016, Volume 823, 141 (первый квартал)
4. *Kadam K., Vorobyov E. I., Regály Z., Kóspál, A., Ábrahám P.* “Dynamical gaseous rings in global simulations of protoplanetary disk formation” // *Astrophysics Journal*, 2019, Volume 882, 96 (первый квартал)
5. *Vorobyov E. I., Lin D. N. C., Guedel M.* “The effect of external environment on the evolution of protostellar disks” // *Astronomy & Astrophysics*, 2015, Volume 573, 5 (первый квартал)

6. *Vorobyov E. I., Regaly Z., Guedel M., Lin D. N. C.* “An alternative model for the origin of gaps in circumstellar disks” // *Astronomy & Astrophysics*, 2016, Volume 587, 146 (первый квартал)
7. *Vorobyov E. I., Matsukoba R., Omukai K., Guedel M.* “Thermal evolution of protoplanetary disks: from β -cooling to decoupled gas and dust temperatures” // *Astronomy & Astrophysics*, 2020, Volume 638, 102 (первый квартал)
8. *Vorobyov E. I., Basu S.* “Variable protostellar accretion with episodic bursts” // *Astrophysics Journal*, 2015, Volume 805, 115 (первый квартал)
9. *Liu H. B., Takami M., Kudo T., Hashimoto J., Dong R., Vorobyov E. I., et al.* “Circumstellar disks of the most vigorously accreting young stars” // *Science Advances*, 2016, Volume 2, No. 2, 1500875 (первый квартал)
10. *Vorobyov E. I., Elbakyan V. G., Plunkett A. L., Dunham M. M., Audard M., Guedel M., Dionatos O.* “Knotty protostellar jets as a signature of episodic protostellar accretion?” // *Astronomy & Astrophysics*, 2018, Volume 613, 18 (первый квартал)
11. *Kadam K., Vorobyov E. I., Regály Z., Kóspál A., Ábrahám P.* “Outbursts in global protoplanetary disk simulations” // *Astrophysics Journal*, 2020, Volume 895, 41 (первый квартал)
12. *Liu H. B., Vorobyov E. I., Dong R., Dunham M. M., Takami M., et al.* “A concordant scenario to explain FU Orionis from deep centimeter and millimeter interferometric observations” // *Astronomy & Astrophysics*, 2017, Volume 602, 19 (первый квартал)
13. *Vorobyov E. I., Khaibrakhmanov S., Basu S., Audard M.* “Accretion bursts in magnetized gas-dust protoplanetary disks” // *Astronomy & Astrophysics*, 2020, Volume 644, 74 (первый квартал)
14. *Vorobyov E. I., Elbakyan V. G., Liu H. B., Takami M.* “Distinguishing between different mechanisms of FU-Orionis-type luminosity outbursts” // *Astronomy & Astrophysics*, 2021, Volume 647, 44 (первый квартал)
15. *Vorobyov E. I., Elbakyan V. G., Omukai K., Hosokawa T., Matsukoba R., Guedel M.* “Accretion bursts in low-metallicity protostellar disks” // *Astronomy & Astrophysics*, 2020, Volume 641, 72 (первый квартал)
16. *Kadam K., Vorobyov E. I., and Kóspál A.* “Eruptive behavior of magnetically layered protoplanetary disks in low-metallicity environments” // *Astrophysics Journal*, 2021, Volume 909, 31 (первый квартал)

17. *Vorobyov E. I., DeSouza A. L., Basu S.* “The burst mode of accretion in primordial protostars” // *Astrophysics Journal*, 2013, Volume 768, 131 (первый квартиль)
18. *Sakurai Y., Vorobyov E. I., Hosokawa T., Yoshida N., Omukai K., Yorke H. W.* “Supermassive star formation via episodic accretion: protostellar disc instability and radiative feedback efficiency” // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, Volume 459, 1137 (первый квартиль)
19. *Matsukoba R., Vorobyov E. I., Sugimura K., Chon S., Hosokawa T., Omukai K.* “Disc fragmentation and intermittent accretion on to supermassive stars” // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, Volume 500, 4126 (первый квартиль)
20. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Kuiper R., Kley W.* “On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation” // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, Volume 464, L90 (первый квартиль)
21. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Elbakyan V. G., Stecklum B., Eisloffel J., Sobolev A. M.* “Burst occurrence in young massive stellar objects” // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, Volume 482, 5459 (первый квартиль)
22. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Elbakyan V. G., Eisloffel J., Sobolev A. M., Stoehr M.* “Parameter study for the burst mode of accretion in massive star formation” // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, Volume 500, 4448 (первый квартиль)
23. *Vorobyov E. I., Baraffe I., Harries T., Chabrier G.* “The effect of episodic accretion on the phase transition of CO and CO₂ in low-mass star formation” // *Astronomy & Astrophysics*, 2013, Volume 557, 35 (первый квартиль)
24. *Vorobyov E. I., Elbakyan V. G., Takami M., Liu H. B.* “Effect of luminosity outbursts on protoplanetary disk dynamics” // *Astronomy & Astrophysics*, 2020, Volume 643, 13 (первый квартиль)
25. *Dunham M. M., Vorobyov E. I.* “Resolving the luminosity problem in low-mass star formation” // *Astrophysical Journal*, 2012, Volume 747, 52 (первый квартиль)
26. *Baraffe I., Vorobyov E. I., Chabrier G.* “Observed luminosity spread in young clusters and FU Ori stars: a unified picture” // *Astrophysical Journal*, 2012, Volume 756, 118 (первый квартиль)

27. *Vorobyov E. I., Elbakyan V., Hosokawa T., Sakurai Y., Guedel M., Yorke H.* “Effect of accretion on the pre-main-sequence evolution of low-mass stars and brown dwarfs” // *Astronomy & Astrophysics*, 2017, Volume 605, 77(первый квартиль)
28. *Basu S., Vorobyov E. I.* “A hybrid scenario for the formation of brown dwarfs and very low mass stars” // *Astrophysical Journal*, 2012, Volume 750, 30 (первый квартиль)
29. *Vorobyov E. I.* “Formation of giant planets and brown dwarfs on wide orbits” // *Astronomy & Astrophysics*, 2013, Volume 552, 129 (первый квартиль)
30. *Vorobyov E. I.* “Ejection of gaseous clumps from gravitationally unstable protostellar disks” // *Astronomy & Astrophysics*, 2016, Volume 590, 115 (первый квартиль)
31. *Vorobyov E. I., Steinrueck M. E., Elbakyan V., Guedel M.* “Formation of freely floating sub-stellar objects via close encounters” // *Astronomy & Astrophysics*, 2017, Volume 608, 107 (первый квартиль)
32. *Vorobyov E. I., Elbakyan V. G.* “Gravitational fragmentation and formation of giant protoplanets on orbits of tens of au” // *Astronomy Astrophysics*, 2018, Volume 618, 7 (первый квартиль)
33. *Vorobyov, E. I., Akimkin, V., Stoyanovskaya, O. P., Pavlyuchenkov, Y., and Liu, H. B.* “Early evolution of viscous and self-gravitating circumstellar disks with a dust component” // *Astronomy & Astrophysics*, 2018, Volume 614, 98 (первый квартиль)
34. *Vorobyov E. I., Elbakyan V. G.* “Gravitoviscous protoplanetary disks with a dust component II. Spatial distribution and growth of dust in a clumpy disk” // *Astronomy & Astrophysics*, 2019, Volume 631, 1 (первый квартиль)
35. *Vorobyov E. I., Pavlyuchenkov Y. N.* “Improving the thin-disk models of circumstellar disk evolution. The 2+1-dimensional model” // *Astronomy & Astrophysics*, 2017, Volume 606, 5 (первый квартиль)

Степень достоверности полученных результатов:

Достоверность полученных результатов подтверждена их публикацией в ведущих мировых журналах первого квартиля, таких как *Science Advances*, *the Astrophysical Journal*, *The Astrophysical Journal Letters*, *The Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* и *Astronomy & Astrophysics*, а также

высоким уровнем цитирования полученных результатов. Существование вспышечной моды аккреции подтверждено независимыми численными гидродинамическими исследованиями в университете Тюбингена, г. Тюбинген, Германия и Национальной астрофизической обсерватории Японии, г. Токио, Япония. Полученные в результате численного моделирования протозвездных дисков находят подтверждение при наблюдениях на ведущих мировых телескопах (Subaru). Сравнение модельных темпов протозвездной аккреции с известными темпами аккреции у звезд типа Т Тельца показало хорошее согласие, что указывает на корректное вычисление переноса массы и углового момента гравитационными и вязкими моментами сил в коде FEOSAD.

Важным свидетельством достоверности полученных результатов является их апробация на российских и зарубежных конференциях, в том числе и в качестве приглашенного докладчика, а также на семинарах в ведущих мировых учебных и научных заведениях. По теме диссертации было выполнено более 40 докладов в течение последних десяти лет. Диссертант активно сотрудничает с российскими и зарубежными коллегами и посещает такие научные заведения, как ИНАСАН РАН, г. Москва; Университет Западного Онтарио, г. Лондон, Канада; Институт астрофизики при Венском университете, г. Вена, Австрия; Университет Токио, г. Токио, Япония; Университет Киото, г. Киото, Япония; Обсерватория Конколи, г. Будапешт, Венгрия и др. Все выносимые на защиту положения тщательно аргументированы и полностью изложены в 35 работах соискателя, опубликованных в рецензируемых журналах первого квартиля из списка ВАК.

Соответствие требованиям к оформлению диссертационной работы, предъявляемым к работам, направляемым в печать:

Участники объединенного семинара кафедры физики космоса ЮФУ и отдела космических исследований НИИ физики ЮФУ считают, что представленная диссертация является завершенной научно-

исследовательской работой, уровень которой полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация Воробьева Эдуарда Игоревича «Динамические процессы в газопылевых протопланетных дисках» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Заключение принято на заседании объединенного семинара кафедры физики космоса ЮФУ и отдела космических исследований НИИ физики Южного федерального университета 16 декабря 2021 г., протокол № 14.

Присутствовало 11 человек. Результаты голосования: «за» - 11 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел.

Ачарова Ирина Александровна,

к.ф.-м.н., доцент,

Южный федеральный университет,

физический факультет,

кафедра физики космоса,

заведующий кафедрой, председатель заседания

