

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.280.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело N _____

Решение диссертационного совета от 29 июня 2022 г. № 68 о присуждении
Воробьеву Эдуарду Игоревичу, Российская Федерация,
учёной степени доктора физико-математических наук

Диссертация «Динамические процессы в газопылевых протопланетных дисках» по специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия принята к защите 28 марта 2022г., протокол № 58, диссертационным советом Д 002.280.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования, 119017 Москва, ул. Пятницкая, д.48, состав совета утверждён приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 128/нк от 22 февраля 2017 г., частичные изменения состава внесены приказами Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 301/нк от 23.11.2018, № 129/нк от 17.02.2021, № 331/нк от 12.04.2021.

Соискатель Воробьев Эдуард Игоревич, 1968 года рождения, имеет учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 Астрофизика, радиоастрономия, присуждённую решением диссертационного совета Специальной астрофизической обсерватории РАН от 19 октября 2001 года № 3, диплом кандидата наук КТ № 064638 выдан

8 февраля 2002 года. В настоящее время работает ведущим научным сотрудником в ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (ЮФУ).

Диссертация выполнена в отделе радиофизики и космических исследований Научно-исследовательского института физики ЮФУ, Министерство науки и высшего образования.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается темой исследования и компетентностью в вопросах, рассматриваемых в диссертации. Компетентность подтверждается публикациями по схожей тематике оппонентов и сотрудников ведущей организации.

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., профессор **Гринин Владимир Павлович**, заведующий лабораторией звездообразования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук;

д.ф.-м.н., доцент **Ламзин Сергей Анатольевич**, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова;

д.ф.-м.н., профессор **Хоперсков Александр Валентинович**, заведующий кафедрой информационных систем и компьютерного моделирования ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, – **в своём положительном отзыве**, составленном заведующим отделом радиоприёмной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии д.ф.-м.н., ст.н.с. **Зинченко Игорем Ивановичем** и утверждённом директором ИПФ РАН д.ф.-м.н., академиком **Денисовым Григорием Геннадьевичем**, указала, что диссертация Э. И. Воробьева представляет собой новое крупное

достижение в области исследования процессов образования звезд и планет. Она содержит большое число новых важных результатов. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, а её автор, Эдуард Игоревич Воробьев, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия.

Соискатель имеет 184 печатные научные работы. Диссертация оформлена в виде научного доклада, основанного на результатах, опубликованных за период с 2012 по 2021 в 35 статьях в журналах первого квартиля. Основные результаты диссертации, выносимые на защиту, в этих работах изложены полностью. Случаев заимствования материала без ссылки на автора не выявлено. **Наиболее значимые работы** по теме диссертации:

1. 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

2. Vorobyov E. I., Khaibrakhmanov S., Basu S., Audard M. Accretion bursts in magnetized gas-dust protoplanetary disks // **Astronomy & Astrophysics**, 2020, Volume 644, 74

3. 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

4. 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

5. 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

6. 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

7. Vorobyov E. I. and Basu S. Variable protostellar accretion with episodic bursts // **Astrophysics Journal**, 2015, Volume 805, 115

8. 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

9. Vorobyov E. I. Formation of giant planets and brown dwarfs on wide orbits // **Astronomy & Astrophysics**, 2013, Volume 552, 129

10. 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

На диссертацию и автореферат дополнительных отзывов не поступило.

Диссертационная работа посвящена изучению динамических процессов в протопланетных дисках и их влияния на аккреционную активность молодых звезд, находящихся на стадии эволюции до главной последовательности.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– Показано, что переменная протозвездная аккреция с эпизодическими вспышками присуща как звездам солнечной металличности, так и звездам с пониженной металличностью и первым звездам во Вселенной.

– Обнаружено, что процесс поступления вещества из внешней среды может оказывать существенное влияние на динамическую эволюцию протопланетных дисков. В частности, данный процесс может приводить к формированию дисков с обратным вращением относительно направления вращения звезды.

– Продемонстрировано, что процесс роста пыли происходит на самых ранних стадиях формирования диска. При этом, максимальный размер пылинок зависит от фрагментационных свойств пыли и степени турбулентности среды.

– Исследованы неопределённости в наблюдательных оценках масс молодых протопланетных дисков и показано, что большая часть данных объектов склонна к развитию гравитационной неустойчивости.

– Продемонстрировано существенное влияние вспышек светимости на динамическую эволюцию протопланетных дисков. Сжатие диска по завершению вспышки может приводить к развитию гравитационной фрагментации и формированию эмбрионов планет-гигантов.

– Показана важность учета протозвездной аккреции при расчете эволюции молодых звезд до главной последовательности.

Теоретическая значимость исследования:

– Предложена новая модель вспышек аккреции и светимости в результате приливного разрушения газопылевых сгустков, формирующихся в результате гравитационной фрагментации диска. Данная модель позволяет объяснить вспышки у молодых звездных объектов типа FU Ориона, а также у молодых массивных протозвезд типа S255IR.

– Отмечается, что часть сгустков может избежать приливного разрушения в результате миграции на протозвезду и сформировать планеты-гиганты или коричневые карлики на орбитальных расстояниях от нескольких десятков до сотен астрономических единиц, давая возможное объяснение формированию таких планетных систем, как система звезды HR 8799.

– Показано, что кинематические особенности протопланетных дисков, в частности, степень отклонения от симметричного кеплеровского закона, могут быть использованы для дифференцирования механизмов вспышек светимости типа FU Ориона.

– Сделан вывод о важности учета неизолированного характера эволюции протопланетных дисков.

– Предложено объяснение проблемы светимости, основанное на переменном характере темпа аккреции вещества у молодых гравитационно-неустойчивых протопланетных дисков.

– Предложен механизм выброса газовых сгустков из протопланетного диска с последующим формированием изолированных коричневых карликов и звезд очень малой массы.

— **Практическое значение** полученных соискателем результатов исследования заключается в:

– разработке численной гидродинамической модели протопланетных дисков FEOSAD, которая может в дальнейшем служить основой для изучения формирования протопланет и их первичных атмосфер, а также для обучения молодых специалистов основам высокоэффективного численного моделирования;

– предсказании вспышек аккреции и светимости у звезд низкой металличности, которое может быть проверено будущими наблюдениями на телескопах нового поколения (например, ELT);

– подтверждении метода детектирования прошедших вспышек светимости у звездных объектов типа FU Ориона по распространённости молекул CO в газовых оболочках, окружающих молодые протопланетные диски.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для составления заявок на наблюдения протопланетных дисков на таких наземных и космических телескопах, как ALMA, JWST и «Миллиметрон», а также могут быть включены в научные пособия для студентов и аспирантов, изучающих процессы звездообразования.

Достоверность результатов подтверждается публикацией результатов в международных журналах первого квартала, высокой цитируемостью результатов, апробацией результатов на многочисленных российских и международных конференциях и семинарах, а также сравнением результатов численного моделирования с наблюдениями протопланетных дисков.

Личный вклад соискателя:

Во всех работах вклад автора является либо ведущим, либо равным вкладу других авторов. Вклад автора включает в себя постановку задач, разработку численных гидродинамических методов, расчет и интерпретацию численных результатов, сравнение с наблюдательными данными, написание статей. В список положений, выносимых на защиту, включены лишь те результаты и выводы, в которых вклад автора является основным.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

– Не выполнен учет дополнительных слагаемых в уравнениях гидродинамики при переходе от трехмерного к двумерному моделированию в пределе тонкого диска.

– Адаптивный α -параметр является функцией координат и времени (через плотность). Почему тогда не учитывалась зависимость от температуры? Насколько адаптивный α -параметр чувствителен к выбору значений α_{MRI} и α_{dz} ?

– В диссертации не исследовано влияние дискового магнитного ветра на эволюцию протопланетного диска.

– Рассмотрение вспышек аккреции у массивных протозвезд ограничено механизмом гравитационной неустойчивости диска. Значит ли это, что другие механизмы, действующие у маломассивных звезд, заведомо неприемлемы?

– В диссертации используются термины «протозвездный диск» и «протопланетный диск» без пояснения их отличий.

Соискатель аргументировал:

– Интегрирование трехмерных уравнений гидродинамики в вертикальном направлении в пределах шкалы высоты диска с учетом правила Лейбница, действительно, приводит к появлению дополнительных слагаемых, пропорциональных производной шкалы высоты диска по времени. Однако вклад данных слагаемых незначителен по сравнению с остальными гидродинамическими компонентами из-за медленного изменения шкалы высоты диска со временем, и поэтому в гидродинамическом моделировании протопланетных дисков дополнительные слагаемые в настоящее время не рассматриваются.

– Зависимость адаптивного α -параметра от температуры газа присутствует неявно в определении поверхностной плотности магнитоактивного слоя, Σ_{MRI} . Данная величина зависит от степени ионизации

газа, которая в свою очередь напрямую зависит от температуры газа. Адаптивный α -параметр, действительно, чувствителен к значениям α_{MRI} и α_{dz} , выбор которых в диссертации основан на результатах численного магнитогидродинамического моделирования другими научными группами. Следует отметить, что современные наблюдательные данные указывают на то, что в протопланетных дисках степень турбулентности может быть ниже, чем ожидалось. Это может отразиться на значениях α_{MRI} в сторону понижения данного параметра, что следует учитывать в будущих работах.

– Магнитный дисковый ветер, действительно, может оказывать значительное влияние на эволюцию протопланетных дисков. Однако данное влияние сильно зависит от конфигурации и характера магнитного поля. Более того, в настоящее время не существует общепринятой модели магнитного дискового ветра с учетом магнитного поля, которую можно было бы применить к численному гидродинамическому моделированию комплексом FEOSAD. Автор разрабатывает соответствующую модель, но это тема отдельного проекта.

– Самые последние исследования, не вошедшие в диссертацию, действительно, указывают на то, что магниторотационная неустойчивость не может объяснить вспышки аккреции у массивных протозвезд, поскольку соответствующие модели предсказывают длительность вспышек, на несколько порядков превышающую наблюдаемые величины. Поскольку массивные звезды обычно являются двойными или кратными системами, то тесные сближения между компонентами, вероятно, могут приводить к вспышкам, но соответствующие теоретические работы автору не известны.

– Исторически сложилось так, что термин «протозвездный диск» относится к самой ранней стадии формирования диска, когда звезда набрала не более половины своей окончательной массы. Считалось, что на данном этапе формирование планет еще не происходит, а идет формирование только звезды. Термин «протопланетный» относится к последующей стадии эволюции диска, на которой начинаются процессы формирования планет.

Однако в настоящее время грань между двумя этими терминами действительно стирается, поскольку есть свидетельства в пользу формирования планет уже на «протозвездной» стадии.

На заседании 29 июня 2022 г. диссертационный совет постановил: за решение научной задачи, имеющей значение для развития естественных наук, присудить Воробьеву Э.И. учёную степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 11 докторов наук по специальности 01.03.02 Астрофизика и звёздная астрономия, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0.

Председатель диссертационного
совета Д 002.280.01, д.ф.-м.н



Бисикало
Дмитрий Валерьевич

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.280.01, к.ф.-м.н.

Чупина
Наталья Викторовна

29.06.2022