



Директор ИПФ РАН  
академик

Г.Г. Денисов

«09»

06

2022

## ОТЗЫВ

ведущей организации (Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук») на диссертационную работу Воробьева Эдуарда Игоревича «Динамические процессы в газопылевых протопланетных дисках», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Околозвездные (протозвездные и протопланетные) газопылевые диски играют очень важную роль в астрофизике. Такие диски формируются на ранних этапах звездной эволюции. Через них, в основном, происходит акреция вещества на протозвезду. В дисках же формируются биполярные истечения, уносящие часть этого вещества и избыточный угловой момент из системы. В дисках происходит образование планет – процесс, понимание которого очень важно и для поисков жизни во Вселенной. Хотя исследования протопланетных дисков ведутся уже очень долгое время, последние достижения наблюдательной астрономии резко подогрели интерес к этой тематике. Ключевую роль сыграло открытие тысяч экзопланет. Наблюдаемые характеристики планетных систем вокруг других звезд требуют объяснения. Кроме того, благодаря наблюдениям в миллиметровом диапазоне длин волн с высоким угловым разрешением и рекордной чувствительностью при помощи Большой миллиметровой/субмиллиметровой антенной решетки ALMA удалось впервые получить изображения дисков, которые демонстрируют их сложную структуру. Важным наблюдательным фактом также являются вспышки светимости молодых звезд, которые приписываются событиям эпизодической акреции. Такие вспышки давно известны у звезд сравнительно небольшой массы, но недавно были зарегистрированы и у массивных протозвезд. Эти достижения требуют интерпретации на основе адекватных теоретических моделей, чему и посвящена диссертационная работа Э.И. Воробьева. Таким образом, данная работа, несомненно, очень актуальна. При этом она затрагивает самые разные аспекты строения и эволюции дисков.

Диссертация представлена в форме научного доклада, что вполне оправданно, учитывая большое число первоклассных публикаций по теме работы. В то же время лаконичность такой формы представления может в некоторых случаях приводить к проблемам с пониманием некоторых деталей (что, впрочем, решается чтением оригинальных статей автора). Всего в диссертации 7 разделов, включая введение и заключение, а также список литературы. Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цели работы и основные результаты, описывается их научная новизна, научная и практическая ценность, а также личный вклад соискателя.

Второй раздел посвящен описанию разработанной автором численной гидродинамической модели FEOSAD (Formation and Evolution of Stars and Disks), которая лежит в основе всей дальнейшей работы. Это двумерная модель, использующая приближение тонкого диска и основанная на обычных уравнениях гидродинамики.

Двумерность позволяет изучать многие эффекты, недоступные для часто используемых одномерных моделей. Модель включает в себя учет эффектов нагрева излучением звезды и охлаждения за счет излучения пыли. Имеется модификация модели с учетом переноса излучения в вертикальном направлении. Есть вариант модели, в котором температуры пыли и газа могут быть различны. Еще одна модификация принимает во внимание эффекты магнитного поля. В этом же разделе моделируется эволюция пыли в диске (рост размера пылинок). Также рассматриваются фазовые превращения (сублимация с поверхности и конденсация на поверхность пылинок) летучих химических соединений, таких как CO и CO<sub>2</sub>.

В следующем разделе с использованием данной модели рассматривается динамическая и тепловая эволюция протозвездных и protoplanетных дисков. Во-первых, анализируется гравитационная неустойчивость дисков и их фрагментация. Показано, что эти эффекты сильно зависят от начальных условий в дозвездных облаках. Получены характеристики сгустков, образующихся в результате гравитационной фрагментации. Показано, что такие сгустки могут быть зарегистрированы на ALMA. Рассмотрен вопрос корректного определения масс дисков по излучению пыли. Гравитационная неустойчивость приводит также к образованию в диске спиральных структур, представляющих собой волны плотности. Наблюдения некоторых фуоров в ближнем ИК диапазоне демонстрируют подобные структуры, что может служить подтверждением результатов моделирования. Найдено, что при определенных условиях в дисках формируются кольцевые структуры. Рассмотрен вопрос влияния внешней среды на эволюцию дисков. Это влияние здесь заключается в падении внешнего вещества на диск. Наиболее интересные эффекты возникают в том случае, когда падающее вещество имеет угловой момент, противоположный по знаку угловому моменту диска. При этом формируются внешний и внутренний диск с противоположными направлениями вращения. Подобные системы, похоже, действительно наблюдаются. Проведено сравнение разных моделей тепловой эволюции диска и сделаны выводы об их применимости для разных задач.

Наибольшим по объему является четвертый раздел диссертации, посвященный вспышкам светимости протозвезд вследствие эпизодической акреции. Вначале речь идет о дисках вокруг звезд сравнительно небольшой массы. Рассматривается несколько вариантов. В первом вспышки объясняются акрецией вещества газовых сгустков, которые разрушаются приливными силами, на звезду. Этот вариант анализируется весьма подробно. Результаты моделирования сопоставляются с наблюдениями и отмечается неплохое согласие между ними. Также рассматриваются два других механизма вспышек – вспышки, вызванные магниторотационной неустойчивостью и вспышки, вызванные пролетом внешней звезды через околосзвездный диск. В работе выполнено сравнение наблюдательных характеристик этих трех механизмов. Отличия действительно имеются, что позволяет в принципе попытаться определить наиболее вероятный механизм в наблюдениях. В этом же разделе показано, что вспышки, обусловленные переменной акрецией могут происходить и в дисках с металличностью на 1–2 порядка ниже солнечной. Найдено, что сильная переменность акреции характерна и для дисков вокруг сверх массивных звезд с нулевой металличностью в ранней Вселенной. Как отмечалось выше, в последние годы впервые было зарегистрировано несколько вспышек в разных диапазонах у массивных протозвезд, которые, вероятно, объясняются событиями эпизодической акреции. В диссертационной работе выполнено моделирование и таких объектов, которое продемонстрировало развитие гравитационной неустойчивости и переменную акрецию, приводящую к вспышкам. Далее в разделе рассматривается влияние вспышек светимости на динамическую и химическую эволюцию дисков (за счет повышения температуры диска). Показано, в частности, что изменения химического состава газа сохраняются долгое время после вспышки и могут служить индикатором недавних вспышек. В некоторых случаях через несколько тысяч лет после вспышки развивается сильная гравитационная фрагментация диска с формированием эмбрионов

планет-гигантов во внешних областях. Наконец, в данном разделе рассматривается влияние вспышек на эволюцию молодых звезд и показано, что вспышечный режим акреции позволяет решить так называемую проблему светимости, которая заключается в том, что средняя светимость протозвезд на порядок величины ниже, чем предсказывают простые модели сферического коллапса.

Следующие два раздела самые короткие. Раздел 5 посвящен формированию планет-гигантов и коричневых карликов. Планеты-гиганты могут образовываться из газовых сгустков, возникающих в результате гравитационной неустойчивости во внешних областях диска. Благодаря многотельному гравитационному взаимодействию сгустков и центральной звезды, сгустки могут выбрасываться из диска, образуя коричневые карлики или маломассивные звезды. Найдено, что внутренняя структура выброшенных сгустков отличается от ожидаемой для компактных протозвездных облаков, образующихся при фрагментации молекулярного облака. В то же время модель не может объяснить наличие субзвездных спутников на широких орбитах вокруг звезд с массой  $< 0,7$  солнечной. Сгустки могут также выбрасываться из диска в результате столкновения с внешней звездой.

В разделе 6 рассматривается динамика и рост размеров пыли в протопланетных дисках. Найдено, что эффективность роста пылевых частиц различна в разных частях диска. Отношение массы пыли к массе газа сильно неоднородно, отклоняясь на порядок величины от стандартного значения 1/100. Крупная пыль дрейфует к центру сгустков, образуя компактное ядро и, возможно, протопланету.

В заключении сформулированы основные итоги диссертации и перспективы дальнейших работ. К основным результатам диссертации можно отнести следующее.

1. Разработана двумерная численная гидродинамическая модель FEOSAD, использующая приближение тонкого диска. Эта модель обеспечивает значительно более детальное и точное описание эволюции протопланетных дисков по сравнению с одномерными моделями.

2. Продемонстрирована универсальность механизма вспышек акреции и светимости у протозвезд в широких диапазонах масс и металличностей за счет приливного разрушения газопылевых сгустков, образующихся в результате гравитационной неустойчивости диска.

3. Показано, что поступление вещества из внешней среды может сильно влиять на динамическую эволюцию протопланетных дисков.

4. Показано, что гравитационная неустойчивость и фрагментация газопылевых дисков может приводить к образованию планет-гигантов и коричневых карликов.

5. Найдено, что отношение массы пыли к массе газа в гравитационно-неустойчивых дисках может быть сильно неоднородно в пределах диска.

Все вышеизложенное показывает, что диссертационная работа Э.И. Воробьева представляет собой всестороннее детальное исследование протопланетных дисков на основе численного гидродинамического моделирования. В работе получено много новых результатов, отмеченных выше. Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных методов моделирования, верификацией модели путем сравнения с результатами других работ. Сопоставление с наблюдениями в тех случаях, где это возможно, дает хорошее согласие. Все результаты опубликованы в ведущих астрономических журналах, что предполагает их рецензирование на высоком уровне.

Имеются некоторые вопросы и замечания, изложенные ниже. Как отмечено выше, частично они могут быть связаны с лаконичной формой представления работы.

1. Двумерная модель, безусловно, представляет собой значительный шаг вперед по сравнению с одномерными моделями. Тем не менее хотелось бы видеть достаточно строгое обоснование ее применимости к реальным дискам, толщина которых быстро растет с удалением от звезды. Этот вопрос рассматривается в оригинальных публикациях соискателя, но было бы правильно обсудить его и в научном докладе по диссертации, ввиду

его важности.

2. В разделе 2.4 при перечислении механизмов нагрева и охлаждения газа почему-то не указывается нагрев излучением звезды (хотя в разделе 2.1 это есть) и некоторые другие потенциально важные механизмы.

3. При рассмотрении вспышек акреции у массивных протозвезд соискатель ограничивается механизмом гравитационной неустойчивости, в отличие от дисков вокруг звезд небольшой массы, где обсуждаются 3 механизма. Значит ли это, что два других здесь заведомо неприменимы?

Эти замечания ни в коей мере не снижают общей очень высокой оценки работы. Диссертация Эдуарда Игоревича Воробьева «Динамические процессы в газопылевых protoplanетных дисках» представляет собой новое крупное достижение в области исследования процессов образования звезд и планет. Она содержит большое число новых важных результатов. Результаты представлены на многих международных и российских конференциях, опубликованы в большом числе статей в ведущих журналах (35 статей, все в журналах 1-го квартриля). В большинстве публикаций Э.И. Воробьев является первым автором, а в двух единственным. Диссертация Э.И. Воробьева была представлена на расширенном семинаре отдела радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики РАН с привлечением специалистов из других подразделений института и других организаций, и получила положительную оценку. Она удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, а ее автор, Эдуард Игоревич Воробьев, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Результаты диссертационной работы представляют интерес для специалистов в области физики и химии областей звездообразования, и могут быть использованы в ИНАСАН, ИПФ РАН, АКЦ ФИАН, ГАИШ МГУ, УрФУ и др., в частности, при планировании наблюдений protoplanетных дисков на различных инструментах.

Зав. отделом радиоприёмной аппаратуры  
и миллиметровой радиоастрономии,  
доктор физ.-мат. наук  
тел.: +7-831-4367253  
Email: [zin@ipfran.ru](mailto:zin@ipfran.ru)  
Адрес: 603950 Нижний Новгород,  
ул. Ульянова, 46, ИПФ РАН

И.И. Зинченко