

Отзыв официального оппонента В.П. Гринина о диссертации Э.И. Воробьева «Динамика – ческие процессы в газопылевых протопланетных дисках», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация Эдуарда Игоревича Воробьева посвящена изучению динамических процессов в протопланетных дисках и их влиянию на аккреционную активность молодых звезд, находящихся на стадии эволюции до главной последовательности. Из наблюдений известно, что аккреция вещества на молодые звезды происходит весьма неравномерно. На временных масштабах, сравнимых с периодом вращения звезды, нестабильность аккреции обусловлена взаимодействием аккреционного диска с магнитосферой звезды. Происхождение более масштабных событий, наблюдаемых в виде мощных вспышек фуоров, связывают с резким усилением темпа аккреции. Природа таких событий уже длительное время продолжает оставаться предметом оживленных дискуссий. В диссертации Э.И. Воробьева представлен новый взгляд на эту проблему, согласно которому нестабильность процесса аккреции на молодые звезды является следствием гравитационной неустойчивости и фрагментации протопланетных дисков на ранних стадиях их эволюции. Спонсором этого процесса является продолжающееся выпадение на диск звезды вещества из остатков протозвездного облака.

Диссертация оформлена в виде доклада, основанного на результатах 35 статей. Она состоит из Введения, шести глав и Заключения. Во Введении дан подробный обзор текущего состояния исследований по физике протопланетных дисков, сформулированы цели диссертации и результаты, выносимые на защиту, отмечена их новизна и практическая значимость.

В главе 2 описан численный гидродинамический комплекс FEOSAD (Formation and Evolution of Stars and Disks), разработанный автором диссертации для моделирования динамических процессов в дисках в двухмерном приближении. Здесь было бы уместно привести некоторые подробности, например, как учитывалась вязкость при численном решении задачи и дать ссылку на источник, из которого были взяты функции нагрева и охлаждения.

В разделе 2.2 показано, что более точный расчет теплового баланса в двухмерной модели диска, учитывающий градиент температуры по оси z , понижает температуру в диске. В результате увеличивается степень гравитационной неустойчивости диска и, как следствие, количество сгустков, образующихся в результате гравитационной фрагментации.

В последующих разделах Главы 2 описаны модификации вычислительного комплекса FEOSAD, учитывающие эволюцию пылевой компоненты диска, неравенство температуры пыли и газа, наличие в диске магнитного поля, а также фазовые превращения молекул CO и CO₂. Сравнение с существующими сейчас вычислительными комплексами других авторов показывает, что FEOSAD обладает более широкими возможностями при изучении динамической эволюции протопланетных дисков.

Глава 3 посвящена исследованию динамической и тепловой эволюции дисков, их гравитационной неустойчивости и фрагментации. Показано, что гравитационная фрагментация зависит от начальных условий в дозвездных облаках: чем больше масса протозвездного облака и скорость его вращения, тем активнее идет процесс фрагментации. При начальной массе протозвездного облака порядка 1 массы Солнца образующиеся в результате гравитационной фрагментации объекты представляют собой плотные газовые сгустки в диапазоне масс от одной массы Юпитера до одной десятой массы Солнца. С использованием упрощенной модели построены спектральные распределения энергии. Показано, что массивные и горячие газовые сгустки могут проявляться в виде локальных максимумов в спектральных распределениях энергии на $\approx 5 \mu\text{m}$.

Исследована также возможность наблюдений газовых сгустков на изображениях протозвездных дисков в миллиметровом диапазоне. С этой целью с использованием программного модуля CASA1 построены синтетические изображения диска на длинах волн 0.9 и 1.3 мм. Показано, что одного часа наблюдений на интерферометре ALMA с угловым разрешением 0.1" достаточно для обнаружения газовых сгустков с массой от 1.5MJ на орбитальных расстояниях ~ 800 а.е. в протозвездном диске, находящемся на расстоянии 250 парсек от Солнца.

В главе 3 обсуждаются также разные подходы к моделированию тепловой эволюции протопланетных дисков. Показано, что базовая модель с одинаковой температурой пыли и газа при учете вязкого нагрева и нагрева излучением звезды пригодна для решения большинства динамических задач. Различия в температуре газа и пыли не вызывают качественных изменений в структуре диска, но их нужно учитывать при исследовании химической эволюции протопланетных дисков и оценках их массы.

В четвертой главе представлены результаты численного гидродинамического моделирования мощных вспышек аккреции и светимости, подобных вспышкам фуоров. Рассмотрено также влияние таких вспышек на химико-динамическую эволюцию диска и звезды. В данной модели вспышки светимости происходят в результате приливных разрушений газовых сгустков в окрестности звезды с последующей аккрецией их вещества на звезду. Расчеты показывают, что сгустки формируются во внешних областях диска в процессе гравитационной фрагментации и мигрируют по направлению к звезде в результате гравитационного взаимодействия с другими сгустками и со спиральными волнами плотности. Автор диссертации иногда называет этот процесс падением сгустка на звезду, но на самом деле это, действительно, миграция, а не падение. В процессе миграции сгустки могут распадаться образуя кольцевые структуры, наблюдаемые на изображениях дисков в субмиллиметровом диапазоне.

Вспышки могут наблюдаться как изолированные события, разделенные большим интервалом времени, так и группами (кластерами). Параметры вспышек - средняя продолжительность и светимость - согласуются с данными, полученными из наблюдений фуоров. Во время таких вспышек светимость звезды увеличивается в десятки и сотни раз. Это оказывает сильное воздействие на ионизационную структуру околозвездного диска. Поскольку аккреция и истечение вещества в виде дискового ветра и джетов тесно связаны между собой, вспышки аккреционной активности могут сильно влиять на структуру джетов, вызывая появление на них пятен и узлов. Таким образом, предложенная автором гидродинамическая модель дисков на ранних этапах их эволюции хорошо согласуется с наблюдаемыми у молодых объектов сильными флуктуациями темпа истечения вещества. Данная модель, как показано далее, применима также к околозвездным дискам вокруг сверхмассивных первичных звезд, образующихся на ранних этапах эволюции Вселенной, а также к молодым массивным звездам Галактики.

Наряду с этой моделью в четвертой главе для полноты картины рассмотрена также альтернативная модель вспышек фуоров в результате развития магнито-ротационной неустойчивости. Показано, что она также может осуществляться в дисках молодых звезд за исключением маломассивных объектов, масса которых меньше 0.28 солнечных масс.

Главу 4 завершает анализ влияния вспышек светимости на динамическую эволюцию дисков. Показано, что в случае мощных и продолжительных вспышек это влияние оказывается довольно сильным за счет повышения температуры диска, что может затруднить развитие газодинамических неустойчивостей. Показано также, что гидродинамические модели с переменной протозвездной аккрецией и эпизодическими вспышками воспроизводят наблюдаемый разброс болометрических светимостей и температур протозвезд, а также зависимость болометрической светимости от массы звезды. Кроме того, аккреция вещества протозвездой на стадии ее формирования может объяснить наблюдаемый разброс светимости в молодых звездных скоплениях без какого-либо значительного разброса в их возрасте.

К этой главе есть небольшое замечание: автор диссертации использует без пояснений два разных термина, обозначающие околозвездные диски молодых звезд. В одних случаях это протозвездные диски, в других - протопланетные. Хотелось бы чтобы автор диссертации пояснил, чем вызван такой дуализм.

В Главе 5 обсуждается вопрос о происхождении планет-гигантов и коричневых карликов в контексте рассматриваемой модели динамической эволюции протопланетных дисков. Показано, что рождение таких объектов является естественным следствием газодинамической неустойчивости периферийных областей дисков и их последующей фрагментации. Часть таких маломассивных объектов получает скорости, превышающие локальную скорость убегания и покидает систему. Они формируют маломассивное крыло начальной функции масс. Сгустки с массой менее $15 M_{\text{Юр}}$ распадаются при взаимодействии с аккрецирующими остатками протозвездного облака. Моделирование показало, что часть сгустков на периферии дисков эволюционирует в планеты-гиганты и коричневые карлики с широкими орбитами. Такие

объекты были обнаружены в ходе поисков экзопланет и развитая диссертантом модель их вполне убедительно объясняет. Модель не объясняет существование коричневых карликов на широких орбитах, обнаруженных у звезд с массой < 0.7 масс Солнца. Это говорит о том, что образование таких систем нуждается в новых подходах.

В последней, шестой главе обсуждается вопрос об эволюция околозвездной пыли. Важность этого вопроса объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, пыль (особенно мелкая) является важнейшим источником непрозрачности протопланетных дисков, от которой зависит термодинамика дисков. Во-вторых, пыль является основным материалом, из которого образуются планеты земной группы, а также ядра планет-гигантов. Как и в предыдущих главах, рассматривается газопылевой протопланетный диск, подверженный сильной гравитационной неустойчивости и фрагментации. Одним из ключевых параметров, влияющих на скорость укрупнения пылинок, является турбулентная скорость. Именно благодаря ей, а также обратному процессу – разрушению пылинок при столкновениях - мелкая пыль может довольно долго сохраняться в верхних слоях протопланетных дисков, о чем свидетельствуют наблюдения околозвездной экстинкции у звезд типа UX Ori. В рассчитанных моделях турбулентная вязкости зафиксирована с помощью параметра α Шакуры и Сюняева (при $\alpha = 10^{-2}$). Расчеты показали, что динамическая неустойчивость диска приводит к неоднородному распределению пыли. Крупная пыль концентрируется во внутренней области диска. Аналогичным образом ведет себя пыль внутри газопылевых сгустков, что способствует образованию ядра, из которого может вырасти планета.

Оценивая диссертацию в целом, необходимо подчеркнуть, что моделирование газодинамических процессов в протопланетных дисках относится к числу наиболее сложных задач современной астрофизики, над решением которых работают группы теоретиков в разных странах. Результаты, полученные диссертантом и вынесенные им на защиту, надежно обоснованы и вносят крупный вклад в развитие этой области астрофизики. Работа Э.И.Воробьева удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Результаты, полученные диссертантом, могут быть рекомендованы для включения в учебники по астрофизике и научные пособия для студентов и аспирантов, изучающих процессы звездообразования, а также для использования в научных исследованиях по этой тематике, проводимых в астрономических институтах и обсерваториях РФ. Считаю, что Эдуард Игоревич Воробьев безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 астрофизика и звездная астрономия.

Отзыв подготовлен доктором физ.-мат. наук,
зав. Лаб. Звездообразования ФБГУН ГАО РАН Владимиром Павловичем Грининым,
Адрес: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65/1
Тел. 8 (812) 3637345
эл. адрес: vgcrao@mail.ru

Подпись В.П. Гринина заверяю:

Зам. директора по орг. вопросам Брискина Т.В.

