

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Санкт-Петербургский

государственный университет

С.В. Микушев

« 27 » ноября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Ломары Аслановны Максимовой на тему: «Влияние конвективной неустойчивости и поверхностных тепловых волн на структуру и эволюцию протопланетного диска», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Актуальность исследования

Согласно современным представлениям, звезды рождаются окруженными газопылевыми аккреционными дисками, которые в ходе своей эволюции становятся протопланетными, то есть в них начинается процесс образования планет. Данная гипотеза подтверждается наблюдательными данными, указывающими на распространность в дисках субструктур в виде колец и спиралей, а также прямыми обнаружениями формирующихся в дисках планет. Кроме того, наблюдения показывают, что эволюция молодых звезд с протопланетными дисками характеризуется вспышками светимости, причины которых могут быть неразрывно связаны с эволюцией протопланетных дисков.

Для определения условий образования планет, объяснения морфологических особенностей протопланетных дисков и выяснения причин вспышек светимости молодых звезд требуется разработка моделей протопланетных дисков. Эта задача осложнена необходимостью рассмотрения разнообразных физических процессов, включающих магнитогазодинамические эффекты, перенос излучения, химическую

кинетику. Важно учитывать развитие различного рода неустойчивостей, которые могут генерировать турбулентность и обуславливать наблюдаемые особенности акреции. Самосогласованное многомерное моделирование протопланетных дисков с учетом всех перечисленных эффектов до сих пор невозможно из-за ограничений на пространственное и временное разрешение разностных схем решения соответствующих дифференциальных уравнений. Поэтому большую роль играют более простые модели, в которых детально исследуется роль отдельных эффектов в эволюции дисков. В частности, актуальным является исследование тепловой структуры протопланетных дисков с целью выяснения роли конвективной неустойчивости в генерации турбулентности и определения особенностей появления тепловых волн как причины появления наблюдаемых неоднородностей структуры протопланетных дисков.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем работы составляет 118 страниц с 30 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 85 наименований.

В диссертации выполнено исследование по трем важным направлениям.

В первой главе исследовано влияние конвекции на эволюцию протопланетного диска. В предположении, что развитие конвективной неустойчивости приводит к генерации турбулентности и, как следствие, увеличивает скорость акреции, реализована одномерная модель турбулентного акреционного диска. В модели согласованно решается классическое уравнение вязкой эволюции диска и уравнения его тепловой структуры. Учитывается повышение турбулентной вязкости в областях развитой конвекции и приток массы из оболочки диска. Проведены расчеты эволюции диска для различных значений темпа притока массы из оболочки, эффективности конвекции и фоновой турбулентной вязкости. Определены диапазоны параметров, при которых возможно возникновение конвекции. Исследованы условия, при которых турбулентность, вызываемая конвективной неустойчивостью, приводит к эпизодическому характеру акреции. Определена форма профилей зависимости темпа акреции от времени во время вспышек от параметров модели.

Во второй главе описывается моделирование процесса возникновения тепловых поверхностных волн в рамках (1+1)-мерного приближения. В модели детально рассчитывается перенос ультрафиолетового излучения звезды вдоль лучей, направленных от звезды до рассматриваемых участков диска, и перенос инфракрасного (ИК) излучения диска в направлении, перпендикулярном плоскости диска. При расчете переноса излучения звезды учитывается градиент плотности газа внутри расчетных ячеек. С помощью

разработанной модели проведены расчеты эволюции протопланетного диска с различными массами.

В третьей главе на основе (1+1)-мерной модели, представленной в главе 2, развита полноценная двумерная радиационная модель тепловой структуры диска, в которой учитывается диффузия ИК-излучения в радиальном направлении. Выполняется сравнение результатов расчетов структуры протопланетного диска, сделанных с учетом различных приближений: а) диск находится в гидростатическом равновесии и ИК-излучение диффундирует только в вертикальном направлении, б) диск находится в гидростатическом равновесии и перенос ИК-излучения происходит в том числе в радиальном направлении, б) полноценная двумерная динамика диска и диффузия ИК-излучения только в вертикальном направлении, в) полноценная двумерная радиационная газодинамическая модель.

Заключение резюмирует результаты работы.

Научная новизна проведенного исследования, полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации

В диссертации представлен ряд оригинальных результатов об эволюции протопланетных дисков.

Впервые показано, что во внутренних областях протопланетных дисков для широкого набора параметров диска может развиваться конвективная неустойчивость. Конвекция может приводить к турбулизации вещества, что, при условии постоянного притока массы из оболочки диска, может обуславливать переменность акреции и, как следствие, быть причиной вспышек светимости молодых звезд.

Разработана **оригинальная** модель тепловой структуры протопланетного диска, в которой аккуратно рассчитывается перенос ультрафиолетового излучения звезды, а также диффузия ИК-излучения диска в радиальном направлении. С помощью модели **впервые** показано, что тепловые волны, развивающиеся в процессе взаимодействия излучения звезды с неоднородностями поверхности диска, могут развиваться не во всей толще диска, а только в его поверхностных слоях.

С помощью моделирования эволюции протопланетного диска в рамках согласованной радиационной газодинамической модели, развитой в диссертации, получен **новый результат** о том, что условия возникновения поверхностных тепловых волн зависят от особенностей переноса излучения в диске. В частности, диффузия ИК-излучения в радиальном направлении может сглаживать неоднородности распределения температуры и, как следствие, подавлять развитие тепловых волн.

Значимость для науки полученных результатов

Теоретическая значимость научных положений диссертации состоит в развитии теории эволюции протопланетных дисков, что имеет важное значение для теории образования звезд и планет. Практическая значимость заключается в возможности применения полученных результатов для интерпретации наблюдательных данных о вспышках светимости молодых звездных объектов, а также особенностей структуры протопланетных дисков, которые наблюдается на картах излучения дисков в высоком разрешении. Кроме того, подход к расчету эффективного коэффициента турбулентной вязкости через условие развития конвективной неустойчивости, а также модели переноса излучения, развитые в диссертации, могут быть полезны в более реалистичных газодинамических и магнитогазодинамических моделях протопланетных дисков.

Обоснованность и достоверность полученных научных положений, выводов и заключений

Достоверность представленных результатов и сформулированных выводов подтверждается использованием хорошо разработанных и апробированных аналитических и численных методов решения уравнений газодинамики и переноса излучения. Оригинальные результаты, полученные в диссертации, сравниваются с ранее полученным другими авторами результатам. В каждой главе явно и подробно отмечаются границы применимости развивающихся моделей.

Основные результаты диссертации апробированы на многочисленных всероссийских и международных конференциях и опубликованы в четырех статьях в Астрономическом журнале, который входит в список ВАК и является одним из ведущих российских рецензируемых научных журналов.

Замечания по содержанию и оформлению диссертационного исследования

1. Одним из основных предположений, лежащих в основе модели конвективно-неустойчивого диска, представленной в главе 1, является то, что турбулентная вязкость определяется двумя механизмами - предписанной фоновой вязкостью и вязкостью, обусловленной развитием конвективной неустойчивости. Параметры модели задаются таким образом, что фоновая вязкость соответствует турбулентному альфа-параметру равному 0.1 или 0.01. Для демонстрации вклада конвективной неустойчивости в перенос углового момента за счет турбулентных напряжений автору следовало оценить эффективное значение турбулентного-альфа

параметра для вязкости, обусловленной конвекцией (второе слагаемое в уравнениях 1.12 и 1.24).

2. В главе 2 указывается, что тепловые волны возникают на поверхности диска самопроизвольно. Неустойчивости развиваются при появлении малых возмущений в системе. Автору следовало обсудить, что в рассматриваемом случае может быть источником самопроизвольных малых возмущений поверхности диска, которые перехватывают больший поток излучения звезды и, как следствие, начинают расти. Полезным было бы проанализировать зависимости времени возникновения начальных возмущений и положения областей, в которых они возникают, от разрешения расчетной сетки.
3. В главе 3 представлена двумерная радиационная газодинамическая модель протопланетного диска. В отличие от модели, изложенной в главе 1, в данном случае в уравнениях отсутствует какая бы то ни было физическая вязкость. Автору необходимо было явно обсудить, наблюдается ли в двумерных расчетах перенос углового момента и вызванная им акреция вещества. Если да, то следовало указать, за счет какого механизма это происходит, и чему равно соответствующее эффективное значение турбулентного альфа-параметра.

Указанные замечания не затрагивают основные положения и выводы работы, не снижают ее значимости и не влияют на общую высокую положительную оценку работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертации могут представлять интерес для астрофизиков и астрономов СПбГУ, Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, Государственного астрономического института им. Штернберга МГУ, Коуровской астрономической обсерватории УрФУ и других астрономических организаций, в которых проводятся исследования молодых звезд с протопланетными дисками.

Заключение

Диссертационная работа Максимовой Л.А. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Разработанные оригинальные численные модели основаны на современных протестированных конечно-разностных методах, для каждой модели описаны границы их применимости. Полученные в диссертации результаты обладают научной новизной, вносят вклад в теорию эволюции протопланетных дисков и могут быть применены для интерпретации

наблюдаемых вспышек светимости молодых звездных объектов и особенностей структуры протопланетных дисков.

Диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Максимова Ломара Аслановна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Отзыв подготовлен кандидатом физико-математических наук, доцентом, старшим научным сотрудником кафедры гидроаэромеханики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Сергеем Александровичем Хайбрахмановым.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры астрофизики Санкт-Петербургского государственного университета 23 ноября 2023 года, протокол № 44/8/2-02-2.

Заведующий кафедрой астрофизики,
доктор физико-математических наук,
профессор

В.П.Решетников

Старший научный сотрудник
кафедры гидроаэромеханики,
кандидат физико-математических наук,
доцент

С.А.Хайбрахманов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Ученое звание профессора
Удостоверено



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Адрес: Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Телефон (812) 328-77-32

e-mail: spbu@spbu.ru.

Сайт: spbu.ru