

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу РАЗДОБУРДИНА Дмитрия Николаевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия» (отрасль наук: «физико-математические») на тему «Транзиентная динамика возмущений в астрофизических дисках»

Диссертация Д.Н. Раздобурдина посвящена очень интересной теме – исследованию поведения в аккреционных дисках возмущений, демонстрирующих транзиентный рост. Такие возмущения принципиально отличаются от экспоненциально нарастающих неустойчивых мод, их рост происходит линейным или степенным образом до определенного момента времени, после чего эти возмущения убывают. Сегодня считается общепринятым, что аккреционные диски сильно турбулизованы, поскольку молекулярная вязкости вещества в дисках позволяет обеспечить только очень низкую вязкость, на много порядков меньшую наблюдаемой. Этот факт был установлен более сорока лет назад в основополагающих работах по теории α -дисков. Однако причина возникновения сильной турбулентности в дисках до сих пор не ясна. Предложено всего несколько возможных механизмов турбулизации, каждый из которых имеет серьезные проблемы.

Возможно, причиной турбулизации могут быть транзиентно растущие возмущения, если их амплитуды в максимуме достигают уровня необходимого для возникновения нелинейных неустойчивостей. Исследование транзиентного роста возмущений является сегодня важным и востребованным научным направлением в рамках более широкой темы, посвященной структуре, динамике и наблюдательным проявлениям астрофизических аккреционных дисков.

Очевидным подтверждением актуальности данной темы диссертации является только что случившееся присуждение Государственной премии России по науке и технологии основоположникам теории дисковой аккреции – Николаю Ивановичу Шакуре и Рашиду Алиевичу Сюняеву.

Диссертация Д.Н. Раздобурдина состоит из введения, четырех глав, короткого заключения и списка литературы. Основную часть введения занимает специализированный обзор исследований, посвященный вопросам возникновения и развития неустойчивостей в аккреционных дисках и механизмам их турбулизации. Обзор компактный и очень плотный, при малом объеме он содержит ссылки примерно на 140 оригинальных работ из

183, содержащихся в библиографии. Направленность обзора очень точно соответствует теме диссертации.

Во второй половине введения сформулирована цель и рассмотрены формальные признаки результатов диссертационной работы: актуальность, научная ценность, апробация. Там же сформулированы результаты выносимые на защиту, публикации в рецензируемых журналах и глава в коллективной монографии, в которых эти результаты были опубликованы, а также охарактеризован личный вклад диссертанта.

В самом конце введения описана структура диссертации.

Первая глава содержит описание математического аппарата, который используется при исследовании транзитного роста линейных возмущений. Описание достаточно подробное для того, чтобы понять суть этих методов, а также их применение в исследованиях, проведенных в последующих главах. При этом по всем ключевым моментами используемых методов даны ссылки на использующие их оригинальные работы и на более подробное их описание. В этой же главе приведены два простых примера, поясняющих механизм транзитного роста неустойчивостей. Это «биения» невозрастающих мод и рост амплитуды полного возмущения при убывании образующих его компонентов.

Во второй, третьей и четвертой главах последовательно рассмотрены задачи транзитного роста возмущений в последовательно усложняющихся моделях астрофизических дисков. Во второй главе моделью является тонкий баротропный квазикеплеровский тор при этом рассматривается частный случай возмущений, являющихся совокупностью акустических волн. В третьей главе рассмотрено развитие линейных возмущений общего вида в полубесконечном невязком диске. В последней главе рассматривается уже вязкий аккреционный диск причем в двух вариантах гравитационного потенциала: ньютоновском и потенциале Пачиньского-Виите, описывающем гравитационное поле шварцшильдовой черной дыры.

Каждая из этих глав начинается с вывода и аналитического исследования уравнений эволюции линейных возмущений в соответствующих моделях. По возможности проводятся аналитические оценки, но основные результаты получены в ходе численного моделирования. Полученные результаты подробно комментируются и разбираются. Очень приятно, что каждая из этих глав содержит собственное заключение, содержащее констатацию полученных в ней результатов.

Следует отметить, что выводы уравнений и анализ полученных численных результатов поведены очень подробно, неясные или оставшиеся без объяснений моменты практически отсутствуют. В отличие от этого,

описание численных методов решения полученных уравнений чрезвычайно краткое. В главах 2 и 3 автор ограничивается только описанием структуры используемой разностной схемы, в более сложной в вычислительном смысле главе 4 описание несколько более подробное, но не на много. Вопросы же реализации вычислений на компьютерах в диссертации не затронуты вообще, при том, что наиболее трудоемкие вычисления проводились с использованием методов параллельных вычислений. Вероятно, диссертант не считает владение современными численными методами существенной частью собственной квалификации, но я, как оппонент, с этим не согласен.

Переход от более простых моделей к более сложным позволил диссертанту проследить какие свойства полученных им решений являются общими, а какие – специфическими, и каким образом по мере усложнения моделей меняется поведение линейных возмущений.

Заключение, приведенное в конце диссертации получилось кратким, по-видимому, из-за того, что каждая из глав была снабжена собственным промежуточным заключением, где анализировались ее результаты.

Библиография содержит 183 названия.

Диссертация написана хорошим языком, очень подробно и понятно.

Новизна и достоверность полученных результатов не вызывает сомнения. Там, где используется методы, предложенные ранее другими исследователями, наряду со ссылкой на их работы указано в чем именно проведенные ими исследования отличаются от проведенных диссертантом и его соавторами. Используемые методы подробно описаны и обоснованы, и, по-моему мнению, не содержат ошибок. Полученные результаты, в частности, положения выносимые на защиту, докладывались на нескольких научных конференциях высокого уровня и опубликованы в рецензируемых журналах, некоторые из которых известны жестким подходом к рецензированию публикаций.

Оформление диссертации соответствует требованиям ГОСТ 7.32-2001 и дополнительным требованиям ВАК. Автореферат полно и верно отражает содержание диссертации.

В диссертации отмечены следующие недостатки.

- 1 В диссертации отсутствует единое место в котором было бы сформулировано отличие терминов «тонкий тор» и «тонкий аккреционный диск».
- 2 На стр. 37 до формулы (10) включительно для записи суммы используется нотация с явным знаком суммирования Σ , а в формуле (11) и нескольких формулах далее – нотации слепого суммирования по

- одноименным разновысоким индексам. Смена нотации никак не отмечена в тексте.
- 3 На стр. 38 в формуле (15) опечатка: в правой части формулы должны стоять одноименные разновысокие индексы.
 - 4 В главе 2 на стр. 51 (последний абзац) безразмерная радиальная протяженность потока x_d определена как разность координат нормированных внешних и внутренних границ тора, т.е. как вычисляемая величина. В то же время в подписях к рисункам 4 (стр. 57) и 5 (стр. 59) величина x_d задается. Переход к использованию величины x_d как основной в тексте главы 2 не описан.
 - 5 На стр. 59 на рисунке 5 (правый график) из-за обилия кривых не различимы штрихи на нижней горизонтальной оси.
 - 6 На стр. 61 на рисунке 6 в подписи присутствуют буквенные обозначения графиков (вероятно «а» – левый, «б» – правый), а на рисунке этих букв нет.
 - 7 В последнем абзаце на стр. 70 не разрешена ссылка на формулу из главы 2.
 - 8 На стр. 76 в формуле (106) опечатка: в правом нижнем элементе матрицы должно быть написано « $16\Omega^4$ » вместо « $16\Omega^2$ ».
 - 9 В главе 3 рассматривается полубесконечный аккреционный диск (см. первый абзац главы на стр. 67). Однако в разделе 3.3 этой главы (стр. 81, абзац после формулы (119)) появляется параметр безразмерной радиальной протяженности потока x_d , т.е. рассматривается уже диск (или тор) с внешней границей. Этот переход в тексте не отмечен. Помимо этого для величины используется другое определение (другая нормировка), чем на стр. 51, это видно из рисунков 17 и 18 (стр. 89–90).
 - 10 На стр. 90 на рисунке 18 возмущение достигает максимальной амплитуды в момент времени $t_{opt} = 10$ (см. подпись к рисунку), однако на самом рисунке показан «узор» для момента $t = 11$. Причина выбора этого момента вместо t_{opt} не ясна.
 - 11 Формула (120) на стр. 92 определяет не волновое число, а длину волны – обратную волновому числу величину. При этом график на рис. 20 построен правильно – от волнового числа возмущения.
 - 12 В диссертации два раза используется термин «молекулярная вязкость», а два раза «микроскопическая вязкость».

Перечисленные замечания не сказываются на достоверности полученных в диссертации результатов. Принципиальных замечаний по существу работы нет.

Рассматриваемая диссертация представляет собой выполненный на высоком уровне научный труд, который содержит результаты, обладающие научной новизной и научной значимостью. Выводы достоверны и основаны на большом научном материале. Все выносимые на защиту положения отражены в публикациях и монографиях. Работа в целом и библиография, в частности, свидетельствуют о широком научном кругозоре и высокой квалификации и высоком уровне компетентности автора в исследуемой области.

Считаю, что диссертационная работа «Транзиентная динамика возмущений в астрофизических дисках» полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, а также требованиям положения о присуждении ученых степеней МГУ имени М.В.Ломоносова, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а автор диссертации – Дмитрий Николаевич Раздобурдин – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

Заведующий лабораторией космических проектов ГАИШ МГУ
доктор физ.-мат. наук, доцент



М.Е. Прохоров

Подпись зав. лаб. ГАИШ МГУ, д.ф.-.м.н. Прохорова М.Е. заверяю.

Директор ГАИШ МГУ
академик РАН



М.П.



А.М. Черепашук