

Отзыв

официального оппонента

на диссертацию Раздобурдина Дмитрия Николаевича

«Транзиентная динамика возмущений в астрофизических дисках»,

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная астрономия»

Диссертация посвящена одному из классических вопросов теории аккреции – проблеме турбулизации аккрецирующих потоков. Несмотря на то что данной проблеме уже несколько десятилетий, она далека от окончательного разрешения. Поэтому тема научных исследований, проведённых диссертантом, весьма актуальна и значима.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём диссертации составляет 154 страницы. В диссертации насчитываются 28 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 183 наименования.

Во введении даётся обзор проблем, затронутых в работе, обосновываются актуальность и цели работы. Здесь же дан обзор линейных механизмов, отвечающих за возникновение и поддержание турбулентности как в астрофизических (аккреционные и протопланетные диски), так и в лабораторных (течения Куэтта, Пуазейля, Тэйлор-Куэтта) сдвиговых потоках. Особое внимание уделено докритической турбулизации сдвиговых потоков в немагнитном кеплеровском потоке, в связи с явлением транзиентного роста линейных возмущений.

Первая глава посвящена детальному описанию математических методов, позволяющих отыскать линейное возмущение, приводящее к максимально возможному транзиентному росту, названное автором как оптимальное возмущение. Дано детальное описание двух методов поиска оптимальных возмущений: матричного и вариационного. Первый метод широко применяется как в астрофизической, так и в гидродинамической литературе, тогда как второй впервые был применён автором к астрофизическим дискам.

Во второй главе исследуется оптимальный рост волновых пакетов, состоящих из глобальных звуковых мод в геометрически тонком квазикеплеровском газовом торе. Радиальная структура мод была получена аналитически с помощью ВКБ-приближения. Для вычисления оптимального роста был применён матричный метод. Было показано, что транзиентный рост акустической энергии может достигать значительных величин, причём максимально возможный рост амплитуды рассматриваемых мод происходит в квазипериодическом режиме, а величина роста обратно пропорциональна отношению протяженности диска к его толщине. Этот результат может найти применение при исследовании механизма квазипериодических осцилляций в аккрецирующих системах.

В третьей главе обобщены результаты, полученные во второй главе, на случай произвольных адиабатических возмущений. При этом особое внимание уделено оптимальному росту крупномасштабных возмущений, длина волны которых сопоставимой с толщиной диска. Исследование подобных возмущений требует учёта радиальной структуры диска, т.к. масштаб изменения фоновых величин становится сравним с длиной волны возмущения. Для вычисления оптимального роста был применён вариационный метод. Использование вариационного метода позволило сформулировать и строго доказать необходимое и достаточное условие возможности транзиентного роста линейных возмущений в двумерном вращательном потоке идеальной жидкости.

На основе численных расчётов оптимальных возмущений было показано, что среди крупномасштабных возмущений наибольший рост демонстрируют сдвиговые вихри в форме лидирующих спиралей. Энергия подобных вихрей растёт в десятки раз за несколько оборотов вещества на внутреннем краю диска.

В четвёртой главе учитывается влияние диссипативных эффектов на оптимальный рост возмущений. Диссипация накладывает ограничение на максимальную закрутку лидирующих спиралей, исследованных в третьей главе. Учёт вязких сил позволил вычислить максимально возможный оптимальный рост при заданном числе Рейнольдса в потоке.

Помимо ньютоновского потенциала, в этой главе рассмотрены аккреционные

диски в псевдоньютоновском гравитационном потенциале Пачинского—Вииты, имитирующим эффекты общей теории относительности. Это позволило учесть отклонения орбитальной и эпициклической частот от их ньютоновских значений. Было показано, что в псевдорелятивистских областях газовых дисков рост крупномасштабных вихрей усиливается обратно пропорционально четвертой степени эпициклической частоты. Поэтому её стремление к нулю на внутреннем крае релятивистского диска, вблизи последней устойчивой орбиты, приводит к значительному увеличению роста крупномасштабных возмущений. Полученные кривые оптимального роста были интерпретированы в терминах более простой локальной задачи.

Отметим недостатки диссертации. Описание математического аппарата в главе 1 дано на чисто математическом языке, и очень трудно для понимания без знания функционального анализа. Практически во всей остальной части диссертации автор использует аппарат обычных дифференциальных уравнений, поэтому материал главы 1, на мой взгляд, мог бы быть изложен значительно понятнее. В диссертации используются один и тот же математический термин «норма» для различных величин: стр. 32. «Естественно ограничить область определения непрерывными векторами $q(0)$ с единичной нормой $\|q(0)\| = 1$.» стр. 93. «Также, кроме широко применявшейся ранее нормы, совпадающей с акустической энергией возмущения, была исследована норма, совпадающая с канонической энергией в осесимметричном случае.»

Некоторые замечания по литературе. В списке часть ссылок начинается с фамилии автора статьи, а другая часть с названия работы. На стр.10 фамилия Фрике (немецкая) преобразована во Фрайк. На стр. 54 Написано: «переход от трёхмерной задачи к эффективно двумерной осуществляется заменой плотности на поверхностную плотность, а индекс политропы на $n + 1/2$. Впервые этот факт был замечен в работе [20]». Это важное соотношение было получено гораздо раньше в работе *Hunter, C. Self-gravitating gaseous disks. Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 4, p. 219, 1972.* Обсуждаемая на стр.11 величина параметра турбулентной вязкости α оценена непосредственно из наблюдений транзиентных источников в

работе *Bisnovaty-Kogan, G. S.; Klepnev, A. S.; Giovannelli, F. Estimation of Alpha-Viscosity Coefficient from Observations of Nonstationary Disk Accretion. International Journal of Modern Physics: Conference Series, Volume 28, id. 1460186, 03/2014*, не упомянутой в диссертации.

Отмеченные недостатки нисколько не умаляют ценности данной диссертации, которая характеризуется оригинальностью применённых автором методов, новизной полученных результатов, и написана хорошим языком. Все результаты, выносимые на защиту, хорошо обоснованы и достоверны. Выводы автора важны, и его результаты должны найти свое применение в астрофизике высоких энергий. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах, международных конференциях, и были опубликованы в высокорейтинговых научных журналах. Результаты диссертации могут быть использованы при исследованиях, проводимых в ГАИШ МГУ, ИНАСАН, ИКИ РАН, ГАО РАН, АКЦ ФИАН.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная астрономия» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук МГУ, а её автор Раздобурдин Дмитрий Николаевич, несомненно, заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук МГУ.

Автореферат хорошо отражает содержание диссертации.

Главный научный сотрудник ИКИ РАН
д.ф.-м.н., профессор


Г.С. Бисноватый-Коган

Подпись Г.С. Бисноватого-Когана заверяю,
Ученый секретарь ИКИ РАН, д.ф.-м.н.




А.В. Захаров