

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Лазовика Ярослава Александровича

на тему

«Приливная диссипация и орбитальная эволюция в системах «звезда-планета»»

по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация Я.А. Лазовика посвящена разработке алгоритма, моделирующего орбитальную эволюцию системы «звезда-планета» с его последующим применением для решения широкого спектра задач, в том числе исследования динамики популяции короткопериодических систем с массивными экзопланетами.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во **введении** обоснована актуальность и практическая значимость диссертационной работы, сформулирована цель и описана научная новизна исследований, перечислены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** автор приводит описание разработанного им алгоритма планетной миграции. Особое внимание уделено расчетам темпов приливной диссипации на основе моделей звезд, полученных при помощи кода MESA. Также в этой главе дана параметризация магнитного взаимодействия, а также сформулированы принципы, на основе которых автор моделирует потерю планетой вещества.

Конкретные примеры реализации разработанного алгоритма описаны во **второй главе**. Автор исследует, какие факторы наиболее важны в контексте эволюции системы «звезда-планета»: начальные параметры планеты, звезды или параметры, характеризующие интенсивность взаимодействий. В

этой главе поднят важный вопрос о том, приливы каких типов вносят доминирующий вклад в миграцию планет.

Изучив характерные примеры орбитального перемещения планеты в процессе её эволюции, в **третьей главе** автор переходит к моделированию динамики всей популяции горячих юпитеров. На основе начальных распределений параметров систем, воссоздается наблюдаемое распределение планет, в результате чего автором были получены ценные статистические данные, свидетельствующие о значимости приливной диссипации среди реальных короткопериодических систем с газовыми планетами-гигантами. Сформулировано важное предположение, согласно которому определенная доля менее массивных планет, горячих нептунгов, может являться остатками горячих юпитеров, прошедших через фазу стабильной аккреции.

В **четвертой главе** автор применяет имеющиеся методики оценки приливной диссипации для исследования планетных приливов. Приведенные в этой главе результаты представляют собой существенное дополнение к тем данным, что были получены ранее для моделей маломассивных звезд. В частности, вычисленные темпы затухания инерциальных волн позволяют объяснить циркуляризацию орбит горячих и теплых юпитеров.

В **пятой главе** автор анализирует итоги своей работы через призму наиболее современных исследований по схожей тематике. Стоит подчеркнуть, что в большинстве случаев результаты находятся в полном или частичном согласии с данными из других публикаций. В тех случаях, когда несоответствия имеют место, автор предлагает возможные объяснения, позволяющие понять причину их возникновения.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, представлены шаги для предстоящего исследования.

Тема работы является, безусловно, **актуальной**. История наблюдений экзопланет насчитывает менее 30 лет. По мере роста числа открытых планет, возрастает необходимость использовать более сложные модели для объяснения их формирования и эволюции. Развитие методов обработки данных и вы-

числительных мощностей позволило проводить 3D симуляции различных гидродинамических процессов, в том числе и распространения и затухания приливных волн. Важнейшим результатом работы в этом направлении стало создание моделей и калибровок для оценки эффективности взаимодействий. Работа Я.А. Лазовика, посвященная реализации этих моделей для изучения миграции планет, является важным продолжением подобных исследований. По её итогам было получено большое количество принципиально **новых** данных. В этой связи особого упоминания заслуживает оценка темпов затухания приливных волн в газовых оболочках планет-гигантов, выполненная совместно с Адрианом Баркером, одним из ведущих специалистов в области теории приливов.

Обоснованность полученных результатов обусловлена использованием общепризнанного формализма для расчета темпов приливной диссипации, а также кодов MESA и starAML для получения эволюционных моделей звезд и профилей звездного ветра, соответственно. В ходе своей работы Я.А. Лазовик использует параметризацию закона торможения звезды, а также обращается к различным вспомогательным калибровкам, таким как функция светимости звезды в XUV-диапазоне. Вышеперечисленные зависимости основаны на наблюдениях большой выборки звезд.

Отдельные положения настоящей работы были сопоставлены с результатами схожих по тематике исследований и с данными наблюдений. Высокий уровень соответствия свидетельствует о **достоверности** полученных в диссертации результатов.

Работа выполнена на высоком уровне и изложена понятным и доступным языком. Результаты работы могут быть использованы в ГАИШ МГУ, ФИАН, ИКИ РАН, ЛФТИ РАН, Институте Астрономии РАН, Главной астрономической обсерватории РАН, Специальной астрофизической обсерватории РАН и других астрономических и физических научных учреждениях.

Тем не менее, к ней есть ряд замечаний:

ЗАМЕЧАНИЯ

1) В секции 1.3.2. описывается формализм, использующийся в дальнейшем для определения вклада инерциальных волн в приливную диссипацию. Этот формализм основан на работе Г. Огильви 2013 года, которая цитируется в тексте диссертации. Отмечу, что в этой работе, строго говоря, диссипация инерциальных волн не рассматривалась вообще, а был рассмотрен процесс возбуждения инерциальных колебаний под действием импульсной приливной силы. Результаты этой работы могут быть применены только для тех систем, в которых существует возможность эффективной истинной диссипации инерциальных мод, что может оказаться достаточно нетривиально. В известных мне случаях, эффективная истинная диссипация была связана с жестким ядром в центре рассматриваемого объекта (или, наличием скачка плотности), которое приводит к концентрации соответствующих возмущений на семействе лучей (характеристик). Этот процесс облегчает диссипацию возмущений. Этот эффект, однако, отсутствует, например, в случае полностью конвективного объекта. Я подозреваю, что в более реалистичных моделях реализуется какой-то промежуточный режим. В любом случае, не исключено, что вклад инерциальных волн переоценен, см. также раздел 4.2.

2) В начале секции 1.3.3. читаем «Гравитационные волны возникают вблизи границы между лучистым ядром и конвективной оболочкой» — отмечу, что, вообще говоря, это упрощенная точка зрения, возбуждение гравитационных волн возможно и в случае полностью радиативной звезды, хотя в этом случае этот процесс менее эффективен, чем для тех звезд, у которых имеется конвективная оболочка.

3) При обсуждении магнитных эффектов стоило сравнить величину эффективного сечения (1.22) с характерной площадью магнитосферы планеты.

- 4) При обсуждении возбуждения гравитационных волн в радиативных оболочках планет-гигантов (раздел 4.2) стоило бы показать распределение частоты Брента-Вяйсяля по радиусу. Также, в случае достаточно эффективной диссипации энергии во внешних слоях планеты, возможен их нагрев, который может привести к исчезновению радиативного слоя. Интересно было бы оценить, пользуясь результатами раздела 4.2, величину отклонения от полной синхронизации вращения на разных этапах орбитальной эволюции. Отметим, однако, что эти замечания вероятно стоит рассматривать как пожелания, которые стоит учесть в дальнейшей научной деятельности диссертанта.
- 5) Известно, что в ряде систем ось вращения звезды не совпадает с нормалью к орбите горячего юпитера, более того, известны и системы, в которых горячий юпитер движется в сторону, противоположную вращению звезды. Стоило бы обсудить и такие системы.
- 6) Незначительное замечание — читаем на стр.25 - «частота приливных возмущений» - как правило, эта величина называется «частота приливного воздействия» (tidal forcing frequency).

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Лазовик Ярослав Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

отдела теоретической астрофизики и

космологии Федерального

государственного бюджетного учреждения науки

«Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН» (ФИАН)

Иванов Павел Борисович

08 мая 2024 года

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 333-33-66, e-mail: ivanovpb@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН», астрокосмический центр, отдел теоретической астрофизики и космологии.

Тел.: +7(495) 333-33-66; e-mail: ivanovpb@lebedev.ru

Подпись сотрудника ФИАН

П.Б. Иванова удостоверяю: