

«ГОРЯЧИЕ ЮПИТЕРЫ»: ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ, ВОЛНЫ В ЗВЕЗДАХ И ПРИЛИВЫ



ИВАНОВ Павел Борисович,

доктор физико-математических наук

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

DOI: 10.7868/50044394820030032

В этой заметке обсуждаются самые интересные, с точки зрения автора, особенности систем, содержащих так называемые «горячие юпитеры» – планеты-гиганты, расположенные вне Солнечной системы и имеющие орбитальные периоды порядка нескольких дней. Особенное внимание уделено недавно обнаруженному в некоторых таких системах эффекту медленного уменьшения орбитального периода, а также приливным взаимодействиям, которые, вероятно, его вызывают. Обсуждается современное состояние теории так называемых «динамических приливов», в развитии которой автор принимал непосредственное участие, и ее способность объяснить данные наблюдений.

ВВЕДЕНИЕ

«Горячий юпитер» был первой планетой, обнаруженной возле «нормальной» звезды 51 Пегаса и получил обозначение «51 Пегаса b». Это газообразная планета-гигант с массой порядка половины массы Юпитера (напомним, что масса Юпитера $\sim 2 \cdot 10^{30}$ г составляет приблизительно одну тысячную массы Солнца) и орбитальным периодом

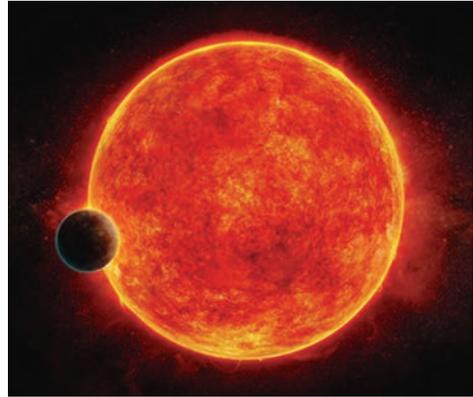
около 4 дней. Именно за открытие этой планеты была присуждена Нобелевская премия по физике за 2019 г. В дальнейшем было открыто несколько десятков подобных планет.

Существование такого рода объектов вызывает несколько фундаментальных с точки зрения теории образования планет вопросов. Во-первых, до сих пор идут споры о том, как они образовались. С моей точки зрения, является практически несомненным, что

они образовались вдали от своих родительских звезд, на расстояниях больше нескольких астрономических единиц (одна астрономическая единица равна «среднему» расстоянию от Земли до Солнца, около $1.5 \cdot 10^{13}$ см). В этой связи возникает вопрос: как горячие юпитеры преодолели расстояние от места рождения до их настоящего местоположения?

На сегодняшний день существуют две конкурирующие теории этого процесса. В основе первой теории лежит эффект «миграции» планет в протопланетных дисках. Вторая теория называется теорией «прыгающих горячих юпитеров». В ней предполагается, что изначально возникло порядка десятка планет на больших расстояниях. Гравитационные взаимодействия между ними привели к тому, что одна или несколько из них потеряли значительную долю орбитального углового момента. В результате их орбиты стали «высокоэксцентричными» с расстоянием минимального сближения со звездой порядка нескольких радиусов звезды. На таких расстояниях приливные взаимодействия между планетой и звездой становятся эффективными, в результате чего происходит потеря в основном энергии орбитального движения, но не углового момента. В случае доминирования приливных взаимодействий орбита планеты со временем становится все более «круглой» или, как говорят, «циркуляризуется». Следует отметить, что обе теории не свободны от существенной критики и в настоящее время активно обсуждаются в научной литературе.

Вторым весьма любопытным обстоятельством является тот наблюдательный факт, что плоскости орбит многих горячих юпитеров не совпадают с плоскостью, перпендикулярной оси вращения их родительских звезд. Более того, наблюдаются планеты, напри-



Так могла бы выглядеть вблизи планетная система, содержащая «горячий юпитер».
Иллюстрация сайта
<https://www.universetoday.com/>

мер, WASP-2b, WASP-15b, WASP-17b, HAT-P-6 и другие, которые движутся в сторону, противоположную направлению вращения звезды (так называемое ретроградное движение).

Установить направления орбитального движения относительно оси вращения звезды можно только для тех планет, для которых наблюдаются «астрономические транзиты»: в результате орбитального движения планета проходит по диску звезды. Это связано с так называемым «эффектом Росситера-Маклафлина». Его суть состоит в следующем: вследствие эффекта Доплера та часть звезды, которая вращается в направлении наблюдателя, вызывает голубое смещение спектральных линий, а та, что вращается от наблюдателя, в свою очередь, – красное смещение. При этом планета, заслоняющая эти части во время своего прохождения, изменяет интенсивность излучения, которое оказывается смещенным в разные стороны спектра. В результате по форме спектра звезды во время транзита можно судить о направлении орбитального движения относительно оси вращения.

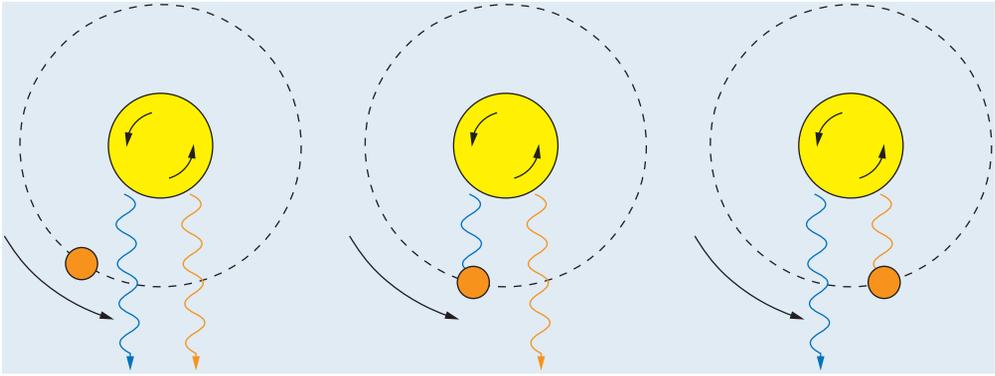


Иллюстрация эффекта Росситера-Маклафлина. Та часть звезды, которая движется в сторону наблюдателя, имеет более «голубое» излучение вследствие эффекта Доплера, та часть, которая движется от наблюдателя, – более «красное». Если звезда и планета вращаются в одну и ту же сторону, то сперва планета закрывает часть «голубого» излучения, а потом красного. В противоположном случае возникает обратная ситуация. Очевидно, что спектр звезды будет в результате этого меняться во время транзита и по характеру изменения можно судить о направлении вращения звезды. Иллюстрация Autiwa, «Википедия»

Разумно предположить, что протопланетный диск вращался в сторону вращения звезды. Поэтому для объяснения ретроградного движения необходимо либо рассматривать миграцию планет в дисках, вращающихся в сторону, противоположную орбитальному движению, либо теорию «прыгающих юпитеров». Хотя такая миграция, в принципе, возможна, тем не менее считается, что наблюдательные данные свидетельствуют, скорее, в пользу второй теории.

Третий интересный факт связан с горячими юпитерами с наиболее короткими орбитальными периодами (порядка одного дня), для которых наблюдаются транзиты по диску звезды. Для некоторых из них удалось установить постепенное уменьшение орбитального периода со временем (порядка одной сотой секунды в год). Оказывается, что горячий юпитер, у которого орбита уменьшается с таким темпом, должен сблизиться с родительской звездой и разрушиться примерно в течение десятка миллионов лет. Столь медлен-

ные изменения орбитального периода удалось обнаружить с помощью высокоточных наблюдений очень большого количества транзитов. Весьма вероятно, эти взаимодействия связаны с приливами, возбуждаемыми в звезде планетой-гигантом. Такие наблюдения позволяют проверить современную теорию приливов, которую мы обсудим более детально.

ПРИЛИВНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Приливы возникают в любом протяженном небесном теле, движущемся вокруг источника гравитации. Сила гравитации в точке тела, наиболее близкой в некоторый момент к источнику гравитации, больше силы, действующей на центр масс, а в наиболее удаленной точке – меньше. Возникающая разница сил приводит к деформации тела, которая в простейшем случае описывается как «приливный горб». Важно отметить, что даже в такой про-

стейшей ситуации приливный горб не направлен в точности на тяготеющий центр, а слегка отклоняется от него в сторону, противоположную направлению движения источника гравитации в системе отсчета, связанной с телом. Отметим, что если тело вращается быстрее по сравнению с орбитальным движением источника гравитации, то его направление движения в этой системе отсчета будет противоположно направлению орбитального движения, что, например, происходит с Луной. Отсутствие сонаправленности приливного горба и направления на тяготеющий центр связано с работой сил вязкости, которые приводят к необратимому процессу передачи энергии орбитального движения и вращения небесных тел в тепло. Этот процесс называется диссипацией. Диссипация запасенной в приливном горбе энергии сопровождается эволюцией параметров орбиты, таких как период и радиус. А в случае вытянутых орбит – еще и эволюцией эксцентриситета.

Отметим, что приливная эволюция может приводить как к увеличению размера орбиты в случае, если тело вращается в сторону орбитального движения с периодом вращения меньшим, чем орбитальный период (для простоты предполагаем круговую орбиту), как в системе «Земля-Луна», так и к уменьшению размера орбиты. Уменьшение, вероятно, осуществляется в системах с горячими юпитерами, для которых период вращения родительских звезд существенно меньше орбитального. Приливные взаимодействия полностью перестают оказывать влияние на орбитальные параметры только в случае так называемой «полной при-

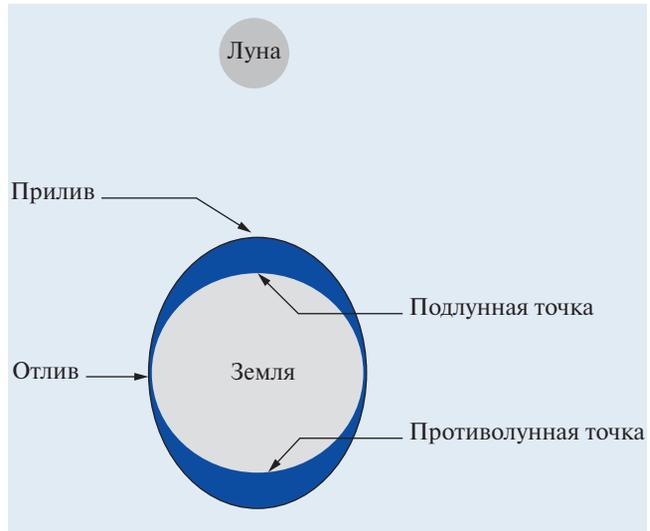


Иллюстрация возникновения приливного горба. Части «Земли», которые расположены ближе к «Луне», чем центр «Земли», притягиваются сильнее, чем центр, а те, которые расположены дальше – слабее. Вследствие этого, с точки зрения «Земли», на нее со стороны «Луны» действуют растягивающие силы, называемые «приливыми» и возникает характерная фигура, вытянутая в направлении «Земля» – «Луна». Иллюстрация «Википедия» (<https://en.wikipedia.org/wiki/Tide>)

ливной синхронизации». В этом случае орбиты тел являются точно круговыми, оси их собственных вращений направлены вдоль вектора углового момента орбиты, а периоды собственных вращений равны орбитальному периоду.

Одним из важнейших нерешенных вопросов теории приливных взаимодействий звезд и планет-гигантов является природа вязких сил, вызывающих диссипацию энергии орбитального движения и энергии вращения. Описанная выше очень упрощенная картина соответствует теории так называемых «квазистационарных» приливов. В рамках этой теории, как правило, считается, что диссипация происходит в тех зонах звезд и планет-гигантов, где имеются

развитые конвективные движения и связанная с ними турбулентность. Вязкость турбулентной среды может быть на много порядков больше обычной молекулярной вязкости. К сожалению, теоретические оценки величины турбулентной вязкости показывают, что ее все равно недостаточно, чтобы объяснить наблюдаемые явления. Поэтому особенный интерес представляют те теории, в которых наблюдаемые величины (изменение орбитального периода и т.д.) явно не зависят от величины вязкости.

Одним из важнейших нерешенных вопросов теории приливных взаимодействий звезд и планет-гигантов является природа вязких сил, вызывающих диссипацию энергии орбитального движения и энергии вращения.

Теория приливных взаимодействий, в рамках которой, при определенных предположениях, выражения для эволюции орбитальных параметров не зависят от величины вязкости, называется теорией динамических приливов. Ее основы были разработаны французским астрофизиком Жаном-Полем Заном (1935–2015). Она существенно отличается от упрощенной картины, описанной выше, и связана с существованием в газообразных объектах, таких как звезды и планеты-гиганты, волн различного типа: например, так называемых внутренних гравитационных волн, которые и играют роль в приливных взаимодействиях, обсуждаемых ниже, или инерциальных колебаний, связанных с вращением рассматриваемого объекта. Типичные частоты таких волн сравнимы с частотой изменения приливных сил. Из курса общей физики известно, что если частота колебания близка к частоте возбуждающей его силы, то его амплитуда может очень сильно увеличиваться. Этот эффект называется резонансом. В звездах, как правило, волны могут усиливаться в основном в определенных местах, например, на границе между областями,

в которых присутствует и отсутствует конвекция, и затем распространяться по звезде с так называемой «групповой скоростью» v_g . Если время распространения волн $T_{\text{пр}} \sim R_*/v_g$, где R_* – радиус звезды, меньше, чем

время их затухания, то для вычисления изменения орбитальных параметров совершенно неважно, насколько оно меньше. Достаточно выяснить, как быстро энергия и угловой момент могут передаваться приливными силами от орбиты в волны, а скорость их передачи волнами

звезде будет такой же, лишь бы выполнялся этот критерий! Такая ситуация называется «режимом умеренно большой вязкости».

Таким образом, можно построить теорию, которая включит только величины, описывающие орбиту и определенные характеристики звезды, в которой возбуждаются приливы, связанные с передачей энергии и углового момента от орбиты к волнам, но не зависящие от плохо понимаемого механизма затухания этих волн. Эта теория, хотя и значительно более сложная, чем теория квазистатических приливов, пользуется большой популярностью в астрофизике.

МЕТОД НОРМАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТЕОРИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИЛИВОВ

Теория Зана была построена в 70-е годы прошлого века, когда понимание структуры звезд было не таким полным, как в настоящее время. Она использует некоторые величины, которые, как мы теперь знаем, плохо согласуются с современными моделями звезд. К тому же описанная выше картина носит

приблизительный (асимптотический) характер, который аккуратно описывает действительность только в нереалистическом случае, когда частота изменения приливного поля стремится к нулю. Для того, чтобы сравнить теорию динамических приливов с наблюдениями, было необходимо обобщить теорию Зана так, чтобы она стала более реалистичной. Это и было сделано нашей группой.

Основой нашего метода является представление всех интересующих нас величин в виде рядов по так называемым «нормальным колебаниям». Эти колебания являются близкими аналогами «стоячих волн», которые возникают, например, в музыкальных инструментах. В отличие от бегущей волны, максимумы и минимумы стоячих волн не распространяются, а «стоят на месте». В простейшем случае стоячая волна получается сложением двух волн, бегущих в разные стороны. Важно отметить, что справедливо и обратное утверждение: бегущие волны могут быть представлены в виде суммы стоячих. Если мы говорим о волнах в звездах и об их взаимодействии с приливами, то стоячие волны обладают бесконечным набором частот, в том числе, для многих звездных моделей, и частотами, сравнимыми с частотой изменения приливной силы. В виде суммы по стоячим волнам (нормальным модам колебаний звезд) можно представить и волны, которые возбуждаются приливами, затем распространяются по звезде и там затухают. Более того, в виде аналогичной суммы можно представить и саму приливную силу. Вообще говоря, эти суммы содержат

Основой нашего метода является представление всех интересующих нас величин в виде рядов по так называемым «нормальным колебаниям». Эти колебания являются близкими аналогами «стоячих волн», которые возникают, например, в музыкальных инструментах.

бесконечное число членов, но в большинстве интересных с практической точки зрения задач, например, в случае почти круговой орбиты, важно только их небольшое число. Переход на язык нормальных мод позволил модернизировать теорию Зана и развить ее до того уровня, который позволяет проводить непосредственное сравнение теории и наблюдений.

Мы проверили, можно ли объяснить современные данные эволюции орбитального периода в рамках обновленной теории динамических приливов для нескольких систем, содержащих горячие юпитеры с изменяющимся орбитальным периодом. Оказалось, что данные по орбитальной эволюции в системах, содержащих звезды главной последовательности, не противоречат нашей теории. Тем не менее необходимы дальнейшие наблюдения как уже исследованных систем, так и новых, чтобы уменьшить ошибки и сделать возможными конкретные выводы.

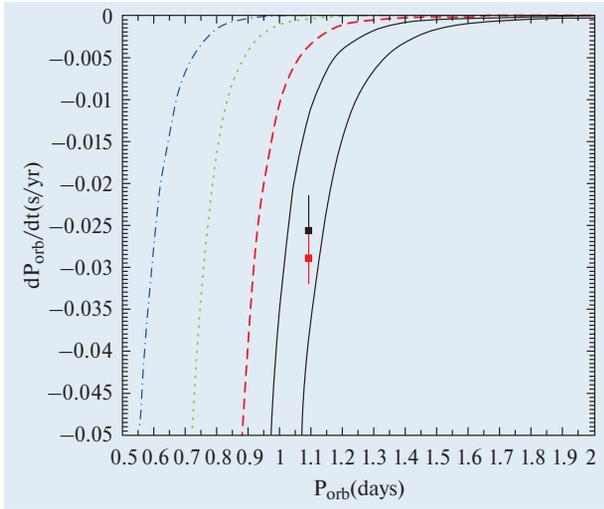
В качестве примера на рисунке показана скорость изменения орбитального периода как функция самого орбитального периода, рассчитанная в нашем подходе для системы WASP-12b. Отметим, что для этой системы ошибки наблюдений относительно невелики. Две сплошные кривые соответствуют двум немного отличающимся, но удовлетворяющим наблюдательным данным моделям родительской звезды и предположению о действии режима умеренно большой вязкости. Другие кривые соответствуют ситуации, в которой вязкость была искусственно уменьшена, и режим умеренно большой вязкости не выполнялся. Символы показывают данные

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом данные наблюдений пока согласуются с обобщенной теорией Зана. Но во многих системах ошибки измерений порядка самой измеренной величины изменения орбитального периода. Поэтому еще сложно говорить о полном согласии теории и наблюдений. В этой связи очень важно продолжать наблюдения уже известных систем с горячими юпитерами с орбитальными периодами

порядка одного дня и меньше и открывать новые.

Остаются нерешенными и некоторые теоретические вопросы. Во-первых, как мы уже отмечали выше, необходимо обобщить построенную теорию на случай наклонных орбит. Во-вторых, «обычные» механизмы затухания не могут привести к ситуации, когда волны полностью затухают во время их пробега по звезде. Существует надежда, что могут оказаться значительно более эффективными так называемые «нелинейные» механизмы. Например, амплитуда волны, распространяющейся в центр звезды, растет, и она может «опрокинуться», в точности как волны на море, опрокидывающиеся на пляж. При опрокидывании волн существенно возрастает передача в тепло запасенной в них энергии, то есть необходимая для нас диссипация энергии волн. Возможно, такого рода эффекты помогут обосновать «режим умеренно большой вязкости».



Результат расчета изменения орбитального периода горячего юпитера WASP-12b и данные наблюдений двух групп, показанные двумя точками (красной и черной), красные и черные штрихи дают ошибки наблюдения. По оси x — орбитальный период в днях, по оси y — скорость изменения орбитального периода, в секундах в год. Сплошные кривые рассчитаны для двух возможных моделей звезд в рамках теории умеренно большой вязкости, для расчета штрихованной, пунктирной и штрихпунктирной кривых вязкость была искусственно уменьшена. Рисунок автора

наблюдений двух групп. Видно, что для данной системы теория вполне согласуется с наблюдениями. По этой теме была опубликована статья “Dynamical tides in exoplanetary systems containing hot Jupiters: confronting theory and observations” («Динамические приливы в экзопланетных системах, содержащих горячие юпитеры: сопоставление теории и наблюдений») в журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*¹.

¹Chernov, S.V., Ivanov, P.B., Papaloizou, J.C.B., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 470, Issue 2, p. 2054