

УДК 52-423.3

Частота слияний экзопланет со звездами в результате приливной эволюции и ухода с Главной последовательности

А.В. Попков¹, С.Б. Попов²

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский переулок, д. 9, г. Долгопрудный, Московская область, 141701

popkov.av@mipt.ru

² Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Университетский проспект, д. 13, Москва, 119234

Поступила в редакцию 14 ноября 2017 г.

Аннотация. В работе методом популяционного синтеза рассчитан темп различных видов слияния планет со звездами под действием приливных сил, а также за счет расширения звезды на стадиях после Главной последовательности. Показано, что галактический темп слияний со звездами на стадии Главной последовательности составляет примерно одно событие раз в 50 лет. В основном вклад в эту величину вносят слияния с маломассивными планетами, что не сопровождается очень ярким оптическим транзиентом (пиковая светимость $\lesssim 10^{36.5}$ эрг с^{-1}). Яркие события, связанные с массивными планетами (порядка массы Юпитера), имеют оптическую светимость $\sim 10^{37.5}-10^{38}$ эрг с^{-1} . Они происходят примерно в 10 раз реже. Такие транзиенты могут быть обнаружены в близких галактиках на расстояниях вплоть до нескольких мегапарсек при использовании крупных обзорных телескопов, таких как строящийся инструмент LSST. Темп слияний с красными гигантами составляет примерно 3 события в год на галактику, подобную нашей, однако это не сопровождается заметным выделением энергии. Количество слияний зависит от истории звездообразования, в первую очередь на протяжении последних сотен миллионов лет.

THE RATE OF PLANET-STAR COALESCENCES DUE TO TIDAL EVOLUTION AND GIANT FORMATION, *by A.V. Popkov, S.B. Popov.* We use population synthesis to study planet-star mergers of different type due to tidal forces and stellar expansion on post-main sequence stages of evolution. It is shown that the Galactic rate of planet mergers with main sequence stars is about once per 50 years. This value is dominated by low-mass planets. Thus, they are not accompanied by bright optical transients (peak luminosity $\lesssim 10^{36.5}$ erg s^{-1}). Brighter events related to massive planets (with approximately Jupiter mass) have optical luminosities $\sim 10^{37.5}-10^{38}$ erg s^{-1} . They appear approximately 10 times more seldom. Such transients can be observed in near-by galaxies up to distances about few Mpc with future large survey telescopes like LSST. The rate of planet mergers with evolved stars (giants) is about 3 per year per Milky Way-like galaxy. However, such events do not produce detectable transients. The number of coalescences depends on the star-formation history, especially during last few hundred million years.

Ключевые слова: экзопланеты, звезды, оптические транзиенты

1 Введение

Первые планеты, обращающиеся вокруг других звезд, иначе называемые экзопланетами, были открыты около 20 лет назад (Майор, Кело, 1995). К настоящему времени существует более 3500 подтвержденных экзопланет и более 10 000 кандидатов¹. Статистический анализ данных по обнаруженным объектам показывает, что в среднем у каждой звезды есть несколько планет (см. Винн, Фабрички, 2015 и ссылки там). Количество известных экзопланет постоянно растет благодаря наземным и космическим наблюдениям. Анализ данных демонстрирует огромное многообразие типов планет и их систем, а также требует нетривиальных моделей для объяснения формирования и эволюции этих объектов. Таким образом, астрофизика экзопланет (а также разнообразные небесно-механические и астрометрические задачи) являются в настоящее время чрезвычайно актуальной областью исследования, где имеется ряд интересных нерешенных задач.

Одним из важных вопросов в этой области является эволюция планет как на ранней стадии формирования, так и в дальнейшем, на более поздних стадиях. После окончания процесса образования планетной системы орбиты планет остаются в большинстве случаев достаточно устойчивыми. Однако постепенные изменения орбитальных параметров все же могут происходить благодаря взаимодействию планет друг с другом, влиянию второй звездной компоненты в двойных системах и другим процессам. Для близких же к звездам планет наибольшую роль играет приливное взаимодействие.

Наблюдения показывают, что в природе существует достаточно много планет, расположенных на расстояниях меньше 0.1 а. е. от своих звезд и, соответственно, имеющих периоды обращения порядка десятков и даже нескольких дней, а иногда – и часов (Винн, Фабрички, 2015). Приливы, вызываемые такими планетами на звездах (и звездами на этих планетах), приводят к обмену моментом импульса между звездой и планетой и к диссипации энергии. В результате этого уменьшаются большая полуось и эксцентриситет орбиты, а также происходит синхронизация вращения планеты с ее обращением вокруг звезды. Конечным результатом такого взаимодействия может быть падение планеты на звезду (см., например, Тейтлер, Кёнигл, 2014 и ссылки там).

В работе (Метцгер и др., 2012) были изучены возможные сценарии слияний планет со звездами. Согласно их результатам, если $\bar{\rho}_p/\bar{\rho}_* \gtrsim 5$, где $\bar{\rho}_p$ – средняя плотность планеты, а $\bar{\rho}_*$ – средняя плотность звезды, то планета достигает поверхности звезды неразрушенной (назовем этот случай “столкновением”). При этом сначала наблюдается транзит в ультрафиолетовом и/или мягком рентгеновском диапазонах с пиковой светимостью $\lesssim 10^{36}$ эрг/с. А недели или месяцы спустя может быть видна оптическая вспышка, пиковая светимость которой для планет с массой порядка юпитерианской составляет 10^{37} – 10^{38} эрг/с, продолжительность вспышки – несколько дней. При $1 \lesssim \bar{\rho}_p/\bar{\rho}_* \lesssim 5$ происходит приливное разрушение планеты и образование аккреционного диска, что также сопровождается оптическим транзитом длительностью до нескольких месяцев с пиковой светимостью до 10^{37} – 10^{38} эрг/с. Наконец, если средняя плотность планеты меньше средней плотности звезды, происходит стабильное перетекание вещества с планеты на звезду без существенного увеличения светимости последней. Данные результаты означают, что в первых двух случаях слияния являются потенциально наблюдаемыми, особенно в случае массивных планет. В связи со строительством новых, более крупных обзорных телескопов (в первую очередь LSST), которые могут обнаруживать такие события в относительно близких галактиках, предсказание частоты данных вспышек представляет интерес.

В своей работе (Метцгер и др., 2012) сделали простую оценку частоты слияний планет со звездами на основе имеющихся наблюдательных данных, которые были перенормированы на всю Галактику, и получили значение галактического темпа этих событий порядка 0.1–1 в год. В данной работе принят расчет темпа слияний звезд и планет на основе более детальной модели.

2 Метод

Расчет производился часто применяемым при решении астрофизических задач методом популяционного синтеза (см. описание методики и основные примеры использования в астрофизике в обзоре

¹ См., например, онлайн-каталоги <http://exoplanets.eu/> и <http://exoplanets.org/>

Попов, Прохоров, 2007). Он состоит в расчете статистики большого количества систем или объектов некоторого типа на основе заданных начальных распределений и законов эволюции. В данной работе он был использован следующим образом. Задавались начальные параметры звезд (массы) и планет (массы и большие полуоси орбит). Затем рассчитывалась приливная эволюция орбиты планеты и изменялись параметры звезды в соответствии с расчетами звездной эволюции. По ходу вычислений собиралась статистика по планетам, сливающимся со звездами (в каждом из трех режимов: столкновение, приливное разрушение, перетекание). Затем проводилась нормировка результатов для получения оценок галактического темпа слияний каждого типа.

Приливная эволюция орбиты рассчитывалась (в приближении круговых орбит и статических приливов) для большого числа систем планета-звезда ($N = 10^7$). Было использовано следующее уравнение для изменения большой полуоси (Джексон и др., 2008):

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dt} = -\frac{9}{2} \sqrt{\frac{G}{M_*}} \frac{R_*^5 M_p}{Q'_*} a^{-13/2}, \quad a < a_{\text{sync}}, \quad (1)$$

где a – радиус орбиты, M_* , R_* – масса и радиус звезды, M_p – масса планеты, $Q'_* = 10^{5.5}$ – параметр, характеризующий эффективность диссипации энергии (“приливная добротность”), a_{sync} – радиус синхронной с вращением звезды орбиты. Для планет, расположенных дальше этого радиуса, меняется знак в правой части формулы (1), однако из-за их удаленности от звезды изменение радиуса орбиты мало, и мы им пренебрегали. Уравнение (1) решалось численно. В каждом случае рассматривалась однопланетная система, однако затем при нормировке результатов учитывалась возможность существования многопланетных систем.

Кроме слияний планет со звездами за счет приливно-сокорачивающей орбиты, в процессе расширения звезды после схода с Главной последовательности планеты также могут быть поглощены, что учитывается в наших расчетах. Зависимости радиуса звезд разных масс от времени были получены интерполяцией эволюционных треков PARSEC (PARSEC (PAdova and TRIeste Stellar Evolution Code) (Брессан и др., 2012; Чен и др., 2014) для солнечной металличности ($Z = 0.02$).

Начальные параметры систем – масса звезды, масса и начальный радиус орбиты планеты – генерировались по методу Монте-Карло в соответствии с заданными распределениями. В качестве начального распределения $M_p - a_0$ были взяты результаты моделирования процесса формирования планетных систем (Алиберт и др., 2013). Данный подход был реализован в таких задачах впервые. Он позволяет отказаться от сложного и неоднозначного учета эффектов селекции и эволюции при использовании наблюдательных данных по экзопланетам. В качестве начальной функции масс звезд был использован закон, предложенный в работе (Крупа, 2001).

На основании расчетов для N систем строились распределения вероятности различных типов слияний планет со звездами разных возрастов. Затем вычислялась свертка этих распределений с зависимостью темпа звездообразования в Галактике от времени, начиная с ее образования. Используемая нами зависимость является аппроксимацией детальной функции галактического темпа звездообразования от времени, представленной в работе (Хейвуд и др., 2016). В результате получена частота слияний различных типов (столкновений, приливных разрушений, стабильных перетеканий) в Галактике в нашу эпоху. Помимо слияний с нормальными звездами (т. е. звездами Главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга – Рассела), рассматривались и поглощения планет расширяющимися звездами-гигантами. Такие события происходят гораздо чаще, чем падения планет на звезды Главной последовательности, но не приводят к легко наблюдаемым вспышкам из-за низкой плотности гигантов.

3 Результаты и выводы

Вычисленные частоты различных типов слияний со звездами разных типов приведены в табл. 1. На рис. 1 показано распределение по светимости тех слияний, которые приводят к оптическим вспышкам. Частота наиболее ярких из них, со светимостью $10^{37.5} - 10^{38}$ эрг/с, составляет примерно 0.003 в год в Галактике. Для таких слияний распределение по светимостям показано более детально на

рис. 2. Эти, хотя и редкие, события могут наблюдаться строящимся телескопом LSST на расстояниях до нескольких мегапарсек.

Таблица 1. Частота слияний различных типов в галактике, подобной нашей, в единицах $[\text{год}^{-1}]$. Значение частоты слияний типа стабильного перетекания на звезды, ушедшие с Главной последовательности, вследствие своей малости искажено статистическими флуктуациями. Для него дана оценка сверху по порядку

Стадия эволюции звезды	Столкновения	Приливные разрушения	Стабильные перетекания
Главная последовательность	2.2×10^{-2}	2.8×10^{-3}	8×10^{-4}
После главной последовательности	3.08	3.6×10^{-4}	$\lesssim 10^{-6}$
Всего	3.10	3.2×10^{-3}	8×10^{-4}

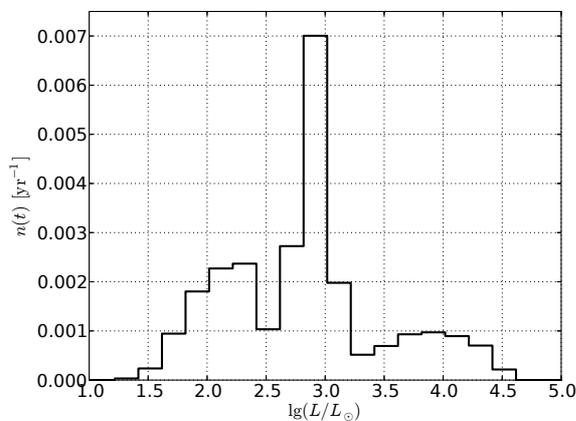


Рис. 1. Распределение слияний планет со звездами по пиковой оптической светимости транзита, сопровождающего слияние, в галактике, подобной Млечному Пути. По оси ординат отложена частота слияний в год на галактику в данном интервале светимостей

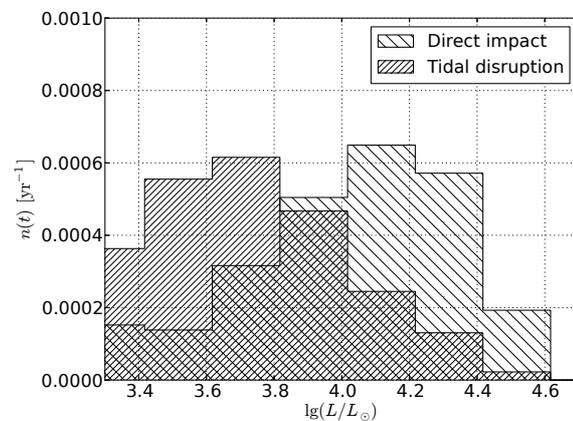


Рис. 2. Распределение по пиковой оптической светимости ярких слияний различных типов: столкновений (“direct impact”) и приливных разрушений (“tidal disruption”)

Полученные нами результаты дают заметно меньший темп слияний, чем в расчетах, проведенных в работе (Метцгер и др., 2012). В первую очередь это связано с различием в начальных распределениях планет. На наш взгляд, использование начальных распределений, рассчитанных на основе популяционного синтеза, позволяет получить более точные оценки, чем при простом масштабировании наблюдательных данных, как в подходе (Метцгер и др., 2012).

Наши расчеты показывают сильную зависимость темпа слияний от распределения близких к звездам экзопланет по массам и орбитальным радиусам. Соответственно, неопределенности в этих величинах могут влиять на полученные результаты. В настоящий момент несколько групп в мире ведут активную работу по уточнению моделей популяционного синтеза формирования экзопланет. Сравнение данных этих расчетов со все возрастающей популяцией известных экзопланет позволит в ближайшем будущем (по всей видимости, еще до ввода в строй LSST) получить более точные оценки частоты слияний. В частности, можно ожидать, что количество известных экзопланет резко возрастет в ближайшие три года благодаря обработке данных спутника Gaia, а также работе спутника TESS.

Основные источники неопределенностей в нашей работе – единственное фиксированное Q'_* для всех систем, одинаковая форма распределения планет по массам и начальным орбитальным ради-

усам для всех звездных масс (изменялась лишь нормировка в зависимости от массы звезды), а также неучет эффектов, связанных с возможной эксцентricностью орбит планет. Расчеты для набора моделей, отличающихся значением Q'_* для звезд Главной последовательности (однако, также не зависящим от массы звезды), будут представлены нами в ближайшее время. А учет зависимости параметров распределений от массы звезды станет возможным после появления соответствующих моделей формирования планет, что должно произойти в ближайшие годы.

Детальный учет величины приливной диссипации в звезде представляет собой крайне трудную задачу. Мы применяли достаточно простой подход, единый для всех звезд, использованный также и в работе (Метцгер и др., 2012), что позволяет лучше сравнивать наши результаты. Однако очевидно, что реалистичные модели приливной диссипации должны иметь более сложную форму. Существует большое количество работ, посвященных этой проблематике (например, Цан, 1977; Пенев и др., 2012; Эссик, Вайнберг, 2016; а также обзор Огилви, 2014 и ссылки там). Однако представляется, что в популяционных расчетах в ближайшее время все равно будут использоваться лишь приближенные формулы. Возможно, что наблюдения экзопланет, испытывающих сильное приливное воздействие звезд, позволят получить хотя бы феноменологические оценки значений коэффициента Q'_* для звезд с разными свойствами.

Суммируя результаты проделанной работы, мы подчеркиваем, что оптические транзиенты, связанные со слияниями звезд и планет, могут быть обнаружены в ближайшие годы. Ожидаемый темп таких событий составляет от нескольких раз в сто лет до нескольких раз в тысячу лет на галактику, подобную нашей. Дальнейшее уточнение этих расчетов представляет заметный интерес.

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (соглашение 05.Y09.21.0018). Работа С.Б. Попова поддержана грантом РНФ 14-12-00146.

Литература

- Алиберт и др. (Alibert Y., Carron F., Fortier A., Pfyffer S., Benz W., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2013. V. 558. id. A109.
- Брессан и др. (Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2012. V. 427. P. 127.
- Винн, Фабрицки (Winn J.N., Fabricky D.C.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2015. V. 53. P. 409.
- Джексон и др. (Jackson B., Greenberg R., Barnes R.) // *Astrophys. J.* 2008. V. 678. P. 1396.
- Крупа (Kroupa P.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2001. V. 322. P. 231.
- Майор, Кело (Mayor M., Queloz D.) // *Nature.* 1995. V. 378. P. 355.
- Метцгер и др. (Metzger B.D., Giannos D., Spiegel D.S.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2012. V. 425. P. 2778.
- Огилви (Ogilvie G.I.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2014. V. 52. P. 171.
- Пенев и др. (Penev K., Jackson B., Spada F., Thom N.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 751. id. 96.
- Попов С.Б., Прохоров М.Е. // *Успехи физ. наук.* 2007. Т. 177. С. 1179.
- Тайтлер, Кёнигл (Teitler S., Königl A.) // *Astrophys. J.* 2014. V. 786. id. 139.
- Хейвуд и др. (Haywood M., Lehnert M.D., Di Matteo P., Snaith O., Schultheis M., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2016. V. 589. id. A66.
- Цан (Zahn J.-P.) // *Astron. Astrophys.* 1977. V. 57. P. 383.
- Чен и др. (Chen Y., Girardi L., Bressan A., Marigo P., Barbieri M., Kong X.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2014. V. 444. P. 2525.
- Эссик, Вайнберг (Essick R., Weinberg N.N.) // *Astrophys. J.* 2016. V. 816. id. 18.