



Распределение орбитальных резонансов в мультипланетных системах

Ю.И. Фильчаков¹, Е.А. Попова² 

¹ МБОУ «Лицей № 8», ² ГАО РАН

Поступила в редакцию 14 июля 2025 / Принята к публикации 16 июля 2025

Аннотация

На сегодняшний день открыто более 4400 экзопланетных систем, свыше 1000 из которых имеют две и более планеты (мультипланетные системы) и/или располагаются в системах двойных звезд. В таких системах орбитальные резонансы являются распространённым динамическим явлением. В рамках данного исследования мы проводим статистический анализ резонансной структуры мультипланетных систем. С использованием актуальных наблюдательных данных мы строим распределения отношений орбитальных периодов, отдельно рассматривая случаи внутреннего и внешнего возмущающего тела. Основная цель работы – уточнение положений резонансных пиков относительно ранее полученных результатов, необходимое в силу значительного увеличения количества открытых экзопланет.

ключевые слова: Экзопланетные системы, орбитальный резонанс, мультипланетные системы.

Введение

В данной работе мы анализируем статистику резонансов в мультипланетных системах, используя базы данных экзопланет [Schneider \(2025\)](#), [Rein et al. \(2025\)](#). Смещение резонансных пиков относительно их номинальных положений обсуждается сравнительно давно (например, [Fabrycky et al. \(2012\)](#), [Petrovich et al. \(2013\)](#), [Shevchenko \(2020\)](#)). Возможные механизмы таких смещений рассматривались, например, в работах [Petrovich et al. \(2013\)](#), [Batygin and Morbidelli \(2013\)](#), [Lithwick and Wu \(2012\)](#).

Для определения положения резонансных пиков и сравнения с предыдущими результатами ([Popova and Shevchenko \(2014\)](#)) мы строим и анализируем гистограммы распределения систем по отношению орбитальных периодов. Поскольку на динамическое поведение каждой конкретной системы большое влияние оказывает расположение возмущающего тела (см., например [Shevchenko \(2020\)](#)), мы строим гистограммы, разделяя системы по положению наиболее массивного (возмущающего) тела:

- орбита более массивного тела находится внутри орбиты менее массивного, как в Солнечной системе происходит в случае «Нептун – транснептуновый объект» (внутреннее возмущающее тело);
- орбита доминирующего по массе тела шире орбиты менее массивного, что в Солнечной системе соответствует конфигурации «астероид Главного пояса – Юпитер» (внешнее возмущающее тело).

Для общей картины мы также приводим суммарную гистограмму, включающую оба случая.

*e-mail:m02pea@gmail.com

Таблица 1: Положение пиков для внешнего положения возмущающего тела

Номинальное отношение периодов	Положения пиков для гистограмм 2024 г.	Положения пиков для гистограмм 2014 г.
2/1	2.014 ± 0.124	2.131 ± 0.018
3/2	1.534 ± 0.073	1.599 ± 0.025
3/1	2.957 ± 0.104	3.168 ± 0.024
4/1	3.983 ± 0.187	3.991 ± 0.039
5/2	Не выражен	2.517 ± 0.056

Таблица 2: Положение пиков для внутреннего положения возмущающего тела

Номинальное отношение периодов	Положения пиков для гистограмм 2024 г.	Положения пиков для гистограмм 2014 г.
2/1	2.058 ± 0.056	2.122 ± 0.007
3/2	1.569 ± 0.104	1.547 ± 0.024
3/1	2.860 ± 0.119	3.000 ± 0.039
4/1	4.202 ± 0.225	4.033 ± 0.046
5/2	2.547 ± 0.089	2.500 ± 0.018

1 Гистограммы отношений орбитальных периодов

Мы строим и анализируем гистограммы отношений периодов T_1/T_2 в мультипланетных системах с одной звездой, используя базы данных экзопланет [Schneider \(2025\)](#), [Rein et al. \(2025\)](#). В случаях, когда массы планет не известны, для определения доминирующей по массе планеты, в качестве грубого приближения, мы используем радиусы планет. Общее число планетных систем в исследуемой выборке составляет 811, из них 361 систем для случая внутреннего возмущающего тела и 450 для внешнего. В работе [Popova and Shevchenko \(2014\)](#) суммарное число планетных систем в выборке составило 143. Полученные гистограммы приведены на рис. 1 (внешнее возмущающее тело), 2 (внутреннее возмущающее тело). В любом случае внутреннее тело нумеруется как второе (период обращения T_2), а внешнее — как первое (период обращения T_1). Для наглядности на тех же рисунках приводятся гистограммы, полученные в работе [Popova and Shevchenko \(2014\)](#). На рис. 3 приведена гистограмма без деления систем по положению возмущающего тела. Поскольку в работе [Popova and Shevchenko \(2014\)](#) такая гистограмма не рассматривалась, мы приводим только результаты, полученные в данной работе. На гистограммах выделяются пики вблизи резонансов 2/1, 3/2, 5/2, 3/1 и 4/1. Для большинства пиков по-прежнему наблюдается смещение относительно номинальных значений.

2 Положения резонансных пиков на гистограммах 2014 г. и 2024 г.:

Для определения положений резонансных пиков мы использовали метод наименьших квадратов с аппроксимацией полиномом восьмой степени. В работе [Popova and Shevchenko \(2014\)](#) гистограммы аппроксимировались функцией с пятью пиками, где каждый пик описывается нормальным распределением (на рисунках соответствующие кривые наложены на гистограммы). В таблицах 1 – 3 приведены вычисленные положения пиков для гистограмм, полученных в данной работе и работе [Popova and Shevchenko \(2014\)](#). Стоит отметить, что для резонансов 4/1 во всех случаях и 5/2 для внутреннего положения возмущающего тела сдвиг пика относительно номинального положения стал существенным с увеличением количества рассматриваемых систем.

Заключение

В целом, актуальная статистика продолжает показывать некоторый сдвиг положений резонансных пиков относительно номинальных значений. На новых гистограммах виден рост пиков около резонансов 3/2 и 2/1, однако наблюдается и уменьшение относительной высоты пиков около 5/2, 3/1 и 4/1. Заметны системы с отношениями периодов, близкими к 1/1 (Kepler-132(b,c), HIP 41378

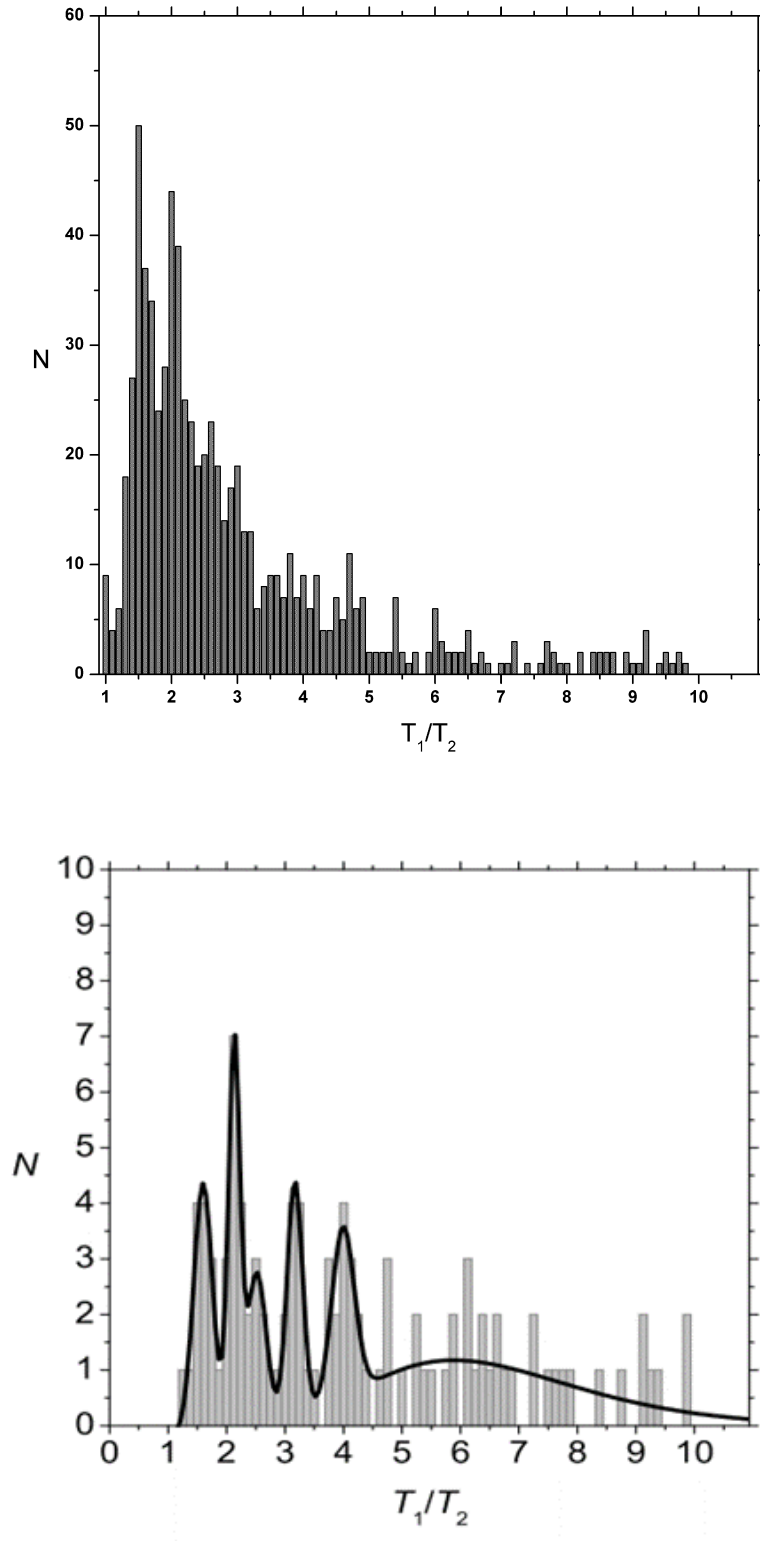


Рис. 1: Гистограммы отношений орбитальных периодов мультипланетных систем с внешним возмущающим телом для данных 2024 г. (сверху) и 2014 г. (снизу)

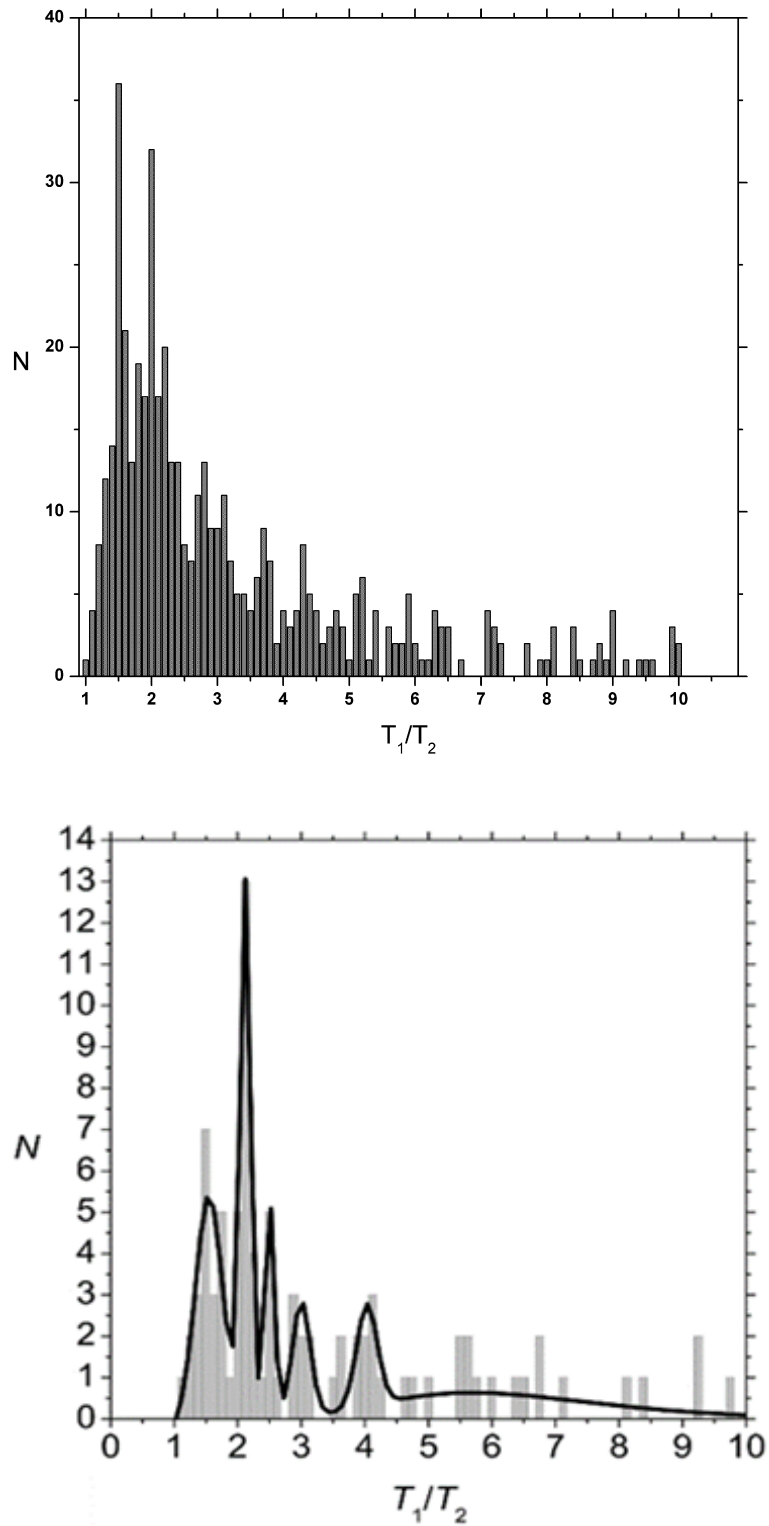


Рис. 2: Гистограммы отношений орбитальных периодов мультипланетных систем с внутренним возмущающим телом для данных 2024 г. (сверху) и 2014 г. (снизу)

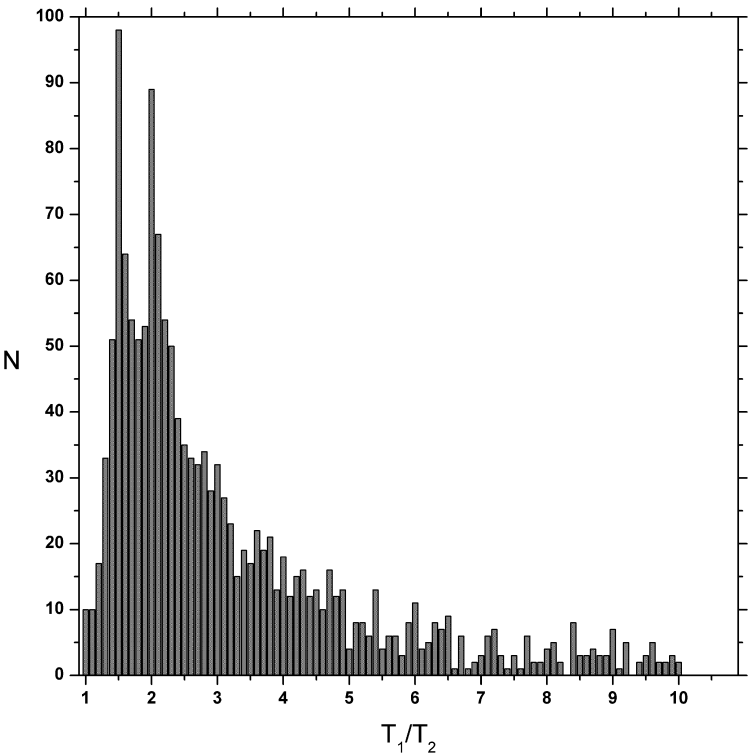


Рис. 3: Гистограмма отношений орбитальных периодов мультипланетных систем без разделения на системы с внутренним и внешним возмущающим фактором для данных 2024 г.

Таблица 3: Положение пиков гистограммы без разделения по положению возмущающего тела

Номинальное отношение периодов	Положения пиков для гистограмм
2/1	2.024 ± 0.094
3/2	1.492 ± 0.020
3/1	2.905 ± 0.079
4/1	3.817 ± 0.100
5/2	Не выражен

(d,e,f), HD 114386 (b,c)) – такие системы заслуживают отдельного, более подробного рассмотрения.

Список литературы

Schneider J. [Encyclopaedia of exoplanetary systems](#)

Rein H. et al. [Open Exoplanet Catalogue](#)

Fabrycky D. et al. (2012) Architecture of Kepler's Multi-transiting Systems: II. New investigations with twice as many candidates arXiv:1202.6328

Petrovich C., Malhotra R., and Tremaine S. (2013) Planets near mean-motion resonances *Astrophys. J.* 770 24

Shevchenko I. "Dynamical Chaos in Planetary Systems." Springer Nature, 2020. ISBN 978-3-030-52143-1 DOI: 10.1007/978-3-030-52144-8.

Batygin K. and Morbidelli A. (2013) Dissipative divergence of resonant orbits *Astron. J.* 145 10

Lithwick Y. and Wu Y. (2012) Resonant repulsion of kepler planet pairs *Astrophys. J.* 756 L11

Popova E. and Shevchenko I. (2014) Orbital resonances in exoplanetary systems *J. Phys.: Conf. Ser.* 572 012006

Distribution of orbital resonances in multiplanet systems

J.I. Filchakov¹, E.A. Popova² ¹ MBEI “Lyceum №8”, ² The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 14 July 2025 / Accepted 16 July 2025

Abstract

At present, more than 4400 exoplanetary systems have been discovered, over 1000 of which contain two or more planets (multiplanet systems) and/or reside in binary star systems. Orbital resonances are a common dynamical phenomenon in such systems. We conduct a statistical analysis of the resonance structure in multiplanet systems. Using up-to-date observational data, we construct distributions of orbital period ratios, separately examining cases of inner and outer perturbing bodies. The primary objective of this work is to refine the positions of resonance peaks relative to previously obtained results, necessitated by the substantial increase in the number of discovered exoplanets.

key words: exoplanetary systems, orbital resonance, multiplanetary systems