ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 18, № 2/3 (2014) 2901(14 с.)

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 18, No. 2/3 (2014) 2901(14 p.)

ПОДІБНІСТЬ СТРУКТУРИ ОРБІТ ПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ ГАЛАКТИКИ

М. В. Ваврух, Н. Л. Тишко, І. Я. Прунчак
Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра астрофізики, вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна
(Отримано 03 червня 2014 р.; в остаточному вигляді — 13 вересня 2014 р.)

Проаналізовано особливості структури орбіт екзопланетних систем в околицях Сонця. Щоб установити подібність планетних систем, кожну з них зіставлено з модельною системою, у якій великі півосі $\tilde{a}_n$ сусідніх орбіт задовольняють співвідношення $\tilde{a}_n = \tilde{a}_{n+1}\alpha$, де α — стала для цієї системи. За відомими спостережуваними даними, методом найменших квадратів визначено α і побудовано розподіл планетних систем за цим параметром. Цей розподіл близький до нормального, а максимум досягається в околі $\alpha_0 = 0.641851$. За критерієм χ^2, достовірність перевищує 85%, що свідчить про подібність структури спостережуваних планетних систем Галактики.

Ключові слова: екзопланети й екзопланетні системи, металічність зір, структура планетних орбіт, закон Тіціуса–Боде.

PACS number(s): 97.82.−j

I. ВСТУП

Про існування екзопланет астрономи здогадувалися ще від початку XX століття, коли було встановлено, що Сонце нічим особливим не виділяється серед інших зір Галактики. Наявність масивних темних супутників біля деяких зір була виявлена за допомогою астрономічних спостережень на початку другої половини минулого століття [1]. У результаті вдосконалення астрономічних інструментів та методів спостережень надійно встановлено існування масивних планет і планетних систем навколо зір в околицях Сонця. Як відомо, першу позасонячну планету біля зорі 51 Peg відкрили співробітники Женевської обсерваторії М. Майор і Д. Квелоц у жовтні 1995 р. Інтенсивними пошуками астрономів за вісімнадцять років виявлено близько 1800 планет та 460 планетних систем, до складу яких входять дві чи більше планети. Орбітальні параметри та маси багатьох планет підтверджено за допомогою різних методів. У зв'язку з пошуком нових планет значну увагу приділяють дослідженню характеристик зір методами спектроскопії та фотометрії [2–5]. В околицях Сонця помічено велику кількість молодих зір із високою металічністю, що підтверджує загальноприйняту теорію формування й еволюції зір. Каталоги позасонячних планет, у яких наведено елементи їх орбіт та оцінку маси, а також деякі характеристики зір, реґулярно поповнюються новими даними [6–8]. Переважна більшість планет має масу, близьку до Юпітера, що, очевидно, пов'язано з використанням непрямих методів спостережень, коли визначається вплив планети на рух зорі або ж на зміну її блиску.

За допомогою сучасних телескопів виявлено планети в околицях Сонця навколо зір, розташованих у сфері з радіусом, близьким до 8.5 кілопарсек. Оскільки частина Галактики, у якій знаходиться Сонце, нічим особливим не вирізняється, то очевидно, що планети є також навколо зір, розташованих в інших ділянках Галактики. Щоб оцінити кількість зір у Галактиці, навколо яких можуть бути планети, врахуємо, що загальна кількість зір є не меншою від 150 мільярдів, а більшість відкритих планет знайдено біля зір зі спектральних підкласів F5–K5. Припускаючи, що планети є лише біля кожної десятої зорі згаданих класів, одержимо число близько 4 мільярдів. Було б абсурдно заперечувати, що навколо такої колосальної кількості зір не можуть зреалізуватися фізико-хімічні умови, близькі до умов, які є навколо Сонця. У зв'язку з цим проблема існування життя у Всесвіті набуває цілком реалістичного змісту.

Про актуальність дослідження структури відомих у Галактиці планетних систем свідчить хоч би те, що із чотирьох головних проблем, які фігурують у програмі "Космічні перспективи Європейського космічного агентства на 2015–2025 рр.", перші дві сформульовано так [9]: 1. Які умови необхідні для формування планет і виникнення життя? 2. Як утворилась і "функціонує" Сонячна система?

II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР, ЩО МАЮТЬ ПЛАНЕТИ

Характеристики зір є ключем до пояснення особливостей планет і планетних систем. У Додатку (таблиця 1) наведено характеристики відомих на сьогодні зір, що мають три чи більше планети. Складаючи її, ми використали каталоги екзопланет [7, 8], де наведено віддалі до зір r (у парсеках), спектральний тип (Sp), їх металічність [Fe/H] та ефективні температури фотосфер. Ми доповнили ці дані розрахованими значеннями відносної світності $L/L_\odot$ (де $L_\odot$ — світність Сонця) та абсолютної зоряної величини M. Із наведених даних випливає, що більшість планет належать зорям головної послідовності, а субгігантам та гігантам належить невелика кількість планет. Планети, знайдені біля пульсарів, у таблицю не включено.

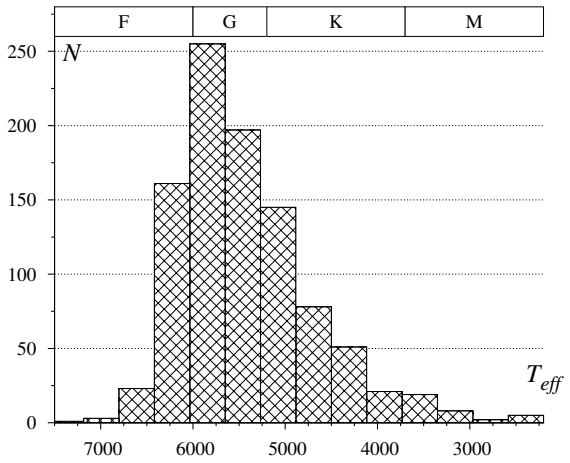


Рис. 1. Розподіл зір, біля яких знайдено планети, за ефективними температурами фотосфер і спектральними класами

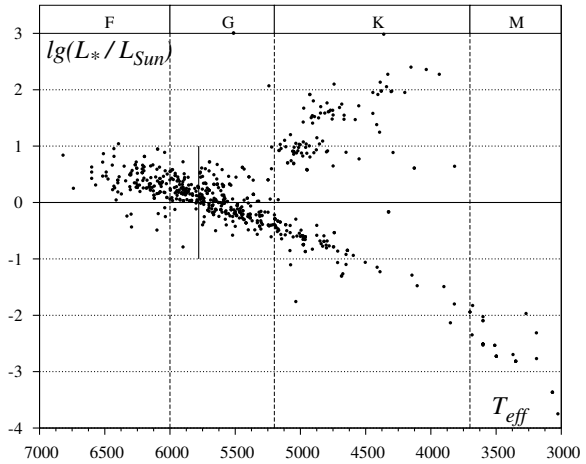
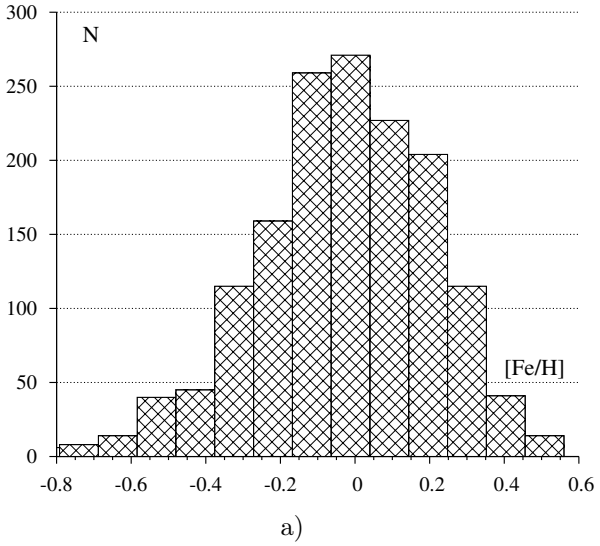


Рис. 2. Фраґмент діаграми Герцшпрунґа–Рессела для зір, біля яких знайдено планети.

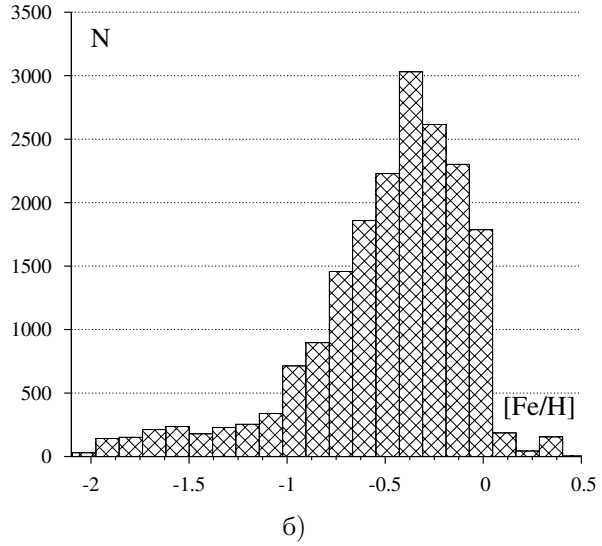
Розподіл зір, біля яких знайдено планети, за ефективними температурами фотосфер і спектральними класами подано на рис. 1. Як бачимо, більшість із них належить до спектральних класів F5–K5, хоча планети є і біля зір пізніших спектральних класів, аж до M9. Значна частина планет є біля субгігантів та гігантів, що належать до спектральних класів K3–M2. Наявність планет біля зір пізніх спектральних класів є причиною їх повільного осьового обертання й пояснює добре відому залежність кутової швидкості обертання зір від спектрального класу [10]. Порівняння цього розподілу із відповідним розподілом із роботи [11], на час публікації якої було відомо лише близько ста зір з планетами, свідчить про те, що розподіл став симетричнішим і набув рис ґауссового розподілу з центром біля спектрального класу G5.

На рис. 2 зображено фраґмент стандартної діаграми Герцшпрунґа–Рессела у змінних "ефективна температура фотосфери — логарифм відносної світності". Структура цього фраґмента, а також значення світності зір свідчать про те, що багато зір є молодими, вони ще не зайняли належного їм місця на головній послідовності відповідно до своїх мас (можливо, що деякі з них перебувають в області субгігантів).

Розподіл зір за металічністю (рис. 3) підтверджує цей висновок. Більшість зір має додатну металічність, а середнє значення металічності зір, що мають планети, становить -0.035 dex. Для порівняння зауважимо, що переважна більшість зір в околицях Сонця (у сфері радіуса 10 кілопарсек) має від'ємну металічність, а її середнє значення становить -0.49 dex. [6]. Висока металічність зір, що мають планети, підтверджує їх молодий вік.



а)



б)

Рис. 3. Розподіл зір за металічністю: а) зорі, біля яких відкрито планети; б) всі зорі в околицях Сонця у сфері радіуса 10 кпк.

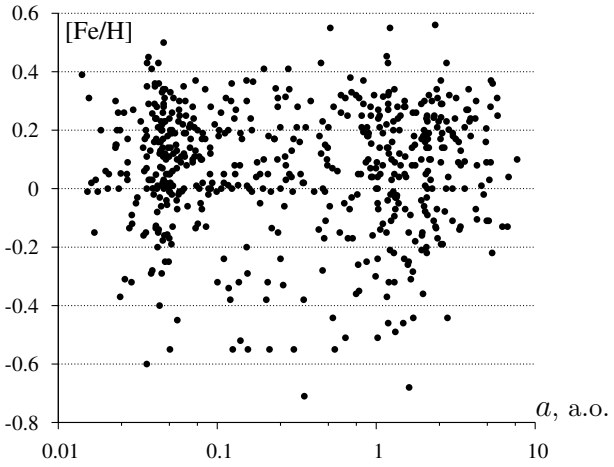


Рис. 4. Діаграма "металічність зорі — велика піввісь планетної орбіти"

Як видно з діаграми "металічність зорі — велика піввісь планетної орбіти" (рис. 4), біля зір з низькою металічністю (старих зір) більшість планет перебувають на високих орбітах. Водночас зорі з додатною металічністю мають планети як на низьких, так і на високих орбітах. Отже, зорі з планетами, що мають низькі орбіти, слід вважати, в основному, зорями молодого віку, які разом зі своїми планетами чи планетними системами перебувають на ранніх етапах еволюції. Наявність в околицях Сонця (напевно, і в Галактиці взагалі) великої кількості молодих зір не випадковість. Це пов'язано з другим етапом інтенсивного зореутворення [12, 13], який закінчився приблизно 0.5 млрд років тому. Розподіл зір за металічністю дає змогу виконати грубу оцінку моменту часу, коли темп зореутворення був максимальним. За початок відліку часу виберімо час формування Сонця (4.5 млрд років тому). Припустімо, що металічність зорі пропорційна часу, оскільки металічність Сонця прийнято за нуль. Уважаючи, що зорі з максимальною металічністю (0.5 dex) утворилися в сучасну епоху (мають нульовий вік), із положення максимуму розподілу молодих зір за металічністю (0.2 dex) знаходимо, що максимальний темп зореутворення у прийнятій шкалі відповідає часу, рівному 2 млрд років. Отже, більшість зір, біля яких виявлено планети, у середньому удвічі молодші за Сонце.

III. ЕКЗОПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ І ЗАКОН ТІЦІУСА–БОДЕ

У каталогах [7, 8] наведено значення мас планет та елементів планетних орбіт (велика піввісь a, ексцентриситет e та орбітальний період P). Індекс J означає, що маса планети вимірюється в одиницях маси Юпітера, індекс E — в одиницях маси Землі. Здебільшого ексцентриситети орбіт є малими, як і в Сонячній системі. Це видно з рисунка 5, на якому зображено розподіл 823 планет за ексцентриситетами. Із них 79% мають ексцентриситети, менші за 0.3. Найбільш імовірно, що наявність орбіт деяких планет із великими ексцентриситетами зумовлена не механізмами формування планет, а еволюційними факторами, які в кожній планетній системі індивідуальні. Тому для встановлення подібності структури планетних орбіт у різних планетних системах слід обмежитися вибіркою типових систем з невеликими ексцентриситетами орбіт, оскільки наявність орбіт з великими ексцентриситетами слід розглядати як виняток із загального правила.

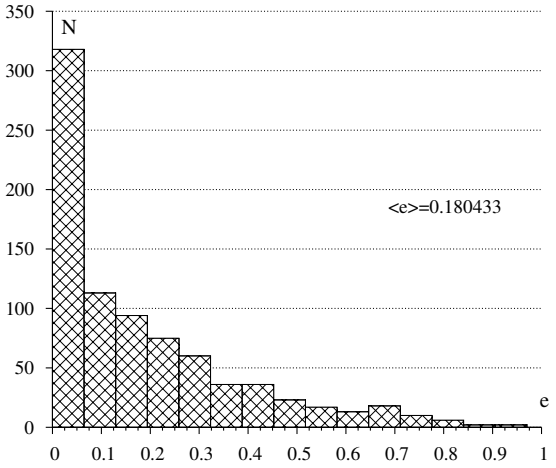


Рис. 5. Розподіл планет за ексцентриситетами орбіт.

Ураховуючи сказане, для аналізу подібності планетних систем ми обмежилися вибіркою із 122 систем, у кожній з яких є три чи більше планет, ексцентриситети орбіт яких менші за 0.3 (див. Додаток, таблиця 2).

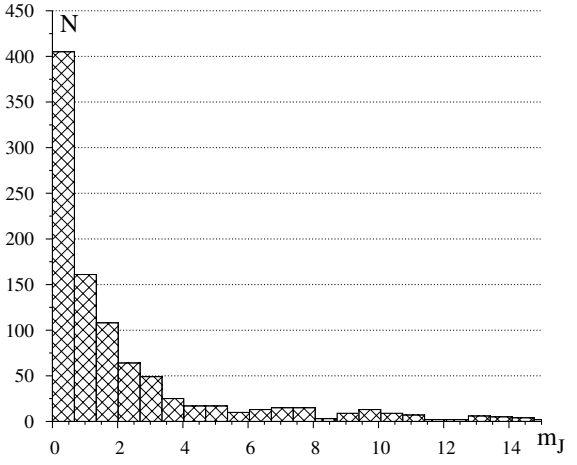


Рис. 6. Розподіл планет з відомими масами.

Як видно з цієї таблиці й рисунка 6, маси великої кількості планет перебувають в області $0,5 \div 1,0$ маси Юпітера, але є також досить масивні, з масою близько 10 і більше мас Юпітера. Як уже зазначено, відсутність планет малих мас не є особливістю будови екзопланетних систем, а пов'язана з обмеженістю методів спостереження.

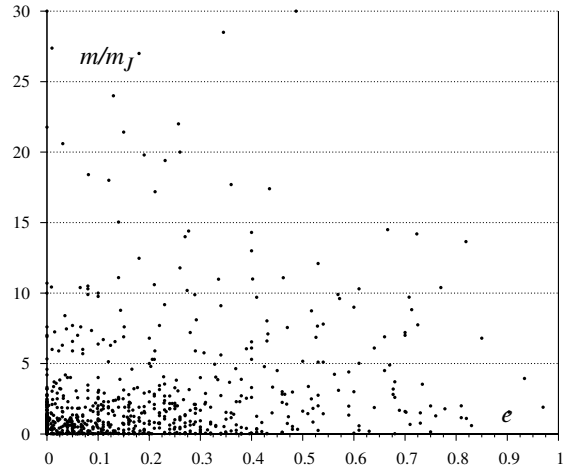


Рис. 7. Розподіл планет на площині "маса планети — ексцентриситет орбіти".

На рисунку 7 зображено розподіл планет на площині "маса планети — ексцентриситет її орбіти". Як видно з рисунка, великі ексцентриситети є у планет з відносно невеликими масами, що підтверджує вплив еволюційних чинників.

Суттєвою особливістю будови екзопланетних систем є велика кількість планет на низьких орбітах. Для багатьох планет велика піввісь орбіти досягає значення близько 0.02 а.о., приблизно для 60% усіх відомих планет велика піввісь не перевищує однієї астрономічної одиниці, а для 94% — 5 а.о.

Як відомо, структура планетних орбіт Сонячної системи, як і структура орбіт супутникових систем навколо планет-гігантів, підлягає закону Тіціуса–Боде [14]. Цей закон пов'язують з іменем Йоганна Даніеля Тіціуса фон Віттенберґа, який у 1766 році, перекладаючи книжку Шарля Бонне "Споглядання природи", зробив своє знамените зауваження про відстані відомих на ту пору планет від Сонця. Боде, як професійний астроном, активно сприяв популяризації цього закону. Однак першим, хто звернув увагу на закономірність у розташуванні планетних орбіт, був Христіан Вольф (1679–1764). Відому формулу

$$r_n = \frac{1}{10}(4 + 3 \cdot 2^n)\text{а.о.} \qquad (1)$$

записав Йоганн Фрідріх Вурм у 1787 році ($n = -\infty$ для Меркурія, $n = 0$ для Венери, $n = 1$ для Землі і т.д.). Закон Тіціуса–Боде вже близько 250 років є предметом дискусій, його то визнавали, то заперечували як випадкову числову послідовність. Об'єктивно ж він відіграв дуже важливу роль у дослідженні Сонячної системи, сприяючи відкриттю ще невідомих планет та об'єктів астероїдного поясу.

Для підвищення точності опису середніх відстаней планет від Сонця було запропоновано чимало модифікацій закону Тіціуса–Боде. Наприклад, формули Вурма для планетної системи:

$$r_n = (a + b \cdot 2^n)\text{ а.о.}, \quad a = 0.387, b = 0.293 \qquad (2)$$

та для супутникових систем:

$$r_n = 3.0(1 + 2^n)R_j \quad (\text{Юпітер}), \qquad (3)$$
$$r_n = (4.5 + 1.6 \cdot 2^n)R_s \quad (\text{Сатурн}),$$

де $R_j(R_s)$ — радіус планети, $n = -\infty, 0, 1, 2, \ldots$. Аналогічні формули запропонували Гільберт, Чалліс, Шарльє, Чемберс та інші. Формула Мері Блеґґ (1913 р.) має вигляд комбінації геомеричної прогресії і періодичної функції, а саме:

$$r_n = \text{A}(1.7275)^n[\text{B} + f(\alpha + n\beta)], \qquad (4)$$

де A і B — сталі числові величини, α і β — сталі кути, а $f(\theta)$ — функція з періодом 2π, що приймає значення в інтервалі $0 \le f(\theta) \le 1$ [14]. Ця формула дуже добре описувала спостережувані дані для планетної системи. Блеґґ запропонувала аналогічні формули також для супутникових систем. Подібну модифікацію запропонував у 40-х роках XX ст. Річардсон. На основі цих робіт була сформульована концепція, згідно з якою орбіти наближено описуються геометричною прогресією, що зумовлено механізмом утворення цих систем, а відхилення від неї є результатом дії еволюційних факторів. Хоча теоретичному обґрунтуванню закону Тіціуса–Боде присвячено чимало робіт (Вайцзеккер, Шмідт, Хіллз, Вульфсон, Біркеланд, Берлаге, Альвен, Доул, Койпер, тер Хаар, Чандрасекхар та ін., див. [14]), задача досі залишається актуальною.

У зв'язку з відкриттям екзопланетних систем задача про точний опис відстаней планет від зорі в кожній системі за допомогою єдиної формули втрачає зміст, адже формування кожної системи та її еволюція, безсумнівно, мають індивідуальні особливості. На наш погляд, важливішим є аналіз загальної структури відомих планетних систем та їх можливої подібності. Це завдання ускладнюється тією обставиною, що не всі характеристики планетних орбіт на сьогодні відомі з достатньою точністю. Якщо великі півосі орбіт визначені з невеликими похибками, то в багатьох випадках ексцентриситети взагалі невідомі, або ж визначені з великими похибками. Однак здебільшого відомі ексцентриситети є малими. Хоча із загальних міркувань ясно, що у планетних системах можуть бути планети як з великими, так і з малими масами, непрямі методи їх детектування не дають змоги встановити елементи всіх планетних орбіт у цій системі. Тому аналіз подібності структури планетних орбіт може бути тільки наближеним і мати статистичний характер. Як відомо з фізики, закони подібності звичайно формулюються в безрозмірних змінних (див., напр., теорію надпровідності, закони гідродинаміки та ін.). Для аналізу подібності планетних систем слід увести якийсь безрозмірний параметр, сталий для цієї системи, що наближено представляє структуру її орбіт. З цією метою зіставимо кожну спостережувану планетну систему з модельною системою, орбіти якої однозначно визначаються цим параметром. Оскільки орбіти планет у Сонячній системі наближено описуються законом геометричної прогресії, то за модельну систему для опису всіх спостережуваних систем виберімо таку, у якій

відношення великих півосей сусідніх орбіт

$$\alpha = \frac{\tilde{a}_n}{\tilde{a}_{n+1}} \tag{5}$$

є сталим для всієї системи. Зауважимо, що насправді в Сонячній системі величина $\alpha_n = a_n/a_{n+1}$ змінюється в межах (0.5–0.7), а її середнє арифметичне значення дорівнює $0.605\ldots$. Якщо ж зіставити Сонячну систему з модельною системою зі сталим α, то методом найменших квадратів одержуємо значення $0.5928\ldots$.

Оскільки модельна система наближено описує положеннння орбіт у середньому по всій системі, то близькість значень α для двох планетних систем може бути критерієм їх подібності в середньому, у статистичному сенсі.

У цій планетній системі спостережувані планети не обов'язково перебувають на сусідніх орбітах (між ними можуть бути орбіти планет із малими масами, які досі ще не зафіксовані). Нехай для цієї системи в результаті спостережень відкрито N планет, а великі півосі їхніх орбіт дорівнюють $a_1, \ldots, a_N$.

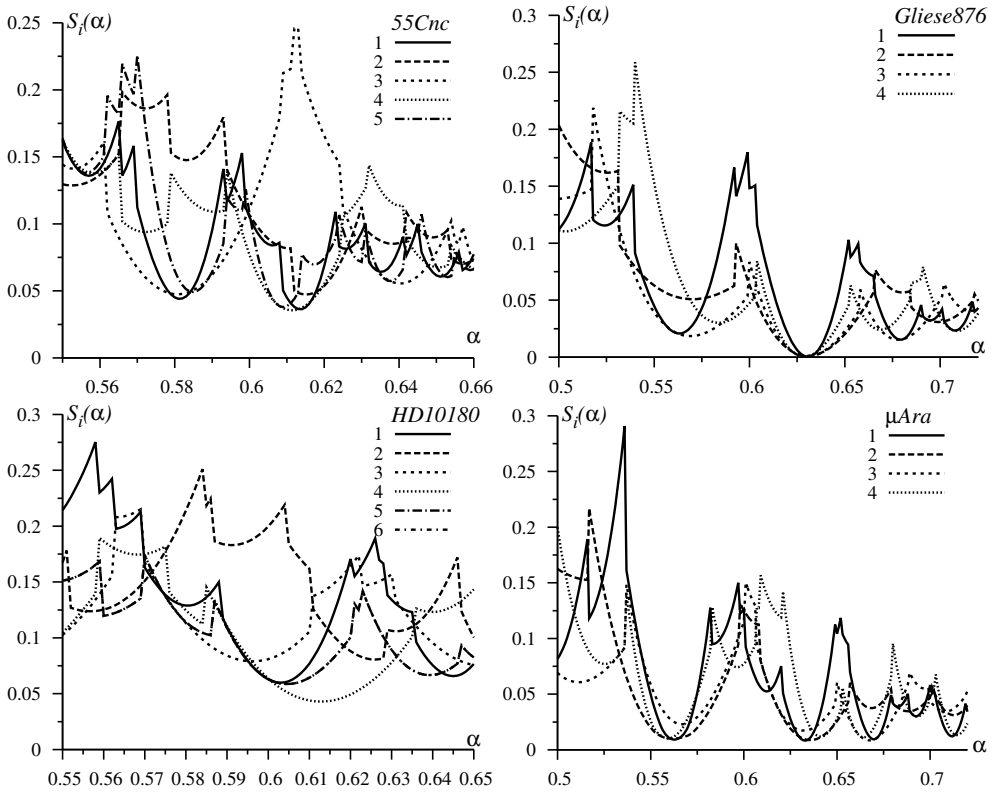


Рис. 8. Залежність функціонала $S_i(\alpha)$ від параметра α для різних систем.

Зіставимо з нею модельну систему, у якій є орбіти з півосями $\tilde{a}_1, \ldots, \tilde{a}_N$, що задовольняють співвідношення (5). Як перший елемент геометричної прогресії виберімо піввісь першої орбіти a_1 , тобто

$$\tilde{a}_n = \alpha^{1-n} a_1. \tag{6}$$

Припускаючи, що модельна орбіта збігається зі спостережуваною ($\tilde{a}_n = a_n$), і логарифмуючи співвідношення (6), визначаємо порядковий номер орбіти n для планети з великою піввіссю a_n:

$$n = \frac{\ln a_1 - \ln a_n}{\ln \alpha} + 1. \tag{7}$$

Оскільки модельна орбіта не обов'язково збігається зі спостережуваною, то знайдене число може бути не цілим і його слід заокруглити до найближчого цілого числа,

$$n \Rightarrow n_* = \left[\frac{\ln a_1 - \ln a_n}{\ln \alpha}\right] + 1. \tag{8}$$

Таким чином, спостережувану орбіту зіставляємо з модельною зі значенням великої півосі

$$\tilde{a}_n = a_1 \alpha^{1-n_*}. \tag{9}$$

Параметр α для заданої системи доберімо з умови мінімізації суми квадратів нормованих відхилень

$$S_1(\alpha) = \sum_{n=2}^{N} \left(\frac{\tilde{a}_n - a_n}{\tilde{a}_n}\right)^2 = \sum_{n=2}^{N} \left(1 - \frac{a_n}{a_1}\alpha^{[\frac{\ln a_1 - \ln a_n}{\ln \alpha}]}\right)^2 \underset{\alpha}{\to} \min. \tag{10}$$

У формулі (10) модельні орбіти планет розраховано відносно першої планети. Загалом за таку "планету

відліку" можна вибрати будь-яку іншу планету, наприклад, із номером i. У цьому разі порядкові номери деяких планетних орбіт можуть ставати від'ємними, якщо вони будуть ближче до центральної зорі відносно вибраної орбіти. Критерієм вибору "планети відліку" виберімо умову найменшого значення мінімуму $S(\alpha)$. Отже, у загальному випадку умова мінімізації набуває такого вигляду:

$$S_i(\alpha) = \sum_{n=1,n\neq i}^{N} \left(1 - \frac{a_n}{a_i}\alpha^{\left[\frac{\ln a_i - \ln a_n}{\ln \alpha}\right]}\right)^2 \underset{\alpha,i}{\rightarrow} \min . \quad (11)$$

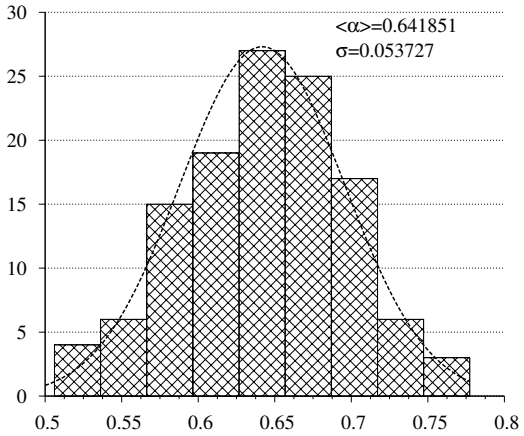


Рис. 9. Розподіл планетних систем за параметром α.

Для прикладу на рисунку 8 зображено залежність функціонала $S_i(\alpha)$ від параметра α, причому різним кривим відповідають різні планети відліку у планетних системах 55Cnc, Gliese876, HD10180, μAra. Як видно з рисунка 8, найменше значення мінімуму функціонала для системи 55Cnc досягається при $i = 4$, $\alpha = 0.611$, для Gliese 876 — $i = 3$, $\alpha = 0.630$, для HD 10180 — $i = 4$, $\alpha = 0.613$, а для системи μAra — $i = 1$, $\alpha = 0.632$.

Результати розрахунку α для планетних систем з $N \geq 3$, для яких відомі орбіти планет, наведено в таблиці 2. Там же подано також найменше мінімальне значення функціонала $S_i(\alpha)$ і номер орбіти відліку (колонка i, у якій нумерація відповідає зростанню великої півосі орбіти). Як видно з таблиці, більшості планетних систем відповідає α в інтервалі $[0.55\ldots; 0.67\ldots]$. На рисунку 9 подано розподіл проаналізованих планетних систем за параметром α. Як бачимо, побудована діаграма добре апроксимується нормальним розподілом, центр якого є в околі точки $\alpha_0 = 0.641851$.

Усвідомлюючи, що розподіл планетних орбіт за законом геометричної прогресії є наближеним, на рис. 10 ми наводимо відносне відхилення півосей орбіт спостережуваних планет від закону геометричної прогресії $\varphi = (a_n - \tilde{a}_n)/a_n^{-1}$ для планетних систем, що мають 4 або більше планети. Як видно з рисунків, відхилення від закону геометричної прогресії є малим, а середнє значення модуля — близько 0.01–0.02. Це зрозуміло, оскільки еволюційні чинники, що діють у різних системах, напевно, не є цілком ідентичними. З іншого боку, відхилення від закону геометричної прогресії теж можна розглядати як спільну рису планетних систем.

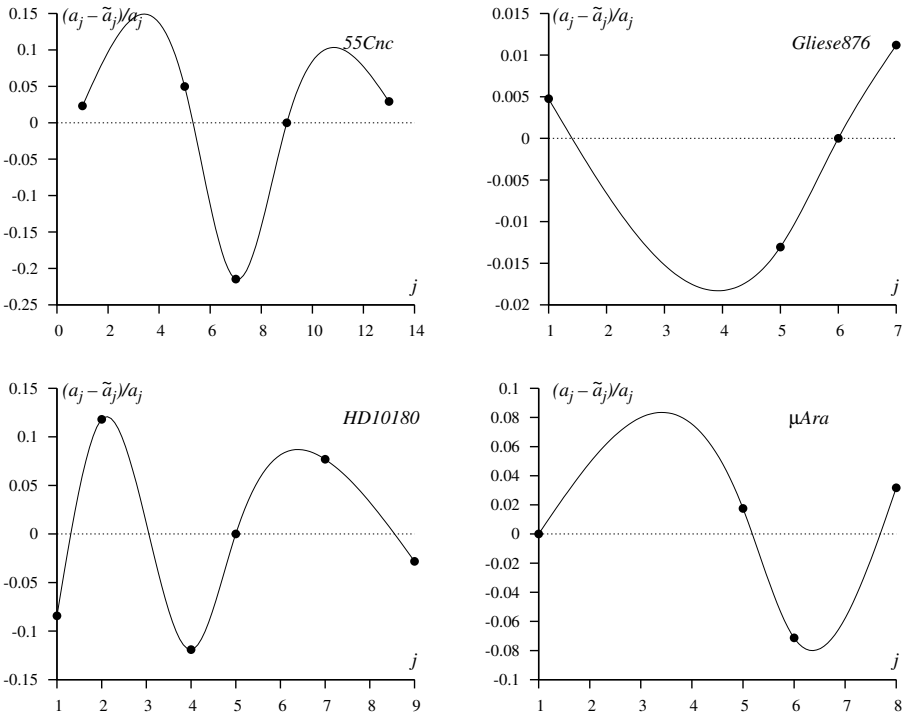


Рис. 10. Відносне відхилення півосей орбіт спостережуваних планет від закону геометричної прогресії для систем 55Cnc, Gl581, HD10180 та μAra.

IV. ВИСНОВКИ

Спостережувані дані, одержані за останні роки, підтверджують висновки, зроблені в праці [11] як щодо молодого віку більшості зір з планетами, так і щодо подібності структури орбіт в екзопланетних системах. Обсяг спостережуваних даних усе збільшується: якщо за час від 1995 р. до 2002 р. було виявлено близько 100 зір з планетами, до 2007 р. відкрито вже близько 200 зір. Зараз відомо понад 1100 зір, біля яких налічується близько 1800 планет, серед них є 460 систем із двома чи більше планетами.

Хоча характеристики зір і планет змінюються в досить широких межах, наявних даних достатньо для інтерпретації особливостей розподілу зір за спектральними класами й металічністю. Подібність структури орбіт в екзопланетних системах і застосовність закону Тіціуса–Боде теж є достатньо переконливими, про що свідчить рис. 9. Розподіл планетних орбіт за параметром α добре описується нормальним законом розподілу, а за критерієм χ^2 отримуємо достовірність, що становить близько 80%. Це означає, що структура орбіт у відомих екзопланетних системах, як і в Сонячній системі, є подібною. При цьому параметр α змінюється в невеликих межах, його середнє значення близьке до золотого перерізу $\frac{1}{2}(\sqrt{5}-1)$.

Оскільки закон геометричної прогресії в цілому для Сонячної системи близький до закону Тіціуса–Боде, то можна стверджувати, що в статистичному сенсі переважна більшість відомих планетних систем Галактики наближено підпорядковується цьому закону. Звичайно, тут мається на увазі не визначення відстаней планет цієї системи до своєї зорі, а загальна структура планетних орбіт у цій системі. У цьому сенсі закон Тіціуса–Боде слід розглядати як одну з основних астрономічних закономірностей (як закон Габбла, наприклад), що мають наближений статистичний характер.

ДОДАТОК

Табл. I.: Характеристики зір з трьома та більше планетами

№	Зоря	r	Sp	M	$L/L_\odot$	$\mathcal{M}$	[Fe/H]	$T_{\rm eff}$
1	47 Uma	13.97	G0V	4.37402	1.52192	1.03	0.0	5892.0
2	55 Cnc	12.34	K0IV-V	5.49342	0.542788	0.905	0.31	5196.0
3	61 Vir	8.52	G5V	5.0878	0.788641	0.95	−0.01	5531.0
4	GJ 667C	6.84	M1.5V	11.0447	0.00326672	0.33	−0.55	3600.0
5	GJ 676A	16.45	M0V	8.50917	0.0337545	0.71	0.23	
6	Gl 163	15.0	M3.5	10.9195	0.00366592	0.4		
7	Gl 581	6.21	M2.5V	11.5845	0.00198693	0.31	−0.135	3498.0
8	Gliese 876	4.7	M4 V	11.8095	0.00161509	0.334	0.05	3350.0
9	HD 10180	39.4	G1V	4.35252	1.55236	1.06	0.08	5911.0
10	HD 125612	52.82	G3V	4.69601	1.13135	1.1	0.24	5897.0
11	HD 134606	26.5	G6IV	4.73377	1.09268			
12	HD 136352	14.8	G4V	4.79869	1.02926			
13	HD 141399	36.17	K0V	4.40826	1.47468	1.14	0.18	5360.0
14	HD 181433	26.15	K3IV	6.29264	0.259982	0.78	0.33	4962.0
15	HD 204313	47.37	G5V	4.61248	1.22182	1.045	0.18	5767.0
16	HD 20794	6.06	G8V	5.34764	0.620791	0.85	−0.38	5490.0
17	HD 31527	38.6	G0V	4.54706	1.2977			
18	HD 37124	33.0	G4 V	5.08743	0.788911	0.83	−0.442	5610.0
19	HD 39194	25.9	K0V	6.0135	0.336201			
20	HD 40307	12.8	K2.5V	6.63395	0.189854	0.77	−0.31	4977.0
21	HD 69830	12.6	K0V	5.44815	0.565902	0.86	−0.05	5385.0
22	HD 82943	27.46	G0	4.3465	1.56099	1.18	0.32	5874.0
23	HIP 14810	52.9	G5	4.90272	0.935215	0.99	0.26	5485.0
24	HIP 57274	25.92	K5V	6.89183	0.149717	0.73	0.09	4640.0
25	HR 8799	39.4	A5V	2.98252	5.48267	1.56	−0.47	
26	KOI-82					0.81	0.18	4809.0
27	Kepler-104					0.81	−0.777	5711.0
28	Kepler-107						−0.092	5851.0
29	Kepler-11		G			0.95	0.0	5680.0
30	Kepler-114					0.71	−0.003	4450.0
31	Kepler-122					0.99	−0.202	6050.0
32	Kepler-124						−0.535	4984.0
33	Kepler-126							6239.0
34	Kepler-127						−0.154	6106.0
35	Kepler-132						−0.053	6003.0
36	Kepler-142					0.99	−0.274	5790.0
37	Kepler-149						0.147	5381.0
38	Kepler-150						−0.136	5560.0
39	Kepler-164					1.11	−0.125	5888.0
40	Kepler-169					0.86	0.238	4997.0
41	Kepler-171						−0.151	5642.0
42	Kepler-172					0.86	0.012	5526.0
43	Kepler-174						−0.556	4880.0
44	Kepler-176						0.072	5232.0
45	Kepler-178						−0.188	5676.0
46	Kepler-18					0.972	0.2	5383.0
47	Kepler-184						−0.338	5788.0
48	Kepler-186	151.0				0.478	−0.28	3788.0
49	Kepler-194						−0.298	6089.0

№	Зоря	r	Sp	M	$L/L_\odot$	$\mathcal{M}$	[Fe/H]	$T_{\rm eff}$
50	Kepler-197						−0.533	6004.0
51	Kepler-20	290.0	G8	5.18801	0.719111	0.912	0.02	5466.0
52	Kepler-203					0.98	−0.107	5821.0
53	Kepler-206					0.94	−0.149	5764.0
54	Kepler-207						−0.023	5920.0
55	Kepler-208					1.03		6092.0
56	Kepler-215					0.77	−0.618	5739.0
57	Kepler-219						0.02	5786.0
58	Kepler-220							4632.0
59	Kepler-221					0.72	−0.413	5243.0
60	Kepler-222						0.15	5433.0
61	Kepler-223						−0.211	5829.0
62	Kepler-224					0.74	−0.309	5018.0
63	Kepler-226					0.86	−0.145	5571.0
64	Kepler-228						−0.067	6043.0
65	Kepler-229						−0.109	5120.0
66	Kepler-235					0.59	0.087	4255.0
67	Kepler-238					1.43	0.143	5614.0
68	Kepler-244						−0.191	5554.0
69	Kepler-245					0.8	−0.028	5100.0
70	Kepler-247						0.169	5100.0
71	Kepler-249						0.221	3568.0
72	Kepler-25					1.22	0.01	6190.0
73	Kepler-250					0.8	0.063	5160.0
74	Kepler-251					0.91	−0.156	5526.0
75	Kepler-253						0.052	5208.0
76	Kepler-254						−0.191	5957.0
77	Kepler-256					1.02	0.061	5551.0
78	Kepler-257						0.315	5180.0
79	Kepler-26					0.65	−0.21	4500.0
80	Kepler-265					1.03	−0.311	5835.0
81	Kepler-267					0.56	0.028	4258.0
82	Kepler-272					0.79	−0.161	5297.0
83	Kepler-275					1.24	0.184	6165.0
84	Kepler-276					0.96	0.012	5812.0
85	Kepler-279					1.23	−0.57	6562.0
86	Kepler-282					1.09	−0.374	5876.0
87	Kepler-286						−0.165	5580.0
88	Kepler-288					0.89	−0.219	5918.0
89	Kepler-292					0.88	0.077	5299.0
90	Kepler-295						−0.332	5603.0
91	Kepler-296						0.168	4249.0
92	Kepler-298					0.65	−0.121	4465.0
93	Kepler-299					0.97	−0.052	5617.0
94	Kepler-30					0.99	0.18	5498.0
95	Kepler-301					0.91	−0.178	5815.0
96	Kepler-304					0.8	0.523	4731.0
97	Kepler-305					0.83	−0.071	4918.0
98	Kepler-306					0.82	0.155	4954.0
99	Kepler-31					1.21	−0.08	6340.0
100	Kepler-310					0.85	−0.299	5797.0
101	Kepler-319					1.29	0.487	5526.0
102	Kepler-325					0.87	−0.171	5752.0
103	Kepler-326					0.98	0.133	5105.0
104	Kepler-327					0.55	−0.042	3799.0
105	Kepler-33					1.291		5904.0
106	Kepler-331					0.51	−0.85	4347.0
107	Kepler-332					0.8	0.05	4955.0
108	Kepler-334					1.0	−0.074	5828.0
109	Kepler-336					0.89	−0.401	5867.0
110	Kepler-338					1.1	−0.106	5923.0
111	Kepler-339					0.84	−0.237	5631.0
112	Kepler-341					0.94	−0.139	6012.0
113	Kepler-342					1.13	−0.053	6175.0
114	Kepler-350					1.03	−0.308	6215.0
115	Kepler-354					0.65	−0.036	4648.0
116	Kepler-357					0.78	0.051	5036.0
117	Kepler-359					1.07	−0.039	6248.0
118	Kepler-363					1.23	0.299	5593.0
119	Kepler-372					1.15	−0.137	6509.0
120	Kepler-374					0.84	−0.441	5977.0
121	Kepler-37	66.0		5.67228	0.46035	0.803	−0.32	5417.0
122	Kepler-399						−0.827	5502.0
123	Kepler-402						−0.22	6090.0
124	Kepler-42	38.7		13.1814	0.00045648	0.13	−0.48	3068.0
125	Kepler-48					0.89		5190.0
126	Kepler-49					0.55		3974.0
127	Kepler-52					0.54		4075.0
128	Kepler-53					0.98		5858.0
129	Kepler-54					0.51		3705.0
130	Kepler-55					0.62		4362.0
131	Kepler-56					1.32	0.2	4840.0
132	Kepler-58					0.95		5843.0
133	Kepler-60					1.1		5915.0
134	Kepler-62		K2V			0.69	−0.21	4869.0
135	Kepler-65		B			1.25	0.17	6211.0

№	Зоря	r	Sp	M	$L/L_\odot$	$\mathcal{M}$	[Fe/H]	$T_{\rm eff}$
136	Kepler-68	135.0				1.079	0.12	5793.0
137	Kepler-79					1.165		6174.0
138	Kepler-80						−0.56	4250.0
139	Kepler-81					0.648	−0.2	4391.0
140	Kepler-83					0.664	−0.2	4164.0
141	Kepler-84					1.022	−0.2	6015.0
142	Kepler-85					0.95		5666.0
143	KOI-94					1.25	−0.01	6116.0
144	Kepler-9					1.0	0.17	5722.0
145	KOI-351					1.13	−0.17	5930.0
146	mu Ara	15.3	G3 IV-V	4.22654	1.74334	1.08	0.28	5700.0
147	ups And	13.47	F8 V	3.44316	3.58703	1.27	0.09	6212.0

Табл. II.: Характеристики планет

№	Назва	a_i	m/m_J	T	e	i	α	$S_i(\alpha)$
1	47 Uma b	2.1	2.53	1078.0	0.032	3	0.563	$6.5 \cdot 10^{-4}$
	47 Uma c	3.6	0.54	2391.0	0.098			
	47 Uma d	11.6	1.64	14002.0	0.16			
2	55 Cnc b	0.1134	0.8	14.651	0.0159	4	0.611	0.0342
	55 Cnc c	0.2403	0.169	44.3446	0.053			
	55 Cnc d	5.76	3.835	5218.0	0.025			
	55 Cnc e	0.0156	0.026	0.736546	0.06			
	55 Cnc f	0.781	0.144	260.7	0.0002			
3	Gliese 876 b	0.208317	1.927	61.03	0.0	3	0.630	$3.17 \cdot 10^{-4}$
	Gliese 876 c	0.12959	0.637	30.23	0.002			
	Gliese 876 d	0.021	0.017	1.94	0.081			
	Gliese 876 e	0.3343	0.039	124.69	0.073			
4	HD 10180 c	0.0641	0.0412	5.75979	0.045	4	0.613	0.0430
	HD 10180 d	0.1286	0.0370	16.3579	0.088			
	HD 10180 e	0.2699	0.0790	49.745	0.026			
	HD 10180 f	0.4929	0.07519743	122.76	0.135			
	HD 10180 g	1.422	0.0673	601.2	0.19			
	HD 10180 h	3.4	0.203	2222.0	0.08			
5	HD 141399 b	0.4225	0.46	94.35	0.04	1	0.664	0.0111
	HD 141399 c	0.7023	1.36	202.08	0.05			
	HD 141399 d	2.1348	1.22	1070.35	0.06			
	HD 141399 e	4.8968	0.69	3717.35	0.0			
6	HD 204313 b	3.04	3.55	1920.1	0.23	1	0.650	0.0151
	HD 204313 c	0.2103	0.054	34.873	0.17			
	HD 204313 d	3.93	1.68	2831.6	0.28			
7	HD 20794 b	0.1207	0.0085	18.315	0.0	1	0.588	$6.9 \cdot 10^{-5}$
	HD 20794 c	0.2036	0.0076	40.114	0.0			
	HD 20794 d	0.3499	0.015	90.309	0.0			
8	HD 37124 b	0.53364	0.675	154.378	0.054	1	0.570	$2.4 \cdot 10^{-3}$
	HD 37124 c	1.71	0.652	885.5	0.125			
	HD 37124 d	2.807	0.696	1862.0	0.16			
9	HD 39194 b	0.0519	0.0117	5.6363	0.2	1	0.548	$7.5 \cdot 10^{-5}$
	HD 39194 c	0.0954	0.0187	14.025	0.11			
	HD 39194 d	0.172	0.0162	33.941	0.2			
10	HD 40307 b	0.0468	0.0126	4.3123	0.2	2	0.666	0.0347
	HD 40307 c	0.0799	0.0208	9.6184	0.06			
	HD 40307 d	0.1321	0.0299	20.432	0.07			
	HD 40307 e	0.1886	0.011	34.62	0.15			
	HD 40307 f	0.247	0.0164	51.76	0.02			
	HD 40307 g	0.6	0.0223	197.8	0.29			
11	HD 69830 b	0.0785	0.033	8.667	0.1	3	0.661	$6.5 \cdot 10^{-4}$
	HD 69830 c	0.186	0.038	31.56	0.13			
	HD 69830 d	0.63	0.058	197.0	0.07			
12	HIP 14810 b	0.0692	3.88	6.673855	0.1427	2	0.662	$2.0 \cdot 10^{-5}$
	HIP 14810 c	0.545	1.28	147.73	0.164			
	HIP 14810 d	1.89	0.57	962.0	0.173			
13	HIP 57274 b	0.07	0.036	8.1352	0.187	3	0.643	$1.3 \cdot 10^{-3}$
	HIP 57274 c	0.178	0.41	32.03	0.05			
	HIP 57274 d	1.01	0.527	431.7	0.27			
14	HR 8799 b	68.0	7.0	164250.0	0.0	3	0.598	$8.5 \cdot 10^{-3}$
	HR 8799 c	42.9	10.0	82145.0	0.0			
	HR 8799 d	27.0	10.0	41054.0	0.1			
	HR 8799 e	14.5	9.0	18000.0				
15	KOI-82 b	0.117	0.0220	16.14569	0.0	2	0.757	$1.7 \cdot 10^{-3}$
	KOI-82 c	0.086	0.00944	10.3117732				
	KOI-82 d	0.067	0.0126	7.07134				
16	Kepler-104 b	0.094		11.427548		1	0.607	$2.0 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-104 c	0.153		23.668205				
	Kepler-104 d	0.257		51.755394				
17	Kepler-107 b	0.044		3.179997		2	0.706	$5.0 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-107 c	0.059		4.901425				
	Kepler-107 d	0.082		7.958203				
	Kepler-107 e	0.123		14.749049				
18	Kepler-11 b	0.091	0.005978	10.30375	0.0	6	0.604	0.0498
	Kepler-11 c	0.106	0.00912	13.02502	0.0			
	Kepler-11 d	0.159	0.02297	22.68719	0.0			
	Kepler-11 e	0.194	0.02643	31.9959	0.0			
	Kepler-11 f	0.25	0.006293	46.68876	0.0			
	Kepler-11 g	0.462	0.95	118.37774	0.0			

№	Назва	a_i	m/m_J	T	e	i	α	$S_i(\alpha)$
19	Kepler-114 b	0.052	0.0220	5.188548		2	0.760	$1.0 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-114 c	0.07	0.1258	8.041				
	Kepler-114 d	0.09	0.0151	11.776				
20	Kepler-122 b	0.064		5.766193		3	0.659	$6.9 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-122 c	0.108		12.465988				
	Kepler-122 d	0.155		21.587475				
	Kepler-122 e	0.227		37.993273				
21	Kepler-124 b	0.039		3.410493		1	0.616	$1.1 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-124 c	0.1		13.821375				
	Kepler-124 d	0.17		30.950851				
22	Kepler-126 b	0.099		10.495711		3	0.604	$8.0 \cdot 10^{-5}$
	Kepler-126 c	0.162		21.869741				
	Kepler-126 d	0.448		100.283134				
23	Kepler-127 b	0.125		14.435889		1	0.658	$3.7 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-127 c	0.2		29.393195				
	Kepler-127 d	0.28		48.630408				
24	Kepler-132 b	0.067		6.178196		3	0.705	$1.1 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-132 c	0.068		6.414914				
	Kepler-132 d	0.136		18.010199				
25	Kepler-142 b	0.032		2.024152		3	0.609	$3.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-142 c	0.057		4.761702				
	Kepler-142 d	0.242		41.809118				
26	Kepler-149 b	0.184		29.198943		3	0.691	$1.5 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-149 c	0.281		55.328328				
	Kepler-149 d	0.571		160.018032				
27	Kepler-150 b	0.044		3.428054		1	0.623	$9.4 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-150 c	0.073		7.381998				
	Kepler-150 d	0.104		12.56093				
	Kepler-150 e	0.189		30.826557				
28	Kepler-164 b	0.058		5.03503		1	0.564	$3.9 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-164 c	0.097		10.945723				
	Kepler-164 d	0.187		28.986769				
29	Kepler-169 b	0.04		3.250619		5	0.657	0.0291
	Kepler-169 c	0.062		6.195469				
	Kepler-169 d	0.075		8.348125				
	Kepler-169 e	0.105		13.767102				
	Kepler-169 f	0.359		87.090195				
30	Kepler-171 b	0.05		4.166972		2	0.688	0.0120
	Kepler-171 c	0.098		11.463462				
	Kepler-171 d	0.223		39.595519				
31	Kepler-172 b	0.04		2.940309		1	0.578	$8.5 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-172 c	0.068		6.388996				
	Kepler-172 d	0.118		14.627119				
	Kepler-172 e	0.211		35.118736				
32	Kepler-174 b	0.1		13.98179		2	0.682	$3.4 \cdot 10^{-5}$
	Kepler-174 c	0.214		44.000529				
	Kepler-174 d	0.677		247.35373				
33	Kepler-176 b	0.058		5.433074		1	0.590	$1.9 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-176 c	0.102		12.759712				
	Kepler-176 d	0.163		25.751974				
34	Kepler-178 b	0.085		9.576694		3	0.598	$2.4 \cdot 10^{-7}$
	Kepler-178 c	0.142		20.552802				
	Kepler-178 d	0.397		96.678988				
35	Kepler-18 b	0.0447	0.02162	3.504725		1	0.613	$1.2 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-18 c	0.0752	0.05412	7.64159				
	Kepler-18 d	0.1172	0.05128	14.85888				
36	Kepler-184 b	0.092		10.687576		2	0.717	0.0162
	Kepler-184 c	0.141		20.303005				
	Kepler-184 d	0.179		29.022358				
37	Kepler-186 b	0.04		3.886803		2	0.652	0.0140
	Kepler-186 c	0.061		7.267277				
	Kepler-186 d	0.091		13.343058				
	Kepler-186 e	0.129		22.407793				
	Kepler-186 f	0.356		129.9459				
38	Kepler-194 b	0.032		2.092281		1	0.642	0.0108
	Kepler-194 c	0.131		17.308032				
	Kepler-194 d	0.275		52.814973				
39	Kepler-197 b	0.06		5.599308		3	0.721	$3.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-197 c	0.09		10.349695				
	Kepler-197 d	0.119		15.677563				
	Kepler-197 e	0.164		25.209715				
40	Kepler-203 b	0.043		3.162697		1	0.664	$4.0 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-203 c	0.061		5.370647				
	Kepler-203 d	0.1		11.32972				
41	Kepler-206 b	0.078		7.781987		1	0.694	$2.0 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-206 c	0.111		13.137471				
	Kepler-206 d	0.163		23.44281				
42	Kepler-207 b	0.029		1.611865		1	0.654	$6.8 \cdot 10^{-5}$
	Kepler-207 c	0.044		3.071571				
	Kepler-207 d	0.068		5.868075				
43	Kepler-208 b	0.054		4.22864		2	0.669	0.0307
	Kepler-208 c	0.079		7.466623				
	Kepler-208 d	0.103		11.131786				
	Kepler-208 e	0.132		16.259458				

№	Назва	a_i	m/m_J	T	e	i	α	$S_i(\alpha)$
44	Kepler-215 b	0.084		9.360672		4	0.630	0.0178
	Kepler-215 c	0.113		14.667108				
	Kepler-215 d	0.185		30.864423				
	Kepler-215 e	0.314		68.16101				
45	Kepler-219 b	0.057		4.585512		1	0.592	$3.2 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-219 c	0.165		22.714613				
	Kepler-219 d	0.272		47.903645				
46	Kepler-220 b	0.046		4.159807		3	0.669	0.0103
	Kepler-220 c	0.076		9.034199				
	Kepler-220 d	0.163		28.122397				
	Kepler-220 e	0.226		45.902733				
47	Kepler-221 b	0.037		2.795906		3	0.660	$1.5 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-221 c	0.059		5.690586				
	Kepler-221 d	0.087		10.04156				
	Kepler-221 e	0.13		18.369917				
48	Kepler-222 b	0.048		3.936981		2	0.516	$9.2 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-222 c	0.091		10.08881				
	Kepler-222 d	0.18		28.081912				
49	Kepler-223 b	0.073		7.384108		3	0.734	0.0345
	Kepler-223 c	0.088		9.848183				
	Kepler-223 d	0.116		14.788759				
	Kepler-223 e	0.14		19.721734				
50	Kepler-224 b	0.038		3.132924		2	0.673	$2.8 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-224 c	0.058		5.925003				
	Kepler-224 d	0.089		11.349393				
	Kepler-224 e	0.124		18.643577				
51	Kepler-226 b	0.047		3.940997		3	0.698	0.0217
	Kepler-226 c	0.058		5.349555				
	Kepler-226 d	0.076		8.109044				
52	Kepler-228 b	0.038		2.566546		1	0.630	0.0220
	Kepler-228 c	0.052		4.134444				
	Kepler-228 d	0.101		11.094286				
53	Kepler-229 b	0.062		6.252972		2	0.531	$6.4 \cdot 10^{-6}$
	Kepler-229 c	0.117		16.068638				
	Kepler-229 d	0.22		41.194912				
54	Kepler-235 b	0.037		3.340222		2	0.552	$2.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-235 c	0.065		7.824904				
	Kepler-235 d	0.122		20.060548				
	Kepler-235 e	0.213		46.183669				
55	Kepler-238 b	0.034		2.090876		1	0.676	$7.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-238 c	0.069		6.155557				
	Kepler-238 d	0.115		13.233549				
56	Kepler-244 b	0.05		4.311792		1	0.593	$1.2 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-244 c	0.087		9.767292				
	Kepler-244 d	0.14		20.050401				
57	Kepler-245 b	0.071		7.49019		1	0.589	$9.9 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-245 c	0.124		17.460812				
	Kepler-245 d	0.202		36.277108				
58	Kepler-247 b	0.042		3.33616		1	0.536	$7.0 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-247 c	0.084		9.439452				
	Kepler-247 d	0.14		20.477912				
59	Kepler-249 b	0.035		3.306539		1	0.601	$1.7 \cdot 10^{-5}$
	Kepler-249 c	0.058		7.113702				
	Kepler-249 d	0.097		15.368459				
60	Kepler-250 b	0.048		4.148141		1	0.628	0.0113
	Kepler-250 c	0.069		7.156804				
	Kepler-250 d	0.127		17.648312				
61	Kepler-251 b	0.053		4.790936		4	0.668	$4.5 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-251 c	0.122		16.514043				
	Kepler-251 d	0.182		30.133001				
	Kepler-251 e	0.404		99.640161				
62	Kepler-253 b	0.046		3.783986		1	0.575	0.0170
	Kepler-253 c	0.089		10.281951				
	Kepler-253 d	0.13		18.119869				
63	Kepler-254 b	0.064		5.826662		1	0.662	$9.7 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-254 c	0.105		12.412183				
	Kepler-254 d	0.139		18.746477				
64	Kepler-256 b	0.027		1.620493		3	0.662	$5.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-256 c	0.045		3.38802				
	Kepler-256 d	0.064		5.839172				
	Kepler-256 e	0.096		10.681572				
65	Kepler-257 b	0.034		2.382667		3	0.613	0.0156
	Kepler-257 c	0.066		6.581484				
	Kepler-257 d	0.16		24.664551				
66	Kepler-26 b	0.085	0.38	12.2829		2	0.717	0.0150
	Kepler-26 c	0.107	0.375	17.2513				
	Kepler-26 e	0.22		46.827915				
67	Kepler-265 b	0.069		6.846262		2	0.595	0.0301
	Kepler-265 c	0.127		17.028937				
	Kepler-265 d	0.236		43.130617				
	Kepler-265 e	0.319		67.831024				
68	Kepler-267 b	0.037		3.353728		3	0.622	$4.5 \cdot 10^{-5}$
	Kepler-267 c	0.06		6.87745				
	Kepler-267 d	0.154		28.464515				

№	Назва	a_i	m/m_J	T	e	i	α	$S_i(\alpha)$
69	Kepler-272 b	0.038		2.971353		1	0.641	$1.1 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-272 c	0.061		6.057342				
	Kepler-272 d	0.091		10.937304				
70	Kepler-275 b	0.098		10.300682		1	0.674	$1.0 \cdot 10^{-2}$
	Kepler-275 c	0.132		16.088134				
	Kepler-275 d	0.224		35.676062				
71	Kepler-279 b	0.112		12.309681		2	0.706	$5.2 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-279 c	0.232	0.171	35.736				
	Kepler-279 d	0.30728	0.13	54.414				
72	Kepler-286 b	0.027		1.796302		2	0.627	$9.7 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-286 c	0.042		3.468095				
	Kepler-286 d	0.061		5.914323				
	Kepler-286 e	0.176		29.221289				
73	Kepler-288 b	0.065		6.097326		2	0.690	$1.2 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-288 c	0.14		19.305772				
	Kepler-288 d	0.287		56.633742				
74	Kepler-292 b	0.035		2.580827		2	0.688	0.0194
	Kepler-292 c	0.045		3.715335				
	Kepler-292 d	0.068		7.055679				
	Kepler-292 e	0.097		11.97901				
	Kepler-292 f	0.141		20.834237				
75	Kepler-295 b	0.099		12.645164		2	0.718	$1.7 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-295 c	0.142		21.526258				
	Kepler-295 d	0.192		33.884054				
76	Kepler-296 b	0.039		3.621457		3	0.680	$3.0 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-296 c	0.054		5.841648				
	Kepler-296 d	0.122		19.850242				
	Kepler-296 e	0.174		34.142347				
	Kepler-296 f	0.263		63.335879				
77	Kepler-298 b	0.08		10.475464		3	0.649	$5.1 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-298 c	0.136		22.92881				
	Kepler-298 d	0.305		77.473633				
78	Kepler-299 b	0.04		2.927128		2	0.570	$2.0 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-299 c	0.07		6.885875				
	Kepler-299 d	0.118		15.054786				
	Kepler-299 e	0.22		38.285489				
79	Kepler-30 b	0.18	0.036	29.334		1	0.600	$6.2 \cdot 10^{-12}$
	Kepler-30 c	0.3	2.01	60.3231				
	Kepler-30 d	0.5	0.073	143.343				
80	Kepler-301 b	0.036		2.508553		1	0.573	$2.5 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-301 c	0.06		5.419026				
	Kepler-301 d	0.112		13.751243				
81	Kepler-304 b	0.039		3.295709		1	0.703	$9.0 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-304 c	0.054		5.315946				
	Kepler-304 d	0.08		9.653471				
82	Kepler-305 b	0.05856	0.0356	5.487		1	0.707	$5.8 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-305 c	0.07711	0.0192	8.291				
	Kepler-305 d	0.121		16.738661				
83	Kepler-306 b	0.05		4.646186		4	0.585	0.0382
	Kepler-306 c	0.067		7.240193				
	Kepler-306 d	0.12		17.326644				
	Kepler-306 e	0.227		44.840975				
84	Kepler-31 b	0.16		20.8613		1	0.635	$1.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-31 c	0.26	4.7	42.6318				
	Kepler-31 d	0.39		87.648901				
85	Kepler-310 b	0.111		13.930698		1	0.647	$5.5 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-310 c	0.281		56.47542				
	Kepler-310 d	0.392		92.876125				
86	Kepler-319 b	0.051		4.362705		3	0.632	0.0125
	Kepler-319 c	0.069		6.941357				
	Kepler-319 d	0.191		31.781925				
87	Kepler-325 b	0.053		4.544439		2	0.700	$1.6 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-325 c	0.105		12.762172				
	Kepler-325 d	0.22		38.715185				
88	Kepler-326 b	0.032		2.248329		1	0.680	$9.2 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-326 c	0.051		4.580358				
	Kepler-326 d	0.066		6.766888				
89	Kepler-327 b	0.029		2.549575		1	0.576	$5.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-327 c	0.047		5.212333				
	Kepler-327 d	0.09		13.969457				
90	Kepler-33 b	0.0677		5.66793		3	0.670	0.0327
	Kepler-33 c	0.1189		13.17562				
	Kepler-33 d	0.1662		21.77596				
	Kepler-33 e	0.2138		31.7844				
	Kepler-33 f	0.2535		41.02902				
91	Kepler-331 b	0.065		8.457496		1	0.635	$8.5 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-331 c	0.105		17.28111				
	Kepler-331 d	0.159		32.134328				
92	Kepler-332 b	0.07		7.626324		1	0.610	$6.3 \cdot 10^{-5}$
	Kepler-332 c	0.114		15.995622				
	Kepler-332 d	0.189		34.21154				
93	Kepler-334 b	0.061		5.470319		1	0.595	$2.5 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-334 c	0.107		12.758005				
	Kepler-334 d	0.168		25.09849				

№	Назва	a_i	m/m_J	T	e	i	α	$S_i(\alpha)$
94	Kepler-336 b	0.033		2.024823		1	0.598	$2.0 \cdot 10^{-6}$
	Kepler-336 c	0.092		9.600001				
	Kepler-336 d	0.154		20.678772				
95	Kepler-338 b	0.117		13.726976		1	0.676	$5.3 \cdot 10^{-5}$
	Kepler-338 c	0.172		24.310856				
	Kepler-338 d	0.257		44.431014				
96	Kepler-339 b	0.055		4.977656		2	0.777	$1.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-339 c	0.069		6.988055				
	Kepler-339 d	0.091		10.558345				
97	Kepler-341 b	0.06		5.195528		1	0.614	0.0580
	Kepler-341 c	0.08		8.01041				
	Kepler-341 d	0.182		27.666313				
	Kepler-341 e	0.242		42.473269				
98	Kepler-342 b	0.128		15.170318		2	0.727	$4.7 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-342 c	0.185		26.234138				
	Kepler-342 d	0.242		39.459357				
99	Kepler-354 b	0.054		5.47666		2	0.703	0.0140
	Kepler-354 c	0.115		16.934402				
	Kepler-354 d	0.146		24.209842				
100	Kepler-357 b	0.063		6.475434		2	0.506	$2.8 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-357 c	0.12		16.85837				
	Kepler-357 d	0.246		49.499875				
101	Kepler-359 b	0.178		25.563222		1	0.520	0.0182
	Kepler-359 c	0.307		57.68802				
	Kepler-359 d	0.372		77.095691				
102	Kepler-363 b	0.048		3.614568		1	0.655	$8.0 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-363 c	0.079		7.542427				
	Kepler-363 d	0.107		11.932125				
103	Kepler-372 b	0.075		6.849692		2	0.710	$6.5 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-372 c	0.154		20.053763				
	Kepler-372 d	0.201		30.092568				
104	Kepler-374 b	0.029		1.897806		2	0.720	$3.3 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-374 c	0.042		3.282807				
	Kepler-374 d	0.056		5.028219				
105	Kepler-37	0.1003	0.00875	13.367308		1	0.702	$2.2 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-37	0.1368	0.0315	21.301886				
	Kepler-37	0.2076	0.0384	39.792187				
106	Kepler-399 b	0.103		14.425281		1	0.635	$2.4 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-399 c	0.155		26.67569				
	Kepler-399 d	0.261		58.034616				
107	Kepler-402 b	0.051		4.028751		2	0.727	0.0141
	Kepler-402 c	0.068		6.124821				
	Kepler-402 d	0.087		8.921099				
	Kepler-402 e	0.102		11.242861				
108	Kepler-42 b	0.0116	0.009	1.2137672		1	0.594	0.0309
	Kepler-42 c	0.006	0.006	0.45328509				
	Kepler-42 d	0.0154	0.003	1.856169				
109	Kepler-55 d	0.029		2.211099		1	0.599	$7.4 \cdot 10^{-5}$
	Kepler-55 e	0.048		4.617534				
	Kepler-55 f	0.081		10.198545				
110	Kepler-62 b	0.0553	0.028	5.714932		1	0.657	0.0197
	Kepler-62 c	0.0929	0.0126	12.4417				
	Kepler-62 d	0.12	0.044	18.16406				
	Kepler-62 e	0.427	0.113	122.3874				
	Kepler-62 f	0.718	0.11	267.291				
111	Kepler-65 b	0.035		2.15491		3	0.645	0.0363
	Kepler-65 c	0.068	0.08495	5.859944				
	Kepler-65 d	0.084	0.006293	8.13123				
112	Kepler-68 b	0.0617	0.02388	5.398763	0.0	3	0.638	$2.2 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-68 c	0.09059	0.015	9.605065				
	Kepler-68 d	1.4	0.947	580.0	0.18			
113	Kepler-79 b	0.117	0.1888	13.484697		1	0.657	0.0101
	Kepler-79 c	0.187	0.0472	27.4029	0.03			
	Kepler-79 d	0.287	0.0692	52.0902	0.025			
	Kepler-79 e	0.386	0.0129	81.0659	0.012			
114	Kepler-81 b	0.056		5.954893	0.0	1	0.654	$2.0 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-81 c	0.089		12.039901	0.0			
	Kepler-81 d	0.128		20.837846				
115	Kepler-83 b	0.078		9.770513	0.0	1	0.640	$5.9 \cdot 10^{-4}$
	Kepler-83 c	0.126		20.08976	0.0			
	Kepler-83 d	0.051		5.169796				
116	Kepler-84 b	0.083		8.725854	0.0	1	0.670	0.0125
	Kepler-84 c	0.108		12.882525	0.0			
	Kepler-84 d	0.052		4.224537				
	Kepler-84 e	0.181		27.434389				
	Kepler-84 f	0.25		44.552169				
117	Kepler-85 b	0.07891	0.0465	8.305992		1	0.686	0.0274
	Kepler-85 c	0.10369	0.059	12.51217				
	Kepler-85 d	0.13		17.91323				
	Kepler-85 e	0.163		25.216751				
118	Kepler-89 b	0.05	0.033	3.7432451		3	0.560	$6.4 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-89 c	0.099	0.03	10.423707				
	Kepler-89 d	0.165	0.164	22.3430004				
	Kepler-89 e	0.298	0.041	54.319931				

№	Назва	a_i	m/m_J	T	e	i	α	$S_i(\alpha)$
119	Kepler-9 b	0.143	0.1419	19.22418	0.0626	1	0.656	$1.2 \cdot 10^{-3}$
	Kepler-9 c	0.229	0.0975	39.03106	0.0684			
	Kepler-9 d	0.0273	0.01652	1.592851				
120	Kepler-90 b	0.074		7.008151		6	0.652	0.0362
	Kepler-90 c	0.089		8.719375				
	Kepler-90 d	0.32		59.73667				
	Kepler-90 e	0.42		91.93913				
	Kepler-90 f	0.48		124.9144	0.01			
	Kepler-90 g	0.71		210.60697				
	Kepler-90 h	1.01		331.60059				
121	μ Ara b	1.5	1.676	643.25	0.128	1	0.633	$8.3 \cdot 10^{-3}$
	μ Ara c	0.09094	0.03321	9.6386	0.172			
	μ Ara d	0.921	0.5219	310.55	0.0666			
	μ Ara e	5.235	1.814	4205.8	0.0985			
122	υ And b	0.059	0.62	4.617136	0.013	1	0.633	0.0234
	υ And c	0.861	1.8	237.7	0.24			
	υ And d	2.55	10.19	1302.61	0.274			
	υ And e	5.2456	1.059	3848.86	0.00536			

[1] И. С. Шкловский, *Вселенная, жизнь, разум* (Наука, Москва, 1987).
[2] R. P. Butler *et al.*, Astrophys. J. **545**, 504 (2000).
[3] G. Marcy *et al.*, Prog. Theor. Phys. Suppl. **158**, 24 (2005).
[4] A. Gimenex, Astron. Astrophys. **356**, 213 (2000).
[5] G. Laughlin, Astrophys. J. **545**, 1064 (2000).
[6] *SIMBAD Astronomical Database*, електронний ресурс `http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/`.
[7] *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*, електронний ресурс `http://exoplanet.eu`.
[8] *The Exoplanet Data Explorer*, електронний ресурс `http://exoplanets.org`.
[9] Б. Гнатык, В. Манько, в кн. *Космология в XXI веке* (Третья планета, Киев, 2013), с. ???.
[10] Д. Мартынов, *Курс общей астрофизики* (Наука, Москва, 1979).
[11] М. В. Ваврух, Н. Л. Тишко, Журн. фіз. досл. **6**, 414 (2002).
[12] Л. В. Коротина, А. В. Драгунова, Н. С. Комаров, Астрофизика (Ереван) **31**, 539 (1989).
[13] Б. А. Воронцов-Вельяминов, *Внегалактическая астрономия* (Наука, Москва, 1978).
[14] М. М. Ньето, *Закон Тициуса–Боде* (Мир, Москва, 1976).

THE STRUCTURE SIMILARITY OF PLANETARY SYSTEMS' ORBITS IN OUR GALAXY

M. V. Vavrukh, N. L. Tyshko, I. Ya. Prunchak
Ivan Franko National University of Lviv, Department for Astrophysics, 8, Kyryla i Mefodija St., Lviv, UA–79005, Ukraine, e-mail: mvavrukh@gmail.com

Analyzed in the paper are the features of the exoplanet orbit's structure for systems in the solar neighbourhood. In order to establish a similarity of planetary systems for each of them a model in which semi-major axes of the neighboring orbits satisfy the relation $\tilde{a}_n = \tilde{a}_{n+1}\alpha$, where α was a constant for this planetary system, was constructed. Parameter values α for all the systems were obtained by the least squares method according to the known observed semi-major axes. The distribution of the planetary systems for this parameter α was built. This distribution is close to normal distribution, and the maximum is reached at $\alpha_0 = 0.641851$. The reliability yielded by the χ^2 criterion is greater than 85%, which points at the similarity of the structure of the observed planetary systems in our Galaxy.