

ПОШУК ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ У КРАТНИХ ЕКЗОПЛАНЕТНИХ СИСТЕМАХ

У статті досліджено розташування планет в кратних екзопланетних системах, запропоновано загальне емпіричне співвідношення з гарним коефіцієнтом детермінації, запропонована методика для виявлення можливих орбіт ще не відкритих планет кратних екзопланетних систем.

Ключові слова: екзопланета, екзопланетна система, правило Тіциуса-Бодє, задача багатьох тіл.

The article examines the location of planets in multiple exoplanetary systems, proposes a general empirical relationship with a good coefficient of determination, and proposes a technique for detecting possible orbits of yet-to-be-discovered planets of multiple exoplanetary systems.

Key words: exoplanet, exoplanetary system, Titius-Bode rule, many-body problem.

Протягом історії сучасної астрофізики питання екзопланетних систем підіймалося в основному як квазінаукове, бо експериментальних підтверджень існування «позасонячних» об'єктів, що могли класифікуватися в повному обсязі як планети, не було. Все змінилося починаючи з 1995 року. В цьому році була відкрита перша екзопланета 51 Pegasib, біля материнської зорі 51 Pegasi, що є жовтим карликом головної послідовності – зорею, дужесхожою на Сонце [1]. Це відкриття стало величезним поштовхом для подальших пошуків екзопланет, а, як наслідок, і цілих екзопланетних систем астрономами всього світу.

Станом на 31 серпня 2022 року підтверджено існування 5156 екзопланет в 3803 планетних системах, в 833 з них більше однієї планети [2]. Ще 2366 перебувають в стані «надійних кандидатів» з проекту «Kepler» [3], ще близько 2200 в проекті «TESS» [4]. Всі вони очікують на підтвердження від наземних телескопів.

Незважаючи на швидкий розвиток екзопланетного напрямку астрономічних досліджень, пошук екзопланет все ще залишається складною і кропіткою працею, переважна більшість екзопланет відкрита за допомогою непрямих методик детектування. Звичайно, великі газові гіганти, що становлять більшість відкритих планет, інколи можливо помітити і прямим спостереженням, але в більшості випадків необхідно знати де саме шукати відповідний космічний об'єкт.

Проблема існування планетних систем розв'язується за допомогою стандартних рівнянь гравітації за допомогою так званої «задачі трьох тіл» або більш загального випадку – «задачі N тіл». Проте і ці, здавалось би очевидні розв'язки, не існують в загальному аналітичному вигляді, а пряме чисельне моделювання ускладнюється через величезний об'єм розрахунків, що займає величезний час та величезні потужності навіть сучасних ЕОМ. Навіть якщо користуватися не сучасними функціональними мовами програмування такими як Python, які є відносно повільними для чисельних розрахунків такого масштабу, а переходити до більш простих, наближених до машинного коду мов, наприклад Fortran, розрахунковий час для однієї системи може сягати місяців, якщо не років. Звичайно це дуже сповільнює розвиток астрофізики в напрямку пошуку та підтвердження існування нових екзопланет. Тоді на поміч приходять емпіричні закономірності, наприклад, правило Тіциуса–Бодє.

Відомо, що Йоган Тіциус отримав для сонячної системи наступну закономірність $(0,3 * 2^n + 0,4)$ а. о., де n – порядковий номер планети, окрім Меркурія для якого $n = -\infty$. Основною проблемою цього правила є незрозумілий порядковий номер Меркурія та неможливість знайти відстань до Нептуна.

Відомо, що експоненціальна залежність пояснює більшість інфляційних процесів розширення і еволюції різних чітко необмежених фізичних процесів. З вказаних міркувань

природньо шукати для кратних екзопланетних систем залежність відстані від материнської зорі до планети від номеру в вигляді:

$$r_n = ae^{bn} \text{ (а. о.) де } n \text{ – порядковий номер планети в системі}$$

Можливе різке відхилення від цієї залежності через різні зовнішні фактори, наприклад зіткнення з іншими позасистемними космічними об'єктами(що можливо і є причиною аномалій в сонячній системі), тоді пропонується наступна апроксимація:

$$r_n = (ae^{bn} + \delta) \text{ (а. о.)}$$

Остання залежність майжеповністю збігається з правилом Тіциуса-Бодє для Сонячної системи (заміна основи з «2» на «e»). Окрім пояснення закономірностей розташувань планет в екзопланетних системах, апроксимація дає можливість спрогнозувати можливе місцерозташування ще не відкритих екзопланет конкретної системи, що може значно спростити їх пошук і відкриття. Про моделюємо це на явному прикладі.

Розглянемо систему TOI-178, відкриту в 2021 році.

Таблица 1.

Параметри екзопланетної системи TOI-178 (2021 р.)

Назва екзопланети	№ екзопланети	Велика (а.о.)
TOI-178 b	1	0.02607 ± 0.00078
TOI-178 c	2	0.0370 ± 0.0011
TOI-178 d	3	0.0592 ± 0.0018
TOI-178 e	4	0.0783 ± 0.0024
TOI-178 g	5	0.1275 ± 0.0039

Апроксимація експонентою дає наступну залежність:

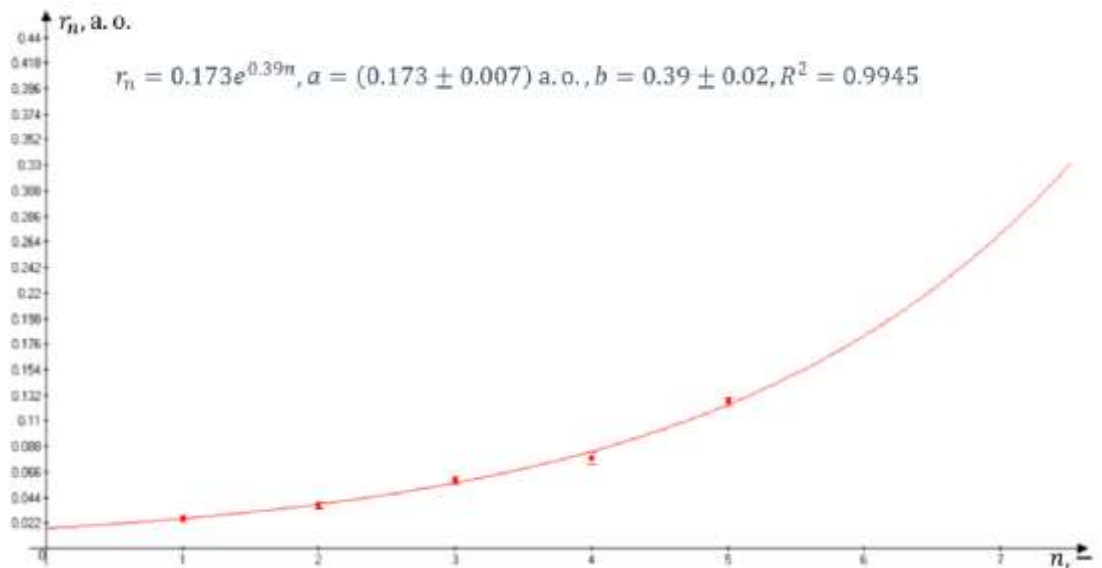


Рисунок 1. Апроксимація для TOI-178

Ми бачимо, що коефіцієнт детермінації близький до одиниці, що означає фрагментальну близькість апроксимації до істинної залежності на даній ділянці. В межах похибки всі експериментальні точки[5] близькі до апроксимації.

Для вже відкритих екзопланетних систем – 5 планет є досить великою кількістю, тому спробуємо на основі цієї системи перевірити можливість передбачувати існування інших, ще не відкритих або не підтверджених безпосереднім спостереженням планет в певній просторовій зоні. Звичайно, для цього можна було б розрахувати для дискретного набору номерів 1,2,3,4,5 передбачувані параметри r_n , порівняти їх з експериментальними, після чого спробувати передбачити, наприклад, r_6, r_7 (якщо ці планети взагалі існують в поданій системі). Але з рис.1. одразу видно, що в межах експериментальної похибки точки лягають на апроксимацію і повторне обчислення немає сенсу. Набагато цікавіше перевірити можливість виявлення параметрів розташування додаткових планет за допомогою подібної моделі в системах з відкритими 3, 4 планетами (хоча б тому, що їх кількість значно більша, ніж кількість великих планетних систем з 5 та більше планетами).

Нехай в нашій планетній системі TOI-178 відкрито лише 4 планети (номери від 1 до 4). Спробуємо на основі цих даних спрогнозувати r_5 .

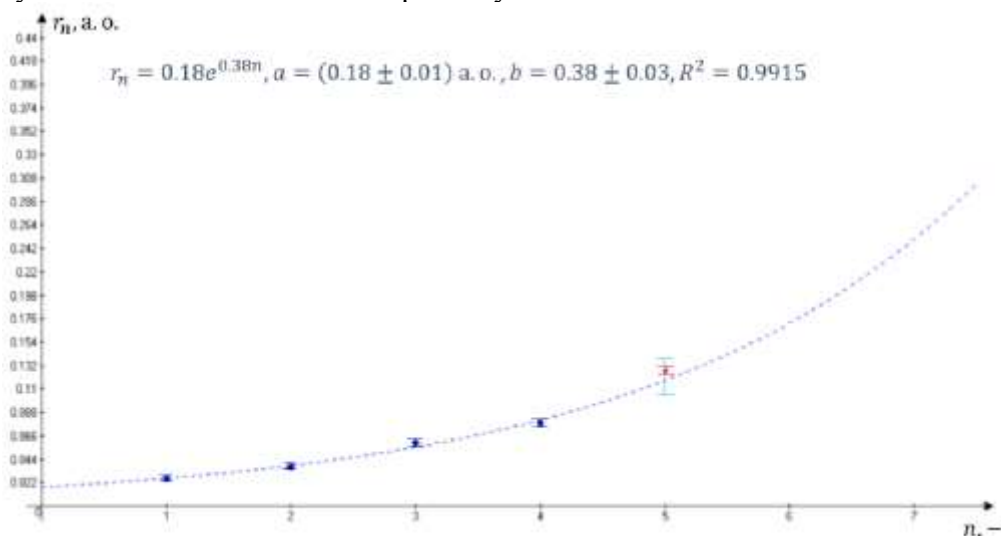


Рисунок 2. Апроксимація для 4 планет. Порівняння прогнозованого r_5 з експериментальним.

Як бачимо з рис. 2 коефіцієнт детермінації навіть для системи з 4 екзопланетами залишається близьким до 1. Блакитним кольором позначений довірчий інтервал для

можливих значень r_5 з ймовірністю потрапляння в діапазон r_4 та r_5 для заданої апроксимації. Звичайно діапазон досить значний, але як бачимо експериментальне значення навіть з діапазоном похибок повністю перебуває всередині прогнозованого діапазону, що підтверджує коректність застосування показаної моделі хоча б для першої оцінки r_5 .

Повторимо для системи TOI-178 з 3 планетами (від 1 до 3). Спрогнозуємо r_4 та r_5 .

Бачимо, що навіть для 3 планет апроксимації виявляється досить близькою до істинної, з високим коефіцієнтом детермінації. Звичайно мала кількість точок значно збільшує статистичну похибку, у відносному значенні до 10% і вище, але навіть за таких

умов можна оцінити діапазон r_4 та r_5 (сині бари довірчих інтервалів з ймовірністю α), які з запасом включають в себе і експериментальні значення і їх діапазон похибок.

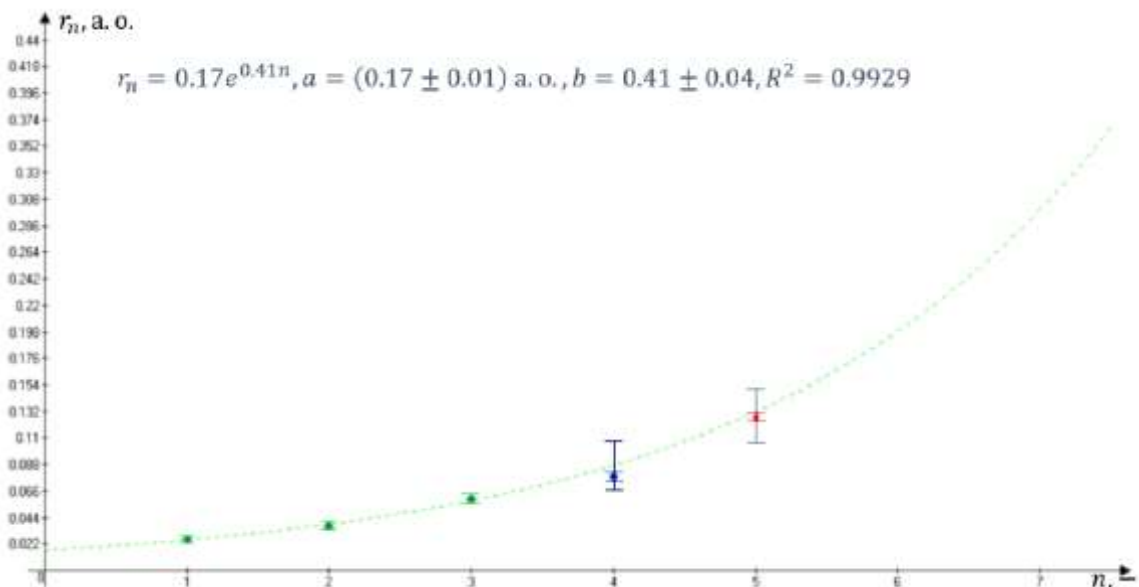


Рисунок 3. Апроксимація для 3 планет. Порівняння прогнозованих r_4 та r_5 з експериментальними.

Як підсумок можна зазначити, що пошук нових екзопланет і екзопланетних систем відбувається щоденно і цей напрямок все більше і більше розвивається, база для досліджень величезна, за оцінками тільки в нашій галактиці екзопланет не менше 10^{11} . Тому такі досить прості, емпіричні способи звуження просторових інтервалів пошуку для систем спостереження в певних кратних екзопланетних системах можуть стати фундаментом і каталізатором нових цікавих відкриттів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Mayor M., Queloz D. A Jupiter-masscompanion to a solar-type star // Nature. — 1995. — Vol. 378. — P. 355–359.
2. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>
3. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblSearch/nph-tblSearchInit?app=ExoTbIs&config=keplerstellar>

4. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=TOI>
5. [Leleu, A.](#) et al. Six transiting planets and a chain of Laplace resonances in TOI-178// *Astronomy & Astrophysics*, Volume 649, id.A26, 29 pp., 2021

Рекомендує до друку науковий керівник професор Кузьменков С.Г.