

ПРОКСИМА ЦЕНТАВРА ТА ЇЇ ПЛАНЕТНА СИСТЕМА

– Але... Земля дійсно населена, ... – видавив я, змішавшись.
– Якби це було правдою, – сказав екзаменатор,
дивлячись на мене так, немов я був прозорий,
– це було б порушенням законів природи.

Станіслав Лем,
“Зоряні щоденники Йона Тихого.
Подорож двадцять друга”

Упродовж останнього десятиріччя астрофізичні уявлення про околиці Сонячної системи зазнали суттєвих змін. Завдяки продуктивній праці сучасного покоління астрофізиків та прогресуючим якісним та кількісним змінам у технології спостережень та редукції спостережних даних стало можливим більш детальне дослідження маломасивних та холодних об'єктів, для яких застосовують термін “ультраохолодні карлики” [1]. Температури в їхніх атмосферах відносно невисокі, максимум випромінювання знаходиться в інфрачервоній частині спектра. Вперше, починаючи з XIX ст., спектральна класифікація зір була розширена, з'явилися спектральні класи L, T і Y. Новітні спостереження показали, що найчисельнішу популяцію (до 90 %) населення Галактики складають саме маломасивні об'єкти – зорі та коричневі карлики спектральних класів M, L, T, Y, а також планети.

Останнім часом увага до вивчення цих об'єктів посилилася ще й і тому, що вони є кращими кандидатами для пошуку екзопланет. Дійсно, їх маси та радіуси набагато менші, ніж у більш гарячіших зір, а це збільшує шанси на детектування планетних систем навколо них як методом транзитів, так і методом радіальних швидкостей. Метод транзитів полягає у детектуванні зменшення потоку випромінювання від зорі внаслідок проходження екзопланети по диску зорі.

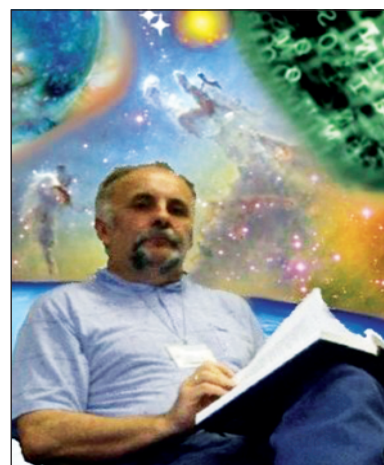
Саме ця методика застосовувалася в космічній місії “Кеплер”. Метод радіальних швидкостей оснований на реєстрації доплеровських зміщень спектральних ліній у спектрі материнської зорі, зумовлений її рухом відносно центру мас планетної системи. При цьому сама екзопланета може залишатись і невидимою з Землі. Саме таким методом було відкрито планетну систему навколо Проксима Центавра.



Максим Могорян
магістр кафедри астрономії
і фізики космосу
фізичного факультету
Київського національного
університету імені
Тараса Шевченка, м. Київ



Рис. 1. Фотографія Проксими, отримана Космічним телескопом імені Габбла



Яків Павленко
доктор фіз.-мат. наук,
завідувач відділом фізики
субзоряних та планетних систем
Головної астрономічної
обсерваторії НАН України,
м. Київ

Проксима Центавра є найближчою до нас зорею (за винятком, звичайно ж, Сонця) – всього в 1.302 ± 0.002 парсек від нас. Її пряме сходження становить $14^{\text{h}}29^{\text{m}}42.94853^{\text{s}}$, а схилення – $62^{\circ}40'46.1631''$; абсолютна зоряна величина у фільтрі V $M_V = 15.60^{\text{m}}$ (рис. 1). Проксима Центавра є червоним карликом з температурою поверхні 2900 ± 50 K [2], що знаходиться на Головній послідовності (за Гарвардською спектральною класифікацією належить до класу M6V). Ця зоря входить до потрійної системи Альфи Центавра: Альфа Центавра А та Альфа Центавра В обертаються навколо спільного центру мас, у той час як Проксима Центавра (інша її назва – Альфа Центавра С) обертається навколо даної подвійної системи.

Цікавою властивістю Проксими є те, що ця зоря аперіодично спалахує (зорі з такою властивістю належать до типу UV Ceti); під час спалахів, спричинених магнітною активністю зорі, інколи відбувається досить помітне підвищення її яскравості [18]. Магнітне поле генерується конвективними рухами у зовнішній частині зорі, а викликані цим полем явища активності спричиняють появу випромінювання у широкому діапазоні довжин хвиль, що схоже на вияви процесів активності в атмосфері Сонця. Під час сильних спалахів вивільняється енергія магнітного поля у вигляді поля випромінювання, що на коротких інтервалах часу може навіть підвищувати повну світність зорі. Звичайно, особливо контрастно такі процеси проявляють себе у випадку маломасивних зір із невеликими ефективними температурами. Характерні розміри таких спалахів для цих зір можуть перевищувати розміри самих зір, а температура в зоні спалахів та супутніх областях може сягати 27 млн K.

Іншою особливістю Проксими (безумовно, не менш цікавою) є наявність у неї планетної системи, щоправда, не схожої на Сонячну систему. На сьогодні відомо, що до складу планетної системи Проксими належать Проксима Центавра b (підтверджена), а також ще два кандидати, параметри яких у порядку їхнього віддалення від зорі наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Основні параметри планетної системи Проксими Центавра [3, 11, 14, 15]

Назва	Маса	Велика піввісь (а.о.)	Орбіт. період (доби)	Ексцентриситет	Радіус
(кандидат)	$\leq 0.4 M_3$	$\sim 0.015\text{--}0.024$	$\sim 2\text{--}4$	—	$\sim 1 R_3$
Проксима Центавра b	$\leq 1.27^{+0.19}_{-0.17} M_3$	$0.0485^{+0.0041}_{-0.0051}$	11.186	< 0.35	—
(кандидат)	$\sim 0.31 M_{10}$	~ 1.6	—	—	—

У 1998 році спектрограф FOS на борту Космічного телескопа імені Габбла помітив ознаки існування екзопланети з радіусом орбіти близько 0.5 а.о. [15]. Детальний пошук, проведений камерою WFPC2 на тому ж самому телескопі, не виявив жодних екзопланет [14]. Відтоді було опубліковано багато теоретичних робіт, пов'язаних з пошуком “осередків життя” в зоні Проксими, придатній для життя (ЗПЖ): детектування екзопланет методом високоточного визначення променевої швидкостей [4, 5, 17], де оцінювалась ймовірність придатності для життя супут-

ників великих екзопланет (EGP), орбіти яких лежать у ЗПЖ зорі [6] та ін.

Перші ознаки існування екзопланети біля Проксими були знайдені британським астрономом *Мікко Туомі* у 2013 році завдяки аналізу архівних спостережень. Задля перевірки результатів британця Європейська південна обсерваторія запустила в січні 2016 року проект Pale Red Dot (у відповідності до назви Pale Blue Dot, яку *Карл Саган* дав Землі через знімок, зроблений космічним апаратом “Вояджер-1” у 1990 році на відстані 6 млрд км від нас). Уже через півроку, у серпні 2016 р., міжнародний колектив із 31 вченого, керований лондонським астрономом *Гіллемом Англада-Ескюде*, підтвердив існування Проксими Центавра b та опублікував результати свого дослідження в журналі “Nature” [3].

Астрометричні вимірювання в Інтер-Американській обсерваторії Серро Тололо (Cerro Tololo Inter-American Observatory, 2014) дають підстави передбачити існування екзопланети, схожої за своїми параметрами на Юпітер, із орбітальним періодом порядку 2–12 років [11].

Зона навколо червоних карликів, яка придатна для життя

Зона, придатна для життя земних форм, – це просторова область поблизу материнської зорі, де температура на твердій поверхні екзопланети або іншого твердого тіла, створювана за рахунок поглинання випромінювання зорі, є достатньою для існування рідкої води (рис. 2). Рідка вода на сьогодні вважається необхідною умовою для виникнення та підтримання умов життя земного типу, оскільки вона потрібна для формування і відтворення сукупності відповідних біохімічних реакцій. Зазначимо, що тут і в подальшому мається на увазі саме *земна форма життя*, яка довела свою здібність до реалізації в широкому діапазоні зовнішніх фізичних умов та є відносно зрозумілою і достатньо вивченою сучасною наукою.

У зв'язку з відносно великим діапазоном мас екзопланет та відкриттям великих екзопланет, які можуть утримувати тонші атмосфери та сильніші магнітні поля, ніж

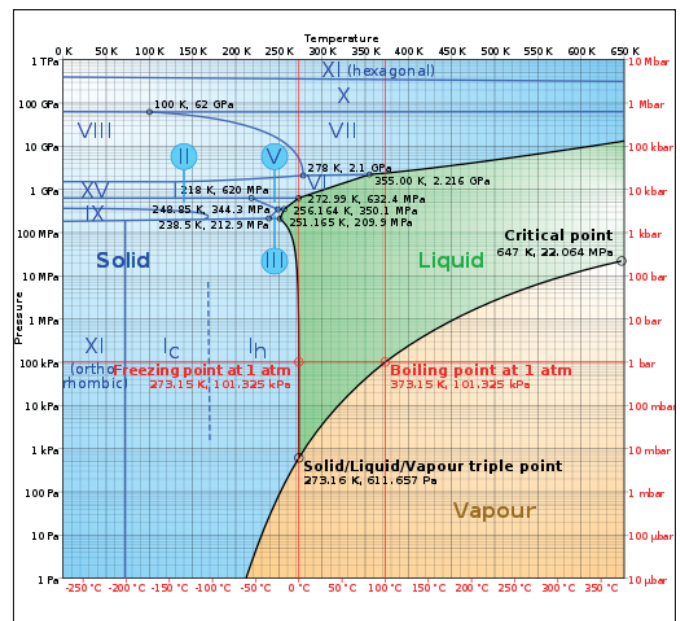


Рис. 2. Фазова діаграма води (вісь тиску є логарифмічною)

Земля, ЗПЖ в наш час поділяють на *консервативну* (CHZ, екзопланети, подібні до Землі, можуть бути придатними для життя) та *оптимістичну* (OHZ; супер-Землі можуть мати температуру, необхідну для наявності рідкої води на поверхні). Межі ЗПЖ визначаються з одного боку випаровуванням води через парниковий ефект, а з іншого – відстанню від зорі, на якій диоксиду карбону та інших поглинаючих молекул недостатньо, аби підтримувати на поверхні екзопланети температуру вище точки замерзання.

Параметри ЗПЖ можна знайти за такими формулами [9, 13], які визначають середній радіус, внутрішню та зовнішню межі:

$$d_{\text{сеп}} = d_{\odot} (L/L_{\odot})^{1/2}, \quad (1)$$

$$d_{\text{вн}} = d_{\odot} (L/L_{\odot})^{1/2} / S_{\text{эф, вн}}^{1/2}, \quad (2)$$

$$d_{\text{зовн}} = d_{\odot} (L/L_{\odot})^{1/2} / S_{\text{эф, зовн}}^{1/2}, \quad (3)$$

де d_{\odot} – це середній радіус ЗПЖ Сонця, L та L_{\odot} – яскравості досліджуваної зорі та Сонця відповідно, $S_{\text{эф}}$ – падаючий потік випромінювання від зорі, який може бути розрахований за формулою:

$$S_{\text{эф}} = S_{\text{эф, \odot}} + a \cdot T + b \cdot T^2 + c \cdot T^3 + d \cdot T^4,$$

де $S_{\text{эф, \odot}}$ – падаючий потік випромінювання від Сонця на відстані середнього орбітального радіуса Землі, а коефіцієнти a , b , c та d можна отримати з таблиць [9, 13]. При цьому слід пам'ятати, що дані коефіцієнти залежать від вибору моделі атмосфери досліджуваної екзопланети.

Сама ймовірність існування ЗПЖ поблизу червоних карликів та її протяжність визначається багатьма факторами. З негативних факторів слід відмітити низький світловий потік від зорі, високу ймовірність синхронізації періодів обертання планети навколо зорі та своєї вісі (як у Місяця), малі розміри ЗПЖ та високу змінність яскравості зорі; з позитивних – розповсюдженість (найбільший відсоток зір є червоними карликами (рис. 3)) та довговічність червоних карликів. За сучасними астрофізичними моделями червоні карлики можуть перебувати на Головній послідовності трильйони років [10].

Особливістю випромінювання червоних карликів є те, що більшість потоку від даних зір припадає на інфрачервону ділянку електромагнітного спектра. Як результат,

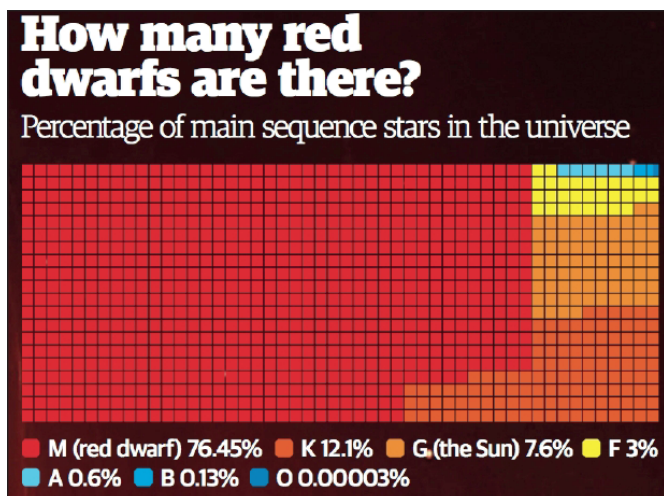


Рис. 3. Інфографіка червоних карликів.
Джерело: www.spaceanswers.com

фотосинтез на екзопланеті біля червоного карлика потребує додаткових фотонів, щоб населити квантові енергетичні рівні молекул, аналогічні тим, які потрібні в земних формах фотосинтезу. Передбачається, що для отримання якомога більше енергії шляхом поглинання фотонів у значно ширшому діапазоні довжин хвиль рослинність на екзопланеті, придатній для життя, ймовірно, буде здаватися чорною у видимому світлі [12].

Першою супер-Землею з масою $M \sim 3 - 4 M_{\oplus}$, знайденою в потенціалній ЗПЖ, була Gliese 581g. Незважаючи на те, що періоди обертання цієї екзопланети навколо зорі Gliese 581 та навколо своєї осі є синхронізованими, припускається існування рідкої води на термінаторі даної екзопланети [16].

Параметри ЗПЖ біля Проксими Центавра

У 1993 році була опублікована об'ємна стаття, в якій Джеймс Ф. Кастінг разом зі співавторами провів детальне дослідження меж ЗПЖ Сонця та багатьох інших зір Головної послідовності в припущенні, що об'єктами дослідження є землеподібні екзопланети з атмосферами, які містять молекули азоту, води та вуглекислого газу; придатність для життя визначалася лише присутністю рідкої води на поверхні екзопланети [8].

Впродовж двадцяти років різні автори вдосконалювали модель Кастінга, Вітмайра та Рейнольдса, і в 2013 р. була опублікована стаття, в якій Коппарану разом з дев'ятьма співавторами навіть коефіцієнти для рівнянь (2) та (3) для п'яти різних моделей атмосфери, які можна використовувати для визначення меж ЗПЖ навколо зір з ефективною температурою [9].

Кількома роками пізніше Стівен Кейн та Стефані Торрес задалися таким питанням: *яким чином на придатність планети для життя впливає зміна падаючого потоку випромінювання зорі, спричинена зміною нахилу вісі обертання та ексцентриситету планети?* У статті, опублікованій у 2017 році, автори обрахували ефекти витягнутості орбіти та нахилу вісі обертання екзопланет, які впливають на падаючий потік випромінювання, як функцію від широти, в припущенні еквівалентності варіацій потоку для повного орбітального циклу [7]. Автори обрали об'єктами дослідження чотири планетні системи в ЗПЖ відповідних їм зір, у яких визначені або самі ексцентриситети планет, або їхні максимальні значення – GJ 163, K2-3, Kepler-186 та Проксима Центавра, – і визначили, що витягнутість орбіти та нахил вісі обертання істотно впливають на придатність планети для життя.

Зважаючи на попередні дослідження ЗПЖ Проксими Центавра, досить легко стає задачею визначення параметрів згаданої ЗПЖ. Оскільки болометрична світність Проксими Центавра становить $0.0017L_{\odot}$, а середній радіус ЗПЖ Землі – 1.37 а.о., то з рівняння (1) можна отримати середній радіус ЗПЖ Проксими Центавра, який дорівнює 0.056 а.о.

Якщо для визначення меж даної зони використати коефіцієнти граничних випадків сучасної Венери та молодого Марса, наведені в статті Коппарану та ін. [9], отримуємо такі граничні значення меж оптимістичної ЗПЖ [10]:

- 0.030 а.о. для внутрішньої межі,
- 0.065 а.о. для зовнішньої межі.

Водночас, висока зоряна активність ставить під сумнів саму наявність ЗПЖ біля Проксими Центавра по іншій причині: тут спостерігаються часті сильні спалахи [2, 18], а пов'язані з активністю потоки високоенергетичних частинок і фотонів можуть знищити озоновий шар планети, дозволяючи смертельним потокам фотонів в ультрафіолетовому спектральному діапазоні досягати її поверхні.

У березні 2016 року на телескопі "Евріскоп" Говард та ін. спостерігали надспалах у атмосфері Проксима Центавра [18]. Блиск цієї зорі збільшився під час надсильного спалаху в 68 раз, була вивільнена болометрична енергія в $10^{33.5}$ ерг, що на порядок більше, ніж будь-який раніше виявлений спалах від Проксими. За останні два роки "Евріскопом" зареєстровано кілька сильних спалахів Проксими, болометричні енергії яких знаходяться в інтервалі від $10^{30.6}$ ерг до $10^{32.4}$ ерг; автори прогнозують щонайменше п'ять надспалахів, які відбуваються щороку.

Застосування великих телескопів дало імпульс більш детальним дослідженням Проксими. Одночасна з фотометричними дослідженнями спектроскопія HARPS із високою роздільною здатністю під час сильних спалахів дає можливість визначити обмеження на інтенсивність ультрафіолетового випромінювання, а отже і оцінити ефективність викидів корональної маси. Горячий зоряний вітер від Проксими спостерігається у вигляді компонента, зміщеного на ~ 30 км/с в деяких емісійних лініях водню [2].

Результати вивчення надспалаху, спостереженого на "Евріскопі", були використані для моделювання фотохімічних змін концентрації молекул NO_x , спричинених взаємодією з високоенергетичними частинками, які генеруються в процесі таких явищ екстремальної зоряної активності. Зокрема було показано [20], що повторення таких спалахів протягом п'яти років є достатнім для



Рис. 4. Ілюстрація М. Корнмессера, як може виглядати поверхня екзопланети Проксима b, що рухається навколо червоного карлика Проксима Центавра. Подвійна зоря Альфа Центавра АВ зображена у верхньому правому куті. Температурні умови екзопланети Проксима b свідчать про можливість існування рідкої води на її поверхні. Джерело: <https://www.eso.org/public/images/eso1629a/>

зменшення озону землеподібної атмосфери на 90 %, а повне виснаження відбувається за кілька сотень тисяч років. Ультрафіолетове випромінювання, продуковане надспалахом, досягло поверхні з інтенсивністю енергії понад два порядки, достатньою для знищення навіть простих ультрадисперсних мікроорганізмів на поверхні планети [18]. З другого боку, можна припустити, що в разі наявності океанів, життя все таки може існувати (рис. 4) під шаром води на цій екзопланеті. ■

Література

1. Pavlenko Ya.V. Brown dwarfs, in Shulga V., 2014, Vol. 2. Dark matter: Astrophysical aspects of the problem, by V. Shulga et al., P. 357.
2. Pavlenko Ya.V., Suarez Mascareno A., Rebolo R. et al. Flare activity and photospheric analysis of Proxima Centauri. *Astron. Astrophys.*, 2016, P. 49.
3. Anglada-Escudé G., Amado P.J., Barnes J. et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature*, 2016. 536 (7617). P. 437–440.
4. Endl M. Extrasolar Terrestrial Planets: Can We Detect Them Already? Conference Proceedings "Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets", Drake Deming (ed), 2002.
5. Endl M., Kürster M. Toward detection of terrestrial planets in the habitable zone of our closest neighbor: Proxima Centauri. *Astron. Astrophys.* 2008. 488, P. 1149–1153.
6. Kaltenegger L. Characterizing habitable exomoons. *Astrophys. J. Letters*, 2010. 712:L125–L130.
7. Kane S.R. Obliquity and eccentricity constraints for terrestrial exoplanets / Torres S.M. *Astrophys. J.*, 2017. PP. 154, 5, 12.
8. Kasting J.F. Whitmire D.P., Reynolds R.T. Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus*, 1993. 101, 1, P. 108–128.
9. Kopparapu R.K., Ramirez R., Kasting J.F. et al. Deshpande R. Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *Astrophys. J.*, 2013. P. 765:131.
10. Kopparapu R.K. A revised estimate of the occurrence rate of terrestrial planets in the habitable zones around Kepler M-dwarfs. *Astrophys. J. Letters*, 2013. P. 767:L8.
11. Lurie J.C., Henry T.J., Jao W.-C. et al. The Solar Neighborhood. XXXIV. a Search for Planets Orbiting Nearby M Dwarfs Using Astrometry. *The Astronomical Journal*, 2014. P. 148 (5): 12.
12. Nancy Y.K.. The color of plants on other worlds. *Scientific American*, 2008. 298. P. 48–55.
13. Ramirez R.M., Kaltenegger L. A Volcanic Hydrogen Habitable Zone. *Astrophys. J. Letters*, 2017. P. 837:L4.
14. Schroeder D.J., Golimowski D.A., Bruckardt R.A. et al. A Search for Faint Companions to Nearby Stars Using the Wide Field Planetary Camera 2. *The Astronomical Journal*, 2000. 119 (2). P. 906–922.
15. Schultz A.B., Hart H.M., Hershey J.L. et al. A possible companion to Proxima Centauri. *The Astronomical Journal*, 1998. 115 (1). P. 345–350.
16. Vogt S.S., Butler R.P., Rivera E.J. et al. The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: A $3.1 M_{\oplus}$ Planet in the Habitable Zone of the Nearby M3V Star Gliese 581. *The Astrophysical Journal*, 2010. 723. P. 954–965.
17. Zechmeister M., Kürster M., and Endl M. The M dwarf planet search programme at the ESO VLT + UVES. A search for terrestrial planets in the habitable zone of M dwarfs. *Astron. Astrophys.* 2009. 505. P. 859–871.
18. Howard W.S., Tilley M.T., Corbett N. et al. The first nakedeye superflare detected from Proxima Centauri, 2018, *astro-ph 1804.02001v1*.