

ОБЪЯВИЛИ НАВКОЛО ДРУГИХ ЗІР



**Анатолій
Відьмаченко**

доктор фіз.-мат. наук,
професор,
зав. відділу
ГАО НАН України

Існування Сонячної системи з вісьмома великими планетами, майже сотнею супутників навколо них, чисельними малими планетами (або так званими астероїдами) і кометами є незаперечним фактом. Однак дослідників завжди цікавило питання про наявність планет навколо інших зір нашої Галактики. Враховуючи розміри Галактики та закони теорії імовірності, можна зробити незаперечний висновок, що наша Сонячна система не є унікальною у Всесвіті.

Задосить приблизними оцінками у тій частині Всесвіту, яку можна спостерігати через найпотужніші телескопи, повинно налічуватися близько 50 мільярдів галактик, найбільші з котрих вміщують по декілька тисяч мільярдів зір. При допустимому часі існування Всесвіту приблизно 14 млрд. років кожна година в ньому повинно було б формуватися близько 1 мільйона планетних систем.

Проте довгий час залишалося відкритим питання про можливість встановити існування позасонячних планет на базі прямих астрономічних спостережень.

Протягом останнього десятиріччя для астрономічних спостережень використовувалися все більш досконалі і складні методи. За допомогою деяких із них згідно з точними, хоч і непрямими методиками стало можливим зареєструвати планетні тіла біля інших, відмінних від нашого Сонця, зір. І хоча такі опосередковані методи вже впевнено вказували на реальне існування позасонячних планет, однак ще тривалий час не можна було прямо спостерігати їх через телескоп або знімок. Відкриття і підтвердження вищезазначених планетних тіл непрямими методами було здійснено в 1995 р., а головним поштовхом до цього стала інформація, яка накопичувалася починаючи з кінця 1980-х і в 1990-і роки. В результаті прямих астрономічних спостережень лише в жовтні 1995 року група астрономів повідомила про відкриття 8 планет, котрі обертаються навколо зір типу нашого Сонця. Про можливе існування системи з трьох планет біля пульсара PSR 1257+12 було повідомлено ще в 1992 р.

МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ НАВКОЛОЗОРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

Саме в 1990-і роки значна увага приділялася пошуку позасонячних планет. Основними методами, які використовуються при таких дослідженнях, є астрометрична реєстрація, отримання прямих зображень, дослідження радіальних швидкостей зір, фотометричний метод (або метод покриттів), спостереження в інфрачервоному діапазоні. Серед такого розмаїття методів для підтвердження існування планетного тіла на сьогодні є і явний лідер — вимірювання радіальних складових швидкості переміщення зір, який ґрунтується на доплерівському методі вимірювання зміщення спектральних ліній. Саме цим методом зареєстровані практично всі відомі на сьогодні планетні системи. І лише деякі з них підтверджені або астрометричним методом, або засобами фотометрії. Радіальна швидкість RV , значення котрої визначається за доплерівським зміщенням ліній у спектрі зір, враховує лише

складову швидкості її зміщення по лінії, яка з'єднує зорю і спостерігача (рис.1). Якщо при цьому зоря зміщується в напрямку до спостерігача, то весь її спектр буде зміщений до синього краю (так зване

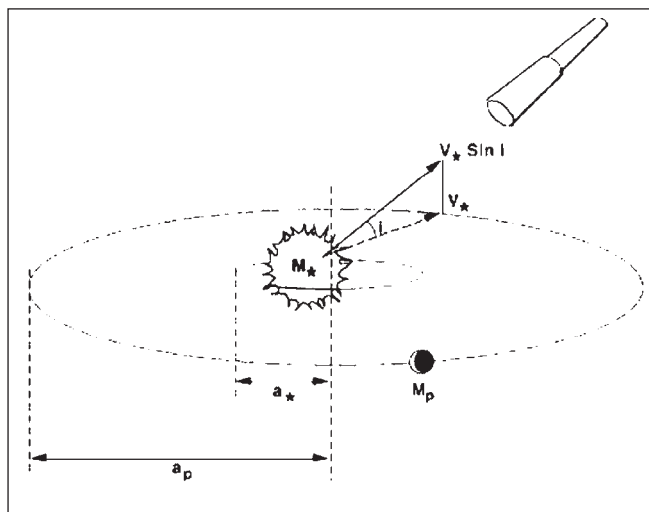


Рис. 1. Виміювання радіальних швидкостей зір

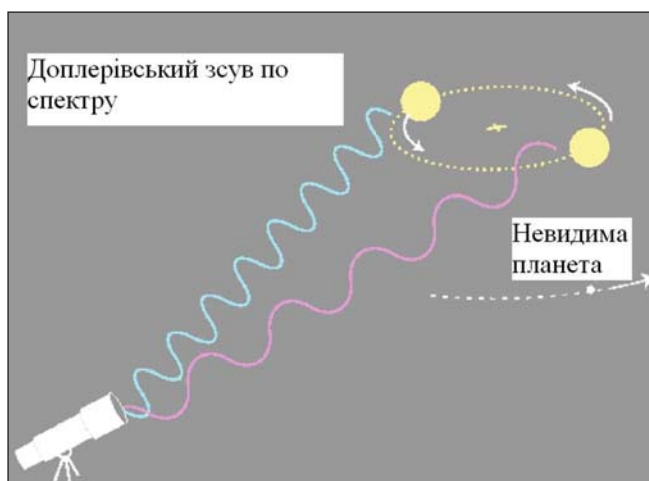


Рис. 2. Схема застосування ефекту Доплера до вимірювань зміщення спектральних ліній зорі в залежності від її руху до і від спостерігача

синє зміщення) і саме значення швидкості буде від'ємним. Якщо ж зоря віддаляється від спостерігача, то спектр зорі буде зміщеним до червоного краю (червоне зміщення) і значення швидкості буде додатнім (рис.2). Таким чином, спостерігаючи зсув спектральних деталей, можна визначити напрямок, в якому зміщується зоря. У випадку, коли планета (або планети) обертається навколо зорі, її місцеположення у просторі буде відчувати деяке зміщення відносно центра маси всієї системи. Спектр такої зорі покаже періодичний зсув то в червону, то в синю область спектра. Інакше кажучи, наявність планетних тіл навколо зорі буде впливати на величину радіальної складової швидкості зорі. Слід відмітити, що таке збурення доплерівської швидкості є дуже невеликим і тому його надзвичайно важко зареєструвати. У зв'язку з цим для подібного аналізу необхідно використовувати високоспеці-

лізовані спектрометри, котрі можуть дати можливість зареєструвати найменші доплерівські зміщення довжини хвилі лінійчатого спектра зорі.

У астрометричному методі для визначення власних рухів вибраних зір як контрольних реперних точок використовуються інші зорі, розташовані поруч. За наявності масивного тіла, яке обертається навколо досліджуваної зорі, буде спостерігатися її видиме зміщення в картинній площині відносно загального центра мас.

Прямий метод базується на тому факті, що планети відбивають світло зорі, навколо якої вони обертаються. Планети практично не випромінюють власного світла. І той факт, що в нічному земному небі ми бачимо деякі планети, є результатом того, що вони світять відбитим від них світлом Сонця. Аналогічно і планети навколо інших зір також повинні відбивати світло від своїх центральних світил. Тому цей метод в принципі також може використовуватися для реєстрації відбитого світла від позасонячних планет. Очевидно, що тільки планети із надзвичайно великими лінійними розмірами можуть бути зареєстровані при використанні цього методу. Головна проблема при такій методиці полягає в тому, що зоря набагато яскравіша від планети. На сьогодні отримано прямі знімки лише для чотирьох екзопланет (один з них див. на рис.3) з масами від 5 до 21 мас Юпітера.

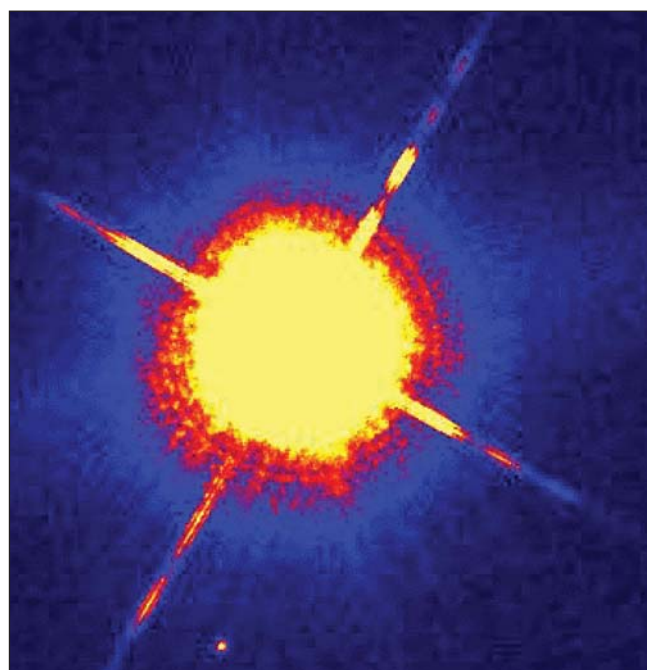


Рис.3. Фотографія екзопланети, отримана за безпосередніми спостереженнями

Фотометричний метод (або метод "транзиту") може використовуватися для реєстрації зміни яскравості зорі в той винятковий момент, коли планета покриває зорю, рухаючись по своїй орбіті. Тому зміна яскравості зорі з цієї причини повинна вказувати на наявність біля неї планетного тіла. Рис. 4 пояснює ефекти, що виникають у

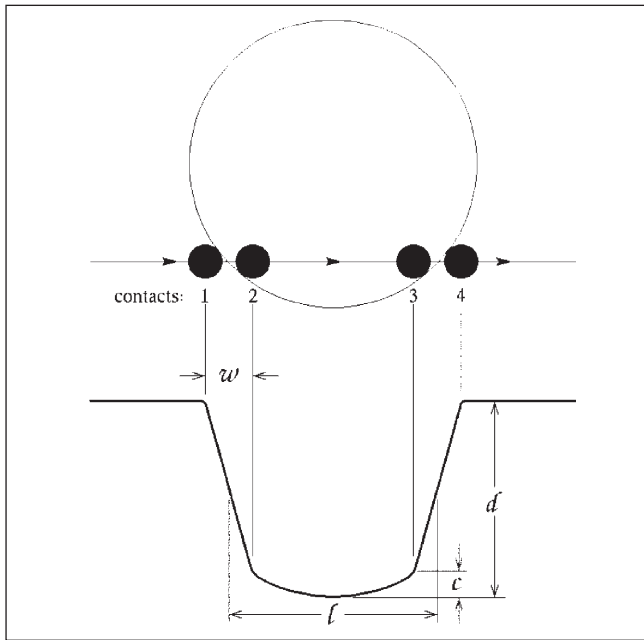


Рис. 4. Схема реєстрації екзопланет за допомогою фотометричного методу

такому випадку. На сьогодні такі явища можна спостерігати для 14 зір з планетами.

Ще одна методика розроблена спеціально для інфрачервоного інтерферометра в Кекській обсерваторії, де за допомогою диференціального способу можна зареєструвати і навіть отримати деякі характеристики позасонячної планети прямо

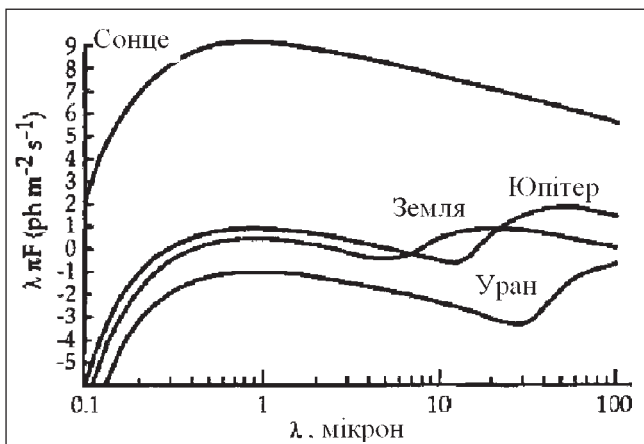


Рис. 5. Спектри Сонця і планет в інфрачервоному діапазоні

із спостережуваного спектра. Даний підхід оснований на існуванні відмінностей між відносно "гладким" інфрачервоним спектром зорі і спектром планети з сильними смугами поглинання в інфрачервоному спектрі позасонячної планети, які відносяться, наприклад, до води і метану (рис. 5).

ЗОРИ З ПЛАНЕТАМИ

Нині досить активно проглядаються біля 3 000 найближчих до Сонця і найяскравіших зір спектральних класів від "A" до "M" з точністю визначення доплерівських швидкостей краще за 10 м/с. На кінець вересня 2006 р. ці дослідження

привели до відкриття навколо 178 зір 208 позасонячних планет-гігантів. При цьому були відкриті і перші планетні системи навколо 21 зорі (тобто доведено існування більше однієї планети), а також було зареєстровано проходження планети по диску зорі. Таким чином, планети вже знайдені біля 7 % досліджуваних зір.

У 1987 р. І.С. Шкловський у своїй книзі "Вселенная, жизнь, разум" навів результати дослідження кратності для 123-х найближчих до нас зір типу Сонця. Всі ці зорі видно неозброєним оком і знаходяться вони у північній півкулі неба на відстанях від Сонця, менших 25 парсек. Виявилося, що 57 з них — це подвійні зорі, 11 — потрійні і 3 — четверні. Тобто майже 60 % всіх зір типу Сонця є кратними.

В дійсності, мабуть, цей відсоток повинен бути ще вищим, оскільки їх маломасивні компоненти неможливо було спостерігати через недостатню (на початок 1980-х років) точність при використанні методики спектральних спостережень. Екстраполяція залежності числа пар від відношення мас компонент для різних періодів обертання зір (від 0,01 до 100 000 років) дозволила стверджувати, що повна кількість подвійних систем з масами менших компонент $>1 M_{\text{Ю}}$, повинна бути >110 . Інакше кажучи, якщо враховувати достатньо малі значення відношення $M_{\text{комп}}/M_{\text{центр.зорі}}$, то отримуємо, що практично всі зорі типу Сонця якщо не кратні, то повинні були б мати планетну систему.

РОЗПОДІЛ ЗІР З ПЛАНЕТАМИ В ОКОЛИЦІ СОНЦЯ

Трохи більше сотні зареєстрованих зір з планетами — це вельми бідна вибірка з точки зору її використання для дослідження статистичними методами. Проте ці зорі розпоршені по всьому небу і це дало нам можливість вивчити їх просторовий розподіл і порівняти його з аналогічним розподілом близько розташованих до Сонця зір як у цілому, так і окремо для кожного спектрального класу і підкласу. Виконаний нами аналіз існуючих даних показує, що 92 % зір яскравіші 8m і 86 % зір знаходяться на відстанях, менших 50 парсек. Наші ретельні дослідження повноти каталогу HIPPARCOS по залежності кількості зір від відстані до Сонця і від візуальної зоряної величини показали, що каталог є повним тільки для зір, яскравіших 8m. У зв'язку з цим для наступного аналізу ми відібрали лише зорі спектральних класів від "A0" до "K9" з візуальними зоряними величинами яскравіше 8,1m і ті, які знаходяться на відстанях $< 50,1$ парсек. Каталог HIPPARCOS вміщує астрометричні, фізичні характеристики і тригонометричні паралакси для 117 955 зір. Із них 17 917 зір — подвійні, і ще 6 763 зір, які підозрюються на подвійність.

Аналіз розподілу зір з планетами та їх порівняння з рештою зір, характеристики котрих взято

з каталогу HIPPARCOS, дали можливість зробити такі висновки:

1) Планети знайдено приблизно біля 7 % досліджуваних зір.

2) Близько 70 % з них — це зорі спектрального класу G. Зважаючи на цей факт, чимало дослідників роблять висновок, що планети слід шукати переважно біля зір цього спектрального класу. На нашу думку, отриманий результат скоріше всього зумовлений тим, що більше половини досліджуваних на сьогодні 3 000 зір — це саме G-зорі, котрим постійно надається особлива увага.

3) Зорі з планетами розташовані на небі нерівномірно. Виявилось, що майже повністю відсутні екзопланети біля зір у широкій області на небесній сфері між 90° і 150° галактичної довготи, яка простягається на 110° по галактичній широті (від -20° до $+90^\circ$). Можна виділити також ще три великі зони, в котрих практично відсутні зорі з планетами: перша має границі 80° — 260° довготи і розташована нижче 45° південної широти, друга знаходиться в межах 0° — 250° довготи і вище 50° північної широти, третя має границі 0° — 50° довготи і займає область від південного до північного полюса.

4) Із урахуванням даних більш детального каталогу "Тихо-2" надійне отримання планет біля зір з блиском хоча 6^m до 12^m повинно підвищити кількість зір із зареєстрованими біля них планетами більш ніж у 25 разів, тобто при вказаному вище 9 %- му співвідношенні зір з планетами. Розширення кількості програмних зір дасть можливість відкрити ще близько 4 500 позасонячних планет-гігантів. Увагу слід звернути на зорі спектральних класів F5-F8, G0, G2, G5, G8, K0, оскільки саме вони складають понад 70 % від загальної кількості зір у нашому найближчому оточенні.

На нашу думку, порівняно невеликий проміжок часу моніторингу зір з планетами-гігантами (~10 — 11 років) є основною причиною того, що більшість відкритих на сьогодні планет мають періоди обертання навколо центральних світил менше 1,5 року.

Так, наприклад, для "відкриття" Юпітера біля Сонця знадобилося б приблизно: $(12 \text{ років}) \cdot (2 - 3 \text{ періоди}) = 24 - 36$ років безперервного патрулювання. Таким чином, "патрулювання" цих же 2 000 зір протягом 15 років може дати можливість у всякому разі потроїти кількість відкритих біля них планет.

ПЛАНЕТИ БІЛЯ ЗІР ТИПУ 51 PEG

Найбільш незвичайними із позасонячних планет є такі, що обертаються навколо так званих зір типу 51 Peg. Спочатку до них належала сама 51 Peg, а також зорі Boo, 55 Snc і And. Періоди обертання планет навколо них дорівнюють 4,2; 3,3; 14,7 і 4,6 земних діб відповідно.

Дослідження доплерівського зміщення ліній поглинання, які відповідають спектрам таких

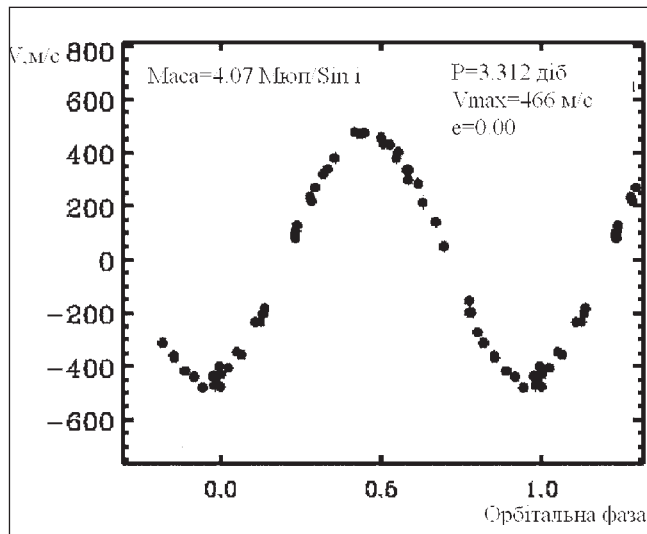


Рис. 6. Крива обертання зірки типу 51 Peg

хімічних елементів, як азот, залізо і кальцій, показали, що спостережені дані дають практично ідеальну синусоїдну доплерівську криву (див. рис. 6).

Це свідчить про практично колову орбіту цих планет. На кінець вересня 2006 р. відомо 51 таких короткоперіодичних планет і 70 % з них мають майже колові орбіти із ексцентриситетами від 0,0 до 0,05. Радіуси орбіт цих планет менше третини відстані між Меркурієм і Сонцем, а їх маси знаходяться в межах 0,12 МЮ (біля зірки HD 49674) — 4 МЮ (біля зірки Gliese 86). До короткоперіодичних (8,43 доби) відноситься і масивний (13,75 МЮ) об'єкт біля зірки HD 162020. (МЮ — маса Юпітера).

Саме ці позасонячні планети-гіганти з малими періодами обертання найбільш цікаві, оскільки такі планети категорично не вписуються в загальноприйнятю теорію формування планет. Згідно з цією теорією, виникнення таких планет-гігантів, як Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун є можливим тільки на порівняно холодній околиці протопланетного диску на відстанях, більших 5 астрономічних одиниць (а.о.) від центральної зірки. Неможливість формування планет в газопиловому диску як дуже близько до зірки, так і далеко від неї зумовлене відсутністю на сьогодні задовільного фізичного механізму, який пояснював би причину початку інтенсивної акреції або при дуже низьких, або при дуже високих температурах.

ЕКЗОПЛАНЕТНІ СИСТЕМИ

Із 178 зір, навколо яких обертаються планети, 21 мають планетні системи. 14 із них мають по дві і 6 — по три планети. Орбіти 14 планет розташовані на відстанях більше 2 а.о. від центральних світил. Проте тільки для зірки 50 Snc характерною особливістю є те, що одна з її планет обертається по майже коловій орбіті і водночас знаходиться саме на тій відстані, на якій згідно із загальноприйнятною теорією формування планет і повинні знаходитися воднево-гелієві планети-гіганти.

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕКЗОПЛАНЕТ

1. Практично всі відкриті на сьогодні екзопланети — це планети-гіганти, подібні до Юпітера. Їх маси знаходяться в діапазоні від 0,12 МЮ (HD 49674) до 11,9 МЮ (HD 136118). Біля зір HD 162020 і HD 168443 знайдено супутники з нижніми межами на маси 13,75 МЮ і 17 МЮ. Однак ці об'єкти можуть бути коричневими карликами.

2. Виконані нами дослідження показали, що близько 25 % екзопланет розташовані на відстанях, що не перевищують відстань між Меркурієм і Сонцем, тобто 0,39 а.о. Найближче (0,038 а.о.) знаходиться планета біля зорі HD 83443, а найдалі (6,01 а.о.) — найдальша планета в багатопланетній системі біля зорі 55 Спс.

3. Розподіл кількості зір по ексцентриситетах показує яскраво виражену особливість. Так, орбіти більше 50 % позасонячних планет мають досить великі значення ексцентриситетів. Таку високу еліптичність планетних орбіт пояснюють найрізноманітнішими механізмами, серед котрих найімовірнішими є гравітаційне розсіяння іншими планетами, іншими зорями і протопланетним диском, за межами котрого вони сформувалися.

4. Аналіз залежності маси екзопланет від великої напівосі їх орбіт показує, що планети переважно згруповані навколо трьох максимумів на відстанях 0,04 — 0,25, 1,0 і 2,5 а.о, причому в кожному з них знаходяться як планети з масами, близькими до маси Юпітера, так і на порядок більшими.

5. Крім гігантських газових планет в останні два роки знайдено так звані дві "суперземлі" — масивні планети земного типу, які не мають густої атмосфери, як у планет-гігантів. Одна з "суперземель" вважається "гарячою" і своїми характеристиками нагадує планету Венеру з високою імовірністю вулканічної активності. На іншій "холодній" суперземлі дослідники допускають наявність водного океану, за що її неофіційно охрестили Океанідою. Ця планета є найменшою із відомих екзопланет і знаходиться на відстані понад 20 000 світлових років. Її відкрили в 2005 р. в результаті спільних досліджень 73-х астрономів із 12-и країн. Спостереження велися на шести обсерваторіях у Чилі, ПАР, Австралії, Новій Зеландії і на Гавайських островах.

6. Кілька років тому академік А. А. Маракушев висунув гіпотезу, згідно з якою передбачається, що планети типу Землі в минулому також були оточені потужними воднево-гелієвими газовими оболонками і виглядали як планети-гіганти. Поступово ці гази були "виметені" на окраїни Сонячної системи, а біля Сонця залишилися лише тверді ядра колишніх планет-гігантів, які і є в даний час планетами типу Землі. Ця гіпотеза переключається з новітніми даними про так звані "гарячі" екзопланети, розташовані дуже близько від своїх зір.

ЕКОСФЕРА

Найбільш цікавими є ті екзопланети, на яких можливе життя. Для цього спочатку необхідно знайти планету з твердою поверхнею і кисневою атмосферою з комфортною температурою на поверхні та з відсутністю шкідливих і несумісних з відомими нам формами життя. Найважливішою умовою життя вважаються наявність води у рідкому стані. Тому середня температура на поверхні такої планети повинна бути близькою 0 °С і не перевищувати точки кипіння +100 °С. Наприклад, середня температура на поверхні Землі складає +15 °С, хоча її відмінність в різних точках земної кулі становить від -90 до +60 °С. Області космосу з умовами, сприятливими для розвитку життя у звичному для нас розумінні, астрономи називають "сприятливими для життя зонами". Саме планети типу Землі і їхні супутники, які знаходяться в таких зонах, — найімовірніші місця прояву неземних форм життя. Виникнення таких сприятливих умов можливе в тих випадках, коли планета розташовується відразу в двох сприятливих для життя зонах — у навколосонячній і галактичній.

Навколосонячна зона ("екосфера") — це уявна сферична оболонка навколо зорі, в межах якої температура на поверхні планет допускає наявність води. Чим вища температура материнської зорі, тим далі від неї знаходиться ця зона. У Сонячній системі такі умови на сьогодні є лише на Землі. Найближчі ж до неї планети Венера і Марс розташовані якраз на границях зони: Венера — з гарячого, а Марс — з холодного боку.

Галактична "сприятлива для життя зона" являє собою безпечну для життя область міжзоряного простору, яка знаходиться досить близько до центра Галактики з тим, щоб мати значну кількість важких хімічних елементів, необхідних для формування кам'яних планет. У той же час ця область повинна бути досить віддаленою від центра Галактики, щоб уникнути шкідливих радіаційних спалахів та зіткнень з численними масивними кометами й астероїдами, що можуть бути спричинені гравітаційним впливом блукаючих зір поблизу галактичного центра. В нашій Галактиці "сприятлива для життя зона" розташовується на відстані 25 000 св. р. від її центра. Саме тут знаходиться і наша Сонячна система. Крім Сонця до цієї зони входить лише 5 % від усіх зір нашої Галактики.

Пошуки планет типу Землі біля інших зір, які планується проводити в майбутньому за допомогою космічних станцій, спрямовані саме на виявлення таких сприятливих для життя областей. Це дозволить істотно обмежити зону пошуку і дасть надію на виявлення життя поза Землею. Список з 5 000 найбільш перспективних зір на сьогодні вже підготовлено, а першочерговому вивченню буде піддано околиці 30 зір, розташування яких вважається найсприятливішим для виникнення життя.