

§ 13. Фізичні характеристики зір

Вивчивши цей параграф, ми:

- побачимо, як вимірюються відстані до зір;
- дізнаємося, що означають зоряні величини;
- довідаємося, як без термометра можна виміряти температуру зорі.

1 Вимірювання відстаней до зір



Рис. 13.1. Річний паралакс визначає кут, під яким було б видно від зорі велику піввісь земної орбіти (1 а. о.) в перпендикулярному до променя зору напрямку

Зорі розташовані в мільйони разів далі, ніж Сонце, тому горизонтальні паралакси зір відповідно в мільйони разів менші, і вимірюти такі малі кути ще нікому не вдавалося. Для вимірювання відстаней до зір астрономи змушені визначати річні паралакси, які пов'язані з орбітальним рухом Землі навколо Сонця (рис. 13.1.). У точці С розташоване Сонце; А, В — положення Землі на орбіті з інтервалом 6 місяців; $BC=1$ а. о. — відстань від Землі до Сонця (велика піввісь земної орбіти); S — зоря, до якої треба визначити відстань; $ZBSC=p$ — річний паралакс зорі.

Відстань від Землі до зорі визначається з прямокутного трикутника CBS :

$$r = \frac{BC}{\sin p} = \frac{1 \text{ а. о.}}{\sin p} \quad (13.1)$$

Річний паралакс можна вимірювати тільки протягом кількох місяців, поки Земля, а разом із нею і телескоп, рухаючись навколо Сонця, не перемістяться у космічному просторі.

Річні паралакси зір астрономи намагалися визначати ще за часів М. Коперника, що могло стати незаперечним доказом обертання Землі навколо Сонця та утвердженням геліоцентричної системи світу. Ale тільки у 1837 р. В. Струве в Пулковській астрономічній обсерваторії (Росія) визначив річний паралакс зорі Вега (а Ліри). Найбільший паралакс має найближча до нас зоря *Проксима Кентавра* — $p = 0,76''$, ale її в Європі не видно. З яскравих зір, які можна бачити в Україні, найближче до нас перебуває зоря *Сіріус* (а Великого Пса), річний паралакс якої $p = 0,376''$.

Відстань до найближчих зір		
Зоря	Відстань	Св. р. пк
Проксима	4,2	1,3
Барнarda	5,9	1,8
Вольф 359	7,5	2,4
Сіріус	8,8	2,6
Росс 154	9,5	2,9
ε Ерідана	11,0	3,3
Проціон	11,4	3,5
Альтайр	16,5	5,1
Вега	26,5	8,1
Арктур	36,0	11,0
Капелла	45,0	13,8

Відстань до зір вимірюють у світлових роках (див. § 1), але в астрономії ще використовують одиницю *парсек* (пк) — відстань, для якої річний паралакс $p=1''$ (парсек — скорочення від паралакс-секунда).

$$1 \text{ пк} = \frac{1 \text{ а. о.}}{\sin 1''} = 206\,265 \text{ а. о.} \approx 3,08 \cdot 10^{13} \text{ км.} \quad (13.2)$$

Співвідношення між парсеком та світловим роком таке: 1 пк $\sim 3,26$ св. року.

Якщо річний паралакс вимірюється кутовими секундами, то відстань до зір у парсеках можна виразити такою формулою:

$$r \approx 1/p'' \text{ пк.} \quad (13.3)$$

2

Видимі зоряні величини

Уперше термін «зоряна величина» був уведений для визначення яскравості зір грецьким астрономом Гіппархом у II ст. до н. е. Тоді астрономи вважали, що зорі розміщені на однаковій відстані від Землі, тому яскравість залежить від розмірів цих світил. Зараз ми знаємо, що зорі навіть в одному сузір'ї розташовуються на різних відстанях (рис. 2.2), тому видима зоряна величина визначає тільки деяку кількість енергії, яку реєструє наше око за певний проміжок часу. Гіппарх розділив усі видимі зорі за яскравістю на 6 своєрідних класів — 6 зоряних величин. Найяскравіші зорі були названі зорями першої зоряної величини, більш слабкіші — другої, а найслабкіші, які ледве видно на нічному небі, — шостої. У XIX ст. англійський астроном Н. Погсон (1829—1891) доповнив визначення зоряної величини ще однією умовою: зорі першої зоряної величини мають бути у 100 разів яскравіші за зорі шостої величини (рис. 13.2). Видиму зоряну величину позначають літерою m . Для будь-яких зоряних величин m_1 , m_2 буде справедливе таке відношення їх яскравості E^1 та E^2 :

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{0,4(m_2 - m_1)}. \quad (13.4)$$

Видима зоряна величина m визначає кількість світла, що потрапляє від зорі до нашого ока. Найслабкіші зорі, які ще можна побачити неозброєним оком, мають $m = +6^m$.

Рівняння (13.4) називають формулою Погсона. Яскравість E фактично визначає освітленість, яку створюють зорі на поверхні Землі.



Рис. 13.2. Зорі поблизу Полярної, що використовують як стандарт для визначення видимих зоряних величин

§ 13. ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР

лі, тому величину E можна вимірювати люксами — одиницями освітленості, які застосовують у курсі фізики. Згідно з формулою (13.4), якщо різниця зоряніх величин двох світил дорівнює одиниці, то відношення близьку буде $\sim 2,512$.

Для визначення видимих зоряніх величин небесних світил астрономи взяли за стандарт так званий північний полярний ряд — це 96 зір навколо північного полюса світу. Найяскравіша серед них — Полярна має зоряну величину $m = +2^m$ (рис. 13.2). Відносно цього стандарта найслабкіші зорі, які ще можна побачити неозброєним оком, мають зоряну величину $+6^m$, у бінокль видно зорі до $+8^m$, у школі телескоп видно світила до $+11^m$, а за допомогою найбільших телескопів сучасними методами можна зареєструвати слабкі галактики до $+28^m$. Дуже яскраві небесні світила мають від'ємну зоряну величину. Наприклад, найяскравіша зоря нашого неба Сіріус має видиму зоряну величину $m = -1,6^m$, для найяскравішої планети Венери $m = -4,5^m$, а для Сонця $m = -26,7^m$.

Видимі та абсолютні зоряні величини деяких зір

Зоря	m	M
Сонце	-26,7	+4,8
Сіріус	-1,6	+1,3
Арктур	-0,1	-0,3
Вега	0	+0,5
Капелла	+0,1	-0,7
Рігель	+0,1	-7,5
Проціон	+0,4	+2,6
Бетельгейзе	+0,4	-6,0
Альтаїр	+0,8	+2,2
Денеб	+1,3	-7,4

3 Абсолютні зоряні величини і світність зорі

Хоча Сонце є найяскравішим світилом на нашему небі, це не означає, що воно випромінює більше енергії, ніж інші зорі.

З курсу фізики відомо, що освітленість, яку створюють джерела енергії, залежить від відстані до них, тому невелика лампочка у вашій кімнаті може здаватися набагато яскравішою, ніж далекий проектор. Для визначення *світності*, або загальної потужності випромінювання, астрономи вводять поняття абсолютної зоряної величини M . Зоряну величину, яку мала б зоря на стандартній відстані $r_0 = 10$ пк, називають абсолютною зоряною величиною. Приблизно на такій відстані (11 пк, або 36 св. років) від нас розташована зоря Арктур, вона має видиму зоряну величину, яка майже дорівнює абсолютної. Сонце на відстані 10 пк мало б вигляд досить слабкої зорі п'ятої зоряної величини, тобто абсолютнона зоряна величина Сонця $= +5^T$.

Якщо відома відстань до зорі r в парсеках та її видима зоряна величина m , то абсолютну зоряну величину M можна визначити за допомогою такої формул:

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (13.5)$$

Світність зорі визначає кількість енергії, що випромінює зоря за одиницю часу, тобто потужність випромінювання зорі. За одиницю світності в астрономії приймають потужність випромінювання Сонця $4 \cdot 10^{26}$ Вт. Якщо відома абсолютна зоряна величина зорі M , то її світність визначається за допомогою такої формули:

$$L = \frac{E}{E_0} = 10^{0.4(5-M)} \quad (13.6)$$

Світність L деяких зір	
Зоря	L
Сонце	1
Денеб	90 000
Рігель	70 000
Бетельгейзе	25 000
Полярна	17 600
Капелла	150
Арктур	102
Вега	54
Сіріус	23
Альтаїр	10

4 Колір і температура зір

Температуру зорі можна визначити за допомогою законів випромінювання *чорного тіла* (див. § 6). Найпростіший метод вимірювання температури зорі полягає у визначенні її кольору. Правда, неозброєним оком можна визначити тільки колір яскравих зір, бо чутливість нашого ока до сприйняття кольорів при слабкому освітленні дуже мала. Колір слабких зір можна визначити за допомогою бінокля або телескопа, які збирають більше світла, тому в окулярах телескопа зорі здаються нам яскравішими.

За температурою зорі розділили на 7 спектральних класів (рис. 13.3), які позначили літерами латинської абетки: *O, B, A, F, G, K, M* (англійське прислів'я: «*Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me*» — «*будь гарною дівчиною, поцілуй мене*»).

Найвищу температуру на поверхні мають сині зорі спектрального класу *O*, які випромінюють найбільше енергії у синій частині спектра (рис. 13.4). Кожний спектральний клас поділяється на 10 підкласів: *AO, AI... A9*.

Звичайно у спектрі кожної зорі є темні лінії поглинання, які утворюються в розрідженні атмосфери зорі та в атмосфері Землі й показують хімічний склад цих атмосфер. Виявилось, що всі зорі мають майже одинаковий хімічний склад, бо основні хімічні елементи

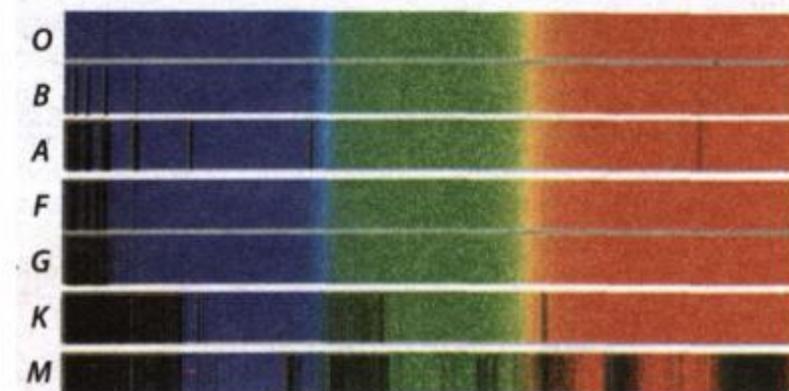
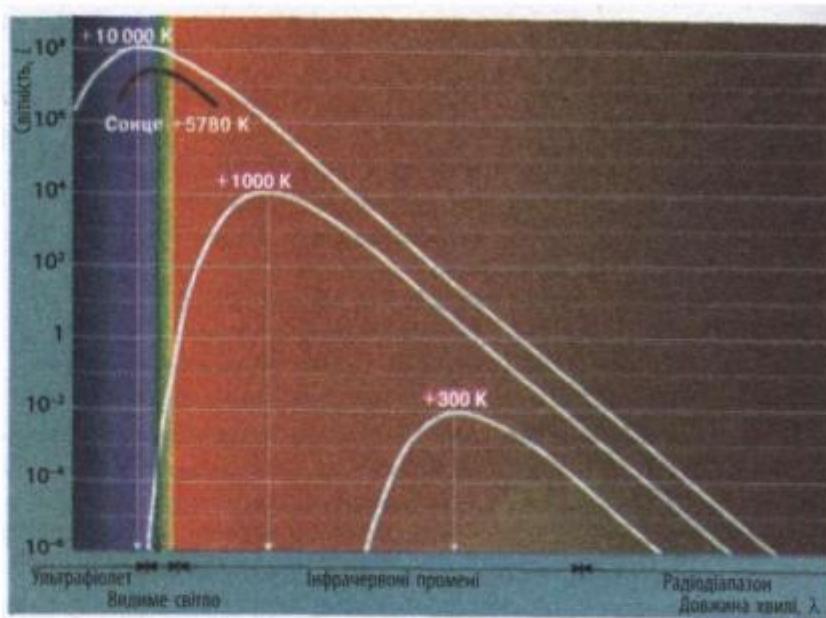


Рис. 13.3. Кольори зір визначають 7 основних спектральних класів. Найгарячіші зорі синього кольору належать до спектрального класу *O*, найхолодніші червоні зорі — до спектрально-го класу *M*. Сонце має температуру фотосфери 5780 К, жовтий колір і належить до спек-трального класу *G*.

§ 13. ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР

Рис. 13.4. Інтенсивність випромінювання космічних тіл із різною температурою. Гарячі зорі випромінюють більше енергії у синій частині спектра, а холодні зорі — у червоній. Планети випромінюють енергію переважно в інфрачервоній частині спектра



у Всесвіті — Гідроген та Гелій, а основна відмінність різних спектральних класів обумовлена температурою зоряних фотосфер.

5 Радіуси зір

Для визначення радіуса зорі не можна використати геометричний метод, бо зорі розташовуються настільки далеко від Землі, що навіть у великих телескопах ще до недавнього часу неможливо було виміряти їхні кутові розміри — усі зорі мають вигляд однакових світлих точок.

Для визначення радіуса зір астрономи використовують закон Стефана—Больцмана:

$$Q = \sigma \cdot T^4, \quad (13.7)$$

де Q — енергія, що випромінює одиниця поверхні зорі за одиницю часу; σ — стала Стефана—Больцмана; T^4 — абсолютна температура поверхні зорі.

Потужність, що випромінює вся зоря з радіусом R , визначається загальною площею її поверхні, тобто:

$$E = 4\pi R^2 \cdot Q = 4\pi R^2 \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (13.8)$$

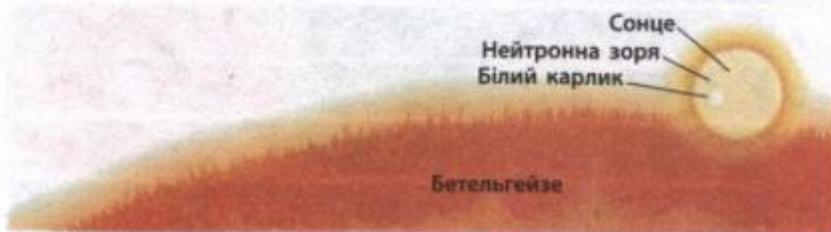


Рис. 13.5. Радіуси деяких зір у порівнянні із Сонцем

З іншого боку, таке ж співвідношення ми можемо записати для енергії, що випромінює Сонце:

$$E_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \cdot \sigma \cdot T_{\odot}^4. \quad (13.9)$$

Таким чином, з рівнянь (13.8), (13.9) можна визначити невідомий радіус зорі, якщо відомі радіус R_{\odot} і температура T_{\odot} Сонця:

$$\frac{R}{R_{\odot}} = (L)^{0.5} \frac{T_{\odot}^2}{T^2}, \quad (13.10)$$

де L — світність зорі в одиницях світності Сонця.

Виявилося, що існують зорі, які мають радіус у сотні разів більший за радіус Сонця, і зорі, що мають радіус менший, ніж радіус Землі (рис. 13.5).

6 Діаграма спектр—світність

Сонце за фізичними параметрами належить до середніх зір — воно має середню температуру, середню світність і т. ін. За статистикою, серед великої кількості різноманітних тіл найбільше таких, які мають середні параметри. Наприклад, якщо виміряти зріст і масу великої кількості людей, які мають різний вік, то найбільше буде людей із середніми величинами цих параметрів. Астрономи вирішили перевірити, чи багато в космосі таких зір, як наше Сонце. Для цієї мети Е. Герцшпунг (1873—1967) та Г. Рессел (1877—1955) запропонували діаграму, на якій можна позначити місце кожної зорі, якщо відомі її температура та світність. Її названо діаграмою спектр—світність, або діаграмою Герцшпунга—Рессела. Вона має вигляд графіка, на якому по осі абсцис відзначають спектральний клас, або температуру зорі, а по осі ординат — світність (рис. 13.6). Якщо Сонце — середня зоря, то на діаграмі має бути скучення точок поблизу того місця, що займає Сонце. Тобто більшість зір повинні бути жовтого кольору з такою ж світністю, як Сонце. Яке ж було здивування астрономів, коли виявилося, що в космосі не знайшли жодної зорі, яку можна вважати копією Сонця. Більшість зір на діаграмі розташовані у вузькій смузі, яку називають головною послідовністю. Діаметри зір головної послідовності відрізняються у кілька разів, а їхня світність згідно із законом Стефана—Больцмана (див. п. 13.5) визначається температурою поверхні. До цієї смуги входять Сонце та Сіріус. Суттєва різниця в температурі на поверхні зір різних спектральних

Білі карлики — зорі, що мають радіус у сотні разів менше сонячного і густину в мільйони разів більшу за щільність води.

Червоні карлики — зорі з масою меншою, ніж сонячна, але більшою, ніж у Юпітера. Температура і світність цих зір залишаються сталими протягом десятків мільярдів років.

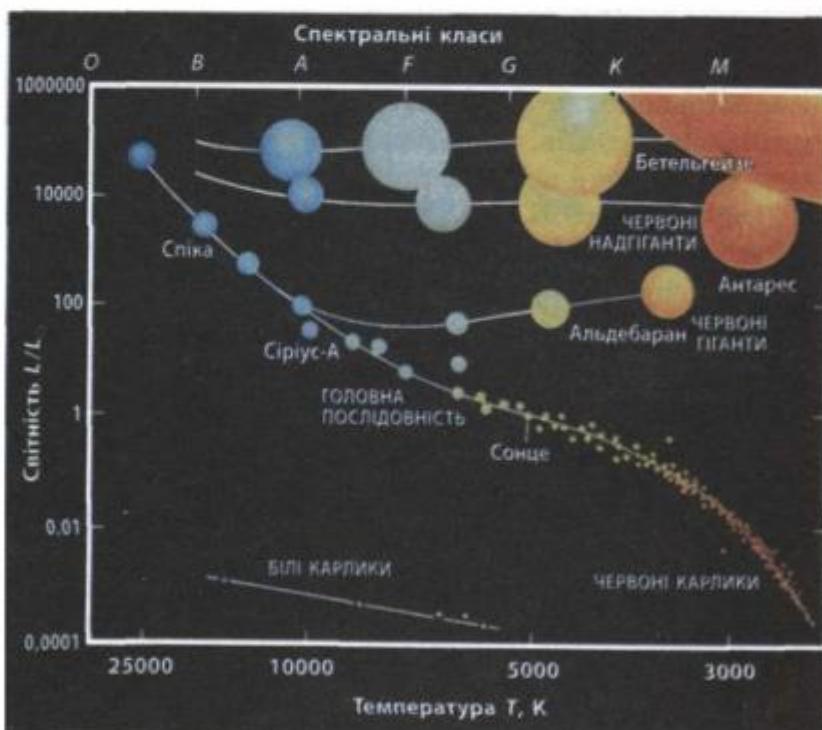
Червоні гіганти — зорі, що мають температуру 3000—4000 К і радіус у десятки разів більший, ніж сонячний. Маса цих зір не набагато більша від маси Сонця. Такі зорі не перебувають у стані рівноваги

§ 13. ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР

класів пояснюється різною масою цих світил: чим більша маса зорі, тим більша її світність. Наприклад, зорі головної послідовності спектральних класів O та B у кілька разів масивніші за Сонце, а *червоні карлики* мають масу в десятки разів меншу, ніж сонячна.

Окремо від головної послідовності на діаграмі розташовуються *білі карлики* (ліворуч знизу) та *червоні надгіганти* (праворуч зверху), які мають приблизно однакову масу, але значно відрізняються за розмірами. Гіганти спектрального класу M мають майже таку саму масу, як білі карлики спектрального класу B, тому суттєво відрізняється середня густота цих зір. Наприклад, радіус *червоного гігANTA Бетельгейзе* у 400 разів більший, ніж радіус Сонця, але маса цих зір майже однаакова, тому червоні гіганти спектрального класу M мають середню густоту в мільйони разів меншу, ніж густота земної атмосфери. Типовим представником білих карликів є супутник Сіріуса, радіус якого майже такий, як радіус Землі, а густота має фантастичну величину $3 \cdot 10^6 \text{ г/см}^3$, тобто наперсток речовини білого карлика важив би на Землі 10000 Н. Ше більшу густоту мають нейтронні зорі та чорні діри (див. § 14).

Рис 13.6. Діаграма Г'рцшпрунга–Рессела.
По осі абсцис позначена температура зір, по осі ординат — світність. Сонце має температуру 5780 К і світність 1. Холодніші зорі на діаграмі розташовані праворуч (червоного кольору), а більш гарячі — ліворуч (синього кольору). Зорі, що випромінюють більше енергії, розташовані вище Сонця, а зорі-карлики — нижче. Більшість зір, до яких належить і Сонце, розташовані вузькій смузі, яку називають головною послідовністю зір



Для допитливих —

Головна загадка діаграми спектр–світність полягає в тому, що в космосі астрономи ще не знайшли хоча б дві одинакові зорі, які мають одинакові фізичні параметри — масу, температуру, світність, радіус. Наприклад, багато зір належать до спектрального класу G (Капелла, а Кентавра тощо), але немає зір, які були б

§ 13. ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР

точно такими, як Сонце. Напевно, протягом еволюції зорі змінюють свої фізичні параметри, тому малоймовірно, що ми зможемо відшукати в космосі ще одну зорю, яка зародилася одночасно з нашим Сонцем, маючи тотожні початкові параметри. У діаграмі спектр–світність захована таємниця еволюції зір: деякі зорі тільки-що народилися, інші мають середній вік, і, крім того, багато зір закінчують своє існування грандіозними спалахами.

Висновки

Фізичні характеристики зір: світність, температура, радіус, густина – суттєво різняться між собою. Між цими характеристиками існує взаємозв'язок, який відображає еволюційний шлях зорі. Сонце за своїми параметрами належить до жовтих зір, які перебувають у стані рівноваги і не змінюють своїх розмірів протягом мільярдів років. У космосі існують зорі-гіганти, які в тисячі разів більші, ніж Сонце, і зорі-карлики, радіус яких менший, ніж радіус Землі.

Тести

- Якими одиницями астрономи вимірюють відстань до зір?
А. Кілометрами. Б. Астрономічними одиницями. В. Паралаксами. Г. Світовими роками. Д. Парсеками.
- Видима зоряна величина визначає:
А. Світність зорі. Б. Радіус зорі. В. Яскравість зорі. Г. Освітленість, яку створює зоря на Землі. Д. Температуру зорі.
- На якій відстані абсолютно та видима зоряні величини мають однакове значення?
А. 1 а. о. Б. 10 а. о. В. 1 св. рік. Г. 10 св. років. Д. 1 пк. Е. 10 пк.
- Які з наведених спектральних класів зір мають на поверхні найвищу температуру?
А. A; Б. B; В. F; Г. G; Д. K.
- Виберіть температуру на поверхні та спектральний клас, до якого належить Сонце:
А. A 10000 K; Б. B 10000 K; В. C 6000 K; Г. G 6000 K; Д. M 3000 K.
- Які зорі мають найвищу температуру на поверхні, і до якого спектрального класу вони належать?
- У чому полягає різниця між видимою та абсолютною зоряними величинами?
- Як астрономи вимірюють температуру зір?
- Якого кольору зорі мають найвищу температуру на поверхні? Які найменшу?
- Чи існують зорі, маса яких менша за масу Землі? Радіус яких зір менший від радіуса Землі?
- Річний паралакс Веги (o Ліри) дорівнює 0,12''. Якою є відстань до неї у парсеках та світових роках?

Завдання для спостережень

- Визначте радіус однієї з яскравих зір, яку видно ввечері у ваш день народження. Який вигляд мала б ця зоря на нашому небі, якби вона світила на місці Сонця?

Ключові поняття і терміни:

Абсолютна зоряна величина, видима зоряна величина, діаграма спектр–світність, парсек, північний полярний ряд, світність зорі, спектральні класи.