

§ 8. Планети земної групи

Вивчивши цей параграф, ми:

- дізнаємося, які умови існують на поверхні планет земної групи;
- довідаємося, чому на Венері і вдень, і вночі неймовірна спека;
- побачимо, чи є життя на Марсі.

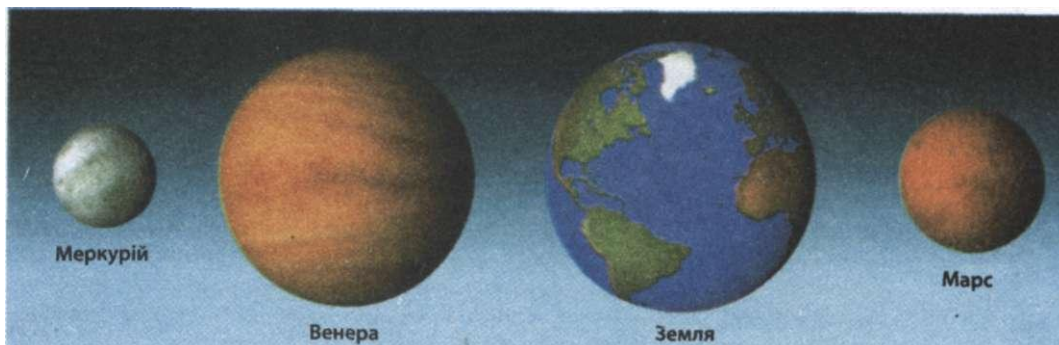
1 Загальна характеристика планет земної групи

Планети земної групи — Меркурій, Венера, Земля і Марс у порівнянні з планетами-гігантами мають відносно невеликі розміри, тверду поверхню та значну густину (близько 5 г/см^3), бо складаються переважно з важких хімічних елементів (рис. 8.1). Ці планети мають гаряче *металеве ядро*, яке оточене мантією із силікатних порід. Верхній шар планет — *кора*, формується під дією як внутрішнього тепла, так і зовнішніх (космічних) факторів. Але температура на поверхні планет земної групи суттєво відрізняється, бо вони отримують від Сонця різну кількість енергії. До того ж в атмосферах Меркурія, Венери і Марса майже немає кисню, а тиск суттєво відрізняється від атмосферного тиску на Землі. Якщо на поверхні Землі є умови для існування життя, то на поверхні інших планет поки що не виявлено навіть примітивних бактерій.

2 Меркурій

Меркурій є найменшою планетою Сонячної системи, яку рідко кому випадало спостерігати неозброєним оком, тому що вона розташована близько від Сонця. Меркурій дуже повільно обертається навколо своєї осі — сонячна доба вдвічі довша, ніж період його

Рис. 8.1. Відносні розміри планет земної групи



§8. ПЛАНЕТИ ЗЕМНОЇ ГРУПИ

обертання навколо Сонця. Отже, протягом майже трьох місяців там світить Сонце і стільки ж триває ніч.

Знімки поверхні Меркурія, які були зроблені за допомогою АМС «Марінер-10» (США), вражають схожістю його рельєфу з по-

верхнею Місяця — така ж величезна кількість кратерів, що свідчить про однакову природу цих космічних тіл (рис. 8.2). Кратери на Меркурії названі іменами відомих поетів, письменників, художників, композиторів. Один із великих кратерів названий на честь Тараса Шевченка.

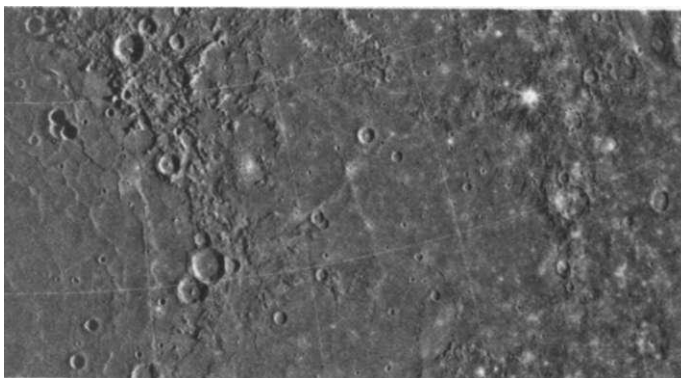
На поверхні Меркурія були виявлені також величезні рівнини, які заповнені застиглою базальтовою лавою. Це свідчить, що планета була колись розігріта, внаслідок чого в той час відбувалася інтенсивна вулканічна діяльність (рис. 8.3).

Меркурій ☿	
Радіус	$0,38 R_{\oplus}$
Маса	$0,06 M_{\oplus}$
Густина	$5,4 \text{ г/см}^3$
Прискорення вільного падіння	$0,38g_{\oplus}$
Орбіта	$a=0,39 \text{ а. о.}$
Рік	88 з. діб
Сонячна доба	176 з. діб
Температура, °C:	
Вдень	+430
Вночі	-170

Рис. 8.2. Кратери на Меркурії



Рис. 8.3. Застигла лава на рівнині Калоріс свідчить, що Меркурій 3 млрд років тому був розігрітий за рахунок внутрішнього тепла, і тоді діяли сотні вулканів. Свіжі кратери утворилися після падіння метеоритів



Для допитливих

Тривалість дня і ночі та погода на Меркурії не змінюються, бо його вісь обертання майже перпендикулярна до площини орбіти, і змін пір року на ньому не відбувається. Денна температура сягає $+430^{\circ}\text{C}$, але протягом тримісячної ночі поверхня цієї планети сильно охолоджується, і температура на світанку знижується до -170°C . Ґрунт Меркурія дуже роздрібнений і має низьку теплопровідність, тому вже на глибині кількох десятків сантиметрів температура не змінюється. Меркурій не може утримувати сталу атмосферу, але біля поверхні планети вдалося виявити присутність атомів Гелію — це пояснюється так званним «сонячним вітром», який складається з елементарних частинок та окремих ядер легких хімічних елементів. У гравітаційному полі Меркурія атоми Гелію можуть рухатися не більше 200 діб, а потім губляться в міжпланетному просторі. Отже, атмосфера цієї планети трохи подібна до ріки, складові якої постійно «пливуть» від Сонця мимо Меркурія до Землі та більш далеких планет.

3

Венера

Венера привертає увагу людей тим, що на нашому небі її яскравість у десятки разів перевищує блиск зір першої зоряної величини. Українська народна назва цієї планети — *Вечірня* або *Вранішня зоря*, бо вона першою з'являється на вечірньому небосхилі й останньою гасне на світанку.

Довгий час Венеру називали планетою загадок, бо густі хмари приховують її поверхню (рис. 8.4). Тільки недавно радіоспостереження виявили, що Венера повільно обертається навколо осі у зворотному напрямку (порівняно з обертанням Землі), і сонячна доба там триває 117 земних діб.

На перший погляд, Венера дуже схожа на Землю, бо ці планети мають майже однакові розміри та масу. Астрономи сподівалися, що клімат на Венері трохи тепліший в порівнянні із земним, а фантасти навіть писали про буйне життя на цій таємничій планеті... Уперше в історії людства АМС серії «Венера» (СРСР) зробили м'яку посадку на поверхню іншої планети і передали на Землю телєвізійне зображення поверхні Венери (рис. 8.5, 8.6).

У хмарах на Венері крім пари води утворюються краплини сірчаної кислоти, але до поверхні ці кислотні дощі не долітають, бо під хмарами температура різко підвищується (на поверхні +480 °С) і краплі випаровуються. Основний шар хмар розташовується на значній висоті (50—60 км), що пояснюється великим атмосферним тиском, який біля поверхні досягає 90 атм — такий тиск на Землі

Рис. 8.5. Панорама поверхні Венери, яку передала АМС «Венера-14». Небо вдень тьмяне, як на Землі перед дощем. Колір хмар і поверхні червоний, бо атмосфера поглинає сонячне проміння у синій частині спектра

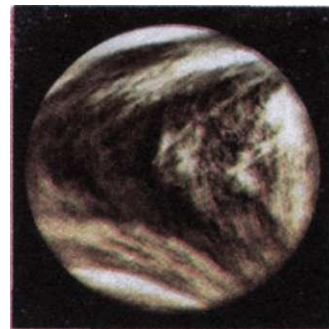


Рис. 8.4. Хмари на Венері, які видно під час спостережень за допомогою телескопа

Венера ♀	
Радіус	0,95 R_{\oplus}
Маса	0,8 M_{\oplus}
Густина	5,2 г/см ³
Прискорення вільного падіння	0,9 g_{\oplus}
Орбіта	$a=0,72$ а. о.
Рік	225 з. діб
Сонячна доба	117 з. діб
Атмосфера:	CO ₂ , N ₂ , H ₂ O
Атм. тиск	90 атм.
Температура поверхні, °С:	
вдень	+480
вночі	+480





Рис. 8.6. АМС «Венера-14» (СРСР)

в океані на глибині 900 м. Хмари на Венері, скоріше, нагадують слабку імлу, в якій видно предмети на відстані до 1 км. Загадкою Венери залишається питання: чому в атмосфері планети так багато вуглекислого газу і так мало води? Дослідження показують, що загальна кількість вуглекислого газу та води, яка виділялась при виверженні вулканів на Землі й Венері, була колись приблизно однакова. Виникає природне запитання: куди поділася вода з поверхні Венери? Чи були колись на Венері океани та моря?

Астрономи створили детальну карту Венери, на якій позначено сотні кратерів, більшість з яких колись були вулканами, бо майже 80% поверхні Венери вкриті вулканічною лавою (рис. 8.7). Деякі кратери утворились після падіння астероїдів. За традицією назви кратерів на Венері даються на честь видатних жінок, які зробили суттєвий внесок у поступ нашої цивілізації. Один із вулканів назвали на честь астронома Харківської астрономічної обсерваторії Валентини Федорець.

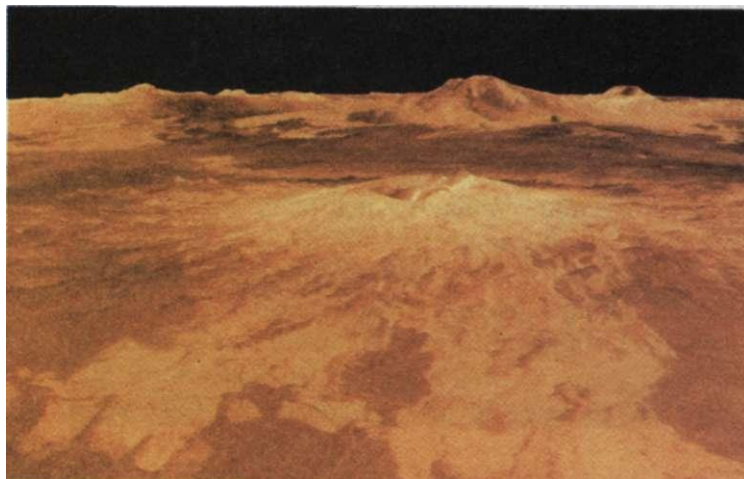


Рис. 8.7. За допомогою радіолокатора вдалося зазирнути під хмари. Поверхня Венери вкрита лавою від виверження вулканів



Для допитливих

Температура поверхні Венери становить $+480^{\circ}\text{C}$, залишається сталою протягом доби і не змінюється залежно від відстані до полюса чи екватора. За таких умов на Венері не відбувається різких змін погоди — ніколи не буває ураганів, а швидкість вітру біля поверхні не перевищує 1 м/с. Висока температура біля поверхні планети зумовлена парниковим ефектом. Головна складова атмосфери Венери — вуглекислий газ (CO_2 — близько 97% за об'ємом. Несподіваним виявилось те, що протягом двомісячної ночі на поверхні Венери не спостерігається абсолютної темряви. Крім постійних спалахів блискавок, які супроводжуються гуркотом грому, там уночі видно свічення верхніх шарів атмосфери. Нічне освітлення підсилюють вогні від діючих вулканів, які внаслідок заломлення променів в атмосфері видно на відстані сотень кілометрів.



Для майбутніх космонавтів

На поверхні Венери людина вижити не зможе, бо сучасні скафандри не витримують атмосферний тиск у 90 атм. Можливо, що космонавти будуть користуватися літаками й повітряними кулями, які зможуть літати у верхніх шарах атмосфери планети на висоті майже 50 км, де температура та тиск такі, як на Землі. Не виключена можливість існування чужих форм життя, які пристосувалися до умов на Венері, адже навіть деякі види земних бактерій могли б вижити у хмарах на цих висотах. Фантасти пропонують поселити у хмарах бактерії, які будуть поглинати вуглекислий газ і виділяти кисень. Із часом на Венері може знизитися температура, на поверхню випадають дощі, потечуть ріки і знову утворяться моря.

4 Марс

Названий колись за свій червоний колір на честь бога війни, «кривавий» Марс під час протистоянь за яскравістю поступається тільки Венері. Хоча маса та радіус Марса менші, ніж Землі, але тривалість доби (24,6 год) і зміна пір року (вісь обертання нахилена під кутом 65° до площини орбіти) нагадують нашу планету. Правда, тривалість сезонів на Марсі майже у 2 рази довша, ніж на Землі. Навіть у невеликі телескопи на Марсі видно білі полярні шапки (рис. 8.8), які свідчать про наявність води в атмосфері планети.

Марс привернув особливу увагу людей після того, як у 1877 р. італійський астроном Д. Скяпареллі відкрив «канали». Тоненькі, ледве помітні лінії, які з'єднували темні ділянки поверхні Марса, нагадували людству зрошувальні системи на Землі, тому фантасти висунули ідею про високий інтелект марсіанської цивілізації. Ці повідомлення зачарували американського мільйонера П. Ловелла, який залишив торгівлю і спеціально для пошуків життя на Марсі побудував величезну астрономічну обсерваторію. Після дослідження Марса за допомогою АМС було встановлено, що «канали» є своєрідною оптичною ілюзією, яку створюють окремі ділянки марсіанського ландшафту — гори, долини, кратери (рис. 8.9).

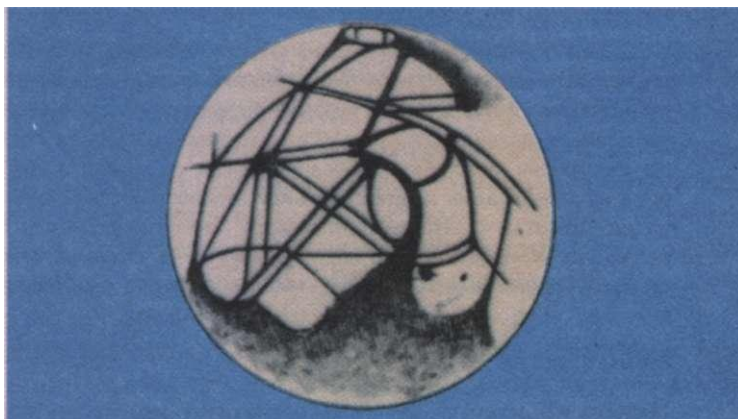
Із близької відстані Марс більше схожий на Місяць, ніж на Землю, бо безліч круглих кратерів свідчать про інтенсивне метеоритне бомбардування в минулому. На деяких схилах метеоритних кратерів видно застигли потоки якоїсь рідини, — можливо, під час вибуху з надр виділялася вода, а потім при низькій температурі знову замерзала (рис. 8.10, 8.11). Ряд кратерів на Марсі назвали

Марс O^*	
Радіус	0,53 R_{\oplus}
Маса	0,11 M_{\oplus}
Густина	3,9 г/см ³
Прискорення вільного падіння	0,37 g_{\oplus}
Атмосфера	CO ₂ , N ₂
Тиск	0,006 атм
Орбіта	$a = 1,52$ а. о.
Рік	687 зем. діб
Доба	24 год 37 хв
Температура поверхні, °C:	
вдень максимальна	+22
вночі	-60,
мінімальна (на полюсі)	-133

Рис. 8.8. Вигляд Марса в телескоп



Рис. 8.9. «Канали» на Марсі виявилися своєрідною оптичною ілюзією, яку створюють окремі ділянки марсіанського ландшафту. Рисунок італійського астронома Д. Скіапареллі



на честь українських астрономів: Барабашов, Герасимович, Сімейкін, Струве, Фесенков.

Чи є життя на Марсі? Розріджена атмосфера та великі добові перепади температури роблять неможливим існування високорозвинених форм життя — рослин або тварин. На знімках поверхні (рис. 8.12) видно червону пустелю з дюнами піску, який переноситься вітром на тисячі кілометрів. Червоний колір марсіанського ґрунту пояснюють значним вмістом (до 16 %) оксидів заліза (звичайної іржі). Про відсутність життя на поверхні Марса свідчать також результати експериментів, які безпосередньо проводились за допомогою АМС — присутність мікроорганізмів на поверхні не зареєстрована.

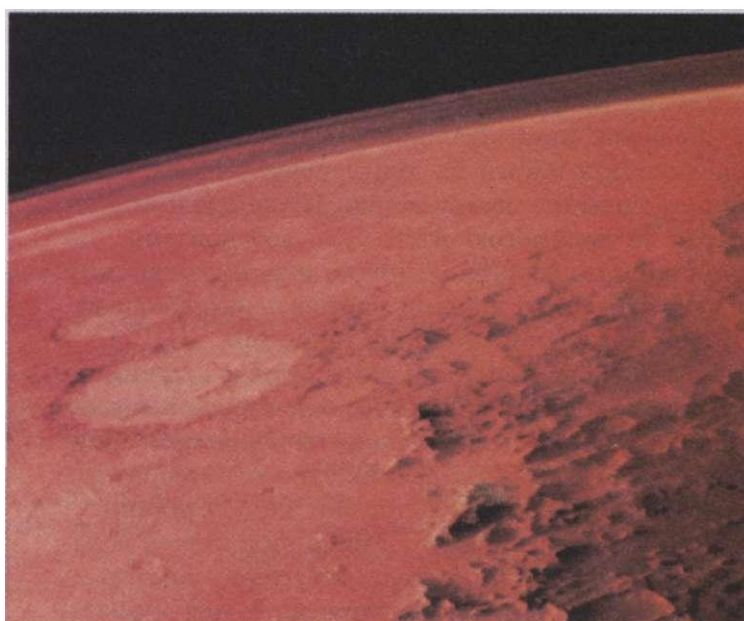


Рис. 8.10. Марс із висоти кількох сотень кілометрів. На горизонті — тонкий шар розрідженої атмосфери. Ліворуч — дивний кратер, який нагадує обличчя людини, що усміхається

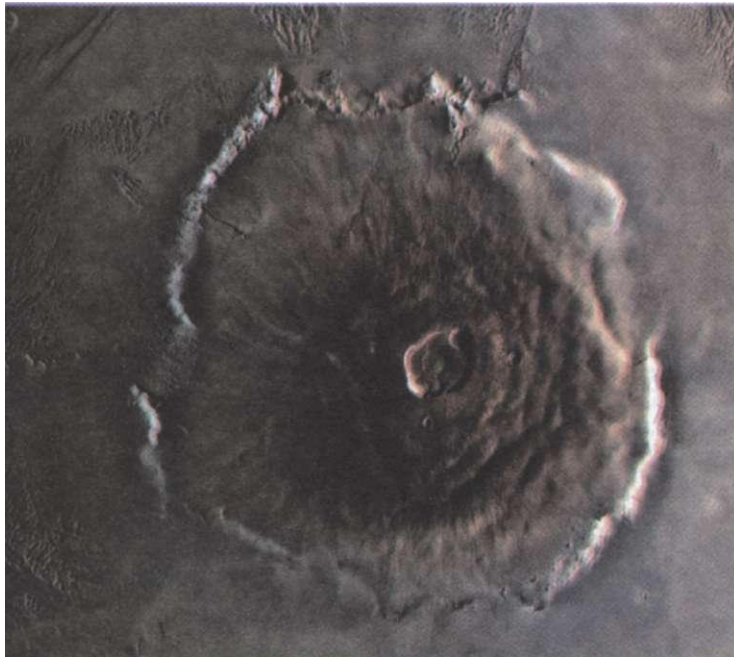


Рис. 8.11. Вулкан Олімп, розташований недалеко від екватора Марса, — найвища гора Сонячної системи. Діаметр вулканічної платформи сягає 700 км, вершина має висоту 27 км, а діаметр жерла вулкана — 75 км

На Марсі ніколи не випадає дощ, бо пари води в атмосфері у 100 разів менше, ніж на Землі. На самій поверхні Марса вода в рідкому стані не помічена, бо при тискові 0,006 атм температура кипіння води знижується до $+3^{\circ}\text{C}$. Тобто як тільки на поверхні утворюється невелика калюжа, то вода закипає і випаровується. Запасів води у вигляді снігу та льоду під поверхнею Марса може бути набагато більше — якби рівномірно її розподілити по поверхні, то глибина такого моря могла б сягати кілька сотень метрів. Русла висохлих річок на поверхні свідчать, що в минулому на Марсі була більш густа атмосфера, випадали дощі, і ймовірно існувало життя. Клімат на Марсі міг змінитися через зіткнення з астероїдом.



Для допитливих

На Марсі виявлена дуже розріджена атмосфера. Головна її складова — вуглекислий газ CO_2 (95% за об'ємом). Атмосферний тиск не перевищує 0,006 атм (такий малий тиск у земній атмосфері на висоті 20 км), тому парниковий ефект є невеликим — цим пояснюються значні добові коливання температури. Найвища температура влітку поблизу екватора на темних ділянках ґрунту піднімається до $+22^{\circ}\text{C}$, але в тому ж місці температура перед світанком опускається до -50°C . Взимку біля полюсів, де полярна ніч триває 8 місяців, мороз сягає -133°C , це є найнижчою можливою температурою на поверхні Марса. За таких умов починається конденсація вуглекислого газу, коли виділяється тепло. Температура залишається сталою, доки весь вуглекислий газ із атмосфери не перетвориться у твердий стан.

§8. ПЛАНЕТИ ЗЕМНОЇ ГРУПИ



Для майбутніх космонавтів

На поверхні Марса теж треба одягати скафандри, але досвід космічних експедицій на Місяць показує, що люди зможуть працювати на цій планеті. Основною проблемою марсіанських експедицій буде велика тривалість космічних перельотів Земля — Марс — Земля (див. §5), бо космонавти більше двох років будуть перебувати за межами Землі. Міжпланетний корабель із масою кілька тисяч тон будуть монтувати на орбіті навколо Землі, і можливо на Марс полетить міжнародна експедиція з 5–10 космонавтів. У майбутньому на Марсі можна буде створити космічну базу — будівельним матеріалом служитимуть гірські породи, а джерелом енергії — сонячні промені. Воду можна використати для добування кисню і водню, які будуть додатковим джерелом енергії. Не виключена можливість, що під поверхнею Марса можуть існувати поклади нафти і газу... Нарешті, марсіанські експедиції розгадають найбільшу таємницю цієї планети — чи існували там розумні марсіани?

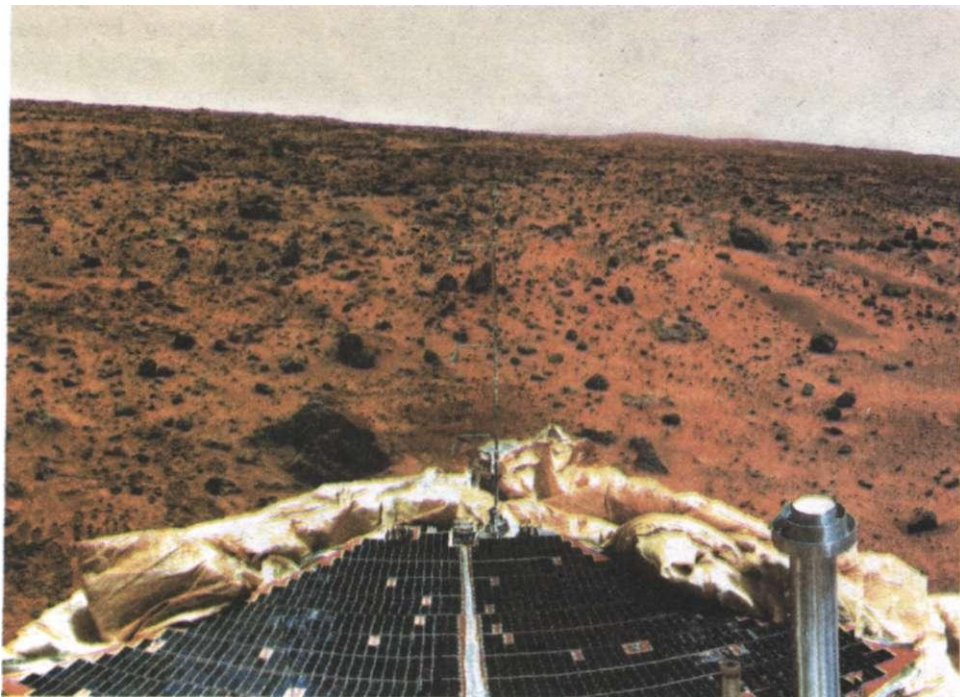


Рис. 8.12. Панорама поверхні Марса. Червоного кольору поверхні надають оксиди заліза. Сильні вітри піднімають у повітря пил, тому барви неба теж рожеві. Ліворуч рейки, по яких з'їхав марсохід — він зупинився під каменем на горбі. Внизу праворуч — парашут



Висновки

Хоча планети земної групи Меркурій, Венера, Земля і Марс схожі за розмірами, масою і внутрішньою будовою, але фізичні умови на поверхні Меркурія, Венери і Марса дуже відрізняються від земних, тому там не виявлені ознаки життя. На Меркурії відсутня стала атмосфера, тому коливання температури протягом доби там майже такі, як на Місяці. На Венері густа атмосфера з вуглекислого га-

зу створює пекельні умови для існування живих істот — там і вдень і вночі температура $+480^{\circ}\text{C}$. Марс буде першою планетою, яку в недалекому майбутньому відвідають люди, але жити там можна тільки в скафандрах. Є припущення, що колись на Марсі була густіша атмосфера, випадали дощі, текли ріки і, можливо, існувало життя. Не виключено, що і тепер живі організми існують під поверхнею планети, де виявлена велика кількість криги.



Тести

1. Із поверхні якої планети земної групи ніколи не можна побачити Сонце?
А. З Меркурія. Б. З Венери. В. Із Землі. Г. З Марса.
2. На яких планетах земної групи у хмарах виявлена сірчана кислота?
А. На Меркурії. Б. На Венері. В. На Землі. Г. На Марсі.
3. На поверхні якої планети земної групи спостерігається найдовший день?
А. На Меркурії. Б. На Венері. В. На Землі. Г. На Марсі.
4. Яка планета земної групи має найгустішу атмосферу?
А. Меркурій. Б. Венера. В. Земля. Г. Марс.
5. На поверхні якої планети земної групи найбільша тривалість сонячної доби?
А. На Меркурії. Б. На Венері. В. На Землі. Г. На Марсі.
6. Чому Меркурій не може утримувати сталу атмосферу?
7. Яка планета обертається навколо осі у протилежному в порівнянні із Землею напрямку?
8. На яких планетах земної групи відбувається зміна пір року?
9. Венера розміщується далі від Сонця, ніж Меркурій, але чому температура на її поверхні вища, ніж на Меркурії?
10. Які є докази того, що на поверхні Марса колись була вода в рідкому стані?
11. На яких планетах земної групи можливе існування життя?
12. Обчисліть свою вагу на поверхні Меркурія, Венери і Марса.
13. Обчисліть найменшу і найбільшу відстані між Землею та Марсом (див. дод. 3, 4).



Диспути на запропоновані теми

14. Чи могли б розумні марсіани, спостерігаючи Землю у свої телескопи, виявити докази існування життя? Існування розумної цивілізації на Землі?



Завдання для спостережень

15. Нарисуйте положення Венери відносно горизонту та відносно зір і спостерігайте, як змінюється це положення протягом кількох тижнів. Зробіть висновки, як змінюється яскравість планети за цей час.
16. Під час протистоянь Марса визначте моменти, коли планета зупиняється і починає рухатися відносно зір у зворотному напрямку — зі сходу на захід.



Ключові поняття і терміни:

Вечірня або Вранішня зоря, Марсіанські канали, пилові бурі, планети земної групи, полярні шапки.

§ 9. Планети-гіганти

Вивчивши цей параграф, ми:

- дізнаємося, чому планети-гіганти не мають твердої поверхні;
- довідаємося, чи стане Юпітер зорею;
- дізнаємося про дивну зміну пір року на Урані.

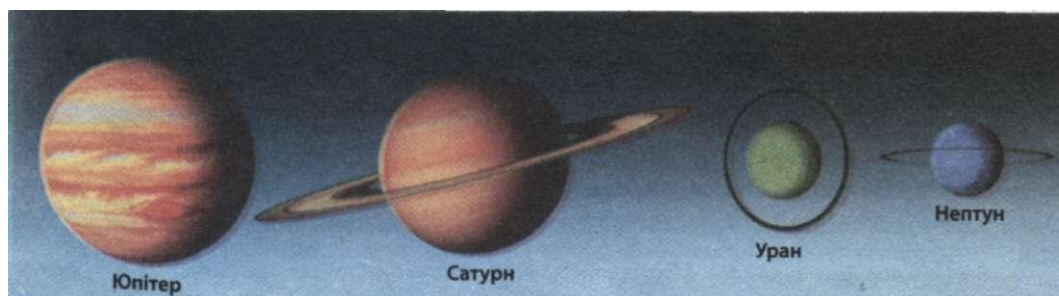
1 Загальна характеристика планет-гігантів

Планети-гіганти на відміну від планет земної групи не мають твердої поверхні, бо за хімічним складом (99 % Гідрогену і Гелію) і густиною ($\sim 1 \text{ г/см}^3$) вони нагадують зорі, а їхня велика маса спричиняє нагрівання ядер до температури понад $+10\,000^\circ\text{C}$ (рис. 9.1). Крім того, планети-гіганти досить швидко обертаються навколо осі та мають велику кількість супутників (див. § 10).

Юпітер ♃	
Радіус	$11,2 R_{\oplus}$
Маса	$318 M_{\oplus}$
Густина	$1,3 \text{ г/см}^3$
Прискорення вільного падіння	$g = 2,5g_{\oplus}$
Орбіта	$a = 5,2 \text{ а. о.}$
Рік	11,2 з. року
Доба	9 год 50 хв
Атмосфера	H_2, He
Температура, $^\circ\text{C}$:	
хмари	-107
у ядрі	+40 000

Найбільшою загадкою усіх планет-гігантів (крім Урана) є джерело внутрішньої енергії, яку випромінюють ці планети в інфрачервоній частині спектра. Джерелом енергії не можуть бути термоядерні реакції, бо маса планет-гігантів недостатня для перетворення їх у зорі. Не виключена можливість, що гіганти випромінюють ту енергію, яка була накопичена під час утворення Сонячної системи кілька мільярдів років тому. Можливо, що в минулому Юпітер мав досить високу температуру на поверхні й світився на небі молодій Землі у 100 разів яскравіше за Місяць.

Рис. 9.1. Відносні розміри планет-гігантів



2 Юпітер

Юпітер, який був названий на честь наймогутнішого бога римської міфології, виявився найбільшою планетою Сонячної системи. Основними компонентами атмосфери Юпітера є водень — 86,1% та гелій — 13,8%, а у хмарах помічена присутність метану, аміаку та водяної пари. Верхній шар світлих хмар, де атмосферний тиск сягає 1 атм, має температуру -107°C і складається з кристаликів аміаку. Шар хмар з домішками сірки, що розташований нижче, має червоний колір (рис. 9.2—9.4). Найнижче знаходяться хмари з водяної пари, які утворюються на глибині 80 км від верхніх світлих хмар. Температура і атмосферний тиск із глибиною поступово зростають.

Недавно з'явилися гіпотези щодо можливості існування життя у хмарах Юпітера, адже його атмосфера має всі компоненти, які були необхідні для появи життя на Землі. Деякі шари хмар є теплі та відносно комфортні для існування навіть земних мікроорганізмів.

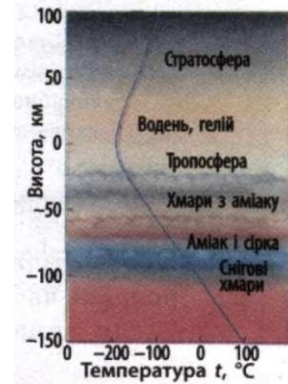


Рис. 9.2. Будова атмосфери Юпітера за результатами досліджень АМС «Галілей» (США). Рівень, де тиск сягає 1 атм, вважають свого роду «поверхнею» планети

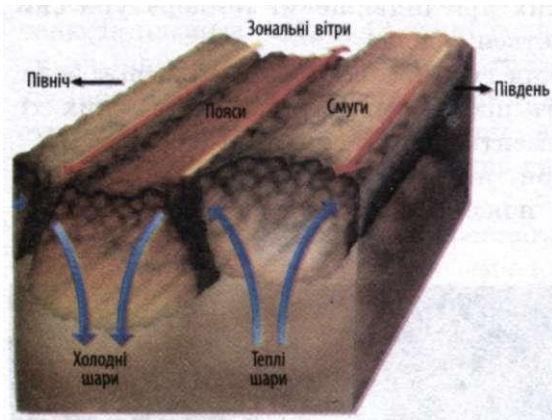


Рис. 9.3. Смуги хмар в атмосфері. З надр Юпітера надходить потік енергії, який викликає конвекцію — теплі шари повітря піднімаються вгору, а холодні — опускаються донизу. Сильні горизонтальні вітри виникають через добовий перепад температури між нічною та денною півкулями планети



Рис. 9.4. Велика Червона Пляма, яка розташована в південній півкулі Юпітера і за розмірами майже вдвічі більша, ніж Земля, є велетенським вихором в атмосфері, у якому вітер дме з ураганною швидкістю до 100 м/с (фото АМС «Вояджер», США). Чому цей вихор, який помітили ще 300 років тому, існує до нашого часу, залишається загадкою.



Для допитливих

На глибині 20000 км водень переходить у металічний стан, і його фізичні властивості нагадують розплавлений метал, який добре проводить електричний

струм. Такий агрегатний стан водню (густина 4 г/см^3 при тискові 10^6 атм) на Землі не існує. Завдяки електричному струмові, що генерується у цій металевій оболонці, виникає потужне магнітне поле, тому навколо Юпітера утворюються радіаційні пояси, які в 10^4 рази інтенсивніші від земних. Юпітер є потужним джерелом радіовипромінювання. У центрі Юпітера існує тверде ядро, подібне за хімічним складом до планет земної групи, яке може складатися зі скельних порід.

3 Сатурн

Сатурн — найвіддаленішу планету, яку знали астрономи в стародавні часи, — назвали на честь батька головного бога Юпітера. Після винайдення телескопа виявили, що Сатурн є найкрасивішою планетою Сонячної системи, бо його казкове кільце зачаровує як дітей, так і дорослих (про природу кільця див. у § 10). Сатурн не має того розмаїття кольорів, який ми спостерігаємо в атмосфері Юпітера, але структура атмосфери цих планет дуже схожа. Жовтуватого кольору верхнім шарам атмосфери Сатурна надають снігові хмари з аміаку (рис. 9.5). На глибині 300 км від верхніх шарів хмар розташовуються хмари води, у яких при підвищенні температури сніг перетворюється в дощ.

Сатурн ♄	
Радіус	$9,4 R_{\oplus}$
Маса	$95 M_{\oplus}$
Густина	$0,7 \text{ г/см}^3$
Прискорення вільного падіння	$g = 1,1g_{\oplus}$
Орбіта	$a = 9,5 \text{ а. о.}$
Рік	29,5 з. року
Доба	10 год 14 хв
Атмосфера	H_2, He
Температура, °C:	
хмари	-178
у ядрі	+15000

Середня густина Сатурна менша, ніж води, що свідчить про невелику кількість важких хімічних елементів у ядрі планети.

Сатурн, як і Юпітер, має магнітне поле, радіаційні пояси та є джерелом радіовипромінювання.

Рис. 9.5. Верхні шари хмар отримують енергію як від Сонця, так і з глибини Сатурна. У результаті взаємодії цих потоків енергії виникають сильні вітри, що спрямовані переважно із заходу на схід і швидкість яких досягає 400 м/с . Через вітри утворюються темні смуги хмар, які розташовані паралельно до екватора





Для допитливих

Сатурн теж випромінює у космос більше енергії, ніж отримує від Сонця. Астрономи недавно виявили дефіцит Гелію в атмосфері Сатурна в порівнянні з атмосферою Юпітера і запропонували цікаву гіпотезу про можливе джерело його енергії. На Сатурні Гелій не повністю розчиняється у водні, як це спостерігається на Юпітері, де вищі тиск і температура. У водневій атмосфері Сатурна Гелій утворює краплі, які конденсуються в атмосфері як своєрідний туман і потім випадають у вигляді дощу. Такі гелієві опади у верхніх шарах атмосфери можуть бути джерелом внутрішньої енергії, бо більш густий Гелій (у порівнянні з воднем) опускається ближче до центра. Таким чином, потенціальна енергія крапель Гелію перетворюється в кінетичну енергію, що призводить до підвищення температури в надрах. Із часом гелієві дощі припиняться, тому температура на Сатурні знизиться.

4 Уран

Названий на честь бога неба Уран є по-справжньому блакитною планетою, тому що одну сьому його атмосфери складає метан. Існує одна особливість, яка виділяє Уран з усіх планет Сонячної системи: його екватор нахилений до площини орбіти під кутом 98°. Такий великий кут нахилу призводить до унікальної у Сонячній системі зміни пір року — полярні кола розташовуються майже на екваторі, а Тропіки — біля полюсів. Це означає, що Сонце освітлює один із полюсів планети майже 42 земні роки, у той час як на іншому полюсі стільки ж триває полярна ніч (рис. 9.6). Правда, спеки там не буває, бо Уран отримує від Сонця набагато менше енергії, ніж Земля, і температура верхніх шарів атмосфери не піднімається вище за -215 °С.

Астрономи довгий час спостерігали за Ураном, але не виявили суттєвих змін кольорів або утворень в атмосфері. Тільки у 2007 р., коли Сонце освітлювало одночасно обидві півкулі Урана (рис. 9.6), у телескопи були помічені смуги хмар.

Уран ♅	
Радіус	4 R _⊕
Маса	14,6 M _⊕
Густина	1,2 г/см ³
Прискорення вільного падіння	g = 0,9g _⊕
Орбіта	a = 19,2 а. о.
Рік	84 земні роки
Доба	17 год 14 хв
Атмосфера	H ₂ , He, CH ₄
Температура, °С:	
хмари	-215
у ядрі	+10000



Рис. 9.6. Вісь обертання Урана лежить майже у площині орбіти, тому там тропіки збігаються з полярним колом. Тривалість сезонів на Урані 21 земний рік. Осьове обертання Урана, як і Венери, відбувається у напрямку, протилежному напрямку обертання інших планет Сонячної системи

5 Нептун

Чи існує океан на планеті Нептун, яку назвали на честь бога підводного світу? Нептун розташовується на околиці Сонячної системи і має період обертання 164,8 земного року. Планета має

Нептун Ψ	
Радіус	$3,9 R_{\oplus}$
Маса	$17,2 M_{\oplus}$
Густина	$1,6 \text{ г/см}^3$
Прискорення вільного падіння	$g = 1,2g_{\oplus}$
Орбіта	$a = 30 \text{ а. о.}$
Рік	164,8 земного року
Доба	16 год 06 хв
Атмосфера	$\text{H}_2, \text{He}, \text{CH}_4$
Температура, °С:	
хмари	-213
ядра	+10000

внутрішнє джерело енергії, бо випромінює у космос тепла майже втричі більше, ніж одержує його від Сонця. Від часу свого відкриття у 1846 р. Нептун зробив повний оберт навколо Сонця тільки у 2011 р.

Під хмарами температура атмосфери поступово підвищується до $+700^\circ\text{C}$, тому вода там не може перебувати в рідкому стані. Більш реальною є гіпотеза про водяні хмари з розчином аміаку, густина яких може перевершувати густину рідкої води в кілька разів (рис. 9.7). Швидкість вітрів у хмарах сягає фантастичної величини — 500 м/с . Чому виникають сильні вітри на такій холодній планеті — це ще одна нерозгадана таємниця Нептуна.

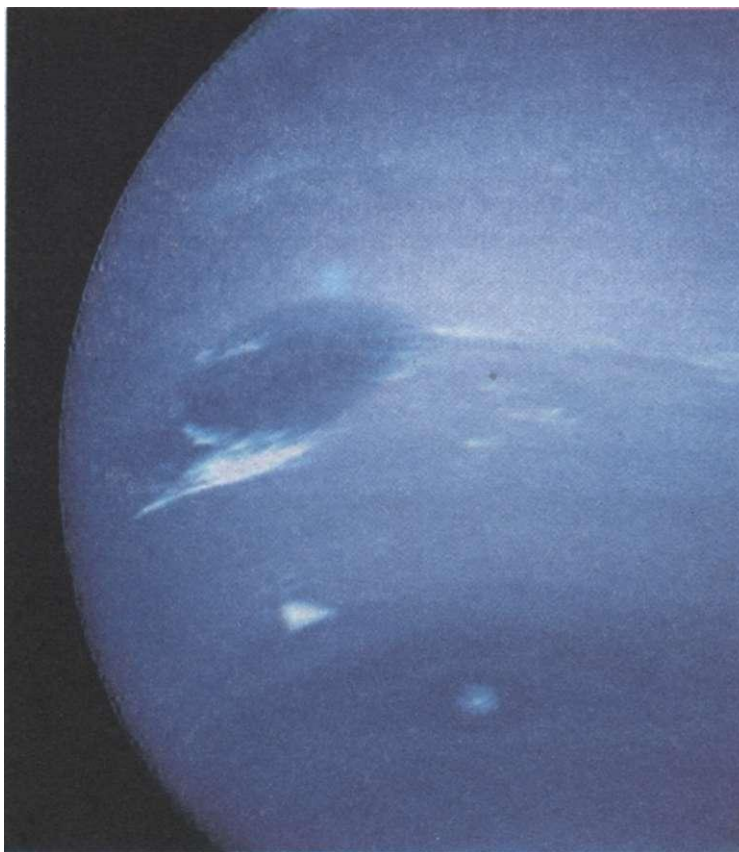


Рис. 9.7. На Нептуні виявлений велетенський вихор із діаметром понад 1000 км, який має назву Велика Чорна Пляма

**Висновки**

Планети-гіганти за хімічним складом нагадують зорі, вони не мають твердої поверхні, тому на них ніколи не зроблять посадку пілотовані космічні кораблі. Під холодними хмарами гіганти мають гарячі надра, температура яких сягає десятків тисяч градусів. Однією з таємниць залишається джерело внутрішньої енергії планет-гігантів, бо всі вони, за винятком Урана, випромінюють у космос більше енергії, ніж отримують від Сонця.

**Тести**

- Які планети випромінюють у космос більше енергії, ніж отримують від Сонця?
А. Усі планети-гіганти. Б. Юпітер, Сатурн, Нептун. В. Юпітер, Сатурн, Уран. Г. Уран.
- Які планети обертаються навколо осі у зворотному напрямку?
А. Венера, Юпітер. Б. Усі планети-гіганти. В. Юпітер, Сатурн. Г. Уран, Венера.
- На якій із цих планет спостерігається найбільша тривалість дня?
А. На Венері. Б. На Марсі. В. На Юпітері. Г. На Урані. Д. На Землі.
- Скільки часу триває день на полюсах Урана?
А. 21 земний рік. Б. 17 год 14 хв. В. 1 місяць. Г. 1 земний рік. Д. 42 земні роки.
- Які особливості у планет-гігантів?
- Чому Юпітер можна вважати дуже схожим на зорю?
- Що викликає гелієві дощі на Сатурні?
- Чим обумовлена зміна пір року на Урані?
- Обчисліть найменшу та найбільшу відстані між Землею та Юпітером.
- За допомогою *рухомої* карти зоряного неба визначте, коли ці планети сходять і заходять у день вашого народження поточного року.

**Диспути на запропоновані теми**

- Чому виникли гіпотези про можливе життя у хмарах Юпітера?

**Завдання для спостережень**

- За допомогою астрономічного календаря відшукайте на небі Юпітер та Сатурн і визначте, у якому сузір'ї спостерігаються ці планети.
- Які планети-гіганти видно сьогодні у вечірній час?

**Ключові поняття і терміни:**

Велика Червона Пляма, Велика Чорна Пляма, планети-гіганти, шари хмар, смуги хмар.

§ 10. Супутники планет

Вивчивши цей параграф, ми:

- дізнаємося, які фізичні умови існують на поверхні супутників планет;
- побачимо, чи можливе там життя;
- довідаємося, чому навколо планет існують кільця.

1 Супутники Марса

Фобос (від грец.— *страх*) і *Деймос* (від грец.— *жах*) названі на честь вічних супутників бога війни Марса. Ці космічні тіла за

Супутники Марса		
Назва	Радіус, км	Маса, 10^{16} кг
Фобос	14	1,1
Деймос	8	0,2

формою нагадують величезні картоплини: найбільший діаметр Фобоса — 28 км, а Деймоса — 16 км. Їхня поверхня темного кольору має безліч кратерів (рис. 10.1). Космонавти на поверхні цих супутників змушені будуть прив'язуватися до корабля, бо маленька сила тяжіння завдасть клопоту при пересуванні — поштовх ноги може надати тілу достатньої швидкості для міжпланетних польотів.

Рис. 10.1. Деймос і Фобос мають тверду поверхню, яка вкрита шаром чорного пилу і «засіяна» кратерами. На Фобосі видно дивні борозни, що схожі на ріллю



Для допитливих

Існування супутників Марса передбачав ще Кеплер, який вірив у магічну силу цифр: Земля має 1 супутник, у Юпітера були відомі на той час 4 супутники, тому навколо розташованого посередині Марса мають обертатися 2 супутники. Потім цю ідею розвинув Свіфт, який у «Мандрах Гуллівера» описує супутники Марса. Але тільки у 1877 р. А. Голл (США) відкрив Фобос і Деймос. Періоди їхніх обертань (7,7 год і 30,3 год) і відстань до планети виявилися майже такими, як описав Свіфт 150 років тому. Насправді, ніякої магії у цьому дивному передбаченні немає, бо Свіфт напевне знав, що за допомогою третього закону Кеплера можна визначити період обертання та відстань супутника від Марса.

2 Супутники Юпітера

Юпітер має принаймні 63 супутники, які були зареєстровані до 2011 р., і тьмяні кільця. Чотири найбільші супутники: Іо, Європа, Ганімед, Каллісто (рис. 10.2) — відкрив Галілей за допомогою свого першого телескопа, тому їх називають Галілеєві супутники. *Іо* має найбільшу геологічну активність з усіх тіл Сонячної системи — там зареєстровано 8 постійно діючих вулканів, із жерл яких викидаються розжарені гази і магна (рис. 10.3). *Іо* привертає увагу фантастичною гамою кольорів — жовтих, червоних і брунатних, що надають йому сполуки сірки, які містяться в продуктах виверження вулканів. Поверхня *Іо* зовсім рівна, бо рідка магна при температурі +400 °С заповнює будь-які западини.

Галілеєві супутники Юпітера		
Назва	Радіус, км	Маса, 10 ²² кг
Іо	1815	8,9
Європа	1570	4,8
Ганімед	2630	14,9
Каллісто	2400	10,8



Рис. 10.2. Галілеєві супутники Юпітера: Європа, Ганімед Каллісто — покриті снігом і льодом. Під льодовою корою може існувати океан рідкої води, у якій не виключена вірогідність життя

Три інші Галілеєві супутники — *Європа*, *Ганімед* і *Каллісто* — дуже схожі між собою: на їхній поверхні видно багато снігу та льоду (рис. 10.4). Під льодовою корою на цих супутниках може існувати океан рідкої води. Численні кратери свідчать про інтенсивне метеоритне бомбардування в минулому. Під час вибухів із кратерів витікала вода, яка заповнювала долини, тому на поверхні не видно ділянок із великими перепадами висоти. Правда, у деяких місцях помічені загадкові утворення, які нагадують жолобки та гребені гірських хребтів, що свідчить про можливу тектонічну діяльність у минулому. Ганімед є найбільшим супутником у Сонячній системі, який за розмірами навіть перевершує Меркурій.



Рис. 10.3. На *Іо* багато сірки і діючих вулканів

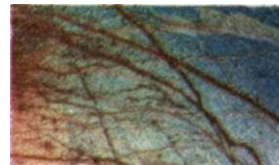


Рис. 10.4. Тріщини в льодовому панцирі Європи



Для допитливих

На поверхні Каллісто привертають увагу серія концентричних гребенів і гряди горбів, що оточують дві великі ділянки, які були названі басейнами. Гряди горбів дуже схожі на брижі — хвилі, які утворює кинутий у воду камінь. Напевно, енергія, що виділилася під час падіння гігантського метеорита, розтопила лід, але при сильному морозі (-150 °С) вода миттєво замерзла.

3 «Сім'я» Сатурна

Великі супутники Сатурна	
Назва	Радіус, км
Титан	2575
Рея	765
Япет	720
Діона	560
Тефія	525
Енцелад	251
Мімас	197
Янус	100

Титан	
Маса	$1,25 \cdot 10^{23}$ кг
Прискорення вільного падіння	$g=0,14g_{\oplus}$
Атмосфера	N_2, CH_4
Тиск	1,6 атм.
Температура поверхні, °C	-180°

«Сім'я» Сатурна складається із системи кілець і 62 супутників, які були відкриті до 2011 р., але більшість із них мають невеликі розміри (рис. 10.5, 10.6). Найбільший супутник *Титан* оточений густою азотною атмосферою, і його поверхня захована під хмарами з метану. Попри малу силу тяжіння (1/7 земної) атмосферний тиск на поверхні Титана складає 1,6 атм., бо маса стовпа повітря над одиницею поверхні у 10 разів більша, ніж на Землі.

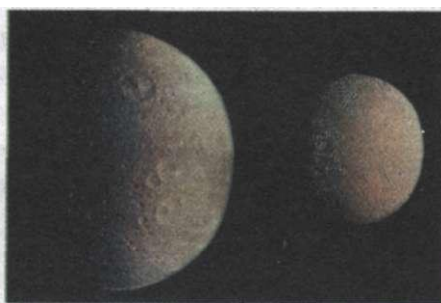


Рис. 10.5. Найбільший супутник Титан має густу азотну атмосферу з домішками метану. Можливо, там падають метанові дощі, а на поверхні існують моря з рідкого метану

Рис. 10.6. Супутники Сатурна Енцелад (ліворуч) і Діона. Безліч кратерів на льодовій поверхні свідчать, що там давно не відбувалася будь-яка тектонічна діяльність



Для допитливих

На поверхні Титана навіть удень морок, бо крізь 100-кілометровий шар туману пробивається дуже мало світла, тому там пекучий мороз (-180°C). Саме така низька температура і спричиняє існування досить густої атмосфери, у той час як на Меркурії та на супутнику Юпітера Ганімеді атмосфера практично відсутня, хоча вони мають більшу масу. Фантасти стверджують, що на Титані може навіть існувати життя, бо в атмосфері виявлено багато компонентів органічних сполук.

4 Кільця Сатурна

Кільця Сатурна (рис. 10.7) уперше побачив Галілей у 1610 р., але за допомогою невеликого телескопа він не зміг розпізнати справжню суть спостереження. Він виявив, що з боків Сатурна має дві кулі, які зливаються, якщо дивитися на них із великої відстані. Тільки у 1659 р. датський астроном Х. Гюйгенс довів, що кулі є тонким плоским кільцем навколо Сатурна. Під час спостережень із поверхні Землі у великі телескопи видно три концентричних кільця, але за допомогою АМС було виявлено, що ці

кільця складаються ще з тисяч окремих вузьких кілець (рис. 10.8).

Дослідження показують, що діаметр частинок у кільцях коливається в межах від міліметра до десятків метрів і складаються ці маленькі супутники зі снігу та льоду. Товщина кілець дуже мала в порівнянні з їхньою шириною — усього кілька десятків метрів.

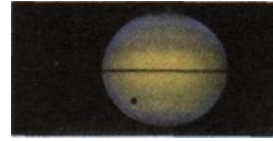


Рис. 10.7. Залежно від того, як зорієнтований Сатурн щодо Землі, його кільця видно максимально розкритими або, коли Земля лежить у площині кілець, вони стають невидимими, тому що ми їх бачимо з ребра

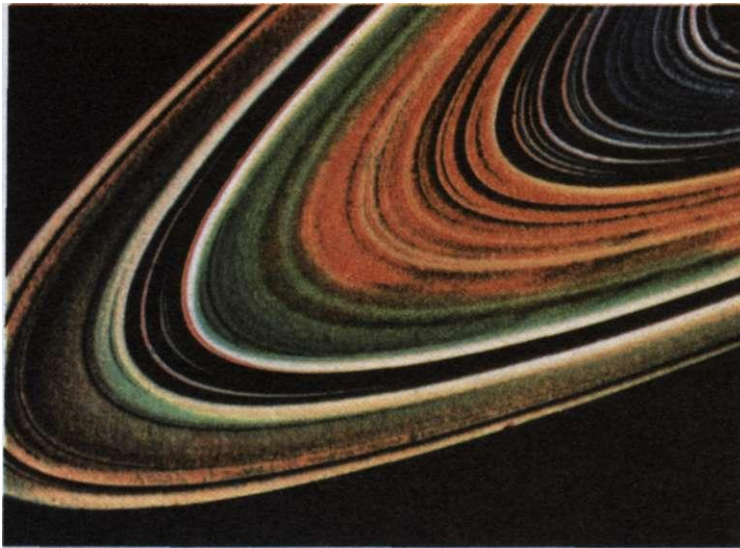


Рис. 10.8. На знімках АМС «Вояджер» видно тисячі концентричних кілець Сатурна, які дивно переплетені між собою



Для допитливих

У 1848 р. французький астроном Рош довів, що існує межа у відстані до планети, і супутники планет не можуть до неї наблизитися, бо гравітаційні сили розірвуть їх на частини. Якщо середня густина супутника така сама, як планети, то ця межа *Роша* дорівнює 2,4 радіуса планети. Є гіпотеза: колись існував супутник Сатурна, який увійшов за межу Роша і був розірваний припливними силами. Згідно з іншою гіпотезою, кільця — це залишки того будівельного матеріалу, з якого утворилася Сонячна система 5 млрд років тому. Цю гіпотезу підтверджують невеликі тьмяні кільця навколо інших планет-гігантів.

5

Супутники Урана

Уран має темні кільця і 27 супутників, які були зареєстровані до 2011 р. За допомогою телескопів відкриті тільки 5 великих супутників: *Аріель*, *Умбріель*, *Титанія*, *Оберон* і *Міранда*, а всі інші вперше сфотографовані у 1986 р. АМС «Вояджер-2». Супутники повернені до Урана однією півкулею, а їхні орбіти лежать у площині екватора, внаслідок чого на всіх супутниках відбувається така ж дивна зміна пір року, як і на Урані (див. §9).



Рис. 10.9. На поверхні Міранди видно дивні яри і долини, що нагадують трекові доріжки на стадіонах

Великі супутники складені з льоду та скелястих порід. Міранда (рис. 10.9) є найцікавішим супутником, на якому видно терени з долинами, провалами та пасмами гір. Це все свідчить про періоди катастроф у її геологічній історії, коли кілька разів невідомі космічні фактори змінювали поверхню супутника. Титанія і Оберон (рис. 10.10) мають безліч кратерів. Сірий колір поверхні свідчить про те, що сніг на ній брудний.



Рис. 10.10. Оберон (ліворуч), Титанія (праворуч)

6 Супутники Нептуна

У наш час (2011 р.) відомо 13 супутників Нептуна та виявлено тонкі тьмяні кільця. За допомогою телескопів було відкрито 2 супутники — *Тритон* і *Нереїду*, а інші сфотографувала АМС «Вояджер-2» у 1989 р.



Рис. 10.11. Південний полюс Тритона. Поверхня вкрита льодом і снігом, а в полярній шапці, можливо, є замерзлий азот

Найбільший супутник Нептуна Тритон (радіус — 1380 км) має кілька загадкових утворень. Світла поверхня Тритона поглинає мало сонячної енергії, тому температура там не піднімається вище ніж -236°C . Це найнижча денна температура, яку зареєстрували на супутниках планет Сонячної системи. Поверхня Тритона тверда (рис. 10.11).

Тритон — єдиний великий супутник серед тіл Сонячної системи, який рухається навколо планети у зворотному напрямку в порівнянні з обертанням Нептуна навколо осі. Це свідчить, що Тритон, можливо, був колись захоплений гравітаційним полем Нептуна, і він по спіралі наближується до планети. Коли відстань між Нептуном і Тритоном зменшиться до 65000 км (межа Роїла), припливні сили зруйнують супутник, і навколо Нептуна утвориться величезне кільце, подібне до кільця Сатурна.

Тритон	
Радіус	1380 км
Маса	$2,15 \cdot 10^{22}$ кг
Температура	-236°C

**Висновки**

Супутники планет Сонячної системи мають різноманітні фізичні характеристики. Поверхня більшості супутників покрита снігом і льодом, а на супутниках Юпітера Європі, Ганімеді й Каллісто, можливо, існують океани рідкої води. Найбільший супутник Сатурна Титан оточений густою атмосферою, і на його поверхні можуть бути океани метану. У метанових морях при низьких температурах органічні сполуки могли б утворити форми життя, які не схожі на земні, — там замість води розчинником міг би служити рідкий метан. Супутники планет у майбутньому можуть стати космічними базами для освоєння Сонячної системи.

**Тести**

- Чому інколи кільця Сатурна зникають?
 - Випаровуються.
 - Ховаються за Сатурн.
 - Закриваються іншими планетами.
 - Площина кільця збігається з променем зору спостерігача.
 - Закриваються хмарами.
- Який із великих супутників рухається навколо планети у зворотному напрямку?
 - Європа.
 - Іо.
 - Каллісто.
 - Ганімед.
 - Тритон.
- На поверхні яких супутників може існувати життя?
 - На Фобосі.
 - На Іо.
 - На Ганімеді.
 - На Європі.
 - На Титані.
- Який із супутників має густу азотну атмосферу з домішками метану?
 - Фобос.
 - Європа.
 - Титан.
 - Оберон.
 - Тритон.
- На яких супутниках виявлені постійно діючі вулкани?
 - На Місяці.
 - На Деймосі.
 - На Іо.
 - На Тритоні.
 - На Хароні.
- Чим пояснюється дивовижне забарвлення Іо?
- Про що свідчать численні кратери на супутниках Юпітера?
- Які супутники планет мають атмосферу?
- Що спричиняє існування досить густої атмосфери на Титані?
- Визначте свою вагу на поверхні одного із супутників планет, радіуси яких наведені у цьому параграфі, якщо його густина дорівнює 2 г/см^3 .
- На поверхні якого супутника ваша вага буде найбільшою?

**Диспути на запропоновані теми**

- Поверхню яких супутників можна використати для побудови космічних поселень?

**Завдання для спостережень**

- За допомогою бінокля або шкільного телескопа можна спостерігати Галілеєві супутники Юпітера. Визначте моменти затемнення одного з цих супутників — коли він зникає за диском Юпітера.

**Ключові поняття і терміни:**

Галілеєві супутники, кільця навколо планет, межа Роша.

§ 11. Малі тіла Сонячної системи

Вивчивши цей параграф, ми:

- довідаємося про загадковий пояс астероїдів;
- дізнаємося про небезпечні астероїди, які можуть зіткнутися із Землею;
- познайомимося з метеорами та метеоритами;
- побачимо незвичайні світила з дивними «хвостами» — комети;
- з'ясуємо, коли в Сонячній системі з'явилися планети-карлики.

1 Астероїди

Перший астероїд (від грец.— *зореподібний*) відкрив італійський астроном Д. Піацці (1746—1826). У ніч на 1 січня 1801 р. він побачив слабку зорю, яка наступного вечора трохи перемістилася. Новій планеті дали назву *Церера* (за римською міфологією — богиня землеробства). За Церерою почали уважно спостерігати — вона виявилася невеликою, навіть меншою, ніж Місяць, але оберталася навколо Сонця між орбітами Марса і Юпітера. Яке ж було здивування астрономів, коли через кілька років недалеко від Церери виявили ще одну малу планету — її назвали *Палладою* (одним з імен богині мудрості *Афіни*). Потім були відкриті ще дві — *Юнона* й *Веста*. Потім довели, що перший відкритий астероїд є і найбільший за розмірами — діаметр Церери дорівнює 960 км. Цереру відносять до класу *планет-карликів* (див. 11.7). На січень 2011 р. зареєстровано понад 500 000 астероїдів (рис. 11.1, 11.2), і найменші з них мають

Найбільші астероїди	
Номер і назва	Діаметр, км
1 Церера	960
2 Паллада	608
3 Веста	555
10 Гігія	450
31 Ефросинія	370
52 Європа	289
65 Кибела	309
451 Пацієнція	276
511 Давида	323
704 Інтерамнія	350

Рис. 11.1. Астероїд 433 Ерос має вигляд велетенського сідла завдовжки 33 км. АМС, зробивши посадку на поверхню астероїда в улоговині поблизу центра, виявила, що його сіра поверхня вкрита шаром реголіту і схожа на поверхню Місяця



діаметр усього кілька десятків метрів. У телескопи диски цих тіл розрізнити неможливо — вони мають вигляд світлих точок. Сумарна маса всіх астероїдів не перевищує 0,1 маси Місяця.

Астероїдам надають порядковий номер і назву, яку пропонує автор відкриття. Спочатку за традицією астероїдам надавали назву на честь міфологічних богинь, але з часом число відкритих малих планет перевершило все «божественне» населення Олімпу, тому зараз нові космічні тіла називають на честь країн, міст, видатних учених, поетів і діячів мистецтва. Велику кількість малих планет відкрив у Кримській астрофізичній обсерваторії астроном М. С. Черних (1931—2006).

Деякі астероїди, назви яких пов'язані з Україною

Номер	Назва
1709	Україна
1855	Корольов
2164	Ляля
2171	Київ
2325	Черних
2427	Кобзар
2428	Каменярь
2606	Одеса
2616	Леся
2728	Яцків
2883	Барабашов
3084	Кондратюк

2 Таємниці астероїдів

Чому між Марсом та Юпітером розташована не одна велика планета, а безліч малих тіл? Для пояснення цієї загадки німецький астроном Г. Ольберс (1758—1840) висунув гіпотезу, що між Марсом та Юпітером колись існувала планета *Фаєтон*, яка чомусь вибухнула. Причиною катастрофи могла бути зустріч планети з іншим космічним тілом. На користь теорії вибуху планети свідчить те, що більшість астероїдів мають вигляд осколків неправильної форми. Сучасні дослідження розподілу орбіт малих планет показують, що, швидше за все, між Марсом та Юпітером великої планети ніколи не було, а *пояс астероїдів* — це залишки тої речовини, з якої 4,5 млрд років тому утворилися планети Сонячної системи.

Рис. 11.2. Астероїд 243 їда

За орбітою Нептуна розташоване кільце маленьких планетоподібних тіл (так званий *пояс Койпера*, див. 11.7. Планети-карлики), які через гравітаційні збурення можуть змінювати параметри своєї орбіти. Зіткнення з іншою планетою або супутником спричинить руйнування цих тіл і утворення окремих фрагментів, які будуть обертатися по самостійних орбітах. Якщо врахувати, що ймовірність зустрічі осколків зростає зі збільшенням їхньої кількості, то пояс астероїдів може бути своєрідною машиною для дроблення космічних тіл на менші фрагменти.



Для допитливих

Про те, що малі планети продовжують ділитися, свідчить відкриття так званих сімейств, або груп, астероїдів. У 1918 р. японський астроном К. Прайма звернув увагу на деякі групи астероїдів, що мають схожі параметри орбіт. Такі групи астероїдів назвали *сімействами Прайми* — вони могли утворитися після зіткнення більш великих тіл. Астероїди рухаються навколо Сонця в той же бік, що й планети, і мають, як правило, еліптичні орбіти.

3 Небезпечні астероїди

Найбільшу увагу астрономів привертають астероїди групи Аполлона, Амура і Атона, бо в перигелії вони наближаються до Землі або навіть перетинають її орбіту. Наприклад, у 1932 р. астероїд 1862 Аполлон (діаметр 3 км) пролетів мимо Землі на відстані 0,028 а. о. Ще ближче від Землі у 1994 р. пролетів астероїд 1994 ХМ1 — від катастрофи нас відділяло всього 112000 км у просторі та 1 година у часі.

Ступінь ризику — це добуток ймовірності космічної катастрофи на кількість можливих людських жертв

У 2004 р. відкрили 320-метровий небезпечний астероїд Апофіс, який 13 квітня 2029 р. пролетить мимо Землі на відстані близько 37000 км

Хоча ймовірність зустрічі з окремим астероїдом досить мала, але, враховуючи їхню значну кількість і глобальні наслідки зіткнення, *ступінь ризику* загинути від космічної катастрофи виявився таким самим, як від звичайної повені або авіакатастрофи. За сучасними даними, існують близько 2000 астероїдів із діаметром більше ніж 1 км і кілька сотень тисяч із діаметром більше 100 м, які перетинають орбіту Землі (рис. 11.3). Під час зустрічі Землі з астероїдом

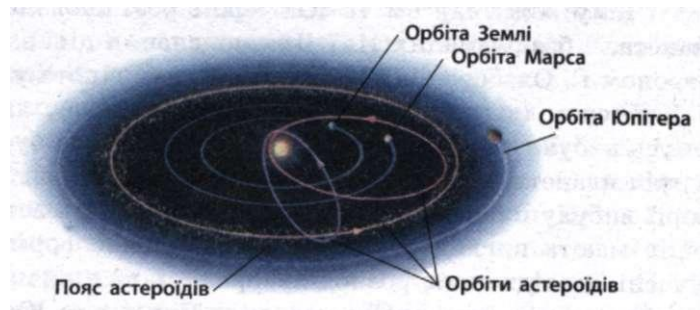


Рис. 11.3. Орбіти деяких астероїдів, що перетинають орбіту Землі

діаметром 1 км виділиться енергія, яка еквівалентна вибухові мільйонів атомних бомб. Крім того, викид пилу в атмосферу призведе до утворення суцільної хмарності, тому поверхня Землі буде отримувати менше сонячної енергії. Зниження температури може дати початок новому льодовиковому періоду (див. § 7).

Для врятування нашої цивілізації створений міжнародний Фонд «Космічна варта», розроблена програма пошуків небезпечних астероїдів і комет та обчислення їх орбіт. Значний внесок у ці дослідження зробили українські астрономи Києва (В. Кручиненко, К. Чурюмов), Криму (М. Черних) і Харкова (Д. Лупішко).



Для допитливих

У майбутньому технічні можливості людства дозволять уникнути ймовірної катастрофи від зустрічі з астероїдами, якщо можна буде якось змінювати їхні параметри орбіти. Вибух атомної бомби в космосі може змінити орбітальну швидкість тільки у випадку, якщо астероїд буде монолітним твердим тілом. Дослідження астероїда Ероса (див. рис. 11.1) свідчать, що навіть невеликі космічні тіла складені з окремих фрагментів, які під час вибуху можуть розлетітися на окремі осколки, орбіти яких розрахувати наперед неможливо.

4 Метеори та метеорити

Назви *метеор* і *метеорит* у перекладі з грецької означають: «той, що перебуває у повітрі». Астрономи колись вважали, що падаючі зорі — суто атмосферне явище, щось подібне до звичайної блискавки. Метеорні частинки — це космічний пил, який ніколи не долітає до поверхні Землі, бо він згоряє та випаровується в атмосфері на висоті кількох десятків кілометрів. Тобто *метеором*, або *падаючою зорею*, ми називаємо світлове явище, яке викликає іонізоване повітря на шляху польоту метеорної частинки, бо саму мікроскопічну порошок помітити неможливо. Метеорити мають більшу масу, тому вони можуть досягти поверхні Землі (рис. 11.4). Коли метеоритне тіло з великою швидкістю летить в атмосфері, то через опір повітря воно нагрівається до температури вище 10 000 °C і починає світитись, як розжарена куля, яку називають болідом (від грец.— *спис*). Під час польоту боліда з надзвуковою швидкістю в атмосфері виникає ударна хвиля, яка створює потужні звукові коливання, тому людина чує сильний гуркіт.

Метеоритне тіло — це фрагмент астероїда, який, обертаючись навколо Сонця, зіткнувся з нашою планетою. Тобто метеорити мають астероїдне походження. Швидкість, з якою метеор чи метеорит влітає в земну атмосферу, залежить від напрямку його руху відносно вектора швидкості Землі. Найбільшу швидкість входження в атмосферу (50—70 км/с) мають ті метеоритні тіла, які летять назустріч руху Землі, коли швидкості боліда та Землі додаються. Швидкість метеора і метеоритного тіла під час входження в атмосферу Землі не може бути меншою за 11,2 км/с, бо навіть коли астероїдне тіло «доганяє» нашу планету, то через земне тяжіння його швидкість починає зростати. Нині за рахунок метеоритної речовини маса Землі збільшується на 500 000 т за рік.

На Землі астрономи та геологи виявили більше сотні метеоритних кратерів різного діаметра (рис. 11.5), які називають астроблемами



Рис. 11.4. Метеорит, знайдений в Антарктиці

Метеор — світлове явище, яке виникає в іонізованому повітрі на шляху польоту маленьких метеорних частинок

Болід — світлове явище, яке супроводжує політ метеоритного тіла в атмосфері



Рис. 11.5. Аризонський кратер (США) утворився 10 000 років тому. Його діаметр — 1,2 км, глибина 200 м. Осколки метеорита знаходять на відстані 30 км від кратера.

(від грец.— *зоряні рани*), але більшість кратерів не збереглася, бо протягом віків атмосферні процеси знищували сліди космічних катаклізмів. Велику кільцеву структуру метеоритного походження діаметром 7 км виявили в Україні в Іллінецькому районі Вінницької області. Геологічні дослідження показують, що початкова маса метеорита була меншою ніж 10^{11} кг. (Відомості про найбільші астроблеми на території України див. у дод. 10.)



Для допитливих

На територію України щорічно падають кілька метеоритів масою від 1 кг і більше, тому астрономи звертаються до всіх учнів із проханням допомогти в пошуках цих космічних мандрівників. Зверніть увагу на падіння болідів, які летять із надзвучковою швидкістю, тому виникає різкий вибуховий звук, як при польоті реактивного літака, коли він перетинає звуковий бар'єр. Уночі під час польоту боліда видно яскраве свічення у вигляді розжареної кулі, яка може розпастися на осколки. Для пошуків метеорита визначте напрямок, у якому летів болід запишіть, о котрій годині спостерігалося це явище, і зразу повідомте про це вчителю астрономії або напишіть до найближчої астрономічної обсерваторії (адреси див. у додатку).

5

Загадка Тунгуського метеорита



Рис. 11.6. Повалений ліс на місці падіння Тунгуського метеорита

Найбільшим метеоритом ХХ ст. можна вважати Тунгуський, що впав 30 червня 1908 р. в тайзі поблизу ріки Підкам'яна Тунгуска (притока Єнісею) у Сибіру. Його політ в атмосфері спостерігали по трасі завдовжки майже 5000 км. Яскравість боліда була настільки великою, що здавалося, наче від Сонця відділився кусок і полетів по небу. Під час падіння відбувся надзвичайно сильний вибух, який було чути на відстані 2000 км від місця падіння. Сейсмічні станції зареєстрували землетрус, а сейсмічні хвилі дві-чотири обігнули Землю. Розрахунки показали, що при па-

Дінні метеорита виділилась енергія 10^{17} Дж — таку енергію виділяє вибух найпотужніших водневих бомб.

У 1926 р. Академія наук України організувала першу експедицію в район падіння Тунгуського метеорита. її очолив професор Л. Кулик. Цікава таємниця, яку виявила експедиція,— відсутність кратера та осколків на місці падіння метеорита, тому вчені висунули гіпотезу, що метеорит міг вибухнути в повітрі. Про це свідчать стовбури повалених дерев на місці катастрофи (рис. 11.6). Площа поваленого та спаленого лісу займає близько 5000 км^2 , але в епіцентрі повітряного вибуху, де ударна хвиля поширювалася перпендикулярно до поверхні Землі, стовбури дерев не були повалені.



Для допитливих

Залишається таємницею, куди поділись осколки Тунгуського метеорита при вибуху. Найбільш вірогідним поясненням цих аномальних явищ може бути гіпотеза

про те, що метеорит був льодяним ядром невеликої комети (див. п. 11.6), яке вибухнуло в атмосфері Землі. Газові компоненти ядра випарувалися, а тверді силікатні частинки розплавившись і випали на поверхню у вигляді мікроскопічних частинок.

6 Комети

Комети (від грец.— *волохатий*) своїм незвичним виглядом привертають найбільшу увагу людей, бо вони мають дивний красивий хвіст. Комети є залишками космічної речовини, з якої утворилися планети Сонячної системи. За традицією кометі дають назву на честь тих астрономів, які першими побачили її на небі (рис. 11.7, 11.8). Часто комети відкривали аматори астрономії і навіть школярі. На честь українських астрономів названі комети Герасименка, Неуйміна, Скоритченка, Черних, Чурюмова, Шайна.

Найзнаменитішою кометою можна вважати *комету Галлея*, яку спостерігають вже кілька тисячоліть. Директор Гринвіцької обсерваторії Е. Галлей (1656—1742) вперше визначив орбіту комети, яку було видно у 1682 р. Для цього він вивчив стародавні літописи і звернув увагу на те, що одна з комет з'являлася на небі з постійним періодом 76 р. За допомогою третього закону Кеплера Галлей визначив велику піввісь орбіти та передбачив її появу у 1758 р. Останній раз комету Галлея спостерігали у 1986 р., а наступний її приліт до Землі очікується у 2061 р.

Тривалий час загадкою для астрономів був довгий хвіст комети, який іноді простягається на мільйони або на сотні мільйонів кілометрів, причому напрямок хвоста змінюється таким чином, що він весь час відхиляється у протилежний від Сонця бік. Здається, що хвіст до Сонця не притягується, а навпаки, відштовхується, на-



Рис. 11.7. Комета Галлея



Рис. 11.8. Комета Гейла-Боппа

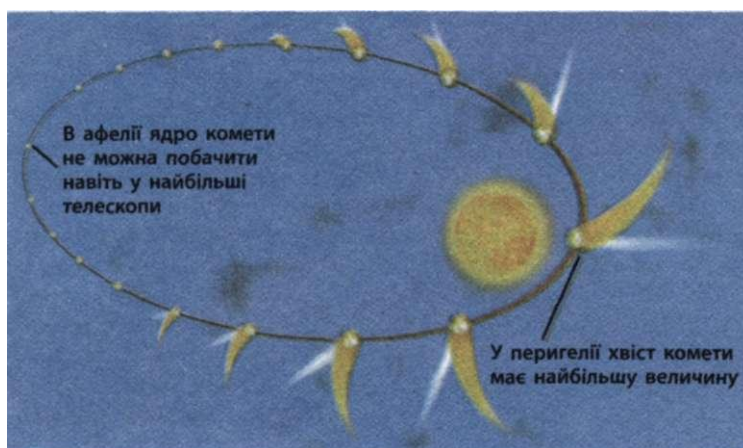


Рис. 11.9. Рух комети навколо Сонця. Під дією сонячного вітру хвіст комети відштовхується в протилежному від Сонця напрямку



Рис. 11.10. Ядро комети Галлея на відстані кількох тисяч кілометрів. Довжина дуже темного ядра — 15 км, ширина — 8 км. З отворів, що розташовані на поверхні, вириваються струмені газу

Сонячний вітер складається з елементарних частинок та окремих ядер легких хімічних елементів, які летять від Сонця

чебто від Сонця дме своєрідний вітер. Зазвичай, хвіст комети притягується до Сонця, але для частинок із діаметром меншим ніж 10^{n5} м сила відштовхування стає більшою за силу притягання. Хвіст комет саме і складається з мікроскопічних частинок космічного пилу, на які діє відштовхувальна сила сонячного вітру (рис. 11.9).

Ядро комети, з якого утворюється хвіст, складається в основному з льоду. Уперше воно було сфотографоване радянською АМС «Вега» у 1986 р. (рис. 11.10). Діаметр таких крижаних ядер може бути всього кілька десятків кілометрів, тому на великій відстані від Землі їх не видно. Крига у ядрах комет, які часто наближуються до Сонця, з часом повністю випаровується. Від комети залишаються тверді силікатні пилінки, які продовжують рух по орбіті та перетворюються в *метеорні потоки*. Коли Земля перетинає орбіту такого метеорного потоку, спостерігається «зоряний дощ», у цей час на небі можна побачити тисячі метеорів.

Датський астроном Я. Оорт висунув гіпотезу, що за орбітою Нептуна можуть бути мільйони таких кометних ядер (хмара Оорта), але з них тільки невелика кількість підходить у перигелії близько до Сонця. Під впливом гравітаційного збурення великих планет комети можуть змінити свою орбіту і навіть зіткнутися з ними. Такою катастрофою міг бути також вибух Тунгуського метеорита (див. п. 11.5). У 1994 р. комета Шумейкера—Леві упала на Юпітер. Під час цього зіткнення виділилась енергія, яка дорівнює вибухові мільйонів ядерних бомб.



Для допитливих

Чи можна використати астероїди і комети для потреб нашої цивілізації? Можливо, що в майбутньому астероїди можна пристосувати як бази для міжпланетних експедицій. Деякі астероїди можуть містити рідкісні хімічні елементи, які можна було б застосовувати при спорудженні космічних поселень як у космосі, так і на поверхні супутників планет. Під час космічного будівництва треба пам'ятати, що прискорення вільного падіння на астероїдах дуже мале, тому один необережний поштовх ногою може надати космонавтові другу космічну швидкість. Температура на поверхні астероїдів залежить від кольору поверхні та відстані до Сонця. У головному поясі астероїдів на відстані 2,8 а. о. від Сонця температура на денному боці рідко піднімається вище ніж 0°C , але астероїди групи Аполлона, Амура і Атона, які рухаються по дуже витягнутих орбітах, у перигелії можуть нагріватися до $+500^{\circ}\text{C}$.

7 Планети-карлики

Уперше цей новий клас тіл Сонячної системи визначили у серпні 2006 р. на з'їзді Міжнародного Астрономічного Союзу (МАС) у Празі. Тоді ж було змінено статус *Плутона*, який до цього був дев'ятою планетою Сонячної системи: відтепер він став першою *планетою-карликом*. Після відкриття Нептуна у 1846 р. (див. §4) майже ціле століття астрономи шукали дев'яту планету, яка могла викликати невеликі збурення орбіти Урана, бо гравітаційним впливом Нептуна можна пояснити тільки 98% збурень орбіти цієї планети.

Тільки 18 лютого 1930 р. в Ловеллській обсерваторії (США) Клайд Томбо відкрив невідому планету, яка отримала назву Плутон на честь міфічного бога підземного царства.

У 1978 р. астрономи звернули увагу на те, що на фотографії Плутона видно невеликий виступ на його дисконі. Продовжуючи спостереження, учені дійшли висновку, що у Плутона є супутник, який отримав назву *Харон*. Він обертається навколо планети з періодом 6,4 доби. У 2006 р. за допомогою космічного телескопа Габбла були відкриті ще два невеликі супутники Плутона — *Нікс* і *Гідра*. У зв'язку з тим, що Плутон має дуже витягнуту орбіту з великим, у порівнянні з іншими планетами, ексцентриситетом ($e = 0,25$), і за масою і розмірами наба-

Плутон \mathcal{L}	
Радіус	$0,18 R_{\oplus}$
Маса	$0,002 M_{\oplus}$
Густина	$2,1 \text{ г/см}^3$
Прискорення вільного падіння	$g = 0,06g_{\oplus}$
Орбіта	$a = 39,5 \text{ а. о.}$
Рік	248,6 земного року
Доба	6,4 земної доби
Температура	-213°C

Рис. 11.11. Плутон, Харон, Ерида



гато менший за інші планети Сонячної системи, деякі астрономи вважають, що Плутон був колись супутником Нептуна, адже Юпітер, Сатурн, Нептун і Земля мають набагато більші за нього супутники. Статус Плутона як планети поступово ставав підозрілим ще й тому, що його орбіта нахилена під значним кутом до площини екліптики у порівнянні з будь-якою планетою Сонячної системи і трохи нагадує орбіти комет.

У 1951 р., аналізуючи орбіти комет, астроном Ж. Койпер передбачив існування за Нептуном поясу астероїдів, який тепер офіційно назвали поясом Койпера. Астрономічні спостереження за допомогою сучасних телескопів підтвердили цю гіпотезу у 1990 р., коли за Плутоном почали відкривати нові об'єкти поясу Койпера. З наукової точки зору стало очевидним, що Плутон більше схожий на членів цієї групи, ніж на інші 8 планет Сонячної системи.

У липні 2005 р. відкрили новий об'єкт поясу Койпера, який був навіть більший за Плутон, тому деякі астрономи стали називати його десятою планетою. Нову планету неофіційно прозвали *Ксеною* (з грец.— *чужа*). Це відкриття стало фатальним ударом для статус-кво дев'яти планет, бо якщо Плутон вважають планетою, то Ксена теж має належати до класу планет. Тому перед астрономами постали питання, що робити з іншими об'єктами поясу Койпера, які трохи менше ніж Плутон, адже в майбутньому на околицях Сонячної системи можуть відкрити ще більші тіла?

На кінець 2010 р. зареєстровано більше 1000 астероїдів, орбіти яких розташовуються за орбітою Нептуна в межах поясу Койпера. Для розв'язання цієї проблеми в Міжнародному Астрономічному Союзі був створений спеціальний комітет, який запропонував модифікувати визначення планети, додавши, що *планета має бути не тільки круглої форми, але повинна також бути єдиним тілом на своїй орбіті*. За цим визначенням *Плутон* утратив статус планети, оскільки він один із багатьох об'єктів поясу Койпера, і до того ж його орбіта фактично перетинається з орбітою Нептуна. У 2006 р. Плутон був позначений астероїд ним номером 134340; офіційну назву й номер отримав і об'єкт з умовною назвою «Ксена». Він тепер має номер 136199 та назву *Ерида*.

На грудень 2010 р. зареєстровано 3 планети-карлики: *Церера*, *Плутон*, *Ерида*.



Висновки

Малі тіла Сонячної системи (планети-карлики, астероїди, комети, метеорні тіла) є залишками тої величезної хмари космічної речовини, з якої утворилися Сонце і великі планети. Основний пояс астероїдів розташовується між

Марсом та Юпітером, але за орбітою Нептуна існують ще мільйони плането-подібних тіл (пояс Койпера) та мільйони кометних ядер (хмара Оорта). Астероїди, можливо, стануть базами для дослідження космосу, а металеві астероїди можна використати як джерело для добування корисних копалин. Існує небезпека зустрічі Землі з тими астероїдами, орбіти яких наближуються до Землі або перетинають її орбіту.



Тести

1. Метеором називається явище, коли:
 - А. Зорі падають на Землю. Б. Каміння падає на Землю. В. Пилінки згоряють у повітрі. Г. Блискавки спостерігаються у повітрі. Д. Пил викидається в атмосферу.
2. З чого складається ядро комети?
 - А. Із льоду та пилу. Б. Із заліза. В. Із каміння. Г. Із розжарених газів. Д. Із пари води.
3. З якою найменшою швидкістю метеорит влітає в атмосферу Землі?
 - А. 1 м/с. Б. 1 км/с. В. 11,2 км/с. Г. 22,2 км/с. Д. 70 км/с. Е. 100 км/с.
4. З якою найбільшою швидкістю метеорит може влетіти в атмосферу Землі?
 - А. 1 м/с. Б. 1 км/с. В. 11,2 км/с. Г. 22,2 км/с. Д. 70 км/с. Е. 100 км/с.
5. Тунгуський метеорит називають загадковим тому, що:
 - А. Метеорит був космічним кораблем марсіян. Б. На місці падіння не виявлено метеоритного кратера. В. В атмосфері стався спалах, що нагадував вибух ядерної бомби. Г. Метеорит був брилою льоду. Д. Після падіння метеорита над Європою спостерігалось загадкове сяйво в атмосфері і вночі не було видно зір.
6. Чому більшість астероїдів мають неправильну форму?
7. Чому метеорити можуть досягати поверхні Землі?
8. Яке сімейство астероїдів може викликати загрозу для Землі?
9. Чим відрізняється метеор від метеорита?
10. Хвіст комети зазвичай притягується до Сонця чи відштовхується від нього?
11. Чому комета може змінити свою орбіту?
12. Який найбільший метеоритний кратер виявили на території України?
13. Обчисліть свою вагу на астероїді 1709 Україна, який має діаметр 20 км. Густина астероїда – 3 г/см³.



Диспути на запропоновані теми

14. Яка ваша думка щодо практичного використання астероїдів як джерела корисних копалин?



Завдання для спостережень

15. Порахуйте кількість метеорів, які пролітають по небосхилу протягом 30 хв.



Ключові поняття і терміни:

Астроблема, астероїд, болід, комета, метеор, метеорит, пояс астероїдів, пояс Койпера, ступінь ризику, хвіст комети, хмара Оорта, ядро комети.

§ 12. Сонце — наша зоря

Вивчивши цей параграф, ми:

- дізнаємося, чому світить Сонце;
- довідаємося про природу сонячних плям та їхній вплив на біосферу Землі;
- побачимо, як у домашніх умовах можна використати сонячну енергію.

1 Фізичні характеристики Сонця

Сонце — одна з мільярдів зір нашої Галактики, центральне світило в Сонячній системі, вік якого близько 5 млрд років. Воно дає Землі тепло і світло, що підтримує життя на нашій планеті. Сонце розташовується на близькій відстані від Землі — усього 150 млн км, тому ми бачимо його у формі диска. Вивчення Сонця має дуже важливе практичне значення для розвитку земної цивілізації.

Сонце ☉	
Радіус	$109 R_{\oplus}$
Маса	$330\,000 M_{\oplus}$
Середня густина	$1,4 \text{ г/см}^3$
Хімічний склад за масою, %:	
H_2	71
He	27
Світність	$4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$
Температура, К:	
фотосфери	5780
ядра	15 000 000

Сонячна стала q — енергія, що отримує 1 м^2 поверхні Землі за 1 с, якщо сонячні промені падають перпендикулярно до поверхні. За сучасними даними на межі верхніх шарів атмосфери Землі величина сонячної сталої дорівнює $q = 1,4 \text{ кВт/м}^2$

Температура Сонця вимірюється за допомогою законів випромінювання чорного тіла (див. § 6). Сонце випромінює електромагнітні хвилі різної довжини, які нашим оком сприймаються як біле світло. Насправді, біле світло складається з цілого спектра електромагнітних хвиль від червоного кольору до фіолетового, але Сонце випромінює найбільше енергії у жовто-зеленій частині спектра, тому астрономи називають Сонце *жовтою зорею*. Температура на поверхні Сонця становить 5780 К.

Світність Сонця L_{\odot} визначає потужність його випромінювання, тобто кількість енергії, що випромінює поверхня Сонця у всіх напрямках за одиницю часу. Для визначення світності Сонця треба виміряти сонячну сталу q — енергію, яку отримує 1 м^2 поверхні Землі за 1 с за умови, що Сонце розташоване в зеніті. Для визначення світності Сонця необхідно величину сонячної сталої помножити на площу сфери з радіусом R :

$$L_{\odot} = 4\pi R^2 \cdot q \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт},$$

де $R = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$ — відстань від Землі до Сонця.

2 Будова Сонця

Сонце — величезна розжарена плазмова куля, що має складну будову її зовнішніх і внутрішніх шарів.

У результаті фізичних процесів, що протікають в надрах Сонця, безперервно виділяється енергія, яка передається зовнішнім шарам і розподіляється на все більшу площу. Внаслідок цього з наближенням до поверхні температура сонячної плазми поступово знижується. Залежно від температури та характеру процесів, що визначаються цією температурою, Сонце умовно розділяють на такі області з різним фізичним станом речовини та розподілом енергії: *ядро, зона радіації, конвективна зона та атмосфера* (рис. 12.1).

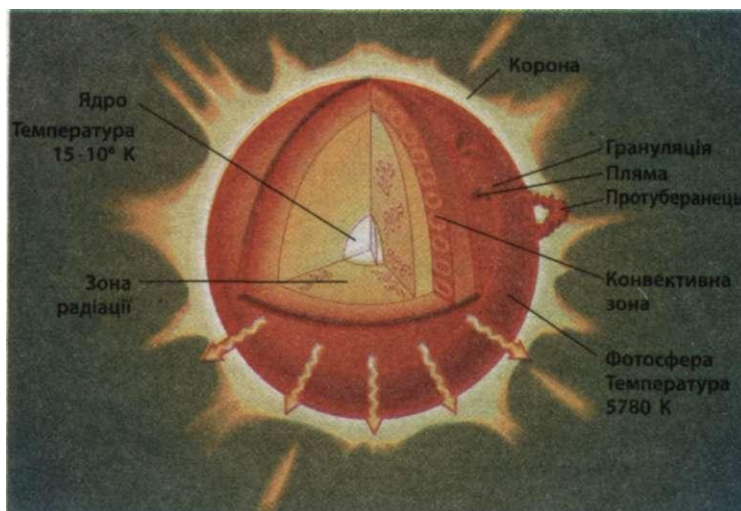


Рис. 12.1. Внутрішня будова Сонця

Центральна область (ядро) займає відносно невеликий об'єм, але завдяки великій густині ядра, яка збільшується до центра, там зосереджена значна частина маси Сонця. Величезний тиск та надвисока температура забезпечують протікання *термоядерних реакцій*, які є основним джерелом енергії Сонця. Радіус ядра становить приблизно $1/3R_{\odot}$.

У зоні *променистої рівноваги*, або *зоні радіації*, що оточує ядро на відстані до $2/3R_{\odot}$, енергія поширюється шляхом послідовного поглинання і наступного перевипромінювання речовиною квантів електромагнітної енергії.

У *конвективній зоні* (від верхнього шару зони радіації, майже до самої видимої межі Сонця — *фотосфери*) енергія передається вже не випромінюванням, а за допомогою конвекції, тобто шляхом пере-

Ядро — центральні області Сонця, де протікають термоядерні реакції

Зона радіації — зона, де енергія переноситься шляхом перевипромінювання окремих квантів

Конвективна зона — зона, де здійснюється передача енергії шляхом перемішування — більш гарячі комірочки спливають угору, а холодні опускаються донизу

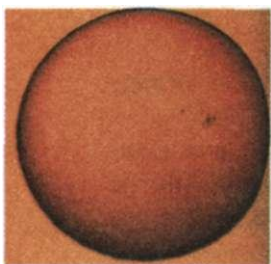


Рис. 12.2. Фотосфера — це найглибший шар атмосфери Сонця, який випромінює світло

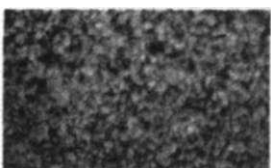


Рис. 12.3. Гранули у фотосфері мають діаметр 1000 км — це прояв конвекції

Рис. 12.4. Спектр Сонця. Темні лінії поглинання утворюються у хромосфері



мішування речовини, коли утворюються своєрідні окремі комірочки, які трохи відрізняються одна від одної температурою та густиною.

Атмосферою вважаються зовнішні шари Сонця, що умовно поділені на три оболонки. Найглибший шар атмосфери Сонця, що складається з газів, — фотосфера (від грец. — *сфера світла*), 200–300 км завтовшки, сприймається нами як поверхня Сонця (рис. 12.2). Густина газів у фотосфері в мільйони разів менша за густину повітря біля поверхні Землі, а температура фотосфери зменшується з висотою. Середній шар фотосфери, випромінювання якого ми сприймаємо, має температуру 5780 К.

У сонячний телескоп можна спостерігати структуру фотосфери, у якій конвекційні комірочки мають вигляд світлих і темних зерен — *гранул* (рис. 12.3). Над фотосферою розташована хромосфера (від грец. — *кольорова сфера*), де атомами різних речовин утворюються темні лінії поглинання у спектрі Сонця (рис. 12.4). Загальна товщина хромосфери становить 10–15 тис. км, а температура у її верхніх шарах сягає 100000 К.

Над хромосферою розміщений зовнішній шар атмосфери Сонця — сонячна корона, температура якої сягає кількох мільйонів градусів. Речовина корони, яка постійно витікає у міжпланетний простір, називається сонячним вітром.



Для допитливих

Якщо порівняти світність Сонця з його масою, то ми отримаємо, що 1 кг сонячної речовини генерує мізерну потужність $\approx 0,001$ Вт, у той час як середня потужність випромінювання людського тіла дорівнює приблизно 100 Вт, тобто в тисячу разів більша від потужності такої ж маси сонячної речовини. Правда, Сонце світить протягом мільярдів років, випромінюючи майже одну й ту саму енергію, надійно обігрівачи Землю та інші тіла Сонячної системи!

3 Сонячна активність

Сонячна активність визначається кількістю плям та їхньою загальною площею. Дослідження показали, що температура всередині плями досить висока і сягає 4500 К, але пляма здається темною на тлі більш гарячої фотосфери з температурою 5780 К (рис. 12.5, 12.6). Виникає питання: що знижує температуру всередині плями? Плями на Сонці можуть існувати протягом кількох місяців, тому виникла гіпотеза, що якийсь процес гальмує конvekцію плазми в сонячній плямі та підтримує різницю температур. Зараз доведено, що таким «ізолятором» є сильне магнітне поле, яке взаємодіє з електрично зарядженими частинками плазми і гальмує конvekційні процеси всередині плями.

Ще одна загадка активності Сонця захована в її *періодичності* — цикл зміни кількості плям повторюється приблизно через кожні 11 років (рис. 12.7).

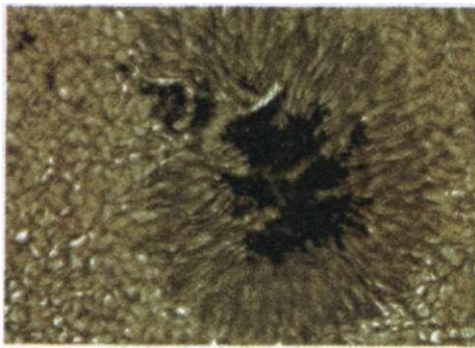


Рис. 12.5. Сонячна пляма — це область фотосфери, де знижується температура, бо сильне магнітне поле у плямі зупиняє конvekцію

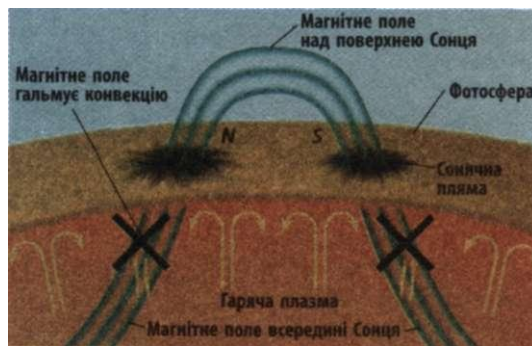
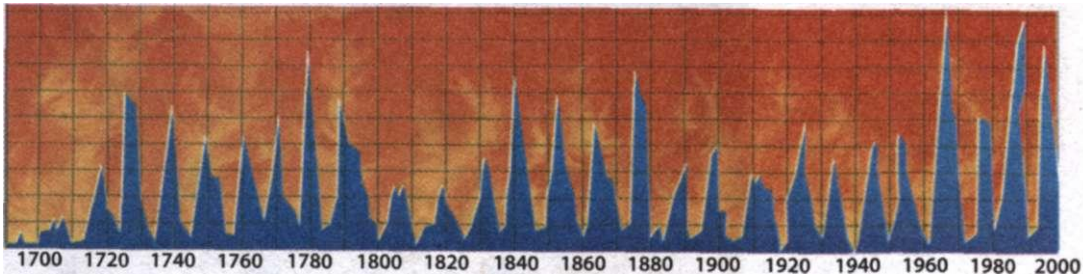


Рис. 12.6. Плями з'єднані між собою попарно, як полюси в магніті, кожна пляма має свою магнітну полярність

Рис. 12.7. Зміна сонячної активності визначається кількістю плям та їхньою площею



Для допитливих

Плями зв'язані між собою магнітними силовими лініями подібно до полюсів магніту — кожна пляма має свою полярність. Так само, як неможливо розділити північний та південний полюси магніту, так і сонячні плями існують тільки парами, які мають різні магнітні полярності. Якщо врахувати полярність плям, то цикл сонячної активності триває приблизно 22 роки.

4 Вплив сонячної активності на Землю

Досліджуючи Сонце за допомогою супутників та АМС, астрономи виявили його сильне *корпускулярне випромінювання* — потік елементарних частинок (протонів, нейтронів, електронів). Наприклад, під час так званих *хромосферних спалахів*, які вибухають поблизу плям, виділяється така величезна енергія, яку можна порівняти з випромінюванням всієї фотосфери Сонця. Не треба плутати спалахи з протуберанцями. *Протуберанці* (від лат. *protuberans* — *здуваюсь*) існують постійно — це щільні холодні хмари водню, які піднімаються в корону і рухаються вздовж магнітних силових ліній. Завдяки протуберанцям відбувається обмін речовин між хромосферою і короною.

Протуберанці — щільні хмари водню, які підіймаються в корону вздовж магнітних ліній

Хромосферний спалах — тимчасове значне посилення яскравості обмеженої ділянки хромосфери Сонця, вибуховий викид речовини і енергії, яка накопичена в магнітному полі сонячних плям

Магнітна буря — збурення магнітного поля Землі під впливом спалаху на Сонці. У цей час виникають неполадки в радіозв'язку та електронних приладах, погіршується самопочуття людей

Спалах виникає між двома плямами з протилежною полярністю, коли протягом кількох годин температура в цій зоні зростає до $5 \cdot 10^6$ К і виділяється енергія 10^{21} — 10^{25} Дж, що майже сумісне зі світністю Сонця у видимій частині спектра. Під час спалаху енергія випромінюється в основному в невидимій частині спектра (радіо, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазоні). Під час спалахів у міжпланетний простір також викидаються потоки заряджених частинок, які летять зі швидкістю до 20000 км/с (рис. 12.8). Через кілька годин після спалаху корпускулярні потоки можуть долетіти до Землі й викликати збурення її магнітного поля та свічення іоносфери, що проявляється у вигляді інтенсивних полярних сяйв.

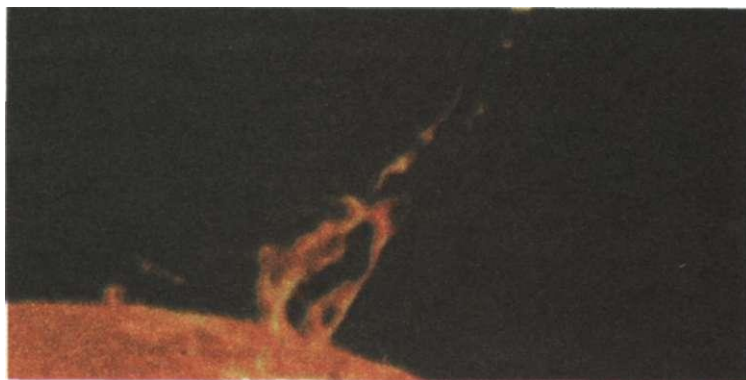


Рис. 12.8. Хромосферний спалах на Сонці



Висновки

Основним джерелом енергії для нашої цивілізації є Сонце, яке дає нам не тільки тепло, але й суттєво впливає на всі процеси, що відбуваються на Землі.

Ми визначили розміри, масу, температуру і світність Сонця; знаємо, що джерелом сонячної енергії є термоядерні реакції у його надрах, і розгадали причину зниження температури в сонячних плямах. Але залишаються нерозгаданими причини сонячної активності й чому існує 11-річний цикл появи плям. У майбутньому сонячне світло стане основним джерелом електричної енергії як на Землі, так і в космічних поселеннях при освоєнні інших планет.



Тести

1. Сонячна стала визначає:
 - А. Кількість енергії, що випромінює Сонце за рік.
 - Б. Кількість енергії, що випромінює Сонце за 1 с.
 - В. Температуру Сонця.
 - Г. Кількість енергії, яку отримує вся поверхня Землі за одиницю часу.
 - Д. Енергію, яку отримує 1м² поверхні Землі за 1 с, якщо сонячні промені падають перпендикулярно до поверхні.
2. Для визначення світності Сонця необхідно знати:
 - А. Радіус Сонця.
 - Б. Радіус Землі.
 - В. Відстань від Землі до Сонця.
 - Г. Температуру на поверхні Землі.
 - Д. Температуру на поверхні Сонця.
3. Які з цих хімічних елементів найбільш поширені на Сонці?
 - А. Оксиген і Ферум.
 - Б. Гідроген і Гелій.
 - В. Гідроген і Оксиген.
 - Г. Нітроген і Оксиген.
 - Д. Ферум і Нітроген.
4. У результаті якого процесу виділяється енергія в надрах Сонця?
 - А. Ядерної реакції.
 - Б. Гравітаційного стиснення.
 - В. Термоядерної реакції.
 - Г. Горіння водню.
 - Д. Падіння метеоритів.
5. Грануляція у фотосфері утворюється в результаті того, що:
 - А. Корона дуже гаряча.
 - Б. Енергія передається конвекцією.
 - В. Плями дуже холодні.
 - Г. Випромінюються нейтрино.
 - Д. На поверхні Сонця є хвилі.
6. Сонце називають жовтою зорею, у той час як для більшості людей воно має білий колір. Як пояснити цю суперечність?
7. Що знижує температуру всередині сонячних плям?
8. Яке явище астрономи називають сонячною активністю?
9. Які процеси на Сонці можуть суттєво впливати на стан земної атмосфери?
10. Що є джерелом енергії Сонця?
11. Обчисліть, яку сонячну енергію зміг би поглинути за 1 год дах вашого будинку опівдні.



Диспути на запропоновані теми

12. Які екологічно чисті джерела енергії можна запропонувати для використання в населеному пункті, де розташована ваша школа?



Завдання для спостережень

Увага! При спостереженнях не можна дивитися на диск Сонця як неозброєним оком, так і в телескоп без спеціального світлофільтра!

13. Підрахуйте загальну кількість сонячних плям та намалуйте їхнє розташування на диску Сонця. Зверніть увагу, що плями часто з'являються парами. Через декілька днів повторіть спостереження, і ви помітите обертання Сонця навколо осі — плями змістилися. Кількість плям за цей час теж може змінитися.



Ключові поняття і терміни:

Гранули, зона конвекції, зона радіації, корпускулярне випромінювання, корона, магнітна буря, протуберанці, світність Сонця, сонячний вітер, сонячна пляма, сонячна стала, фотосфера, хромосфера, хромосферний спалах, ядро.

§ 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

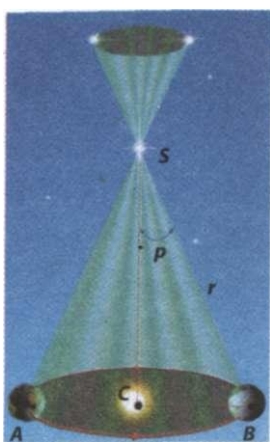


Рис. 13.1. Річний паралакс визначає кут, під яким було б видно від зорі велику піввісь земної орбіти (1 а. о.) в перпендикулярному до променя зору напрямку

Зорі розташовані в мільйони разів далі, ніж Сонце, тому горизонтальні паралакси зір відповідно в мільйони разів менші, і виміряти такі малі кути ще нікому не вдалося. 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 визначити ще за часів М. Коперника, що могло стати незаперечним доказом обертання Землі навколо Сонця та утвердження геліоцентричної системи світу. Але 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 *Проксіма Кентавра* — $p=0,76''$, але 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
Проксіма	4,2	1,3
Барнарда	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
Альтаір	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: $1 \text{ пк} \sim 3,26 \text{ св. року}$.

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 та 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 Зем-

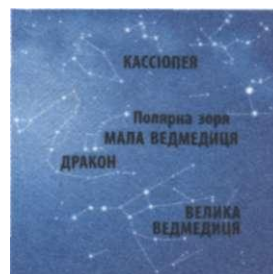


Рис. 13.2. Зорі поблизу Полярної, що використовують як стандарт для визначення видимих зоряних величин

§ 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 зоряних величин двох світил дорівнює одиниці, то відношення блиску буде $\sim 2,512$.

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
Альтаір	+0,8	+2,2
Денеб	+1,3	-7,4

Для визначення видимих зоряних 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 стандарту найслабкіші зорі, які ще можна побачити неозброєним оком, мають зоряну величину $+6^m$, у бінокль видно зорі до $+8^m$, у шкільний 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 $m = -26,7^m$.

3 Абсолютні зоряні величини і світність зорі

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

Абсолютна зоряна величина M визначає яскравість, яку мала б зоря на стандартній відстані 10 пк.
Світність зорі визначає потужність випромінювання зорі.
За одиницю світності приймається потужність випромінювання Сонця $4 \cdot 10^{26}$ Вт

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 прожектор. 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 абсолютній. Сонце на відстані 10 пк мало б вигляд досить слабкої зорі п'ятої зоряної величини, тобто абсолютна 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 формули:

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

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:

$$L = \frac{E}{E_{\odot}} = 10^{0,4(5-M)} \quad (13.6)$$

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
Альтаір	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, незброєним 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 окулярі 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: *A0, A1... A9*.

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

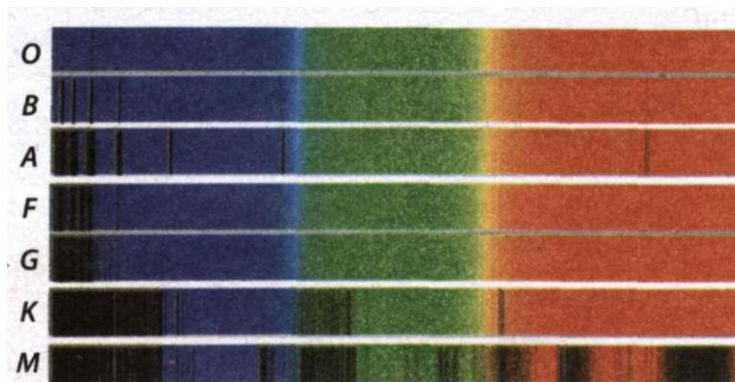
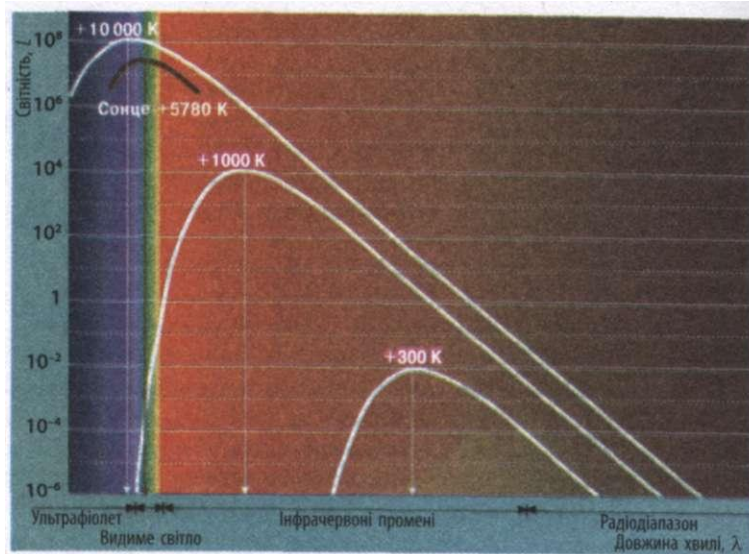


Рис. 13.3. Кольори зір визначають 7 основних спектральних класів. Найгарячіші зорі синього кольору належать до спектрального класу *O*, найхолодніші червоні зорі — до спектрального класу *M*. Сонце має температуру фотосфери 5780 К, жовтий колір і належить до спектрального класу *G*

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 великі телескопи ще до недавнього часу неможливо було виміряти їхні кутові розміри — усі зорі мають вигляд однакових світлих точок.

Радіус зорі можна визначити, вимірюючи її світність та температуру поверхні

Для визначення радіуса зір астрономи використовують закон Стефана—Больцмана:

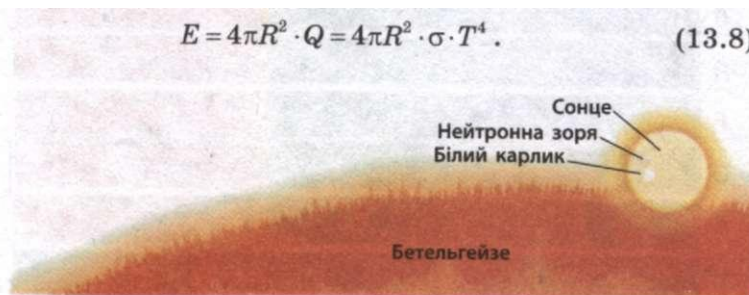
$$Q = \sigma \cdot T^4, \tag{13.7}$$

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:

$$E = 4\pi R^2 \cdot Q = 4\pi R^2 \cdot \sigma \cdot T^4. \tag{13.8}$$

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. Герцшпрунг (1873—1967) та Г. Рессел (1877—1955) запропонували діаграму, на якій можна позначити місце кожної зорі, якщо відомі її температура та світність. Її назвали діаграмою спектр—світність, або діаграмою Герцшпрунга—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 скупчення 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.

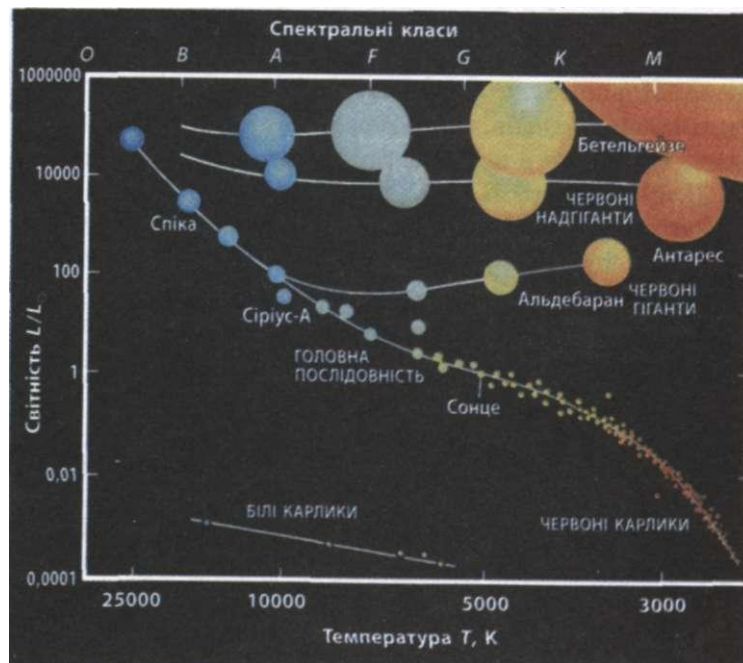
Червоні карлики — зорі з масою меншою, ніж сонячна, але більшою, ніж у Юпітера. Температура і світність цих зір залишаються сталими протягом десятків мільярдів років.

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

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 густина цих зір. Наприклад, радіус *червоного гіганта Бетельгейзе* у 400 разів більший, ніж радіус Сонця, але маса цих зір майже однакова, тому червоні гіганти спектрального класу M мають середню густину в мільйони разів меншу, ніж густина земної атмосфери. Типовим представником білих карликів є супутник Сіріуса, радіус якого майже такий, як радіус Землі, а густина має фантастичну величину $3 \cdot 10^6$ г/см³, тобто наперсток речовини білого карлика важив би на Землі 10000 Н. Ще більшу густину 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 у 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 однакові зорі, які мають однакові фізичні параметри — масу, температуру, світність, радіус. Наприклад, багато зір належать до спектрального класу G (Капелла, α Кентавра тощо), але немає зір, які були б

точно такими, як Сонце. Напевно, протягом еволюції зорі змінюють свої фізичні параметри, тому малоймовірно, що ми зможемо відшукати в космосі ще одну зору, 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. Світловими 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 абсолютна 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. А; Б. В; В. F; Г. G; Д. К.
- Виберіть температуру на поверхні та спектральний клас, до якого належить Сонце:
А. А 10000 К; Б. В 10000 К; В. С 6000 К; Г. G 6000 К; Д. М 3000 К.
- 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 (о Ліри) дорівнює $0,12''$. Якою є відстань до неї у парсеках та світлових 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.

§ 14. Еволюція зір

Вивчивши цей параграф, ми:

- дізнаємося, як народжуються нові зорі;
- побачимо космічні катастрофи, коли вибухають старі зорі;
- довідаємося, чи перетвориться Сонце у чорну діру.

1 Зародження зір

Астрономи створили теорію еволюції зір завдяки тому, що в космосі можна спостерігати мільярди зір різного віку. Це трохи схоже на те, як за кілька годин можна описати ріст та розвиток дерева, яке існує десятки років,— треба тільки піти в ліс і вивчити дерева різного віку. Всесвіт — це своєрідний космічний парк, у якому зорі народжуються, певний час світять, а потім гинуть.



рис. 14.1. Туманність Зріона можна побачити іавіть неозброєним жом. Відстань до неї ілизько 1000 св. років



рис. 14.2. Туманність зоряному скупченні Ілеяди, з якої утворю яься нові зорі

Важко побачити зорю до її народження, поки вона не почне світитися у видимій частині спектра. Зорі зароджуються разом із планетами з розріджених газопилових хмар, які утворюються після вибуху старих зір. За допомогою сучасних телескопів астрономи виявили в космосі сотні таких величезних газопилових туманностей, де зараз відбувається утворення молодих світлів. Наприклад, такі своєрідні «ясла» новонароджених зір можна побачити в сузір'ї Оріон (рис. 14.1) та зоряному скупченні Плеяди (рис. 14.2).

Доля зорі та тривалість її життя залежать від початкової маси зародка зорі — протозорі. Якщо вона була в кілька разів більша, ніж маса Сонця, то під час гравітаційного стиснення утворюються гарячі зорі спектральних класів *O* та *B*. Протозорі з такою початковою масою, як маса Сонця, під час гравітаційного стиснення нагріваються до температури 6000 К. Протозорі з масою у кілька разів меншою, ніж сонячна, можуть перетворитися тільки на червоних карликів. Найменша маса, яка необхідна для початку термоядерних реакцій у надрах зорі, дорівнює майже 0,08 маси Сонця. Об'єкти меншої маси ніколи на зорі не перетворюються — вони будуть випромінювати енергію тільки в інфрачервоній частині спектра. Такі космічні тіла ми спостерігаємо навіть у Сонячній системі — це планети-гіганти Юпітер, Сатурн, Нептун (див. §9). Можливо, що в міжзоряному просторі кіль-

кість таких холодних інфрачервоних тіл (їх ще називають *коричневими карликами*) може бути набагато більшою, ніж видимих зір.

2 Зоря в стані гравітаційної рівноваги

Протягом свого тривалого життя кожна зоря може як збільшувати, так і зменшувати всі свої основні параметри — температуру, світність та радіус. Зорі на головній послідовності (рис. 13.6) перебувають у стані *гравітаційної рівноваги*, коли зовнішні шари за рахунок гравітації тиснуть до центра, у той час як тиск нагрітих газів діє в протилежному напрямку — від центра (рис. 14.3). Зоря в стані гравітаційної рівноваги не змінює своїх параметрів, бо інтенсивне випромінювання енергії з поверхні компенсується джерелом енергії в надрах — термоядерними реакціями. Такий процес триває доти, доки половина Гідрогену у ядрі не перетвориться на Гелій, і тоді інтенсивність термоядерних реакцій може зменшитися. Тривалість такої стаціонарної фази в житті зорі, коли її параметри довгий час залишаються сталими, залежить знову-таки від її маси. Розрахунки показують, що такі зорі, як Сонце, у стані рівноваги світять не менше ніж 10 млрд років. Більш масивні зорі спектральних класів *O*, *B*, у надрах яких термоядерні реакції протікають інтенсивніше, у рівновазі світять 100 млн років, а найдовше «мерехтять» маленькі червоні карлики — їхній вік може перевершувати 10^{11} років.

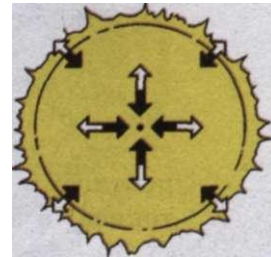


Рис. 14.3. Зоря в стані рівноваги: зовнішні сили гравітації врівноважені силами газового тиску

3 Змінні зорі

Змінні зорі протягом певного часу можуть змінювати свою яскравість. Розрізняють такі типи змінних зір:

- блиск зорі може змінюватися в кратних системах, коли відбуваються періодичні затемнення об'єктів, які мають різну світність. Прикладом такої змінної зорі є *Алголь* — відома подвійна зоря р Персея;
- інший тип змінних зір називають *фізично змінними*. Зміна яскравості таких зір пов'язана з тим, що термоядерні реакції в центрі зорі з часом будуть протікати не так інтенсивно, тоді порушення гравітаційної рівноваги буде помітне у зміні її розмірів і температури на поверхні — на діаграмі *спектр—світність* такі зорі не мають постійного положення і зміщуються з головної послідовності праворуч.

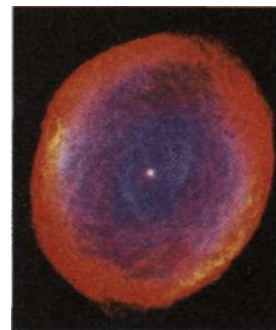


Рис. 14.4. Планетарна туманність утворюється, коли порушується рівновага і зоря скидає зовнішні шари

Із різних типів фізично змінних зір привертають увагу *цефеїди*. Їхня назва походить від сузір'я, у якому вперше помітили таку змінну зорю — 5 Цефея. Розрахунки періоду зміни яскравості показали, що цефеїди змінюють свій радіус, тому їх можна вважати своєрідними маятниками, які коливаються у своєму гравітаційному полі. Період пульсацій залежить від маси та радіуса зорі, наприклад 5 Цефея пульсує з періодом 5,4 доби.

Пульсації приводять до того, що цефеїда з часом перетворюється на гіганта, який може поступово скинути свою оболонку. Такі об'єкти астрономи помилково назвали *планетарними туманностями* — колись вважали, що так народжується нова планетна система (рис. 14.4). Гаряче ядро такої планетарної туманності поступово стискується і перетворюється на білого карлика.

4 Нові та Наднові зорі

Зорі з масою у кілька разів більшою, ніж сонячна, закінчують своє життя грандіозним вибухом. У 1054 р. китайські астрономи спостерігали надзвичайно яскраву нову зорю, яку було видно вдень протягом кількох тижнів. Цю незвичайну зорю помітили також літописці в Київській Русі, бо це був рік смерті Ярослава Мудрого.



»ис. 14.5. Туманність Краб, яка утворилася після спалаху Наднової 1054 р.

Вважалося, що поява нової зорі віщувала «Боже знамення» на сумну подію в житті Русі. Сьогодні на тому місці, де спалахнула ця таємнича зоря, видно *туманність Краб* (рис. 14.5). Зорі спектральних класів *O* та *B*, які протягом кількох днів збільшують свою яскравість у сотні мільйонів разів, називають *Новими*. Інколи Нова випромінює майже стільки ж енергії, скільки виділяють разом усі зорі в галактиці — такі зорі мають назву *Наднових*. Туманність Краб у сузір'ї Тельця є залишком такої Наднової, що спалахнула 4 липня 1054 р. Вірніше, якщо врахувати, що туманність Краб розміщується на відстані 6500 св. років від Землі, то спалах Наднової стався ще 7500 років тому.

Нова зоря — вибухово змінна подвійна зоря, яка раптово збільшує свою світність в 100—10000000 разів (10^2 — 10^7 разів).
Наднова — зоря, світність якої збільшується за кілька днів у мільярди разів

Останній спалах Наднової астрономи спостерігали в минулому тисячолітті 24 лютого 1987 р. у сусідній галактиці — *Великій Магеллановій Хмарі*. Вибухнула гігантська зоря спектрального класу *B*, яка кілька тижнів світила яскравіше від усіх зір у галактиці (рис. 14.6). Приблизно за 20 год перед спалахом Наднової було зареєстровано ударну хвилю нейтринного потоку, який тривав 13 с і за потужністю був у десятки тисяч разів більший, ніж енергія в оптичному діапазоні. Таким чином, у 1987 р. астрономи

вперше отримали інформацію про далеку космічну подію, яка відбулася майже 200000 років тому.

Після спалаху зорі всі планети, які обертали-ся навколо неї, випаровуються і перетворюються у газопилову туманність, з якої в майбутньому може утворитися нове покоління зір. Тобто у Всесвіті спостерігається своєрідний кругообіг речовини: зорі — спалах зір — туманність — і знову народження молодих зір (рис. 14.7).

Білий карлик	
Сіріус — В	
Маса	1,1M _☉
Радіус	0,008R _☉
Світність	0,002
Температура	10 000 К,
Густина	3·10 ⁶ г/см ³



Рис. 14.6. Спалах Наднової у сусідній галактиці Велика Магеллана Хмара (1987 р.)



Рис. 14.7. Кругообіг речовини при утворенні та руйнуванні зір. Під час спалаху Нових утворюються важкі хімічні елементи, тому нове покоління планетних систем утворюється з іншим хімічним складом. Планети земного типу, які мають тверду поверхню, могли виникнути тільки на руїнах старої планетної системи, коли під час спалаху Нових утворюються Si, Fe, Al



Для допитливих

Після спалаху Нової чи Наднової залишається ядро, у якому відсутнє джерело енергії. Така зоря поступово зменшує свій радіус і світить тільки завдяки гравітаційному стисненню — потенціальна енергія зорі перетворюється на тепло. При стисненні маса залишається сталою, тому збільшується густина, і зоря перетворюється на білого карлика. Якщо початкова маса зорі була в кілька разів більшою, ніж сонячна, то білий карлик може перетворитись на нейтронну зорю, радіус якої не перевищує кількох десятків кілометрів, а густина сягає фантастичної величини 10^{15} г/см³. Першу нейтронну зорю випадково відкрили в Кембриджському університеті в 1967 р. За допомогою невеликої антени астрономи зареєстрували радіосигнал, який повторювався з постійним періодом 1 с. Уночі в тому напрямку, звідки надходили імпульси, не було видно жодної зорі, тому астрономи навіть висунули гіпотезу про радіосигнал штучного походження від позаземної цивілізації. Потім спостереження показали, що такі періодичні сигнали надходять на Землю від сотень інших невидимих джерел, які було названо *пульсарми*. Один із пульсарів було виявлено навіть у центрі знаменитої туманності Краб.

5 Пульсари і нейтронні зорі

Сучасні теоретичні розрахунки показують, що пульсари і нейтронні зорі — це одні й ті самі об'єкти. Внаслідок стиснення *нейтронної зорі* має виконуватися закон збереження моменту імпульсу. Цей закон часто демонструють на льоду фігуристи, коли треба викликати швидке обертання свого тіла навколо осі. Спортсмени спочатку починають повільно обертатися навколо осі з витягнутими в різні боки руками. Потім поступово руки підводять до тулуба, при цьому кутова швидкість обертання різко зростає. Таке саме зростання кутової швидкості спостерігається при зменшенні радіуса зорі. Наприклад, зараз Сонце обертається навколо своєї осі з періодом приблизно 28 діб. Якби радіус Сонця зменшився до 10 км, то його період обертання дорівнював би 1 с.

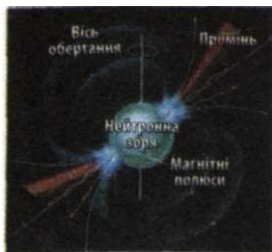


Рис. 14.8. Періодичні сигнали пульсарів пояснюються великою кутовою швидкістю обертання нейтронної зорі навколо осі

Пульсар — джерело електромагнітних хвиль, яке випромінює енергію у вигляді імпульсів із певним періодом. Те саме, що нейтронна зоря

При гравітаційному стисненні настільки зростає напруженість магнітного поля зорі, що вона «випускає» випромінювання тільки через магнітні полюси у вигляді своєрідних «прожекторів», які описують у космосі величезний конус. Можливо, що в Галактиці існують мільйони нейтронних зір, але зареєстровано тільки кілька сотень у вигляді пульсарів (рис. 14.8), бо більшість таких «прожекторів» не спрямовані на Землю.

6 Чорні діри

Чорні діри (рис. 14.9) утворюються на останній стадії еволюції зір із масою більшою ніж $3M_{\odot}$. Така дивна назва пов'язана з тим, що ці тіла мають бути невидимими, бо не випускають за свої межі світла. З іншого боку, такі об'єкти втягують все з навколишнього простору. Якщо космічний корабель потрапить на межу чорної діри, то вирватися з її поля тяжіння він не зможе, бо друга космічна швидкість біля її поверхні дорівнює швидкості світла 300000 км/с. Якщо у формули (5.5) і (5.2) замість V_2 ввести швидкість світла, то отримаємо межу, до якої може стискатися зоря, поки друга космічна швидкість біля її поверхні не досягне швидкості світла:

Чорна діра не випускає з поля тяжіння ні елементарних частинок, ні електромагнітні хвилі. Радіус чорної діри залежить від її маси, і може бути від кількох сантиметрів або метрів до мільярдів кілометрів

$$R_0 = \frac{2GM}{c^2}, \quad (14.1)$$

де R_0 — граничне значення радіуса; G — гравітаційна стала; M — маса об'єкта; $c = 300\,000$ км/с — швидкість світла.

Із формули (14.1) можна визначити критичний радіус будь-якого космічного тіла з відомою масою. Наприклад, для Землі $R_0=1$ см, а для Сонця $R_0=3$ км — такий об'єкт не буде випускати з гравітаційного поля навіть квантів світла, тому він стає невидимим, і від нього ми не можемо отримати інформацію за допомогою електромагнітних хвиль. Подібних чорних дір, або своєрідних зоряних могил, у космосі може налічуватися навіть більше, ніж звичайних зір. Отримати інформацію про чорну діру можна за допомогою і гравітаційного поля, яке безслідно не може зникнути.

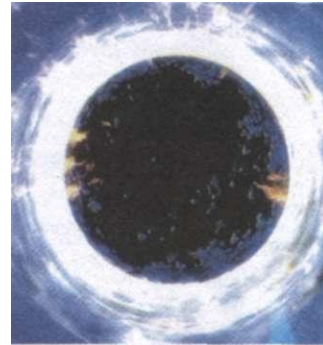


Рис. 14.9. Чорна діра



Для допитливих

Уявіть собі, що космічний корабель наближується до чорної діри. Його швидкість має поступово зростати до швидкості світла. Але згідно з теорією відносності швидкість матеріального тіла, маса спокою якого відрізняється від нуля, ніколи не досягне швидкості світла. Тобто за земним годинником уявний космічний корабель ніколи не долетить до межі чорної діри, бо час для космонавтів на борту корабля буде сповільнюватися. Якщо космонавти будуть підтримувати зв'язок із Землею за допомогою радіо, то сповільнення часу проявиться у тому, що сигнали з корабля будуть надходити все рідше і рідше. З іншого боку, космонавти на космічному кораблі спостерігатимуть зовсім інший плин часу — сигнали від землян будуть надходити все частіше і частіше. Тобто космонавти на кораблі, який падає у чорну діру, могли б побачити далеке майбутнє нашого світу, але вони не зможуть передати нам інформацію про наше майбутнє, бо сигнал через межу чорної діри ніколи не досягне Землі...

7 Еволюція Сонця

Теоретичні розрахунки показують, що такі зорі, як Сонце, ніколи не стануть чорними дірами, бо вони мають недостатню масу для гравітаційного стиснення до критичного радіуса. У стані гравітаційної рівноваги Сонце може світити 10^{10} років, але ми не можемо точно визначити його вік, тобто скільки часу пройшло від його утворення. Правда, за допомогою радіоактивного розпаду важких хімічних елементів можна визначити приблизний вік Землі — 4,5 млрд років (рис. 14.10), але Сонце могло утворитися раніше, ніж сформувалися планети. Якщо все таки зорі й планети формуються одночасно, то Сонце може світити в майбутньому ще 5 млрд років. Після того як у ядрі весь Гідроген перетвориться на Гелій (див. §12), порушиться рівновага в надрах Сонця, і воно може перетворитись на змінну пульсуючу зорю — цефеїду. Потім через нестабільність радіус Сонця почне збільшуватись, а температура фотосфери знизиться до 4000 К — Сонце перетвориться на червоного гіганта. На небосхилі Землі буде світити велетенська червона куля,



Рис. 14.10. Сонячна система утворилася 5 млрд років тому з величезної газопилової хмари

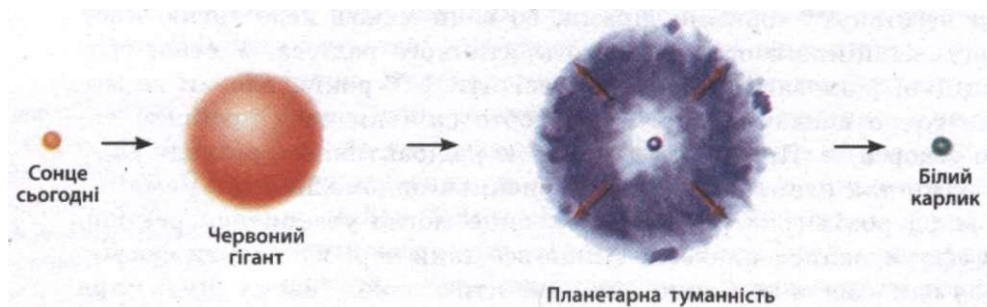
кутовий діаметр якої збільшиться в 10 разів у порівнянні із сучасним Сонцем і буде сягати 5° . Блакитного неба на Землі не стане, бо світність майбутнього Сонця зросте в десятки разів, а температура на поверхні нашої планети буде більшою ніж 1000 К. Википлять океани, і Земля перетвориться на страшну гарячу пустелю, чимось схожу на сучасну Венеру. У Сонячній системі така температура, яка зараз на Землі, буде тільки на околицях — на супутниках Сатурна та Урана. У стадії червоного гіганта Сонце буде світити приблизно 100 млн років, після чого верхня оболонка відірветься від ядра й почне розширюватись у міжзоряний простір у вигляді планетарної туманності (рис. 14.11). При розширенні напевно випаруються всі планети земної групи, і на місці Сонця залишиться білий карлик — маленьке гаряче ядро, у якому колись протікали термоядерні реакції. Радіус білого карлика буде не більшим, ніж у Землі, але густина сягатиме 10^{10} кг/м³. Білий карлик не має джерел енергії, тому температура його поверхні поступово знизиться, і остання стадія еволюції нашого Сонця — холодний чорний карлик.

Рис. 14.11. Еволюція Сонця в майбутньому. Сонце може світити ще 5 млрд років. Потім воно перетвориться на червоного гіганта, який спалить усі живі істоти на Землі



Для допитливих

Сонячна система утворилася 5 млрд років тому з велетенської хмари газу і пилу. А раніше замість цієї хмари існувала зоря, яка вибухнула як Наднова. Тобто наше Сонце належить уже до другого (а можливо й третього) покоління зір, що мають багато важких хімічних елементів, з яких утворилися планети земної групи.



Висновки

У космосі постійно відбуваються народження молодих зір із газопилових туманностей та вибухи старих, коли утворюються нові туманності. Сонячна система утворилася близько 5 млрд років тому з велетенської газопилової хмари, яка

виникла на місці вибуху старої зорі. У стані рівноваги Сонце буде світити ще кілька мільярдів років, а потім перетвориться на червоного гіганта, який знищить усе живе на Землі...



Тести

- Які із цих зір світять довше за всіх?
А. Гіганти спектрального класу О. Б. Білі зорі спектрального класу А. В. Сонце. Г. Червоні гіганти спектрального класу М. Д. Червоні карлики спектрального класу М.
- Зорі якого спектрального класу мають найкоротше життя?
А. А. Б. В. F. Г. G. Д. К. Е. М.
- Який космічний об'єкт називають пульсаром?
А. Червоний гігант. Б. Нейтронну зорю. В. Білий карлик. Г. Пульсуючу зорю. Д. Червоний карлик.
- Термін «нова зоря» означає:
А. У космосі утворилася молода зоря. Б. Вибухнула стара зоря. В. Періодично збільшується яскравість зорі. Г. Відбуваються зіткнення зір. Д. Космічні катастрофи з невідомим джерелом енергії.
- У майбутньому Сонце може перетворитись:
А. На чорну діру. Б. На нейтронну зорю. В. На пульсар. Г. На червоного гіганта. Д. На червоного карлика. Е. На білого карлика.
- Коли параметри зорі залишаються сталими?
- Які зорі світять найдовше?
- Скільки часу може світити Сонце у стані рівноваги?
- Як гинуть зорі великої маси?
- Чи може зоря червоний карлик перетворитись на білого карлика?
- Чому пульсари періодично змінюють інтенсивність випромінювання?
- Визначте густину зорі білого карлика, який має діаметр 1000 км, а його маса дорівнює 10^6 кг.
- Визначте густину зорі Бетельгейзе, якщо її радіус у 400 разів більший від радіуса Сонця, а маса приблизно дорівнює масі Сонця.



Диспути на запропоновані теми

- Як на вашу думку, чи зможе вижити в Сонячній системі наша цивілізація, якщо Сонце в майбутньому перетвориться на червоного гіганта?



Завдання для спостережень

- Відшукайте на небі Велику туманність у сузір'ї Оріон і визначте, о котрій годині вона сходить, заходить і кульмінує.
- Відшукайте на небі яскраві зорі, які видно у вечірній час, і порівняйте їх із Сонцем.



Ключові поняття і терміни:

Змінна зоря, коричневий карлик, круговорот речовини, наднова зоря, нейтронна зоря, нова зоря, протозоря, планетарна туманність, пульсар, цефеїда, чорна діра.