

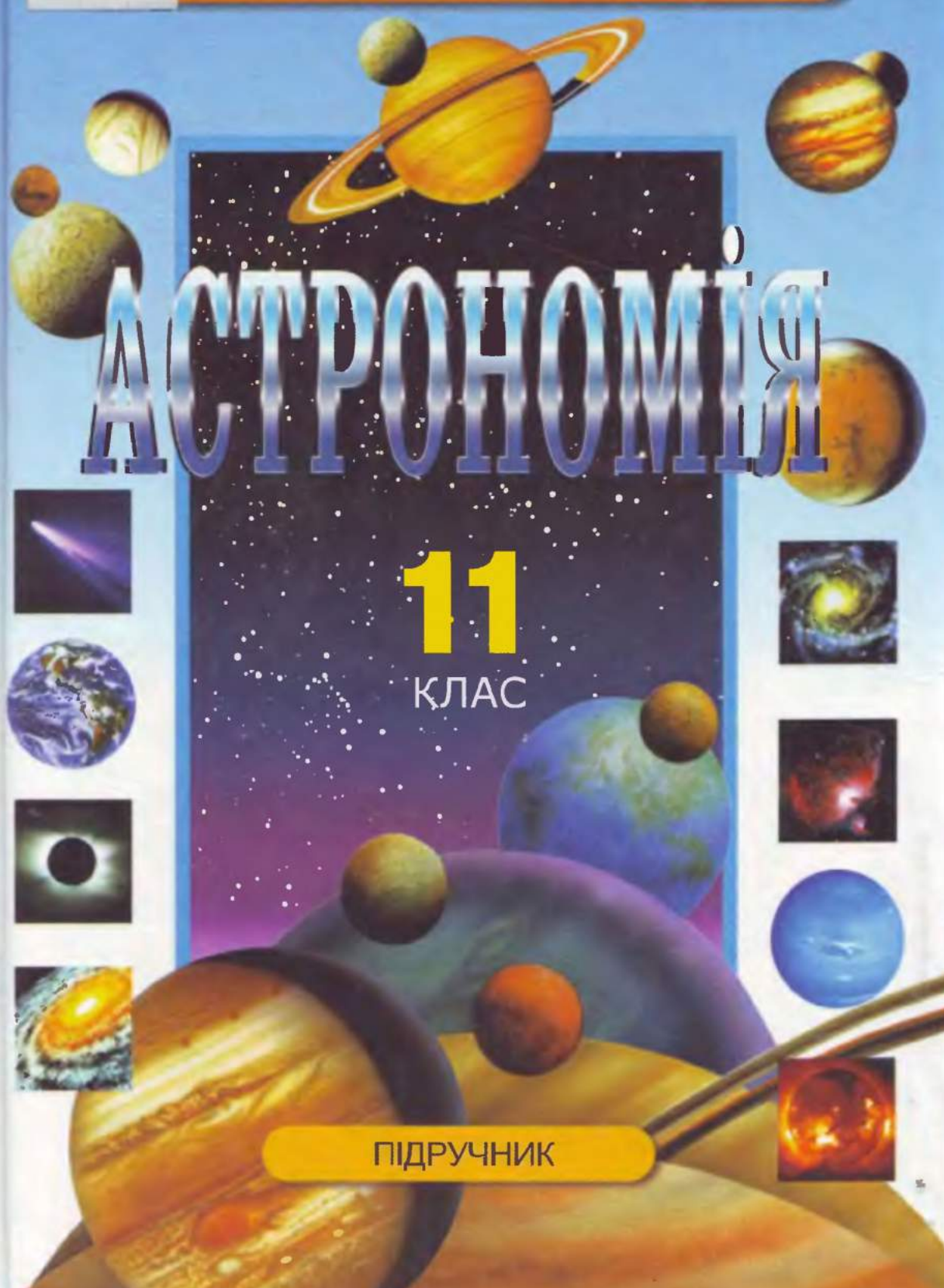
І.А. Климишин, І.П.Крячко

# АСТРОНОМІЯ

11

КЛАС

ПІДРУЧНИК



52(075)  
УДК 373.167.1  
ББК 22.6972  
К 49

*Рекомендовано Міністерством  
освіти і науки України  
(Лист № 1/11-743 від 13 березня 2001 р.)*

**Рецензенти:**

*проф., д-р фіз.-мат. наук М. І. Дзюбенко;  
канд. фіз.-мат. наук І. Б. Вавілова;  
вчитель вищої категорії сш № 242 м. Києва Л. Д. Благодаренко*

**Климишин І. А., Крячко І. П.**

**К49**      **Астрономія: Підручник для 11 класу загальноосвітніх навчальних закладів.—**  
**К.: Знання України, 2002.— 192 с.**  
**ISBN 966-7999-02-5**

ББК 22.6972

ISBN 966-7999-02-5

© Климишин І. А., 2002  
© Крячко І. П., 2002  
© “Знання України”, видання, 2002

# ЗМІСТ

## ПЕРЕДМОВА



- |   |    |
|---|----|
| § 1. Предмет астрономії.<br>Її розвиток і значення в житті суспільства..... | 7  |
| § 2. Короткий огляд<br>об'єктів дослідження в астрономії.....               | 10 |

## I. НЕБЕСНА СФЕРА. РУХ СВИТИЛ НА НЕБЕСНІЙ СФЕРІ



- |  |    |
|--|----|
| § 3. Небесна сфера. Сузір'я.<br>Відстані до небесних об'єктів. Зоряні величини | 16 |
| § 4. Основні точки і лінії небесної сфери.<br>Зоряний час.....                 | 21 |
| § 5. Системи небесних координат.....   | 24 |
| § 6. Сонячний час.<br>Співвідношення між зоряним і сонячним часом              | 27 |
| § 7. Видимий рух Сонця. Тропічний і зоряний рік.                               | 30 |
| § 8. Видимий рух Місяця.<br>Сонячні та місячні затемнення.....                 | 36 |
| § 9. Видимі рухи планет. Закони Кеплера.....                                   | 42 |
| § 10. Календар і його типи.....  | 47 |

## II. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



- |  |    |
|--|----|
| § 11. Сучасні наземні та орбітальні телескопи..... | 52 |
| § 12.* Випромінювання: приймання та аналіз.....    | 62 |

## III. НАША ПЛАНЕТНА СИСТЕМА



- |  |     |
|--|-----|
| § 13. Земля і Місяць.....                    | 68  |
| § 14. Планети земної групи.....              | 75  |
| § 15. Планети-гіганти та їхні супутники..... | 86  |
| § 16. Малі тіла у Сонячній системі.....      | 96  |
| § 17. Формування планетної системи.....      | 105 |

## IV. СОНЦЕ – НАЙБЛИЖЧА ЗОРЯ



- |  |     |
|--|-----|
| § 18. Основні відомості про Сонце.....             | 112 |
| § 19. Будова Сонця. Джерела його енергії.....      | 115 |
| § 20. Сонячна активність та її вплив на Землю..... | 118 |

## V. ЗОРІ. ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР



§ 21. Звичайні зорі.....	126
§ 22. Подвійні зорі.....	133
§ 23. Фізичні змінні зорі.....	135
§ 24. Еволюція зір. Нейтронні зорі. Чорні діри.....	139

## VI. НАША ГАЛАКТИКА



§ 25. Молочний Шлях. Зоряні скупчення та асоціації. Туманності.....	148
§ 26. Підсистеми Галактики та її спіральна структура.....	155

## VII. БУДОВА І ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ



§ 27. Галактики і квазари.....	160
§ 28. Проблеми космології.....	167
§ 29. Походження і розвиток Всесвіту.....	170

## VIII. ЖИТТЯ У ВСЕСВІТІ



§ 30. Про пошук життя за межами Землі.....	176
§ 31. Людина у Всесвіті.....	180

## ДОДАТКИ



1. Вказівки до астрономічних спостережень.....	185
2. Грецький алфавіт.....	187
3. Астрономічні знаки, символи і величини.....	187
4. Деякі фізичні та астрономічні величини.....	187
5. Дані про Землю, Місяць і Сонце.....	188
6. Відомості про планети Сонячної системи.....	188
7. Найяскравіші зорі, їхні сходи і заходи.....	189
8. Календарні таблиці.....	190
9. Список рекомендованої літератури.....	190

# ПЕРЕДМОВА



## ШАНОВНІ СТАРШОКЛАСНИКИ!

Ви починаєте вивчати новий навчальний предмет – астрономію. Не випадково астрономія вивчається у випускному класі середньої школи, адже настав час узагальнити знання, отримані на уроках фізики, хімії, географії, математики. Можна скласти для себе цілісну картину навколишнього світу в його найглобальнішому вимірі – Всесвіті.

Вивчаючи основи науки про Всесвіт, ви познайомитесь з природою планет Сонячної системи, окремих зір і велетенських зоряних систем, дізнаєтесь, як астрономи визначають відстань до небесних світил та їхню будову.

В основу цього курсу астрономії покладено наукові факти, закони і теорії. У свою чергу, розглядаються деякі припущення і гіпотези, пов'язані з питаннями, ще не розв'язаними сучасною астрономією.

Оскільки курс астрономії відносно короткий, то варто не лише уважно працювати з підручником, а й користуватись додатковою літературою. Підручник зорієнтовано на вашу активну участь у вивченні матеріалу. Тому намагайтеся самостійно знайти відповіді на запитання, наведені після кожного параграфа, а також виконати подані вправи.

У тексті підручника авторами заокруглені деякі числа для зручності їхнього сприйняття і запам'ятовування.

Окремі розділи підручника позначено зірочкою (\*). Це означає, що вони дещо складніші для засвоєння і не обов'язкові для всіх.

Кожний розділ завершується переліком того, що корисно знати і вміти, вивчивши конкретну тему.

Обов'язково навчіться користуватись картою зоряного неба, даною до цього підручника. Бажано використовувати на уроках астрономії також контурні карти зоряного неба та робочий зошит.

Астрономія – спостережна наука, тому спостереження небесних світил – важлива частина курсу астрономії. Обов'язково проводьте самостійні спостереження згідно з рекомендаціями підручника і завданнями вчителя. Для цього використовуйте «Астрономічний календар» на поточний рік, бажано мати також бінокль чи телескоп.

Отже, ви працюєте з підручником астрономії, ініціатором створення якого була Українська астрономічна асоціація, що її очолює відомий український астроном Я. С. Ядків. Автори висловлюють щире подяку всім, хто допомагав у підготовці цього підручника.

**А вам, старшокласники, бажаємо успіхів у вивченні**

## **АСТРОНОМІЇ!**



## 1. Предмет астрономії.

### Її розвиток і значення в житті суспільства

Астрономія (від грец. «астрон» – «зоря», «номос» – «закон») – наука про небесні світила, про закони їхнього руху, будови та розвитку, а також про будову і розвиток Всесвіту в цілому.

Астрономія вивчає всю сукупність небесних світил: планети та їхні супутники, комети і метеорні тіла, Сонце, зорі, зоряні скупчення, туманності, галактики, а також речовину та поля, які заповнюють простір між світилами.

Астрономія істотно відрізняється від інших галузей природознавства. В основі інших природничих наук лежить експеримент. Фізик чи хімік можуть штучно створювати ті чи інші умови і досліджувати, як саме в цих умов впливає на перебіг певного процесу.

Основа астрономії – *спостереження*. Вивчаючи потоки електромагнітних хвиль від небесних світил, астрономи не тільки змогли визначити відстані до них, дослідити фізичні умови в їхніх надрах, встановити хімічний склад їхніх атмосфер, з'ясувати внутрішню будову, але й накреслити шляхи їхньої еволюції впродовж мільярдів років.

Можна сказати, що сучасна астрономія утримується на трьох «китах»: по-перше, це потужна світлоприймальна техніка, тобто телескопи найрізноманітнішими допоміжними приладами та світлореєструвальними пристосуваннями; по-друге, вся сукупність законів, ідей і методів теоретичної фізики, встановлених і розроблених за останні триста років; по-третє, весь складний і різноманітний математичний апарат у поєднанні з можливостями сучасної обчислювальної техніки.

Сучасна астрономія є настільки розвиненою наукою, що поділяється на понад десять окремих дисциплін, в кожній з яких використовуються лише її властиві методи досліджень, типи інструментів, поняттєвий апарат. Так, *астрометрія* розробляє методи вимірювання положень небесних світил і куткових відстаней між ними, вона ж розв'язує проблеми вимірювання часу. *Небесна механіка* з'ясовує динаміку руху небесних тіл. *Астрофізика* вивчає фізичну природу, хімічний склад і внутрішню будову зір. *Зоряна астрономія* досліджує будову нашої Галактики та інших зоряних систем. Питаннями походження і розвитку небесних тіл займається *космогонія*, а розвитком Всесвіту в цілому – *космологія* (від грец. «космос» – «Всесвіт», «гонос» – «походження», «логос» – «вчення»).

Астрономія – одна з найдавніших наук. Перші астрономічні записи, знайдені в давньоєгипетських гробницях, датуються XXI–XVII ст. до н. е. Так, відомо, що вже за 3000 років до н. е. єгипетські жерці за першою ранковою появою найяскравішої зорі земного зоряного неба *Сіріус* визначали час настання розливу річки Ніл. В давньому Китаї за 2000 років до н. е. видимі рухи Сонця та Місяця були так добре вивчені, що китайські астрономи передбачали настання сонячних та місячних затемнень.

Було принаймні три причини, що обумовили і стимулювали зародження і розвиток астрономії.

**Перший і**, безумовно, найдавніший стимул – це практичні потреби людей. Для первісних кочових племен, які займалися мисливством, дуже важливою обставиною було чергування темних безмісячних та світлих місячних ночей, що вимагало спостережень за зміною фаз Місяця.

З ритмічною зміною пір року пов'язаний річний цикл життя землеробів. Для народів Межиріччя, Єгипту, Китаю дуже важливим було завбачення розливів великих річок, у долинах яких вони жили. А це вимагало як спостережень за висотою Сонця над обрієм упродовж року, так і зіставлення подій на Землі з виглядом зоряного неба. Спираючись на ці спостереження, люди вже з давніх давен розробили певні системи лічби часу – *календарі*.

Спостерігаючи схід Сонця вранці і його захід увечері, вони змогли виділити для орієнтації в просторі один із головних напрямків – напрямок схід–захід. Слово «орієнтуватися» походить від латинського «орієнс», що означає «схід», а також «схід Сонця».

Для встановлення напрямку вночі люди запам'ятовували розташування на небі яскравих зір та їхніх окремих характерних груп, з'ясовували умови видимості світил на небі впродовж року.

**Другим** стимулом для ретельних спостережень зоряного неба, а загалом – для нагромадження астрономічних знань і розвитку астрономії, були астрологічні завбачення.

Вже в III тис. до н. е. давні вавілоняни уважно слідкували за рухом так званих «блукаючих світил», які, на відміну від нерухомих зір, не займали постійних положень на небі, а рухались, переміщаючись із сузір'я в сузір'я. Від давніх греків до нас дійшла їхня загальна назва – *планети*, від римлян – власні назви: *Меркурій, Венера, Марс, Юпітер і Сатурн*. До числа планет у ті часи відносили ще й *Сонце та Місяць*, бо вони також «блукали» небом по сузір'ях.

Не знаючи справжніх причин руху планет на небі, давні спостерігачі склали уявлення, за яким Сонце, Місяць і згадані п'ять світил є «провісниками волі богів». Наприклад, на клинописних табличках, датованих 2300 р. до н. е., читаємо: «Якщо Венера з'являється на сході в місяці айяру і Великі та Малі Близнята оточують її, і всі чотири, як і вона, темні, тоді цар Елама буде уражений хворобою і не залишиться живим».

Понад 4000 років тому зародилась *астрологія* – *необгрунтоване з позицій сучасної науки намагання за положенням планет на небі передбачати хід подій на землі: погоду та урожай, мир чи війну для держави, долю правителя, а згодом – і кожної людини*

**Третім і**, напевно, найголовнішим стимулом для розвитку астрономії було нестримне бажання людської думки проникнути в суть речей, усвідомити справжнє положення Землі й людини у Всесвіті, пізнати закони, за якими рухаються світила і які визначають їхнє народження, будову та подальший розвиток. Тобто астрономія задовольняла потребу людини в поясненні походження та розвитку навколишнього світу.

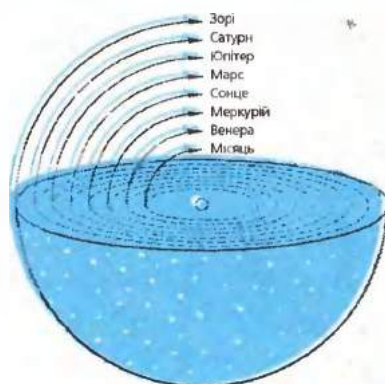


Відіграючи величезну світоглядну роль, астрономія завжди посідає чільне місце в духовному житті людства. Ось що писав з цього приводу А. Пуанкаре: «Астрономія корисна, тому що вона підносить нас над самими самими; вона корисна, тому що вона велична; вона корисна, тому що вона прекрасна. Вона показує нам, яка нікчемна людина тілом і яка велична вона духом, бо розум її у змозі досягнути сяючі безодні, де її тіло – лише темна точка, у змозі насолоджуватись їхньою безмовною гармонією. Так приходимо ми до усвідомлення своєї могутності, і це усвідомлення ... робить нас сильнішими».

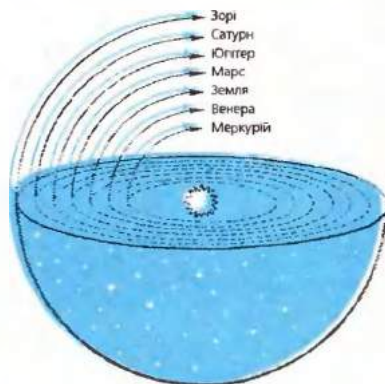
Астрономія зароджувалася в різних куточках планети: у Межиріччі, Китаї, Єгипті – скрізь, де, усвідомивши себе, людина організовувала своє життя у певній спільноті. Ясна річ, у ті часи відповіді на питання про будову й походження навколишнього світу і про місце Землі у ньому люди давали на підставі своїх безпосередніх вражень та відчуттів. Тож не випадково склалось уявлення про те, що Земля нерухома і знаходиться в центрі світу. Як очевидний факт приймалося, що Сонце, Місяць і весь небосхил обертаються навколо неї.

Довгий час у людей не було підстав сумніватись навіть у тому, що Земля плоска. Результати тривалих спостережень, зокрема видимих рухів Місяця, Сонця, планет, передавались із покоління в покоління. З часом вони допомогли змодельовувати рухи цих світил і завдяки цьому обчислювати їхні положення серед зір на багато років наперед. Найдосконаліше це вдалося зробити грецькому вченому Клавдію Птолемею біля 150 р. н. е. Його *геоцентрична модель світу* (мал. 1.1) була так ретельно опрацьована, що її використовували майже 1500 років.

У величну будівлю сучасної астрономії вкладали цеглини сотні вчених усіх країн. Зокрема, Микола Коперник (1473–1543) «зрушив Землю, зупинивши Сонце». Йоган Кеплер (1618–1621) на підставі двадцятирічних спостережень Тіхо Браге (1546–1601) встановив закони руху планет. Галілео Галілей (1564–1642), збудувавши перший телескоп і спрямувавши його в небо, відкрив чотири супутники Юпітера, фази Венери та багато іншого. Ці відкриття утверджували *геліоцентричну модель світу* (мал. 1.2) Коперника. Ісаак Ньютон (1643–1727), узагальнивши закони Кеплера про рух планет, відкрив закон всесвітнього тяжіння і заклав основи небесної механіки. Вільям Гершель



Мал. 1.1. Геоцентрична модель світу



Мал. 1.2. Геліоцентрична модель світу

(1738–1822) створив модель нашої Галактики – велетенської, але скінченних розмірів системи зір. Йозеф Фраунгофер (1787–1826) вперше використав спектральний аналіз в астрономії. Едвін Габбл (1889–1953) довів, що за межами нашої Галактики є незліченне число інших таких же зоряних систем і що цей світ галактик розширюється. Альберт Ейнштейн (1879–1955) створив теорію відносності, яка стала фундаментом космології.

Сучасна астрономія, залишаючись фундаментальною наукою, має величезне прикладне значення і безпосередньо пов'язана з науково-технічним прогресом людства. Вивчення різноманітних небесних тіл, які можуть перебувати в умовах і дуже високих, і дуже низьких температур, густин і тисків, збагачує важливими даними «земні» науки – фізику, хімію тощо. Закони небесної механіки покладено в основу теорії руху космічних апаратів, а практичну космонавтику уявити без астрономії взагалі неможливо. Дослідження Місяця і планет дозволяють значно краще вивчати нашу Землю.

Крім того, астрономія є однією з найголовніших наук, завдяки яким створюється наукова картина світу – система уявлень про найзагальніші закони будови і розвитку Всесвіту та його окремих частин. І ця наукова картина світу, більшою чи меншою мірою, стає елементом світогляду кожної людини.



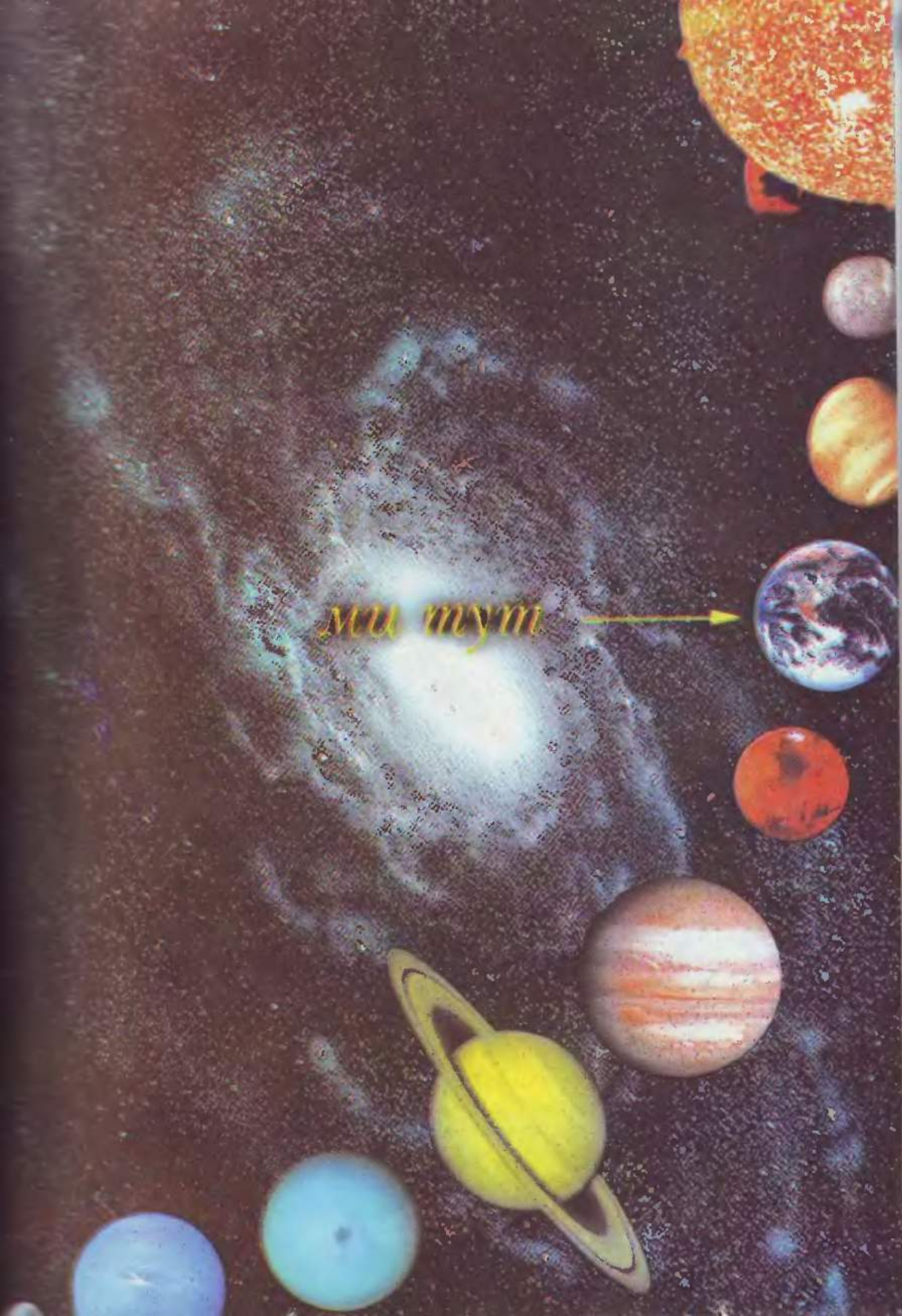
1. Що таке астрономія? 2. Які практичні питання вона допомагає вирішувати?
3. Який із стимулів розвитку астрономії для Вас найпереконливіший? Чому?
4. Що таке астрологія? 5. Чому, на Вашу думку, астрологія не є наукою?

## § 2. Короткий огляд об'єктів дослідження в астрономії

За багато віків свого розвитку астрономія накопичила величезний фактичний матеріал, який дозволяє скласти уявлення про будову Всесвіту в доступних для нас межах. Перш ніж розпочати вивчення основ астрономії, корисно познайомитися з цими уявленнями.

*Земля* – це холодне небесне тіло кулястої форми з порівняно невеликими розмірами – її радіус у середньому становить 6 370 км. На відстані близько 60 земних радіусів від Землі знаходиться її супутник – *Місяць* – також холодне кулясте тіло з розмірами, майже у чотири рази меншими за земні. Місяць обертається навколо Землі за 27,3 доби і супроводжує її у річному русі навколо Сонця. Оскільки Місяць, як і Земля, сам не світиться, ми бачимо лише ту його частину, яка освітлена Сонцем – звідси різні форми видимого Місяця, так звані *фази*.

Окрім Землі з Місяцем, навколо Сонця обертаються ще 8 подібних тіл або *планет*, які мають різні розміри і перебувають на різних відстанях від нього. Два з них – *Меркурій* і *Венера* – ближчі до Сонця, ніж Земля, решта знаходяться далі. Меркурій, найближчий до Сонця, має майже у два з половиною рази менший радіус, ніж Земля. Венера, наша сусідка і друга числом планета, майже однакова розміром із Землею. Четвертий



Мені туюти



систем, і також наш сусід, але з іншого боку – це планета *Марс*. Він майже удвічі менший від Землі за радіусом, знаходиться у півтора рази далі від Сонця, ніж Земля, і має два супутники – *Фобос* і *Деймос*. На відміну від Місяця супутники Марса – це невеликі тіла з середніми радіусами 14 км (Фобос) і 8 км (Деймос), які не мають правильної кулястої форми.

Меркурій, Венера, Земля і Марс належать до планет так званої *земної групи*, бо, попри розбіжності у зовнішніх характеристиках, вони мають між собою багато спільного.

Найбільша планета біля Сонця – *Юпітер*. Його радіус в одинадцять разів більший за земний; він перебуває від Сонця майже у 5 разів далі, ніж Земля, і має 28 відомих сьогодні супутників.

За Юпітером навколо Сонця кружляє *Сатурн*. Він має трохи менші розміри, ніж Юпітер, і вражає системою дуже яскравих кілець, які видно навіть у найпростіший телескоп. До сьогодні астрономи відкрили 30 супутників Сатурна.

Всі вищеназвані планети відомі з прадавніх часів, бо видимі на небі неозброєним оком. Далі йдуть також великі планети: *Уран* з розмірами, майже у 4 рази більшими за земні, що був відкритий за допомогою телескопа у XVIII ст. і має 17 супутників, та *Нептун*, до відкриття якого в XIX ст. привели теоретичні розрахунки на основі закону всесвітнього тяжіння; його система складається з 8 супутників, а розміри у 4 рази більші за земні.

Нарешті, найдалішою від Сонця (в 40 разів далішою, ніж Земля) є невелика планета *Плутон* (відкрита у 1930 р.) із своїм удвічі меншим супутником *Хароном*.

Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун утворюють групу *планет-гігантів*, для яких характерні потужні аміачно-метанові атмосфери та, крім супутників, системи кілець.

Окрім дев'яти названих великих планет, у Сонячній системі рухаються ще десятки тисяч *малих планет* або *астероїдів* (переважно між Марсом і Юпітером), велика кількість *комет*, а також безліч окремих дрібних *метеорних тіл*, які час від часу влітають з великою швидкістю в атмосферу Землі, нагріваються у її щільних шарах і спалахують, створюючи ефект «падаючих зір». Міжпланетний простір заповнений великою кількістю *пилу* та *газу*.

**Сонце та всі тіла, що обертаються навколо нього, утворюють Сонячну систему.** Як наймасивніше тіло серед інших, Сонце займає центральне положення в цій сім'ї. Воно у 109 разів більше за радіусом, ніж Земля, а його маса становить 99,86 % загальної маси всіх тіл, які входять до складу Сонячної системи. Середня відстань від Землі до Сонця становить майже 150 мільйонів кілометрів. Сонце – найближча до Землі *зоря* – головне джерело енергії в нашій планетній системі і «керує» рухом усіх тіл, які знаходяться біля нього.

Зорі дуже далекі від нас. Коли в середині XIX ст. вдалось виміряти віддалі до зір, то виявилось, що навіть найближча з них – *Проксима* із сузір'я Кентавра – така далека, що світло зі швидкістю 300 000 км/с летить від неї до Сонця 4,3 року. Інші зорі знаходяться ще далі. Є такі, від яких світло летить десятки, сотні, тисячі й навіть десятки тисяч років. Щоб усвідомити

масштаби відстаней між зорями, досить зазначити, що світло від Сонця летить до нас лише 8,3 хвилини. Всі зорі за своєю природою схожі на Сонце і в той же час за своїми характеристиками можуть дуже відрізнятись від нього.

Дослідження показують, що більшість зір на нашому небі входять до так званих *кратних систем* – коли зорі, які ми бачимо поодинокими, насправді складаються з двох, трьох чи й більшої кількості компонентів, що обертаються навколо спільного центра мас. Виявлено зорі різноманітної природи, встановлено шляхи їхньої еволюції.

В міжзоряних просторах знаходиться багато пилу і газу, які часом утворюють величезні за розмірами та об'ємом *туманності*. Газові туманності, поблизу яких є яскраві зорі, світяться. *Пиллові хмари*, навпаки, мають вигляд темного провалля на яскравішому тлі.

Кількість зір на небі здається незліченною. Та виявляється, що неозброєним оком їх можна побачити не так вже й багато – лише близько 3 000 водночас. Якщо ж поглянути на зоряне небо в телескоп або сфотографувати його, то виявиться, що насправді зір набагато більше. Проте розміщені вони на небі нерівномірно. Основна їх кількість зосереджена в районі іскристої стрічки *Молочного Шляху* (в Україні вживають назву *Чумацький Шлях*).

Телескопічні спостереження вже давно показали, що Сонце і всі зорі, які ми бачимо, являють собою лише мізерну частку велетенської за розмірами і кількістю складових *зоряної системи* під назвою *Галактика*. Поглянувши на нашу Галактику здалеку, ми б побачили, що зверху вона схожа на спіраль з двома зоряними рукавами, а збоку нагадує двоопуклу лінзу. Діаметр Галактики такий великий, що світло перетне його лише за 100 000 років. Сонце знаходиться приблизно посередині між околицями Галактики та її центром, між двома спіральними рукавами.

Та світ не закінчується за межами нашої Галактики. У Всесвіті є багато інших зоряних систем, подібних до нашої. Вони знаходяться так далеко, що світло летить від них сотні тисяч, мільйони і мільярди років. У наш час дедалі досконаліші спостережні засоби дозволяють виявляти в глибинах Всесвіту все нові й нові галактики.

Загальна кількість галактик повинна сягати багатьох мільярдів. Зібрані у скупчення різної потужності, вони утворюють своєрідну ажурну просторову сітку, де згущення, ланцюжки і надскупчення галактик оточують ділянки простору дуже низької густини. Вся видима частина Всесвіту, доступна сучасним засобам досліджень, називається *Метагалактикою*. Можна припустити існування й інших метагалактик.

Все в навколишньому світі, куди б ми не подивились – від Сонячної системи до грандіозних скупчень галактик – постійно змінюється і рухається. Планети рухаються відносно Сонця, Сонце разом з планетами – відносно зір, всі зорі – відносно центра Галактики, а вона, у свою чергу, – відносно інших галактик. В постійному розширенні знаходиться Метагалактика.



2.1. Підготуйте усне повідомлення на тему «Мої знання і уявлення про Всесвіт».



# I. НЕБЕСНА СФЕРА. РУХ СВІТИЛ НА НЕБЕСНІЙ СФЕРІ

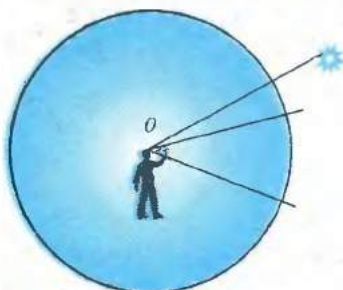
### § 3. Небесна сфера. Сузір'я. Відстані до небесних світил. Зоряні величини

**1. Поняття небесної сфери.** Зоряне небо!.. Напевне, немає людини, яку б не вражала його витончена довершеність, його незбагненна краса і таємничість. Недаремно давні греки дали всьому зоряному Всесвіту назву *космос*, що означає – оздоба, прикраса. І в цьому немає нічого дивного! Свого часу М. Коперник висловився з захопленням: «...Бо що може бути чарівнішим від небосхилу, який вміщує у собі все прекрасне?»

Розмірковуючи над будовою зоряного Всесвіту, філософ Арістотель (384–322 рр. до н. е.) стверджував: «Всесвіт – досконалий, а тому сферичний, бо сфера – єдина досконала фігура». Згідно з його розрахунками, радіус Всесвіту, тобто відстань до сфери зір, має бути у дев'ять разів більшою, ніж відстань від Землі до Сонця, а Земля, за його уявленнями, займає центральне положення у Всесвіті, адже «усі важкі тіла прямують до центра Землі, а оскільки будь-яке тіло прямує до центра всесвіту, то Земля мусить перебувати нерухомо в цьому центрі». Щоправда, інший відомий грецький філософ Демокріт (460–370 рр. до н. е.), а ближче до наших часів Галілей до-

водили протилежне: Всесвіт – безмежний, зорі перебувають на різних відстанях від Землі, але ця різниця у відстанях на око не сприймається, тому і здається, що зорі знаходяться на внутрішній поверхні деякої сфери. Це виявилось і справді так!

Сьогодні ми знаємо, що немає сфери над нашими головами, знаємо, що зорі дуже далекі від нас, та поняття *небесної сфери* залишилось, бо виявилось дуже зручним при вивченні видимих рухів світил та визначенні їхніх взаємних розташувань на небі.



Мал. 3.1. Небесна сфера

**Небесна сфера** – це уявна сфера довільного радіуса, в центрі якої знаходиться спостерігач і на яку спроектовано всі світила так, як він бачить їх у певний момент часу з певної точки простору.

Небесну сферу можна уявити у вигляді велетенського глобуса (довільного радіуса), схожого на глобус Землі, але розглядається він зсередини (мал. 3.1). Центр небесної сфери збігається з оком кожного окремого спостерігача. Як і на земному глобусі, на небесній сфері можна намалювати уявні лінії і певні точки, що дає змогу ввести систему небесних координат.

**2. Сузір'я, їхня кількість і межі.** Перше враження від спостереження зоряного неба – це незліченність зір і хаотичність їхнього розташування на небосхилі. Насправді ж зір, які можна побачити неозброєним оком, на небі Землі близько 6 000.

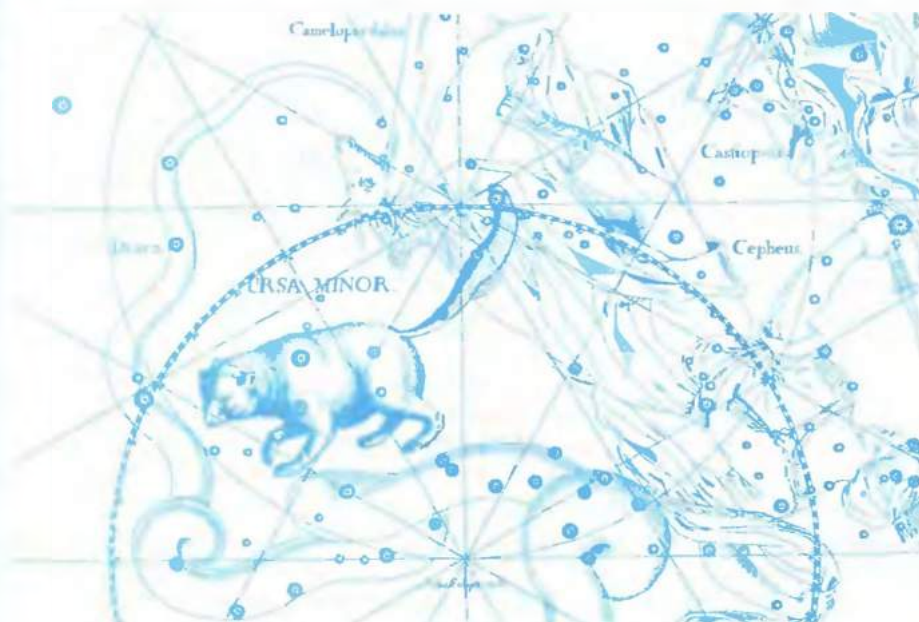
Видиме розташування зір на небі змінюється надзвичайно повільно. Без точних вимірів помітити його впродовж сотень і навіть тисяч років неможливо. Ця обставина дозволила за незапам'ятних часів намалювати по найяскравіших зорях перші характерні «зоряні візерунки» – *сузір'я* (мал. 3.2).



Більшість їхніх назв, які використовуються й сьогодні – це спадок давніх греків. Так, у творі «Альмагест» Птолемея перелічено 48 сузір'їв. Нові сузір'я з'явилися на небі після перших подорожей у південну півкулю Землі під час великих географічних мандрівок XVI–XVII ст., а також після винайдення телескопа.

На початку XX ст. налічувалося 108 сузір'їв. Але на конгресі Міжнародного Астрономічного Союзу 1922 р. їхню кількість було зменшено до 88. Тоді ж було встановлено також нові межі сузір'їв, що існують і досі.

**Сузір'я** – це певна ділянка зоряного неба з чітко окресленими назвами, що охоплює всі належні їй світила і яка має власну назву.



Мал. 3.2. Сузір'я на старовинній зоряній карті

У деяких сузір'ях виділяють менші групи зір, наприклад *Пляди* та *Гіади* в сузір'ї *Тельця*, *Ківиш* у сузір'ї *Великої Ведмедиці* тощо.

Поряд із загальноприйнятими в астрономії назвами для окремих сузір'їв вживають і народні назви. Так, в Україні *Велика Ведмедиця* – це «Великий Віз», *Мала Ведмедиця* – «Малий Віз», *Кассіопея* – «Борона» чи «Пасіка», *Дельфін* – «Криниця», *Пояс Орiona* – «Косарі», *Орел* – «Дівчина з відрами», зоряне скупчення *Гіади*, що утворюють голову *Тельця*, – «Чепіги», а зоряне скупчення *Пляди* – «Стожари».

Про кожну істоту, яку давні люди уявляли у візерунку конкретної групи зір і ім'ям якої називали це сузір'я, було складено певну легенду. Наприклад: син грецького бога морів Посейдона, *Оріон*, був хоробрим і вправним мисливцем. Не було звіра, якого він не міг би вполювати. Розлючена богиня *Артеміда*, охоронниця звірів, підіслала до

Оріона отруйного Скорпіона, від укусу якого він загинув. Та Зевс, головний у пантеоні грецьких богів, забрав на небо і Оріона, перетворивши його на зимове сузір'я, і Скорпіона, помістивши його на літньому небі, щоб той ніколи не наздогнав Оріона.

**3. Позначення і назви зір.** Астрономи минулого задовольнялися тим, що визначали положення окремих зір на малюнку істоти, яку вони «бачили» у візерунку тієї чи іншої їхньої групи (наприклад, зоря *Серце Скорпіона*).

Згодом найяскравіші зорі отримали власні назви (їх налічується 275). Із них лише 15 % – грецькі назви і 5 % – латинські, а 80 % – це арабські назви. Перекладаючи трактати арабських астрономів, європейські вчені, очевидно, спеціально залишали їх для використання. Наприклад, в арабських списках зорі сузір'я *Лебідь* названі прийнятим у ті часи способом: *Денб* – «Яскрава на хвості», *Садр* – «Груди». Так вони називаються і зараз. Назва найближчої до нас зорі *Проксима* перекладається з грецької як «найближча».

Майже 500 років тому зорі в кожному сузір'ї було позначено літерами грецького алфавіту  $\alpha$  (альфа),  $\beta$  (бета),  $\gamma$  (гамма) і т. д. в міру зменшення їхньої яскравості. Щоправда, в окремих випадках порядок позначень «переплутаний», і подекуди переставлені літери для слабкіших і яскравіших зір. Наприклад, у сузір'ї *Близнят* найяскравіша зоря *Поллукс* позначена літерою  $\beta$ , тоді як слабкіша – *Кастор* – літерою  $\alpha$ .

Для зір, яскравість яких змінюється з часом, запроваджені позначення літерами латинського алфавіту: R, S ... Z, далі RR, AZ. Якщо в сузір'ї змінних зір більше, ніж 334 (стільки комбінацій можна утворити з однієї і двох літер), то такі змінні зорі позначають так: V335, 336... (наприклад, V335 Лебедя).

Окремі зорі названо іменами вчених, що їх вивчали. Наприклад, є зоря *Барнарда*, яка знаходиться в сузір'ї *Змієносець*. Вона цікава тим, що за 180 років зміщується на небі на величину діаметра Місяця. Є зоря *Тіхо Браге* – залишок спалаху Наднової зорі 1572 р., яку вивчав відомий астроном Тіхо Браге.

Назва нашої зорі – *Сонце* – походить від індоєвропейського кореня «сау» – «світити».

**4. Визначення відстаней до небесних світил.** Те, що відстань до Місяця дорівнює 60 радіусам Землі ( $r = 60R_{\oplus}$ ), за тривалістю його проходження через тінь Землі при повному місячному затемненні встановив ще грецький вчений Гіппарх біля 150 р. до н. е.

Відстані до планет Сонячної системи вдалося визначити лише у XVII ст. через вимірювання *горизонтального паралаксу* (мал. 3.3).

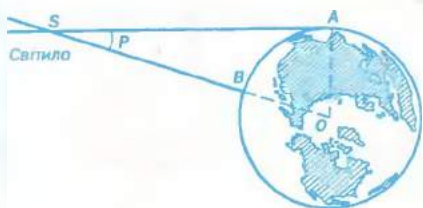
**Горизонтальний паралакс** – це кут між напрямом на світило з якої-небудь точки земної поверхні і напрямом з центра Землі.

Відстані до близьких зір визначають за допомогою вимірювання їхнього *річного паралаксу* (мал. 3.4).

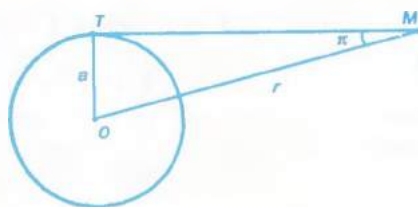
**Річний паралакс  $\pi$**  – кут, під яким із зорі було б видно радіус земної орбіти.

Вперше надійні річні паралакси було виміряно в середині XIX ст. Дотепер відомо точні величини річних паралаксів майже для 100 000 зір, і на цій основі розроблено біля десяти інших методів визначення відстаней до віддаленіших об'єктів.

Оскільки відстані між астрономічними об'єктами дуже великі, то користуватися звичними одиницями довжини (метр, кілометр) незручно. Тому в астрономії використовують особливі одиниці для вимірювання відстаней: *астрономічна одиниця* (а. о.), яка дорівнює середній відстані Землі від Сонця (149 600 000 км), і *парсек* (пк), від слів «паралакс» і «секунда» – відстань, з якої середній радіус земної орбіти видно під кутом  $1''$  (секунда дуги). Часто використовують похідні одиниці: *кілопарсек* (1 кпк = 1 000 пк) і *мегапарсек* (1 Мпк = 1 000 000 пк).



Мал. 3.3. Горизонтальний паралакс



Мал. 3.4. Річний паралакс зорі

Іноколи використовується одиниця довжини *світловий рік* (св. р.). Це така відстань, яку проходить світло за один рік, поширюючись зі швидкістю 300 000 км/с.

Між одиницями довжини, що використовуються в астрономії, існують такі співвідношення:  $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. р.} = 206\,265 \text{ а.о.} = 3 \cdot 10^{16} \text{ м}$ ;  $1 \text{ св. р.} = 0,3066 \text{ пк} = 63\,240 \text{ а.о.} = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ м}$ .

**5. Зоряні величини.** Те, що одні зорі яскравіші, а інші слабкіші, було помічено давно. З метою класифікації зір за їхнім блиском Гіппарх увів поняття *видимої зоряної величини* (цей термін до фізичних розмірів зорі не має ніякого відношення). Найяскравіші зорі він виділив у групу зір 1-ї величини, трохи слабкіші – 2-ї, а ледве помітні – 6-ї величини.

Згодом було прийнято зоряні величини позначати літерою  $m$  (від лат. «магнітуде» – «величина»), що проставляється як показник степеня справа вгорі біля цифри, яка вказує її числове значення (наприклад,  $1^m$ ). Таким чином, замість того щоб говорити про освітленість, яку створює зоря, астрономи говорять: «блиск зорі дорівнює  $m$  зоряним величинам».

Було встановлено, що зоряна величина  $m$  і освітленість  $E$  пов'язані залежністю

$$m = -14^m - 2,5 \lg E. \quad (3.1)$$

Освітленість  $E$ , яку створює зоря  $1^m$ , у 2,512 разів більша, ніж від зорі  $2^m$ , у  $(2,512)^2$  рази більша, ніж від зорі  $3^m$  і т.д. Цю закономірність узагальнює формула Погсона :

$$\frac{E_2}{E_1} = 2,512^{m_1 - m_2}. \quad (3.2)$$

Неважко підрахувати, що зорі  $6^m$  рівно у 100 разів слабкіші за зорі  $1^m$ . Зазначимо, що найяскравіших зір з величинами яскравіше  $1^m$  налічується усього 13, від  $1^m$  до  $2^m - 27$ , а всіх зір до  $6^m$  – близько 6 000. Видима зоряна величина Сонця становить  $-26,8^m$ .

Однак видима зоряна величина  $m$  не дає інформації про справжню потужність джерела світла (наприклад, близька свічка краще освітлює текст, ніж далека електрична лампочка). Тому для характеристики зір введено абсолютну зоряну величину  $M$ .

**Абсолютна зоряна величина – це така зоряна величина, яку б мала зоря, якби перебувала від нас на відстані 10 пк (32,6 св. р.).**

Оскільки освітленості змінюються обернено пропорційно квадрату відстані, то, використовуючи формулу (3.1), знайдемо співвідношення:

$$M = m + 5 - 5 \lg r, \quad (3.3)$$

де  $r$  – відстань до зорі, виміряна в парсеках.

Важливою характеристикою зорі є її *світність*  $L$  – повна кількість енергії, яку випромінює зоря з усієї своєї поверхні за одиницю часу в усіх напрямках. Як правило, світність зорі виражають в одиницях світності Сонця, тобто  $L_{\odot}$ .

Між абсолютною величиною зорі  $M$  та її світністю  $L$  існує зв'язок:

$$L = L_{\odot} \cdot 10^{0,4(M_{\odot} - M)}, \quad (3.4)$$

де  $L_{\odot} = 1$  і  $M_{\odot} = +4,7^m$  – відповідні параметри Сонця.

**6. Каталоги небесних об'єктів.** Окрім зір, на небі можна спостерігати багато інших об'єктів – *туманності, зоряні скупчення, галактики* тощо. Всі ці об'єкти занесено у спеціальні списки – *каталоги*.

Перші каталоги з'явилися ще до нашої ери. Сьогодні завдяки наполегливій багаторічній праці десятків і сотень астрономів маємо декілька різних каталогів небесних об'єктів.

У так званому «Боннському огляді неба» (BD, 1863 р.) наведено координати, зоряні величини і особливості спектрів 324 188 зір. Довгий час найвідомішим серед каталогів зір був дев'яти томний «Каталог Генрі Дрепера» (HD), що містить інформацію про зоряні величини і спектри 225 300 зір (опублікований 1918–1924 рр.).

Один із найвідоміших каталогів незоряних об'єктів склав французький астроном Ш. Месьє (1780–1817). У ньому налічується 109 об'єктів – яскравих зоряних скупчень, туманностей і галактик. Зокрема,

Андромеди із сузір'я Андромеди записана у ньому за номером 31, тому її позначають як об'єкт M31 (читається «Месьє 31»). Існує «Новий генеральний каталог туманностей і зоряних скупчень» (NGC, 1888 р.), в якому галактика M31 має номер 224 (об'єкт NGC224).

Існують і інші каталоги, наприклад, «Tycho Catalogue», складений за результатами роботи супутника «HIPPARCOS» у 1989–1993 рр. Він містить відомості про понад один мільйон зоряних об'єктів. Складено каталоги дискретних радіоджерел, у тому числі квазарів – Третій, Четвертий і П'ятий Бембриджський каталоги (3C, 4C і 5C). Є каталоги інфрачервоних джерел, створені за результатами роботи супутника IRAS, та інші. Окрім традиційних, друкованих каталогів, останніми роками створено їхні комп'ютерні варіанти, що зручніше для користування. Робота над ними триває.



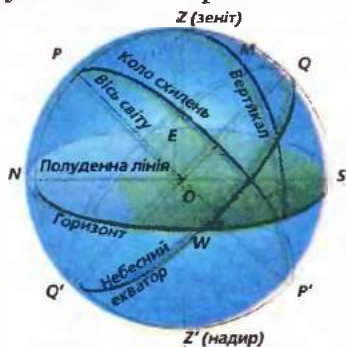
1. Що таке небесна сфера? 2. Скільки сузір'їв налічується на небесній сфері і коли уточнено їхні межі? 3. Які позначення прийнято вживати для звичайних і для змінних зір? 4. Що таке видима зоряна величина і хто її увів? 5. Що означає запис «об'єкт M31», «об'єкт NGC224»?

3.1. Порівняйте взаємне розташування сузір'їв на карті зоряного неба.  
3.2. Підготуйте усне повідомлення на тему «Міфи і легенди зоряного неба».

## 4. Основні точки і лінії небесної сфери. Зоряний час

Для визначення положення світила на небі необхідна певна система координат, подібна до тієї, що використовується на поверхні Землі.

Спосіб побудови сітки географічних координат відомий: на поверхні Землі виділено дві точки – географічні полюси, через них проведено дуги географічних меридіанів, один із них прийнято за початковий («нульовий»); проведено також земний екватор – велике коло, всі точки якого рівновіддалені від полюсів. Перебуваючи всередині небесної сфери, зробимо те ж саме. Слід лише домовитись, які точки на ній вважати «головними».



Мал. 4.1. Точки і лінії небесної сфери

**1. Основні точки і лінії небесної сфери.** Визначення основних точок і ліній небесної сфери починають з найпростішого – з установаження вертикального напрямку за допомогою виски. *Прямовисна лінія* (лінія виски) перетинається з небесною сферою в двох точках, які називаються *зеніт* і *надир*. Ці назви запозичено в арабських спостерігачів: зеніт – «вершина», надир – «напрямок ноги»; їх позначають відповідно літерами Z і Z' (мал. 4.1).

**Зеніт** – це верхня точка перетину прямовисної лінії з небесною сферою, **надир** – нижня точка (протилежна зеніту).

Велике коло, яке проходить через світило, точку зеніту і точку надиру, називається вертикальним колом або вертикалом.

Через центр небесної сфери перпендикулярно до прямовисної лінії проведемо горизонтальну площину.

**Велике коло, по якому горизонтальна площина перетинається з небесною сферою, називається математичним або справжнім горизонтом.**

Справжній горизонт слід відрізнити від видимого горизонту, який на суші є неправильною лінією з точками, що лежать вище або нижче справжнього горизонту, а на морі завжди є колом, площина якого паралельна площині справжнього горизонту.

Небесна сфера обертається навколо лінії, яка називається віссю світу; точки перетину осі світу з небесною сферою називаються полюсами світу. Полюс, відносно якого небесна сфера обертається проти годинникової стрілки (для спостерігача, який перебуває у центрі сфери), називають Північним полюсом світу, протилежний йому – Південним полюсом світу.

У наш час Північний полюс світу перебуває поблизу зорі  $\alpha$  Малої Ведмедиці, яку називають Полярною зорею.

Велике коло, площина якого перпендикулярна до осі світу, називають небесним екватором. Небесний екватор ділить небесну сферу на північну і південну півкулі.

З горизонтом небесний екватор перетинається у двох точках: у точці сходу  $E$  і в точці заходу  $W$ . Велике коло, що проходить через полюси світу і зеніт, називають небесним меридіаном. Небесний меридіан перетинається з горизонтом у двох точках: у точці півночі  $N$  (вона ближча до Північного полюса світу) і в точці півдня  $S$  (вона ближча до Південного полюса світу).

Пряму лінію, що з'єднує точки півдня і півночі, називають полюденною лінією. Небесний меридіан ділить небесну сферу на дві півкулі – східну і західну. Велике коло, що проходить через полюси світу і через світило  $M$ , називають колом схилень.

Слідкуючи за тим, як упродовж року приекваторіальні сузір'я одне за одним зміщуються на вечірньому небі до тієї ділянки горизонту, за яку зайшло Сонце, можна зробити висновок, що Сонце здійснює видимий річний рух назустріч обертанню небесної сфери.

**Велике коло, по якому центр диска Сонця здійснює свій видимий річний рух на небесній сфері, називається екліптикою.**

Слово «екліптика» походить від грецького «екліпто» – «затемнюю», бо як тільки Місяць у своєму русі навколо Землі перетне екліптику в повню, настає затемнення Місяця. Якщо він перетинає екліптику у фазі нового Місяця, відбувається затемнення Сонця.

Площина екліптики нахилена до площини небесного екватора під кутом  $\epsilon = 23^{\circ}26,5'$ . Екліптика перетинається з небесним екватором у двох *точках рівнодень*: весняного і осіннього, що позначаються відповідно знаками  $\Upsilon$  і  $\cap$ . Точка весняного рівнодення  $\Upsilon$  – це точка небесного екватора, через яку центр диска Сонця 20–21 березня

переходить з південної півкулі неба в північну. Через точку осіннього рівнодення  $\epsilon$  центр диска Сонця 22–23 вересня переходить з північної півкулі неба в південну.

**2. Кульмінації світил.** Внаслідок добового обертання небесної сфери кожне світило, описуючи на небі коло (тим менше, чим ближче світило до полюса світу), двічі перетинає небесний меридіан.

Явище проходження світила через небесний меридіан називається **кульмінацією**.

У верхній кульмінації світило буває найвище над горизонтом, у нижній кульмінації світило буває найнижче над горизонтом чи під горизонтом. Деякі зорі в момент верхньої кульмінації проходять через Zenit. В залежності від кутових відстаней, на яких світила знаходяться від полюсів світу, у кожній певній точці земної кулі вони можуть сходити і заходити, або ніколи не заходити, або ніколи не сходити.

Для світил, які в даній місцевості не заходять, ми бачимо і верхню, і нижню кульмінації; для світил, які сходять і заходять, – тільки верхню кульмінацію; для світил, які не сходять, обидві кульмінації відбуваються під лінією горизонту. Для спостерігача на північному полюсі Землі всі зорі північної небесної півкулі не заходять, а зорі південної небесної півкулі не сходять і навпаки. Для спостерігача на екваторі всі зорі обох небесних півкуль сходять і заходять.

Коли центр сонячного диска, перетинаючи небесний меридіан, знаходиться у верхній кульмінації, настає астрономічний полудень; під час нижньої кульмінації центра сонячного диска настає астрономічна північ.

**3. Зоряний час.** Періодичне обертання небесної сфери, повторення явищ сходу і заходу світил та їхніх кульмінацій дали людям природну одиницю лічби часу – *добу*. Залежно від того, що взяте за орієнтир на небі, відрізняють *сонячну* і *зоряну* добу.

**Зоряна доба** – це проміжок часу між двома послідовними верхніми кульмінаціями точки весняного рівнодення.

**Зоряний час** – це час  $s$ , що минув від верхньої кульмінації точки весняного рівнодення.

Зоряну добу розділено на 24 зоряних години, у кожній годині – 60 зоряних хвилин, у кожній хвилині – 60 зоряних секунд. Оскільки повний оберт Землі відносно точки  $\Upsilon$  становить  $360^\circ$ , то маємо таке співвідношення:  $1 \text{ год} = 15^\circ$ ,  $1^\circ = 4 \text{ хв}$ .

Через те що Земля обертається навколо своєї осі, на різних географічних меридіанах кульмінація точки весняного рівнодення настає в різні моменти. Якщо позначити через  $s_0$  зоряний час на нульовому гринвіцькому меридіані, то для спостерігача, який перебуває на схід від Гринвіча і географічна довгота якого  $\lambda$  виражена в годинах і частках години, зоряний час буде більшим на величину  $\lambda$ :

$$s = s_0 + \lambda. \quad (4.1)$$

Як побачимо далі, знання зоряного часу значно полегшує отримання відповіді на питання про те, що можна бачити на небі в кожний заданий момент часу.



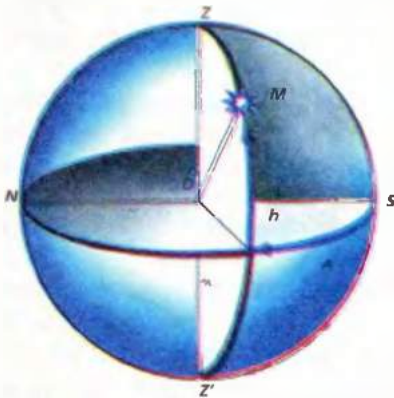
1. Скільки основних точок небесної сфери Вам відомо? 2. Які з цих точок займають постійне положення на небесній сфері, а які визначаються положенням спостерігача в кожному конкретному пункті земної поверхні? 3. Скільки основних ліній введено на небесній сфері? 4. Що таке кульмінація світила? 5. Що таке зоряна доба і зоряний час?

4.1. Доведіть, що для спостерігача, який перебуває в Києві ( $\lambda = 30^\circ = 2$  год), зоряна доба розпочинається на 2 години раніше, ніж у Гринвічі.

## § 5. Системи небесних координат

Положення світила на небесній сфері (як і на поверхні Землі) визначається двома координатами. В астрономії розроблено декілька систем небесних координат, найвідоміші з них такі: *горизонтальна* та *перша і друга екваторіальні* системи координат.

**1. Горизонтальна система координат.** В горизонтальній системі координат використовують *азимут*  $A$  світила  $M$  і його *висоту* над горизонтом  $h$  (мал. 5.1). Основною площиною у цій системі є площина горизонту  $SN$ , а початком відліку – точка півдня  $S$ .



Мал. 5.1. Горизонтальна система координат

Азимут  $A$  світила  $M$  відлічують від точки півдня  $S$  уздовж горизонту в бік заходу до вертикала світила.

Висоту  $h$  світила  $M$  відлічують від горизонту вздовж вертикала до світила.

Як азимут  $A$ , так і висоту  $h$  світила вимірюють у градусах: азимут від  $0$  до  $360^\circ$ , висоту – від  $0$  до  $+90^\circ$  (над горизонтом) і від  $0$  до  $-90^\circ$  (під горизонтом).

Недоліком цієї дуже простої системи координат є те, що кожна з координат світила безперервно змінюється внаслідок обертання небесної сфери.

**2. Перша екваторіальна система координат.** У цій системі координат використовують *годинний кут* світила  $t$  і його *схилення*  $\delta$  (мал. 5.2).

Основною площиною в цій системі є площина екватора  $QQ'$ , а початком відліку – найвища точка небесного екватора  $Q$ .

Годинний кут  $t$  світила  $M$  вимірюється від точки  $Q$  уздовж небесного екватора в бік заходу до кола схилення світила. Інакше кажучи, годинний кут світила  $t$  – це час, що минув від верхньої кульмінації світила.

Схилення  $\delta$  світила  $M$  відлічують від небесного екватора уздовж кола схилень до світила.



Годинний кут  $t$  світила вимірюється в годинах, хвилинах, секундах від  $0^\circ$  (світило у верхній кульмінації) до  $24^h$  (знову у верхній кульмінації). Якщо годинний кут світила  $t = 12^h$ , то світило перебуває в нижній кульмінації. Схилення світила  $\delta$  вимірюють від  $0^\circ$  (світило на небесному екваторі) до  $+90^\circ$  у північній півкулі небесної сфери і від  $0^\circ$  до  $-90^\circ$  у південній півкулі.

У цій системі одна з координат – схилення світила  $\delta$  – залишається незмінною під час обертання небесної сфери. Друга координата – годинний кут  $t$  – безперервно зростає, бо її відлік ведуть від моменту верхньої кульмінації світила в конкретному пункті Землі.

Отже, координата  $t$  у першій екваторіальній системі, як і горизонтальні координати  $A$  і  $h$  світила, мають своє певне значення тільки для деякого моменту часу.

Тому, використовуючи ці координати, не можна побудувати зоряні карти або скласти каталог зір для постійного користування. Ця обставина є недоліком зазначеної системи координат, але її перевагою є порівняно легке вимірювання.

Для побудови зоряних карт і каталогів небесних об'єктів з метою постійного користування необхідно мати координати, які не змінюються внаслідок обертання небесної сфери. Для цього було введено ще одну систему екваторіальних координат.

**3. Друга екваторіальна система координат.** За основну точку для відліку однієї з координат у другій екваторіальній системі беруть точку весняного рівнодення  $\Upsilon$  (або – для аналогії з нульовим меридіаном на Землі – коло схилень, яке проходить через точку  $\Upsilon$ ). У цій системі використовують такі координати: *пряме піднесення*  $\alpha$  світила  $M$  і його *схилення*  $\delta$  (мал. 5.2).

*Пряме піднесення*  $\alpha$  світила  $M$  відлічують від точки весняного рівнодення вздовж небесного екватора назустріч видимому обертанню небесної сфери до кола схилення світила. Вимірюють  $\alpha$  в годинах, хвилинах, секундах.

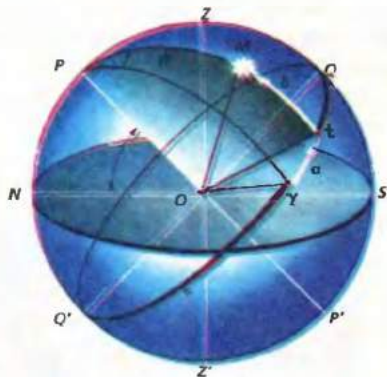
*Схилення*  $\delta$  світила вимірюється так само, як і в першій екваторіальній системі небесних координат.

З мал. 5.2 бачимо, що для кожного світила виконується рівність

$$\alpha + t = s. \tag{5.1}$$

Отже, робимо висновок, що зоряний час  $s$  – це годинний кут точки весняного рівнодення:  $s = t_{\Upsilon}$ .

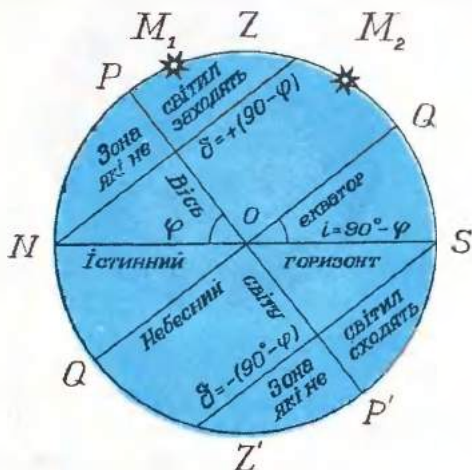
В астрономічних календарях і каталогах наведено координати  $\alpha$  і  $\delta$  світил у другій екваторіальній системі координат. Обчисливши зоряний час  $s$  на момент спостереження, можна знайти за співвідношенням (5.1)



Мал. 5.2. Екваторіальні системи координат

годинний кут світила  $t = s - \alpha$ , який визначає його положення відносно небесного меридіана.

**4. Умови видимості світил.** Використовуючи разом елементи горизонтальної та екваторіальних систем небесних координат, можна з'ясувати важливе питання: які зорі спостерігаються над горизонтом у кожний заданий момент часу; зокрема, які зорі перебувають над горизонтом цілодобово, а які на даній географічній широті взагалі не спостерігаються.



Мал. 5.3. Умови видимості світил

Ми вже знаємо, що, перетинаючи небесний меридіан у верхній кульмінації, світило займає найвище положення над горизонтом. Якщо його схилення  $\delta$  дорівнює широті  $\varphi$ , то під час верхньої кульмінації воно проходить через зеніт. Якщо  $\delta < \varphi$ , то воно кульмінує на південь від зеніту ( $M_1$  на мал. 5.3), при  $\delta > \varphi$  – на північ від нього ( $M_2$  на мал. 5.3).

Маємо відповідні співвідношення для висоти світила у верхній кульмінації ( $BK$ ):

$$h_{BK}^S = (90^\circ - \varphi) + \delta; \quad h_{BK}^N = (90^\circ + \varphi) - \delta. \quad (5.2)$$

Звідси випливають умови перебування світила над горизонтом (мал. 5.3).

Якщо схилення світила  $\delta > 90^\circ - \varphi$ , то воно перебуває над горизонтом цілодобово. Якщо  $\delta < - (90^\circ - \varphi)$ , то світило над горизонтом взагалі не з'являється (його верхня кульмінація відбувається під горизонтом).

Наприклад, для широти  $\varphi = 50^\circ$  маємо: над горизонтом цілодобово знаходяться світила, для яких схилення  $\delta > +40^\circ$ , і не з'являються взагалі світила зі схиленням  $\delta < -40^\circ$ .

**5. Карти зоряного неба.** Навчальні карти зоряного неба, з якими найчастіше доводиться працювати, виконані у формі прямокутника або круга. На карті, яка має вигляд прямокутника, по горизонталі відкладено пряме піднесення  $\alpha$ , по вертикалі – схилення  $\delta$  світил. На карті, яка має вигляд круга, в центрі знаходиться Північний полюс світу. Пряме піднесення  $\alpha$  зір проставлено на обводі карти. Радіальні

що сходяться до центру карти – це проекції кіл схилень. При цьому вздовж чотирьох із них проставляють схилення світил  $\delta$ .

Дати на обводі карти-круга вказують положення Сонця на екліптиці. Його положення на екліптиці на кожну дату знаходимо, пересуваючись від цієї дати до центра карти уздовж радіальної прямої, на її перетині з екліптикою. Шкала зоряних величин розміщена за краєм карти-круга.

На обводі круга вказано, які зорі о певній годині вечора (ранку) 5 і 20 числа того чи іншого місяця перебувають на півдні, тобто поблизу південної частини небесного меридіана. І це робить карту зручною для користування: треба стати лицем на південь, поглянути на небо і тут же, ввімкнувши на мить ліхтарик, знайти на карті відповідний «візерунок зір».

Для спостерігача, який перебуває на географічній широті  $\varphi = +50^\circ$ , через зеніт проходитимуть світила зі схиленням  $\delta = +50^\circ$ , а світила, для яких схилення  $\delta = 90^\circ - \varphi = +40^\circ$ , у нижній кульмінації будуть буквально «ковзати» по горизонту.

Така методика користування наведеною картою компенсує відсутність накладного круга і згаданого овалу-горизонту.

1. Чому дорівнюють азимут  $A$  точки заходу і точки сходу? 2. В якому напрямку відлічується годинний кут  $t$  і в якому – пряме піднесення світила  $\alpha$ ?

5.1 Початкові координати штучного супутника Землі:  $\alpha = 10^h 20^m$ ,  $\delta = +15^\circ$ , кінцеві:  $\alpha = 14^h 30^m$ ,  $\delta = +30^\circ$ . Користуючись картою зоряного неба, визначте, через які сузір'я пролетів цей супутник.

## § 6. Сонячний час.

### Співвідношення між зоряним і сонячним часом

**1. Справжній і середній сонячний час.** Вимірювати час, користуючись зоряною добою, найпростіше, а тому дуже зручно при розв'язанні багатьох астрономічних задач. Проте повсякденний розпорядок життя людини пов'язаний з видимим положенням Сонця, його сходом, кульмінацією і заходом. Інакше кажучи, ми живемо за *сонячним часом*.

Проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями центра диска Сонця на одному і тому ж географічному меридіані називається *справжньою сонячною добою*.

За початок справжньої сонячної доби на певному меридіані приймається момент нижньої кульмінації Сонця (справжня північ). Але тривалість справжньої сонячної доби не є постійною величиною.

Це пов'язано з двома причинами: по-перше, Земля впродовж року рухається навколо Сонця по еліптичній орбіті, тобто нерівномірно, а отже, нерівномірним виявляється і видимий річний рух Сонця серед зір; по-друге, Сонце рухається не вздовж небесного екватора, а по екліптиці, нахиленій до небесного екватора під значним кутом.

Через непостійність тривалості справжньої сонячної доби користуватися справжнім сонячним часом  $T_\odot$  у побуті дуже незручно. Адже

неможливо безперервно регулювати всі годинники «на догоду примхливому Сонцю». Тому було введено поняття *середнього сонця*.

Середнє сонце – це фіктивна точка, яка рівномірно рухається вздовж небесного екватора, і за той же проміжок часу (рік), що і Сонце, повертається до точки весняного рівнодення  $\Upsilon$ . Час, який визначається за середнім сонцем і за яким ми живемо, називається *середнім сонячним часом* і вимірюється *середньою сонячною добою*.

**Середня сонячна доба** – це проміжок часу між двома послідовними нижніми кульмінаціями середнього сонця.

Середній сонячний час  $T_\lambda$  – це час, що минув від нижньої кульмінації середнього сонця.

**2. Місцевий, поясний і всесвітній час.** З цього визначення випливає, що середній сонячний час має різне значення для кожного конкретного меридіана на поверхні Землі. Наприклад, географічні довготи Ужгорода, Києва і Луганська відповідно рівні  $22,3^\circ$ ,  $30^\circ$  і  $39,4^\circ$ , або в годинній мірі  $1^h29^m$ ,  $2^h00^m$ ,  $2^h38^m$ . Отже, в Луганську Сонце як у нижній, так і у верхній кульмінації буде на 38 хв раніше, а в Ужгороді – на 31 хв пізніше, ніж у Києві.

**Час, виміряний на певному географічному меридіані, називається місцевим часом і позначається  $T_\lambda$ .**

Для всіх пунктів, розташованих на одному меридіані, місцевий час буде однаковим. Для пунктів, розташованих на різних меридіанах, він буде різним. Це викликає певні незручності. Якщо в минулому можна було користуватись місцевим часом, то сьогодні у зв'язку з необхідністю складати графіки руху поїздів, літаків тощо виникла потреба впорядкування лічби часу.

У 1884 р. Міжнародна конференція представників 26 держав прийняла систему поясного часу. Земну кулю умовно було поділено меридіанами на 24 годинних пояси з нумерацією від 0-го до 23-го, так що ширина поясу по довготі дорівнює  $15^\circ$ . Через середину кожного годинного поясу проходить центральний меридіан цього поясу.

Місцевий час центрального меридіана поясу  $T_n$  називається **поясним часом**.

Гринвіцький меридіан, який проходить через Гринвіч (передмістя Лондона), є центральним для нульового годинного поясу. Центральний меридіан першого годинного поясу лежить східніше від Гринвіча на  $15^\circ$  або на 1 годину за часом, (проходить він в 45 км на схід від Праги). Центральний меридіан другого годинного поясу знаходиться на схід від Гринвіча на  $30^\circ$  або на 2 години за часом (західні передмістя Києва) і т.д.

Місцевий середній час гринвіцького меридіана  $T_0$  називають **всесвітнім часом** і позначають UT (від англ. «Universal Time»).

Кульмінації світил на географічному меридіані східної довготи  $\lambda$  відбуваються на  $\lambda$  годин раніше, ніж на гринвіцькому. Тому місцевий середній сонячний час  $T_\lambda$  пов'язаний з  $T_0$  так:

$$T_\lambda = T_0 + \lambda. \quad (6.1)$$

У свою чергу, поясний час  $T_n = T_0 + n^h$ , (6.2)

де  $n$  – номер поясу, що збігається з вираженою в годинах довготою центрального меридіана поясу. Наприклад, для Києва  $\lambda \approx 30^\circ = 2^h$ , і відповідно  $n = 2$ .

Вся Європа живе за часом першого годинного поясу. Цей час називають середньоєвропейським.

В Україні годинники у жовтні-березні показують середній сонячний час другого годинного поясу. У квітні-вересні – літній час цього ж поясу. Стрілки годинників переводяться в останню неділю березня на 1 годину вперед, а в останню неділю жовтня – на 1 годину назад.

### 3.\* Порівняння середнього і справжнього сонячного часу.

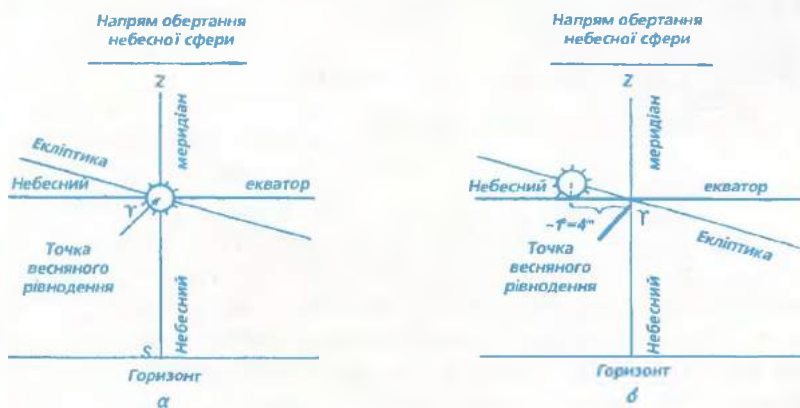
Зв'язок між справжнім сонячним часом  $T_\odot$  і середнім сонячним часом  $T_\lambda$  виміряним на тому ж меридіані, задається співвідношенням

$$\eta = T_\lambda - T_\odot. \quad (6.3)$$

Величина  $\eta$ , що входить у це співвідношення, називається різницею часу.

Оскільки Сонце кульмінує то раніше, то пізніше за середнє сонце, різниця часу може бути як додатною, так і від'ємною величиною. Різниця часу обертається в нуль чотири рази за рік – 15 квітня, 14 червня, 1 вересня і 24 грудня. Чотири рази за рік воно набирає екстремальних значень, і найбільшими ці значення бувають близько 12 лютого ( $\eta = -14,3$  хв) і 4 листопада ( $\eta = -16,5$  хв). Різниця часу обчислюють наперед і подають на кожний день в астрономічних щорічниках.

4.\* Порівняння сонячного і зоряного часу. Сонячна доба триває рівно 24 години сонячного часу. Але тривалість сонячної доби довша, ніж зоряної. Довести це можна за допомогою такого міркування (мал. 6.1).



Мал. 6.1. З'ясування різниці тривалості сонячної (ліворуч) і зоряної доби

У день весняного рівнодення, 21 березня, центр диска Сонця збігається з точкою весняного рівнодення саме в момент її верхньої кульмінації. Впродовж наступної доби, до полудня 22 березня, Сонце

зміститься в бік сходу майже на  $1^\circ$ , тому центр його диска пройде через небесний меридіан на 3 хв 56 с пізніше, ніж точка  $\gamma$ , і сонячна доба виявиться довшою від зоряної на 3 хв 56,55 с.

Ця різниця складає за рік цілу добу – у простому році налічується 365 сонячних діб і 366 зоряних.

Якщо ми будемо вимірювати зоряну добу одиницями сонячної доби, то нарахуємо в зоряній добі 23 год 56 хв 4 с сонячного часу. Якщо сонячну добу будемо вимірювати зоряними одиницями, то нарахуємо 24 год 3 хв 56 с зоряного часу.

**5.\* Зоряний час – надійний помічник при вивченні зоряного неба.** Згадаймо співвідношення (5.1), згідно з яким  $s = \alpha + t$ . Нехай годинний кут світила  $t$  дорівнює нулю (світило знаходиться у верхній кульмінації). Тоді зоряний час  $s$  дорівнює його прямому піднесенню  $\alpha$ , тобто  $s = \alpha$ . Користуючись Астрономічним календарем і знаючи довготу своєї місцевості, обчислимо за формулою (4.1) зоряний час  $s$  на момент спостережень, а на зоряній карті знайдемо зорі з відповідним прямим піднесенням  $\alpha$ . Саме ці зорі будуть знаходитись у південній частині неба, перетинаючи небесний меридіан. Залишається порівняти вигляд зоряного неба із зоряними візерунками на карті. Отже, вміння обчислювати зоряний час допомагає при вивченні зоряного неба.



1. Що таке середнє сонце і чому виникла потреба вводити це поняття? 2. За яким принципом здійснений поділ земної кулі на годинні пояси? 3. Коли сонячний і зоряний годинники показують однаковий час, і коли різниця їхніх показань дорівнює 12 год? 4. Як знання зоряного часу полегшує вивчення зоряного неба?

6.1.\* Обчисліть зоряний час на 20 год поясного часу 31 грудня поточного року і визначте, які сузір'я перетинають у цей момент південну частину меридіана.

6.2.\* Зробіть такі ж розрахунки на 6 год ранку 1 січня наступного року.

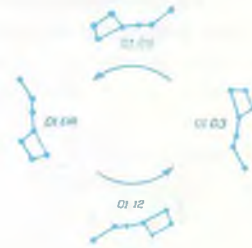
## § 7. Видимий річний рух Сонця. Тропічний і зоряний рік

**1. Зміна вигляду зоряного неба впродовж року.** Вже здавна було виявлено, що положення зір на небосхилі невпинно, від вечора до вечора, змінюються. Зокрема, зорі, які навесні безпосередньо після заходу Сонця підіймаються над горизонтом на сході, через три місяці на цю ж пору доби проходять через небесний меридіан у його південній частині. Ще через три місяці вони зникають у вечірній заграві на заході.

Зміна вигляду зоряного неба у різні пори року свідчить про те, що Сонце зміщується на тлі зір. Його видимий річний рух відбувається назустріч обертанню небесної сфери приблизно на  $1^\circ$  (4 хв) за добу, так що за рік воно проходить шлях довжиною у  $360^\circ$  (24 год), тобто здійснює повний оберт серед зір на небі. Для унаочнення швидкості, з якою

визначається вигляд зоряного неба, візьмемо такий приклад. Сузір'я Овна красується над точкою півдня 1 січня о 23 год, 1 лютого о 21 год, 1 березня – о 19 год.

Гарним показником зміни вигляду зоряного неба на певний момент доби і року є *Ківи Великої Ведмедиці* (мал. 7.1). Лінія, проведена від Полярної зорі через середину відстані між «передніми колесами» Вожа – зорями  $\gamma$  і  $\delta$ , вказує положення точки осіннього рівнодення  $\Delta$ , а точніше – її кутову відстань від небесного меридіана. Це дає змогу побудувати зоряний годинник, за яким можна визначати як місцевий сонячний час  $T_\lambda$ , так і зоряний час  $\Theta$  (див. Додаток 1).

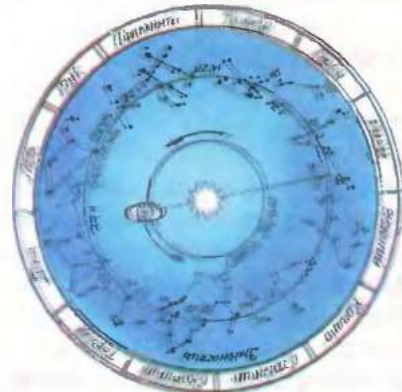


Мал. 7.1. Положення Великої Ведмедиці відносно горизонту

**2. Зодіакальні сузір'я і знаки Зодіака.** Шлях Сонця на небі уздовж екліптики пролягає серед певних сузір'їв, які здавна мають назву *зодіакальних* (від грец. «зоон» – «тварина» і похідного від цього слова «зодіакос», тобто «тваринний»), оскільки серед назв цих сузір'їв багато назв тварин, як-от: *Овен, Телець, Рак, Лев* тощо. Слово «зодіак» означає «коло із зображеннями тварин» або «пояс тварин». В зодіаку відлічується 12 сузір'їв.

Черговість проходження Сонця сузір'ями Зодіака відображено на мал. 7.2. Зауважимо: з 20 листопада по 18 грудня Сонце перебуває у 13-му сузір'ї – *Змієносець*, проте воно до числа зодіакальних не зараховане.

Для зручності відліку положення Сонця на екліптиці (а також для визначення положень Місяця і планет) астрономи Давнього Вавилону понад 2 700 років тому розділили екліптику на 12 рівних відрізків по  $30^\circ$ . Кожний із цих відрізків отримав назву того зодіакального сузір'я, в межах якого він знаходився. Таким чином,



Мал. 7.2. Видимий рух Сонця сузір'ями Зодіака

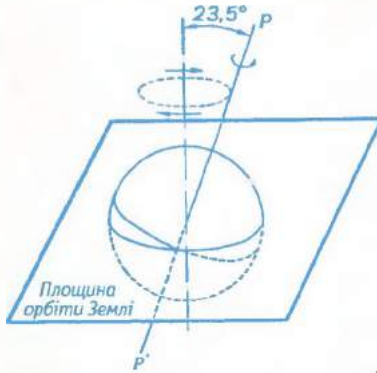
**Знак Зодіака – це дуга екліптики протяжністю в  $30^\circ$ , позначена назвою відповідного зодіакального сузір'я.**

Знаки Зодіака відлічують уздовж екліптики на схід від точки весняного рівнодення  $\Upsilon$  так, що першим є знак Овна; понад 2 000 років тому Сонце проходило цей відрізок екліптики з 21 березня по 21 квітня. Другим знаком Зодіака є знак Тельця, Сонце проходило його з 22 квітня по 21 травня, і так далі. В кожному знаку Зодіака Сонце перебуває місяць.

**3.\* Прецесія.** В наш час знаки Зодіака не вкладаються в ті зодіакальні сузір'я, які, власне, і дали їм назви. Кожний із знаків Зодіака розташовується в сусідньому сузір'ї, так що, перебуваючи

в знаку Овен, Сонце рухається по сузір'ю Риб, знаходячись у знаку Телець, Сонце рухається по сузір'ю Овна тощо.

Така невідповідність знаків Зодіака зодіакальним сузір'ям пояснюється тим, що точка  $\Upsilon$ , до якої «прив'язані» знаки Зодіака, не займає



Мал. 7.3. Рух осі обертання Землі внаслідок прецесії

постійного положення на небі, а весь час рухається назустріч видимому річному рухові Сонця. За рік вона зміщується вздовж екліптики на незначну величину в  $50,26''$ . Як наслідок, Сонце кожного року приходить в точку весняного рівнодення трохи раніше (на 24 хв 24 с), ніж у попередньому році. Таким чином, точка весняного рівнодення поступово зміщується вздовж усього зодіакального сузір'я (чи знаку), проходячи весь Зодіак за 25 800 років.

Такий зворотний рух точки весняного рівнодення називається прецесією рівнодення (з лат. – «випередження»).

Явище прецесії було відкрите ще давньогрецьким астрономом Гіппархом (II ст. до н. е.), а пояснив причину прецесії І. Ньютон.

Оскільки Земля не має правильної сферичної форми, а вісь її добоового обертання нахилена до площини екліптики під кутом  $66,5^\circ$ , то Місяць і Сонце, притягаючи найближчі до них приекваторіальні маси Землі сильніше, ніж найвіддаленіші, створюють обертальний момент, який намагається сумістити площину земного екватора з площиною земної орбіти, а вісь обертання Землі встановити перпендикулярно до площини екліптики. Та швидке обертання Землі перешкоджає цьому. Як наслідок, вісь Землі, наче вісь велетенської дзиги, описує в просторі навколо середнього положення конус розхилом  $23^\circ 26,5'$  з періодом у 25 800 років (мал. 7.3).

При цьому у просторі змінюється положення площини екватора, а отже і точок рівнодень, у яких екватор перетинається з екліптикою. Змінюється також і положення полюсів світу серед зір. Кожен з них за 25 800 років описує на небі мале коло радіусом  $23^\circ 26,5'$  (мал. 7.4) навколо полюса екліптики. І якщо в наш час Полярною зорею є  $\alpha$  Малої Ведмедиці, то 4 500 років тому Полярною зорею була  $\alpha$  Дракона (Тубан), а через 12 000 років не буде найяскравіша зоря літнього неба Ліри (Вега).

Внаслідок прецесії сітка небесних координат безперервно, хоч і дуже повільно, зміщується відносно зір, тому й умови їхньої видимості



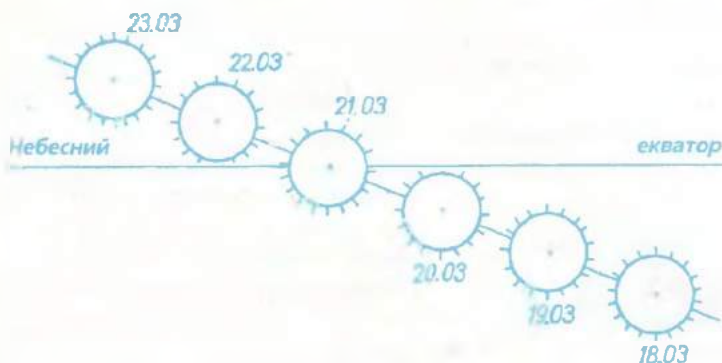
Мал. 7.4. Рух Північного полюса світу внаслідок прецесії



у певному пункті змінюються з часом. Так, через 12 000 років більшої частини сузір'я Оріона на території України не буде видно.

**4. Ефекти, обумовлені видимим річним рухом Сонця.** Оскільки Сонце, рухаючись по небесній сфері вздовж екліптики, то віддаляється від лінії небесного екватора, то наближається до неї, відбувається безперервна зміна його екваторіальних небесних координат – прямого піднесення  $\alpha_{\odot}$  і схилення  $\delta_{\odot}$ .

21 березня Сонце перетинає небесний екватор у точці весняного рівнодення, переходячи з південної півкулі неба у північну (мал. 7.5). У цей момент схилення Сонця  $\delta_{\odot}$  і пряме піднесення  $\alpha_{\odot}$  дорівнюють  $0^{\circ}$ , а в північній півкулі Землі починається *астрономічна весна*.



Мал. 7.5. Перехід Сонця через точку весняного рівнодення

Коли Сонце знаходиться в точці весняного рівнодення, то воно на всіх широтах сходить у точці сходу *E*, а заходить у точці заходу *W*. Половина його добового шляху на небі знаходиться над горизонтом, половина – під горизонтом. Отже, на всій земній кулі (окрім приполярних областей) день та ніч стають рівними між собою. Цей день називається днем весняного рівнодення.

22 червня, у день літнього сонцестояння, Сонце найдалі відходить від лінії небесного екватора у північну небесну півкулю; у північній півкулі Землі починається *астрономічне літо*. В цей час  $\alpha_{\odot} = 6^h$ , а  $\delta_{\odot} = +23^{\circ} 26'$ . Протягом декількох днів схилення Сонця, а отже, і його висота над горизонтом у верхній кульмінації не змінюється (звідси і назва явища – «сонцестояння»). При цьому у північній півкулі тривалість дня найбільша, а ночі – найменша.

23 вересня Сонце знову перетинає небесний екватор у точці осіннього рівнодення, переходячи з північної у південну небесну півкулю; у північній півкулі Землі настає *астрономічна осінь*. В цей момент схилення Сонця  $\delta_{\odot}$  знову, як і в день весняного рівнодення, дорівнює  $0^{\circ}$ , а пряме піднесення  $\alpha_{\odot} = 12^h$ . Знову на земній кулі день та ніч стають рівними між собою. Цей день називається днем осіннього рівнодення.

22 грудня, у день зимового сонцестояння, Сонце знову найдалі відходить від лінії небесного екватора, але вже у південну

небесну півкулю. Це – початок *астрономічної зими* у північній півкулі. В цей день схилення Сонця  $\delta_{\odot} = -23^{\circ} 26'$ , а пряме піднесення  $\alpha_{\odot} = 18^{\circ}$ . В північній півкулі Землі тривалість дня стає найменшою, а ночі – найбільшою в році.

Така зміна схилення Сонця  $\delta_{\odot}$  упродовж року обумовлена тим, що вісь доbowого обертання Землі не змінює свого напрямку в просторі під час орбітального руху навколо Сонця. В якій би точці своєї орбіти не знаходилась Земля, кут нахилу її осі обертання до площини екліптики



Мал. 7.6. Положення Землі відносно екліптики у червні і грудні

завжди становить  $90^{\circ} - \epsilon = 66^{\circ} 34'$ . Як наслідок, промені Сонця впродовж року падають на земну поверхню в одних і тих же широтах під різними кутами (мал. 7.6). Саме цим обумовлена зміна пір року.

Та подивившись у календар, ми побачимо, що ні 21 березня, ні 23 вересня день та ніч не рівні між собою. 21 березня на широті  $\varphi = 50^{\circ}$  день триває 12 год 10 хв, а не 12 год 00 хв, рівнодення ж настає 17–18 березня. Восени згідно з календарем рівнодення настає 26, а не 23 вересня. На це є дві причини.

По-перше, ми вважаємо, що момент рівнодення настав, коли центр сонячного диска потрапить у точку весняного рівнодення. Але ж ми визначаємо початок дня не за центром сонячного диска, а за тим моментом, коли верхній край Сонця торкнеться лінії горизонту. Відповідно кінець дня визначається моментом, коли верхній край Сонця зникне під горизонтом. Таким чином, Сонце в цілому проводить на небі трохи більше часу, ніж центр його диска.

По-друге, є таке явище, як *атмосферна рефракція* – відхилення світлового променя від прямолінійного напрямку при його проходженні через неоднорідну атмосферу Землі (мал. 7.7). На горизонті рефракція досягає найбільшого значення  $35'$ , тобто, навіть перевищує кутові розміри Сонця і Місяця (вони близькі до  $31'$ ). За рахунок рефракції верхній край Сонця з'явиться над горизонтом раніше, а зайде пізніше, ніж Сонце зійде і зайде насправді.



Мал. 7.7. Атмосферна рефракція

Завдяки цьому явищу тривалість дня на Землі завжди довша, ніж це було б на планеті, позбавленій атмосфери. Відповідно точки сходу і заходу сонця при  $\varphi = 50^\circ$  зміщуються у бік півночі приблизно на  $1^\circ$ .

Наді, внаслідок особливо хаотичних рухів атмосферних мас, кут рефракції може, різко змінюючись, сягати  $2^\circ$  і більше. Тоді спостерігачеві здається, що Сонце то «визирає» з-під горизонту, то ховається за ним. Висловивши цей факт, наші предки склали повір'я, ніби «на Великдень Сонце тричі купається».

Разом із зміною екваторіальних координат Сонця, спричинених його видимим рухом по небесній сфері, безперервно змінюються упродовж року також азимуты  $A_E$  і  $A_W$  точок сходу і заходу Сонця, висота Сонця над горизонтом у верхній кульмінації і тривалість його перебування над горизонтом (мал. 7.8).

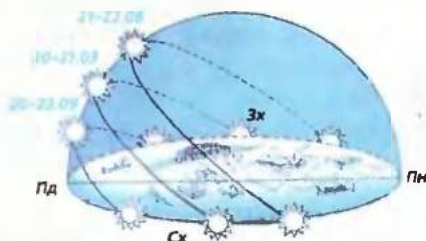
**5. Тропічний і зоряний рік.** Завдяки явищу прецесії з'являється поняття *тропічного* і *зоряного* року.

**Зоряний рік  $T_*$**  – це проміжок часу, за який центр диска Сонця здійснює повний оберт по екліптиці відносно зір.  $T_* = 365,25636^d = 365$  діб 6 год 9 хв 10 с. Фактично зоряний рік – це проміжок часу, за який Земля здійснює повний оберт навколо Сонця відносно далеких зір.

**Тропічний рік  $T_T$**  – це проміжок часу між двома послідовними проходженнями центра диска Сонця через точку весняного рівнодення. Тропічний рік є основною календарною одиницею часу.

Через прецесію, яка змушує точку весняного рівнодення рухатися взустріч Сонцю на  $50,26''$  щороку, тропічний рік  $T_T$  виявляється коротшим від зоряного  $T_*$  на 20 хв 24 с. В результаті багаторічних спостережень встановлено, що тривалість тропічного року  $T_T = 365,24220^d = 365$  діб 5 год 48 хв 46 с. Отже

$$T_* = T_T + 20 \text{ хв } 24 \text{ с.}$$



Мал. 7.8. Зміна впродовж року азимутів точок сходу і заходу Сонця

1. Через які зодіакальні сузір'я Сонце проходить навесні? А восени? 2. У чому полягає різниця між поняттями «зодіакальне сузір'я» і «знак Зодіака»? 3. Чому день рівний ночі не 20–21 березня, на які випадає рівнодення, а на три дні раніше, а у вересні відповідно пізніше? 4.\* Що таке прецесія і до яких наслідків вона призводить?

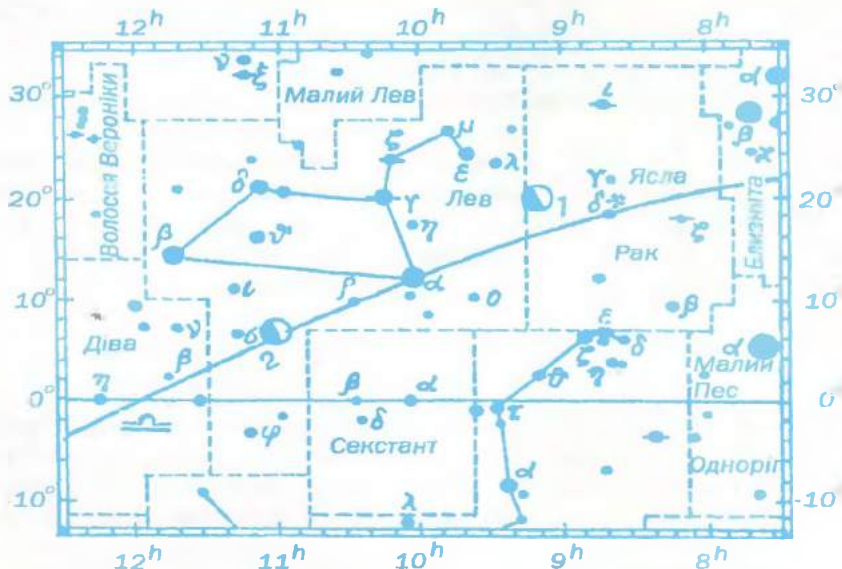
7.1. Знаючи дати настання астрономічної весни, літа і т. д., обчисліть тривалість (у добах) відповідно весняно-літнього та осінньо-зимового проміжків року. Які висновки випливають із порівняння отриманих результатів? 7.2.\* Користуючись картою зоряного неба, оцініть, через скільки років завдяки прецесії точка весняного рівнодення зміститься в сузір'я Водолія.

## § 8. Видимий рух Місяця. Сонячні та місячні затемнення

**1. Видимий рух Місяця.** Місяць – найближче до нас небесне тіло, природний супутник Землі. Зміною свого зовнішнього вигляду він привертав до себе увагу людей з найдавніших часів. Помітити рух Місяця на небі можна вже за 10–15 хв, бо його зміщення серед зір відбувається дуже швидко: за 1 годину він проходить з заходу на схід майже  $0,5^\circ$ . Кутова швидкість Місяця за добу становить від  $11^\circ$  до  $15^\circ$ .

Проміжок часу, за який Місяць, описуючи повне коло на небесній сфері, повертається до тієї самої точки, називається сидеричним або зоряним місяцем (від лат. «сідус» – «зоря»). Сидеричний місяць дорівнює  $27\frac{1}{3}$  доби.

Ретельне вивчення видимого руху Місяця серед зір з нанесенням його шляху на зоряну карту (мал. 8.1) приводить до висновку, що Місяць рухається на небесній сфері по великому колу, нахиленому до екліптики приблизно на  $5^\circ$ , що майже дорівнює 10 його кутовим діаметрам. Це коло перетинає екліптику у двох діаметрально протилежних точках, що називаються *вузлами місячної орбіти*. Вузол, у якому Місяць, рухаючись небом, опускається під екліптику і відхиляється на південь, називається *низхідним*, а той, у якому через 13,6 доби він піднімається над екліптикою і відхиляється на північ, називається *висхідним*.

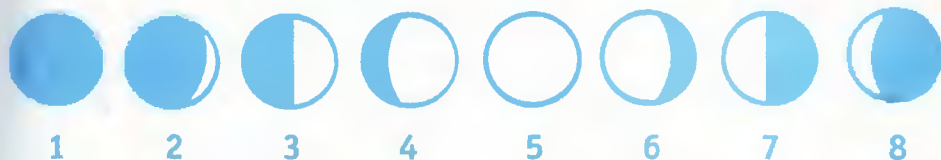


Мал. 8.1. Положення Місяця на небі у моменти двох послідовних фаз першої чверті

Легко помітити, що умови видимості Місяця в різні пори року дуже відрізняються. Влітку у повні Місяць перебуває на небі низько і недовго, а взимку сяє високо і подовгу, бо дуга екліптики

на вічному літньому небі лежить під небесним екватором, а взимку – над ним. Найменша висота Місяця влітку для широти  $\varphi = 50^\circ$  може становити  $11^\circ$ , найбільша його висота взимку для широти  $\varphi = 50^\circ$  може становити  $68^\circ$ .

**2. Фази Місяця.** Поверхня Місяця світиться відбитим сонячним світлом, тому його зовнішній вигляд змінюється залежно від того, яке положення він займає відносно Сонця. Така зміна зовнішнього



Мал. 8.2. Фази Місяця

вигляду Місяця для спостерігача на Землі називається **фаза** м і с я ц я . Розрізняють чотири найголовніші фази (мал. 8.2): *новий Місяць* – 1, *перша чверть* – 3, *повня (повний Місяць)* – 5, *третья (остання) чверть* – 7.

Досліджуючи положення Місяця серед зір у моменти повторення однієї й тієї ж фази, можна зробити висновок: однакові фази Місяця повторюються приблизно через кожні  $S = 29,5$  доби, але настають вони в різних точках місячної орбіти – у кожному наступному місяці на  $30^\circ$  східніше порівняно з попереднім.

Проміжок часу  $S$  між двома однойменними фазами Місяця називається **с и н о д и ч н и м м і с я ц е м** (від грец. «синадос» – «зближення», мається на увазі зближення нового Місяця з Сонцем).

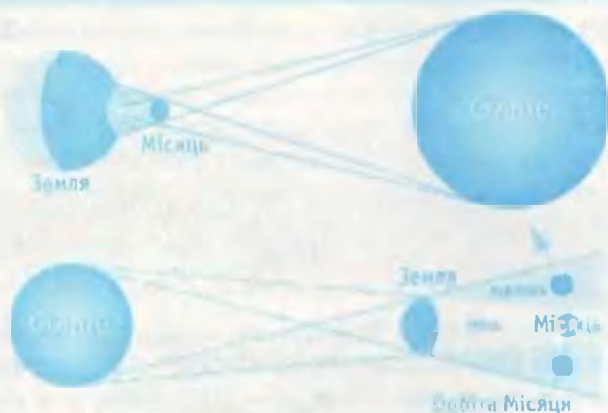
Як бачимо, тривалість синодичного місяця більша від сидеричного. Неважко з'ясувати, чому це так. Нехай у початковий момент Місяць у повні перебуває біля якоїсь зорі. Через  $27,3$  доби він знову зблизиться з нею. Однак, Земля за цей час зміститься по своїй орбіті (а відповідно і Сонце на небесній сфері) на кут близько  $27,3^\circ$ . Тому, щоб зайняти те ж саме положення відносно Сонця і знову бути у повні, Місяць повинен рухатися ще  $2\frac{1}{4}$  доби. Ця величина якраз і складає різницю між сидеричним і синодичним місяцями (мал. 8.3).



Мал. 8.3. Сидеричний і синодичний місяці

**3. Затемнення Сонця та Місяця.** Земля і Місяць, освітлюючись Сонцем, відкидають тіні у вигляді конусів у бік, протилежний від Сонця. Конус земної тіні довший за місячний, а його діаметр на відстані Місяця перевершує діаметр Місяця більш ніж у 2,5 рази. Рухаючись навколо Землі, Місяць двічі на місяць опиняється на лінії Земля–Сонце. У такі моменти і може настати *сонячне* чи *місячне затемнення* (мал. 8.4).

Сонячне затемнення відбувається тоді, коли тінь від Місяця потрапляє на поверхню Землі. Воно спостерігається по-різному в різних точках земної поверхні. Диск Сонця буде повністю закритим тільки для спостерігача, який знаходиться всередині місячної тіні, середнє значення діаметра якої на поверхні Землі – 100 км. У цій вузькій зоні буде спостерігатись *повне* сонячне затемнення (мал. 8.5).



Мал. 8.4. Умови настання сонячного (вгорі) і місячного затемнень

На ділянках земної поверхні, куди падає півтінь від Місяця, всередині так званого конуса місячної півтіні, буде спостерігатись *часткове* сонячне затемнення.

Оскільки відстань Місяця від Землі внаслідок еліптичності його орбіти змінюється від 405 500 км до 363 300 км, а довжина конуса його повної тіні становить 374 000 км, то іноді вершина цього конуса не досягає поверхні Землі. У такому випадку краї сонячного диска залишаться відкритими і будуть утворювати тонке блискуче кільце навколо темного диска Місяця. Таке затемнення називається *кільцевим*.

У різних точках Землі сонячне затемнення настає в різний час. Внаслідок руху Місяця навколо Землі та обертання Землі навколо осі тінь від Місяця переміщується по земній поверхні приблизно з заходу на схід, утворюючи смугу довжиною кілька тисяч кілометрів і максимальною шириною 270 км. Повна фаза затемнення, коли Сонце повністю закривається диском Місяця, триває не більше 7,5 хв.



Мал. 8.5. Повне сонячне затемнення (Сонячна корона)



Мал. 8.6. Повне місячне затемнення



Разом з частковими фазами, коли Місяць тільки насувається на Сонце або сходить з його диска, сонячне затемнення може тривати більше двох годин. Очевидно, що затемнення Сонця можуть відбуватися тільки у фазі нового місяця.

Місячне затемнення (мал. 8.6 на стор. 40) відбувається тоді, коли Місяць потрапляє в конус тіні, відкинutoї Землею. Оскільки час затемнення Місяць насправді позбавляється сонячного світла, то місячне затемнення видно на всій нічній півкулі Землі і для всіх точок цієї півкулі починається і закінчується водночас.

Повна фаза затемнення може тривати до 1 год 40 хв, а все місячне затемнення триває більше трьох годин. Очевидно, що місячні затемнення можуть відбуватись тільки під час повні.

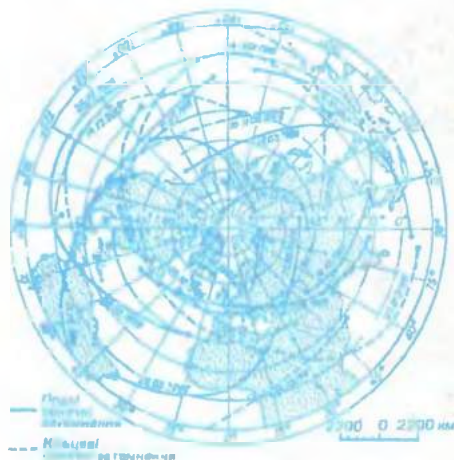
Якби площина місячної орбіти збігалась із площиною екватору, то сонячні й місячні затемнення спостерігалися б кожного синодичного місяця. Але вона нахилена до площини екватору під кутом у  $5^\circ$ , тому Місяць може пройти або вище, або нижче диска Сонця чи конуса тіні Землі.

Щоб відбулося сонячне або місячне затемнення, необхідно, щоб Місяць у фазі нового місяця або ж у повні знаходився поблизу одного з вузлів своєї орбіти, тобто недалеко від екватору.

Кожного року обов'язково буває два сонячних затемнення; за доброго збігу обставин їх може відбутись навіть п'ять. Що стосується місячних затемнень, то, згідно з розрахунками, їх може бути на рік два чи три, а може і зовсім не бути. Отже, мінімальна кількість затемнень на рік – два (обидва сонячні), максимальна – сім (п'ять сонячних і два місячних, або чотири сонячних і три місячних).

Послідовність затемнень повторюється майже точно у тому ж порядку через деякий проміжок часу, що називається саросом (з єгипетської – «повторення»). Сарос, відомий задовго до початку нашої ери, складає 18 років і 10,3 чи 11,3 доби (залежно від того, скільки високосних років було в періоді).

Повторення послідовності сонячних та місячних затемнень відбувається через повторення взаємного положення Сонця, Місяця і вузлів місячної орбіти на небесній сфері. Впродовж кожного сароса буває 43 сонячних затемнення і 25–29 місячних. На певній географічній довготі те ж затемнення повторюється через три сароси (мал. 8.7). А в конкретному пункті Землі повне сонячне затемнення трапляється в середньому раз на 300 років.



Мал. 8.7. Смуги шести сонячних затемнень



1. З якою середньою кутовою швидкістю Місяць рухається по небесній сфері відносно Сонця? 2. Чому на картах зоряного неба не вказують шлях Місяця серед зір, а лише Сонця? 3. Чому сонячні затемнення відбуваються не в кожен фазу нового місяця?

**8.1.** Намалюйте вигляд Місяця у фазі першої чверті. У який час доби він спостерігається у такій фазі? **8.2.** Поясніть з допомогою креслення, чому у повні найменша висота Місяця під час верхньої кульмінації влітку для широти  $\varphi = 50^\circ$  становить  $11^\circ$ , а найбільша висота взимку –  $68^\circ$ . Якими будуть відповідні висоти для широти Вашого населеного пункту?

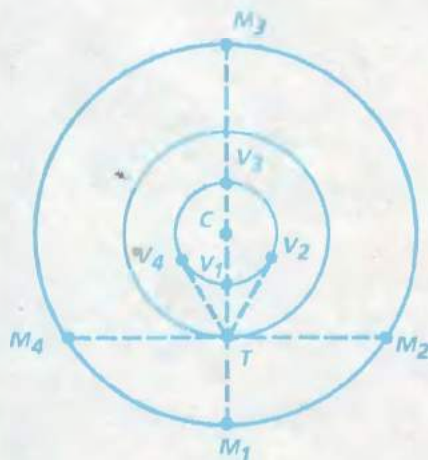
## § 9. Видимі рухи планет. Закони Кеплера

**1. Нижні та верхні планети.** За особливостями свого видимого руху на небесній сфері планети поділяються на дві групи: *нижні* (Меркурій, Венера) і *верхні* (Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун і Плутон). Рух верхніх і нижніх планет небесною сферою відбувається по-різному.

Меркурій і Венера перебувають на небі або в тих же сузір'ях, що й Сонце, або в сусідніх. При цьому вони можуть знаходитись як на захід, так і на схід від нього, але не далі  $28^\circ$  (Меркурій) і  $48^\circ$  (Венера).

Найбільше кутове відхилення планети від Сонця на схід називається найбільшою східною елонгацією (з лат. – «відляляюся»), на захід – найбільшою західною елонгацією.

При східній елонгації планету видно на заході у променях вечірньої заграви незабаром після заходу Сонця (мал. 9.1, положення  $V_4$ ), через деякий час вона також заходить. Потім, переміщуючись зворотним рухом (зі сходу на захід, проти видимого руху Сонця), спочатку повільно, а потім все швидше планета починає наближатися до Сонця, ховається в його променях і стає невидимою. В цей час планета проходить



Мал. 9.1. Конфігурації планет

між Землею та Сонцем і настає її нижнє сполучення із Сонцем (мал. 9.1, положення  $V_1$ ).

Через деякий час після нижнього сполучення планета знову стає видимою, але вже на сході, в променях ранкової зорі, незадовго перед

завою Сонця (мал. 9.1, положення  $V_2$ ). Далі, продовжуючи переміщення зворотним рухом, планета досягає найбільшої західної елонгації, зупиняється на деякий час і знову продовжує рух, але вже прямий, у напрямку до Сонця.

Повернувшись до Сонця, планета незабаром зникає в його променях і знову стає невидимою. В цей час вона проходить за Сонцем, і відбувається її верхнє сполучення (мал. 9.1, положення  $V_3$ ), після якого через деякий час вона знову стає видимою на заході в променях вечірньої заграви. Далі цикл повторюється.

Таким чином, нижні планети, подібно до маятника, «коливаються» відносно Сонця.

Інакше відбувається видимий рух верхніх планет. Коли верхню планету видно після заходу Сонця на західному небосхилі, вона переміщується серед зір прямим рухом, тобто з заходу на схід, як і Сонце. Але швидкість її руху менша, ніж у Сонця, тому Сонце наздоганяє планету, і вона на деякий час перестає бути видимою.

Потім, коли Сонце обжене планету, вона стає видимою на сході перед появою Сонця. Швидкість її прямого руху поступово зменшується, планета зупиняється, потім починає переміщення зворотним рухом зі сходу на захід, причому її траєкторія нагадує петлю (мал. 9.2).

В середині дуги свого зворотного руху планета знаходиться в сузір'ї, протилежному Сонцю; таке її положення називається протистоянням (мал. 9.1, положення  $M_1$ ).

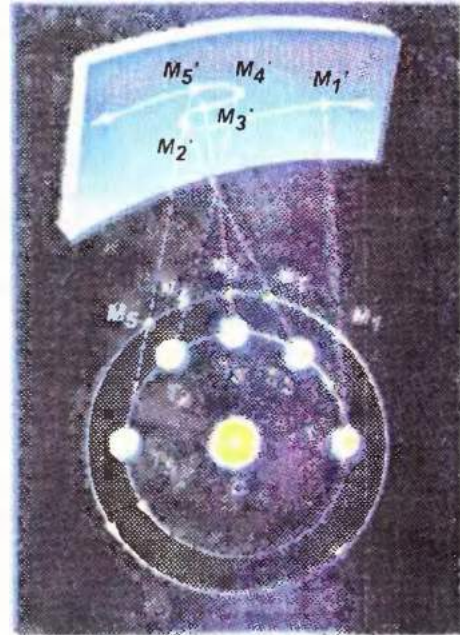
Через деякий час планета знову зупиняється, змінює напрямок свого руху на прямий, знову з заходу на схід. Згодом її наздоганяє Сонце, вона перестає бути видимою – і цикл руху починається спочатку.

В середині дуги свого прямого руху, під час періоду невидимості, планета знаходиться в одному сузір'ї з Сонцем, і таке її положення називається сполученням із Сонцем (мал. 9.1, положення  $M_3$ ).

Розташування планети на  $90^\circ$  на схід від Сонця називається східною квадратурою, на  $90^\circ$  на захід – західною квадратурою (мал. 9.1, положення  $M_4$  і  $M_2$ ).

Всі вищеописані особливі положення планет відносно Сонця називаються конфігураціями.

Проміжок часу  $S$  між двома послідовними однаковими конфігураціями планети називається її синодичним періодом обертання.



Мал. 9.2. Петлеподібний рух планет

Для Меркурія він становить 116 діб, для Венери – 584 доби, для Марса, Юпітера і Сатурна відповідно – 780, 399 і 378 діб.

Особливості руху планет пов'язані з тим, що ми спостерігаємо їхній рух із Землі, яка також обертається навколо Сонця. Отже, петля в русі верхньої планети – це відображення руху Землі по орбіті, і чим далі планета, тим менший розмір петлі. Ширина петлі зворотного руху Марса дорівнює  $15^\circ$ , Юпітера –  $10^\circ$ , Сатурна –  $7^\circ$ .

**2. Закони Кеплера.** Використовуючи дані Птолемея, М. Коперник визначив відносні відстані (в радіусах орбіти Землі) кожної з планет від Сонця, а також їхні сидеричні (відносно зір) періоди обертання навколо Сонця. Це дало змогу Йогану Кеплеру (1618–1621) встановити три закони руху планет.

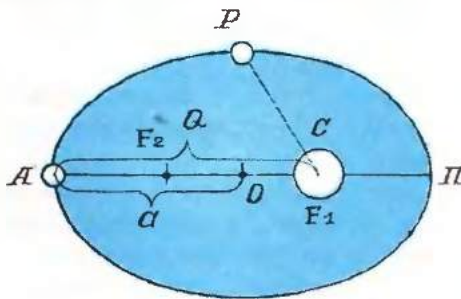
**I. Кожна з планет рухається навколо Сонця по еліпсу, в одному з фокусів якого знаходиться Сонце.**

*Еліпс* (мал. 9.3) – це замкнена крива, сума відстаней до кожної точки якої від фокусів  $F_1$  і  $F_2$  рівна його великій осі, тобто  $2a$ , де  $a$  – велика піввісь еліпса.

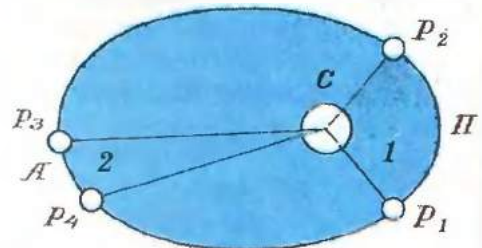
Якщо Сонце перебуває у фокусі  $F_1$ , а планета у точці  $P$ , то відрізок прямої  $F_1P$  називається радіусом-вектором планети.

Відношення  $e = c/a$ , де  $c$  – відстань від фокуса еліпса до його центра, називається ексцентриситетом еліпса. Ексцентриситет визначає відхилення еліпса (ступінь його витягнутості) від кола, для якого  $e = 0$ .

Орбіти планет у Сонячній системі дуже мало відрізняються від колових. Так, найменший ексцентриситет має орбіта Венери:  $e = 0,007$ ; найбільший – орбіта Плутона:  $e = 0,249$ ; ексцентриситет земної орбіти становить  $e = 0,0167$ .



Мал. 9.3. Еліпс як орбіта планети



Мал. 9.4. Другий закон Кеплера

Найближча до Сонця точка планетної орбіти  $\Pi$  називається перигелієм, найдалша точка орбіти  $A$  – афелієм.

**II. Радіус-вектор планети за однакові інтервали часу описує рівновеликі площі.**

З цього закону випливає важливий висновок: оскільки площі 1 і 2 (мал. 9.4) рівні, то по дузі  $P_1P_2$  планета рухається з більшою

швидкістю, ніж по дузі  $P_3P_4$ , тобто швидкість планети найбільша в перигелії  $P$  і найменша в афелії  $A$ .

**III. Квадрати сидеричних періодів обертання планет відносяться як куби великих півосей їхніх орбіт.**

Якщо сидеричні періоди обертання двох планет позначити  $T_1$  і  $T_2$ , а великі півосі еліпсів – відповідно  $a_1$  і  $a_2$ , то третій закон Кеплера має ви-

$$\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{a_1^3}. \quad (9.1)$$

Закони Кеплера справедливі не лише для планет, а й для їхніх супутників, як природних, так і штучних.

У 1687 р. І. Ньютон, розглядаючи задачу взаємною притягання небесних тіл, точніше сформулював третій закон Кеплера для випадку, коли планета з масою  $M$  має супутник з масою  $m$ . Наприклад, для руху Землі навколо Сонця (сидеричний період  $T_{\odot}$ , піввісь орбіти  $a_{\odot}$ ) і Місяця навколо Землі (відповідно  $T_{\oplus}$  і  $a_{\oplus}$ ) третій закон Кеплера записується так:

$$\frac{(M_{\odot} + m_{\oplus}) T_{\oplus}^2}{(m_{\oplus} + m_{\opl�}) T_{\oplus}^2} = \frac{a_{\oplus}^3}{a_{\oplus}^3}, \quad (9.2)$$

де  $M_{\odot}$ ,  $m_{\oplus}$  і  $m_{\opl�}$  – відповідно маси Сонця, Землі і Місяця.

Нехтуючи другими доданками в дужках (малими порівняно з першими), можна визначити масу Сонця в одиницях маси Землі. Таким же чином можна визначити маси й інших небесних тіл, якщо вони мають природні чи штучні супутники.

**3.\* Рух штучних супутників Землі.** Наведемо деякі особливості руху штучних супутників Землі. У найпростішому випадку коловій орбіти, якщо висота  $H$  супутника над поверхнею Землі і радіус  $R$  Землі виражені в кілометрах, його період обертання  $T$  у хвилинах дорівнює

$$T = 1,66 \cdot 10^{-4} \sqrt{(R + H)^3}.$$

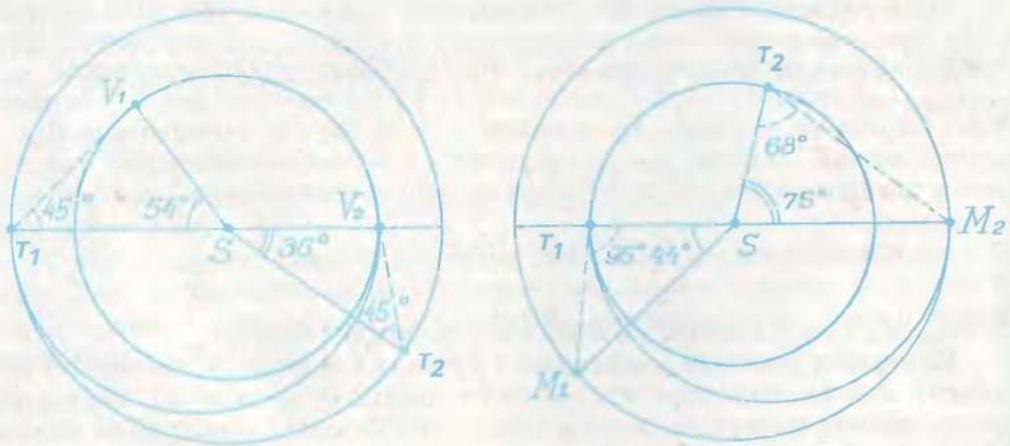
Наприклад, для висот  $H = 220, 562$  і  $1674$  км маємо період обертання  $T = 89, 96$  і  $120$  хв. Дуже цікавим є випадок, коли  $H = 35\,800$  км: тоді  $T = 23$  год 56 хв 04 с. А це час, за який Земля здійснює оберт навколо власної осі. Тому, якщо орбіта такого супутника лежить у площині земного екватора, і він рухається в напрямку обертання Землі, то супутник увесь час перебуватиме «нерухомо»

над певною точкою земного екватора. Така орбіта називається геостационарною.

Найбільша відстань, на якій супутник все ще буде обертатись навколо Землі, – 1,5 млн км. Якщо ж супутник опиниться на більшій відстані, то тяжіння з боку Сонця збурюватиме його рух, або повертаючи супутник на менші висоти, або ж перетворюючи його в штучну планету.

**4.\* Рух космічних апаратів у просторі.** Рух космічних апаратів (КА) у просторі описується тими ж законами, що і рух природних небесних тіл.

Мінімальні енергетичні зусилля потрібні для запуску КА по напівеліптичній траєкторії, яка називається *гоманівською* (за ім'ям німецького вченого В. Гомана). У цьому випадку значення великої півосі орбіти КА дорівнює  $a_{ка} = 1/2(a_{\oplus} + a_p)$ , де  $a_{\oplus}$  і  $a_p$  – півосі орбіти Землі та планети (мал. 9.5).



Мал. 9.5. Гоманівські траєкторії польоту КА до Венери і Марса

Тривалість польоту КА  $t_{ка}$  можна визначити за третім законом Кеплера. Оскільки сидеричний період обертання КА  $T_{ка}$  навколо Сонця по цій орбіті дорівнював би

$$T_{ка} = \sqrt{a_{ка}^3}$$

(де  $a_{ка} = 1/2(a_{\oplus} + a_p)$  – в астрономічних одиницях), то

$$t_{ка} = \frac{1}{2} T_{ка} = \frac{1}{2} \sqrt{a_{ка}^3} = \frac{1}{2} \sqrt{(a_{\oplus} + a_p)^3 / 8} \text{ років.}$$

Так, знаходимо, що політ КА до Венери триває 146 діб, до Марса – 259 діб.

Враховуючи, що кутові швидкості руху Венери, Землі та Марса по орбітах відповідно рівні  $1,6^\circ$ ,  $1^\circ$  і  $0,52^\circ$  за добу, можемо отримати

жизні на мал. 9.5 взаємні положення планет на момент старту КА з Землі: Венера на кутовій відстані  $54^\circ$  позаду, а Марс – на  $44^\circ$  попереду Землі. Коли КА опиниться біля Венери, Земля перебуватиме на  $36^\circ$  позаду неї, а в момент зустрічі КА з Марсом Земля перебуватиме на  $75^\circ$  попереду нього.

Ці два останні числа використовують для розв'язання задачі тривалості очікування КА біля Венери чи Марса. Його повернення на Землю може розпочатися лише за таких умов: від Венери – коли Земля перебуватиме на кутовій відстані  $36^\circ$  попереду неї; від Марса – коли Земля перебуватиме на  $75^\circ$  позаду нього. Обчислення приводять до висновку, що очікування сприятливого розташування планет Венери і Землі триває 480 діб, Марса і Землі – 438 діб. Загальна тривалість експедиції до Венери триватиме 770 діб, до Марса – 956 діб.

1. За якими особливостями видимого руху планети поділяються на верхні та нижні? 2. Що таке конфігурації планет? 3. Що таке синодичний і сидеричний періоди обертання планети? 4. Що таке радіус-вектор планети? 5. Як «зважують» небесні тіла, зокрема, як визначили масу Сонця? 6.\* За скільки діб обертався б штучний супутник навколо Землі, якби він перебував на відстані 1.5 млн км? 7.\* Що таке гоманівська траєкторія?

9.1. Використовуючи «Астрономічний календар» (не обов'язково на поточний рік), простежте зміну положення на небі однієї-двох планет упродовж року, виявіть дати їхніх певних конфігурацій, якщо такі в цьому році траплялися.

9.2.\* Перевірте правильність даних про тривалість очікування КА біля Венери і Марса для успішного повернення на Землю.

## 10. Календар і його типи

Календарем прийнято називати певну систему лічби проміжнів часу з поділом їх на окремі періоди – роки, місяці, тижні, дні.

Слово «календар» походить від латинських слів «калео» – «проголошую» і «календаріум» – «боргова книга». Перше нагадує про те, що в Давньому Римі (звідки до нас прийшов наш календар) початок кожного місяця проголошувався окремо, а друге – що там першого числа кожного місяця сплачували проценти за борги.

Астрономічними прообразами календарних одиниць – місяця і року – стали відповідно тривалості синодичного місяця  $S = 29,53059$  доби і тропічного року  $T_{\gamma} = 365,24220$  доби.

Залежно від своїх традицій, способу життя і релігійних уявлень люди в давнину розробили різні типи календарів: *місячні, місячно-сонячні та сонячні*.

1. *Місячний, місячно-сонячний і сонячний календарі.*

У місячному календарі рік складається з 12 календарних місяців. В давнину лічбу днів у новому місяці починали від першої

появи вузького серпа Місяця на вечірньому небі; тривалість місяця порівнювалась зі зміною фаз Місяця.

Відповідна цьому тривалість астрономічного *місячного року* дорівнює  $12 \cdot 29,53059$  доби = 354,367 доби. Число 354 можна подати так:  $6 \cdot 30 + 6 \cdot 29$ . Тобто можна ввести календарний рік тривалістю 354 доби, в якому загалом буде налічуватись 6 місяців по 30 діб і 6 місяців по 29 діб. А щоб початок календарного місяця якомога точніше збігався з новомісяччям, ці місяці повинні чергуватися. В середньому за кожні три роки із залишку в 0,367 доби накопичується трохи більше однієї доби. Щоб урахувати це, потрібно впродовж кожних тридцяти років 11 разів рівномірно додавати по одному дню. Рік, який містить 354 діб, прийнято називати *простим*, а рік у 355 діб – подовженим або *високосним*. Місячний календар використовується в країнах, де сповідується іслам.

Для узгодження тривалості сонячного та місячного року використовують місячно-сонячні календарі. У таких календарях менші проміжки часу (місяці) вимірюють за змінами фаз Місяця (календарні місяці налічують 30 і 29 діб). Але оскільки 12 таких місяців – це 354 доби, тоді як тропічний рік на 11 діб довший, в лічбу місяців у році найчастіше 7 разів за кожні 19 років вставляли додатковий 13-й місяць. Бо 19 тропічних років практично рівні 235 синодичним місяцям – це так званий *метонів* цикл. Тож, як це видно з Таблиці "Дати нового місяця" (див. Додатки), через кожні 19 років ті ж самі фази Місяця приходяться на ті самі календарні числа. Однак через кожні 216 років конкретна фаза Місяця зміщується по датах нашого календаря на одну добу вперед (від, скажімо, 21 березня до 22 і т.д.).

Місячно-сонячний календар офіційно використовується лише в Ізраїлі. На підставі місячно-сонячного календаря проводять обчислення дат християнської Пасхи і пов'язаних з нею інших свят (Вознесення, Трійці). В минулому ж він повсюдно був найбільш уживаним.

У сонячних календарях за основу обліку часу беруть зміну пір року, тоді як на зміну фаз Місяця не зважають. Першоосновою нашого сонячного календаря був *юліанський календар*, запроваджений 1 січня 45 р. до н. е. римським політичним діячем і верховним жерцем Юлієм Цезарем. Оскільки тоді вже було відомо, що сонячний рік містить близько 365,25 доби, у цьому календарі три з кожних чотирьох років були простими і мали по 365 діб, а четвертий – високосний – 366 діб. У порівнянні з тропічним роком середній рік юліанського календаря був довшим лише на 0,0078 доби. Різниця невелика, але за кожні 128 років з цих частинок нагромаджувалася ціла доба. Отже, якщо у 300 р. н. е. весняне рівнодення припадало на 21 березня, то через 128 років – на 20, ще через 128 років – на 19 і т. д.

До середини XVI ст. дата весняного рівнодення змістилася вже на 10 діб і припадала на 11 березня. З датою весняного рівнодення



визане найбільше християнське свято – Пасха. На Нікейському (325 р.) церковному соборі було прийнято святкувати її в найближчому вівторку після повні, яка наставала після весняного рівнодення. Виявилось, мабуть, що дата дня весняного рівнодення зберігається «завжди». Та оскільки справжнє весняне рівнодення поступово зміщувалося в бік 1 березня, то створилася така ситуація: якщо, наприклад, у XVI ст. повня випадала на 18 березня, весняною вважали не її, а наступну – 17 квітня. Отже, свято Пасхи зсувалося в той бік.

У 1582 р. римський папа Григорій XIII здійснив реформу календаря. Щоб повернути весняне рівнодення з 11 на 21 березня, з календаря було вилучено 10 днів: після 4 жовтня 1582 р. настало не 15 жовтня. І щоб надалі така помилка не виникала, було прийнято з кожних 400 років вилучати три доби: столітні роки, число яких не ділиться без остачі на 4, вважають простими – по 365 днів (такими були роки 1700, 1800, 1900 і буде 2100-й). Цей вилучений календар отримав назву *григоріанського* або *нового стилю* (н.ст.).

Середня тривалість року григоріанського календаря (за 400 років) становить 365,2425 доби, що лише на 26 с перевищує тривалість тропічного року. Тому і похибка на одну добу накопичується в цьому календарі приблизно за 3 300 років. Отже, григоріанський календар загалом точно відображає астрономічні події, хоча упродовж 400 років весняне рівнодення у ньому припадає на дні 19, 20 і 21 березня.

**2. Про нашу еру.** У своїй практичній діяльності людина потребує певної системи обліку років. При цьому немає істотного значення, який рік у цій системі було названо першим.

Та чи інша система лічби років має назву *ера*. Інакше, ерою названо сукупність років, відлічених від певної початкової точки, що зветься *епохою* (з грец. «епохе» – зупинка).

Історія показує, що початковим моментом може бути подія реальна (початок царювання якогось імператора, війна, стихійне лихо тощо) або вигадана, легендарна, часто пов'язана з релігійними віруваннями. Взагалі кажучи, для лічби років не має ніякого значення навіть те, чи дата події вказана правильно, чи помилково. Головне, щоб рахунок років від обраного моменту проводився неперервно, без пропусків і повторень. Лічбу років «від Різдва Христового» (насправді – «від втілення Господа», тобто від свята Благовіщення), яку ми називаємо *нашою ерою*, запровадив у 525 р. римський монах Діонісій Малий, який складав у той час нові таблиці дат Пасхи.

1. Що таке календар? Які типи календарів розроблено в минулому, де і які використовуються в наш час?
2. Що було причиною проведення григоріанської реформи календаря?
3. Що таке наша ера?

## Вивчивши перший і другий параграфи та тему «Небесна сфера. Рух світил на небесній сфері»

### необхідно знати:

- \* Астрономія – наука, яка вивчає небесні тіла, окремі явища і процеси у Всесвіті та Всесвіт в цілому.
- \* Астрономія – одна з фундаментальних наук, тісно пов'язана з фізикою, хімією, науками про Землю, космонавтикою і має прикладне значення.
- \* Астрономія відіграє велику роль у формуванні світогляду.
- \* Небесна сфера – уявна сфера довільного радіуса, на яку проєктуються всі небесні світила і в центрі якої знаходиться спостерігач. Це поняття значно полегшує вивчення небесних об'єктів.
- \* Сузір'я – це певна ділянка зоряного неба з чітко окресленими межами, що включає всі астрономічні об'єкти, які знаходяться на ній постійно.
- \* Добове обертання небесної сфери – наслідок обертання Землі навколо власної осі.
- \* Рух Сонця по екліптиці і зміна вигляду зоряного неба впродовж року – наслідок обертання Землі навколо Сонця.
- \* Місячні та сонячні затемнення відбуваються при відповідних взаємних положеннях Сонця, Землі й Місяця в космічному просторі.
- \* Існування різних систем лічби часу (місцевий час, поясний час, всесвітній час тощо) обумовлене практичними потребами людини.
- \* Календар – це система лічби великих проміжків часу. В Україні використовуються григоріанський календар (новий стиль).

### необхідно вміти:

- \* Знаходити на небі Ківш Великої Ведмедиці, Полярну зорю, сузір'я Кассіопеї, Оріона, сузір'я Зодіаку та інші.
- \* Знаходити за допомогою Полярної зорі сторони горизонту.
- \* Користуватися картами зоряного неба, знаходити світила за допомогою їхніх координат.



## **II. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АСТРОНОМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Упродовж двох чи й трьох тисяч років спостереження астрономів зводилися до вимірювання кутових відстаней між світилами та визначення їхніх координат. Ця наполеглива, дуже копітка і здебільшого непомітна праця вчених-астрометристів триває і в наш час.

Та після того, як 1609 р. Галілео Галілей вперше поглянув на небо в телескоп, можливості астрономічних спостережень зросли у багато разів. Цей рік вважається початком нової ери в астрономії – *ери телескопічних досліджень*. І нехай з нашої точки зору телескоп Галілея був недосконалим, він перевернув світ в уяві його сучасників. Поглянувши в телескоп, можна було переконалися, що ландшафт Місяця в чомусь подібний до земного, що Венера, як і Місяць, змінює свої фази, що навколо Юпітера обертаються чотири супутники, у Сатурна є кільця, на Сонці є плями, а сяйво Молочного Шляху розпадається на міриади крихтих зір.

Все це збуджувало уяву, змушувало замислитись над питаннями про складність Всесвіту, його матеріальність, про множинність населених світів. Від початку телескопічної ери астрономи зосередились на з'ясуванні питань про фізичну природу небесних тіл, про джерела енергії та життєвий шлях зір, про будову і розвиток Всесвіту в цілому. Зараз астрофізика як один із найважливіших розділів астрономії має конкретні відповіді на багато питань, поставлених людським розумом. Отримано їх завдяки новим потужним телескопам, що працюють як в наземних астрономічних обсерваторіях, так і на космічних орбітальних та міжпланетних станціях, а також завдяки вмілому застосуванню законів та ідей сучасної фізики при осмисленні отриманих результатів.

## § 11. Сучасні наземні та орбітальні телескопи

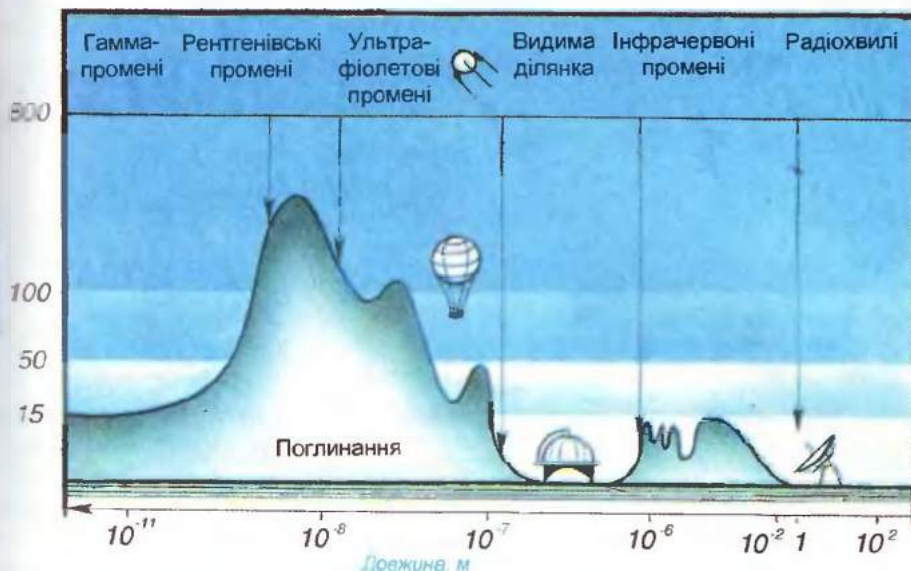
**1. Астрономія – наука всехвильова.** Галузь астрономії, яка вивчає Всесвіт у видимому світлі, називається *оптичною*.

Але видиме світло займає лише маленьку ділянку електромагнітного спектра, куди входять також радіохвилі, інфрачервоне, ультрафіолетове, рентгенівське та гамма-випромінювання – різні за довжиною (чи частотою) електромагнітні хвилі.

Крізь товщу атмосфери до поверхні Землі доходить лише видиме світло з довжиною хвиль від 390 до 760 нм, радіохвилі з довжиною від 0,01 см до 30 м (мал. 11.1) та інфрачервоні промені довжиною 0,75 – 5,2 мкм і вибірково в довжинах хвиль 8,2 – 22 мкм. В інших діапазонах електромагнітних хвиль земна атмосфера непрозора.

З XIX ст. астрономи почали вивчати космічні об'єкти в доступних інфрачервоних променях. А в 30-х роках XX ст. зародилася нова галузь астрономії – *радіоастрономія*, справжній розвиток якої почався після другої світової війни. Та оскільки небесні тіла випромінюють у всьому діапазоні електромагнітного спектра, перед астрономами постала задача проведення досліджень поза межами атмосфери.

Порівняно просто ця задача вирішується для інфрачервоного та субміліметрового випромінювання з довжинами хвиль від 0,013 мм до 1 мм. Основна речовина, що поглинає інфрачервону радіацію, – водяна пара, концентрація якої швидко зменшується з висотою. На висотах 25–30 км земна атмосфера стає прозорою для інфрачервоного випромінювання. Важливі спостереження в цьому діапазоні проводяться з аеростатів і з борту штучних супутників Землі.



Мал. 11.1. Проходження електромагнітних хвиль через земну атмосферу

В короткохвильовій частині спектра виділяють окремо діапазони ультрафіолетової астрономії (довжина хвилі 390–30 нм), рентгенівської астрономії (30–0,01 нм) і гамма-астрономії (довжина хвилі менша за 0,01 нм), кожна з яких має свої методи досліджень (§ 12).

Важливу інформацію про те, що діється далеко за межами Землі, доносять до нас потоки космічних променів і нейтрино. Космічні промені складаються головним чином з протонів – ядер водню, а також з електронів, ядер гелію і ядер важчих хімічних елементів.

Нейтрино – це частинка, яка має неймовірну проникну здатність, бо майже не взаємодіє з речовиною. Не маючи електричного заряду, з маюю спокою, ще й досі достовірно не встановленою, нейтрино здатне проходити крізь тверде тіло навіть легше, ніж світло крізь скло. Наприклад, шар свинцю товщиною в 50 світлових років воно перетне так, немов це порожній простір. Утворюючись під час термоядерних реакцій, нейтрино негайно вилітає назовні, несучи інформацію про події у надрах зорі в поточний момент, тоді як електромагнітне випромінювання мандрує до поверхні зорі сотні тисяч чи мільйони років. А тому методи нейтринної астрономії дуже важливі для вивчення процесів, що відбуваються у надрах Сонця і зір.

Таким чином, з другої половини ХХ ст. астрономія стала всеохвальною наукою, яка вивчає Всесвіт практично в усьому діапазоні електромагнітних хвиль.

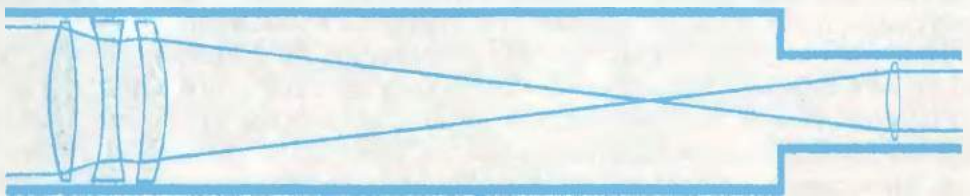
**2. Наземні оптичні телескопи.** Телескоп має три основних призначення: збирати випромінювання від небесних світил на приймальний пристрій (око, фотопластинка, спектрограф тощо); будувати у своїй фокальній площині зображення об'єкта чи певної ділянки неба; збільшувати кут зору, під яким спостерігаються небесні тіла, тобто розділяти об'єкти, розташовані на близькій кутовій відстані й тому нероздільні неозброєним оком.



Мал. 11.2. Оптичний телескоп

Оптичні телескопи (мал. 11.2) обов'язковими складовими частинами своєї конструкції мають: *об'єктив*, який збирає світло і будує у фокусі зображення об'єкта чи ділянки неба; *трубу* (тубус), яка з'єднує об'єктив з приймальним пристроєм; *монтування* – механічну конструкцію, що тримає трубу і забезпечує її наведення на небо; у разі візуальних спостережень, коли приймачем світла є око, обов'язково – *окуляр*. Через нього розглядається зображення, побудоване об'єктивом. При фотографічних, фотоелектричних, спектральних спостереженнях окуляр не потрібний, тому що відповідні приймачі встановлюються безпосередньо у фокальній площині.

Першими було збудовано лінзові *телескопи-рефрактори* (від лат. «рефракто» – «заломлюю», мал. 11.3). Проте світлові промені різних довжин хвиль заломлюються по-різному, і окрема лінза дає

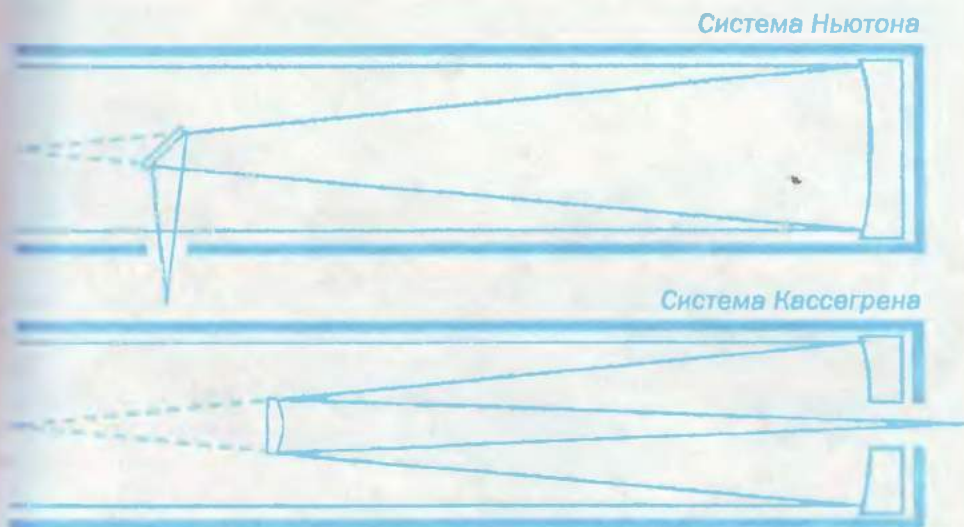


Мал. 11.3. Оптична схема телескопа-рефрактора

зabarвлене зображення. Для усунення цього недоліку з часом почали будувати об'єктиви з кількома лінзами зі скла з різними коефіцієнтами заломлення.

На розміри телескопів-рефракторів накладаються певні обмеження, тому найбільший лінзовий об'єктив має діаметр лише 102 см.

Рефрактори, як правило, використовують в астрометрії, а от астрономи користуються дзеркальними *телескопами-рефлекторами* (від лат. «рефлекто» – «відбиваю», мал. 11.4). Перший такий телескоп з діаметром дзеркала 2,5 см побудував І. Ньютон. Головні дзеркала рефлекторів спочатку мали сферичну форму, згодом – параболічну.



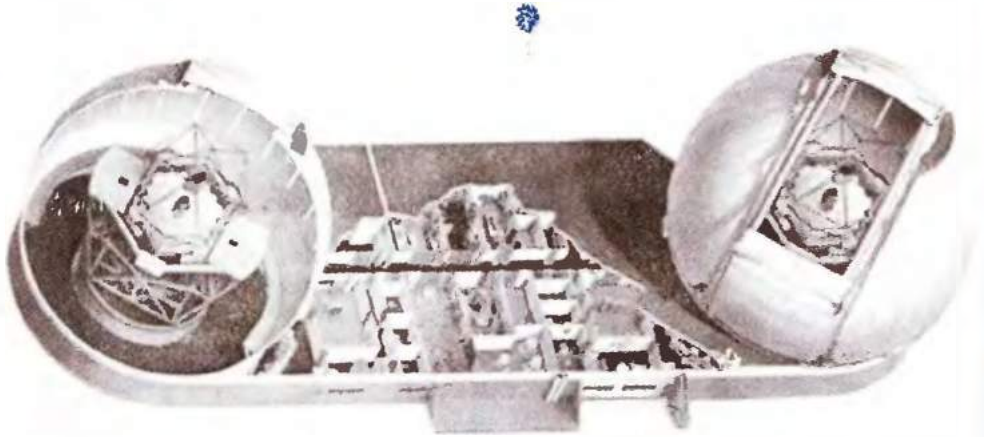
Мал. 11.4. Оптичні схеми телескопів-рефлекторів

Дзеркала виготовляли із бронзи. З середини ХІХ ст. почали робити скляні дзеркала і розробили метод зовнішнього сріблення скляних дзеркал, а з 1930 р. їх почали алюмініювати. Дуже зручною, а тому і найчастіше вживаною, була *система Кассегрена*, в якій головне дзеркало – увігнуте параболічне, а допоміжне – опукле гіперболічне; проте телескопи і павільйони, в яких їх встановлювали, були надзвичайно громіздкими.

Наприклад, з 1948 по 1975 р. найбільшим у світі був 5-метровий рефлектор Паломарської обсерваторії (США). Вага його дзеркала – 13 т, маса труби (точніше, гратчастої конструкції) довжиною 17 м – 140 т, телескоп було встановлено у башті діаметром 41,5 м з вагою купола 1 000 т. У 1975 р. на Північному Кавказі було введено в дію 6-метровий телескоп; за товщини дзеркала 65 см його вага становить 40 т, довжина «труби» – 24 м, діаметр башти – 44 м.

Справжня революція в телескопобудуванні відбулась у 70-х роках ХХ ст. На зміну системі Кассегрена прийшла телескопічна *система Річі-Кретьєна*, у якій головне дзеркало за формою дещо відрізняється від параболоїда, а допоміжне – від гіперболоїда. Тому і довжина труби, і діаметри павільйонів у два – чотири рази менші, ніж у попередніх телескопів. На 2000 рік введено в дію

близько десяти телескопів системи Річі-Кретьєна з діаметром дзеркал 3,6–4,2 м. З 1996 р. працює багатодзеркальний (діаметр сегмента становить 1,8 м) телескоп «Кек-І» з сумарним діаметром дзеркала 10 м, а з 1998 р. – такий же «Кек-ІІ» (мал. 11.5). Введено в дію «Джеміні» з діаметром дзеркала 8,1 м та японський «Субару» з діаметром дзеркала 8,3 м. З 1998 р. почергово вводяться в дію одне із шести (діаметром 8,2 м) дзеркал «Дуже великого телескопа» («Very Large Telescope» – VLT).



Мал. 11.5. Телескопи «Кек-І» та «Кек-ІІ»

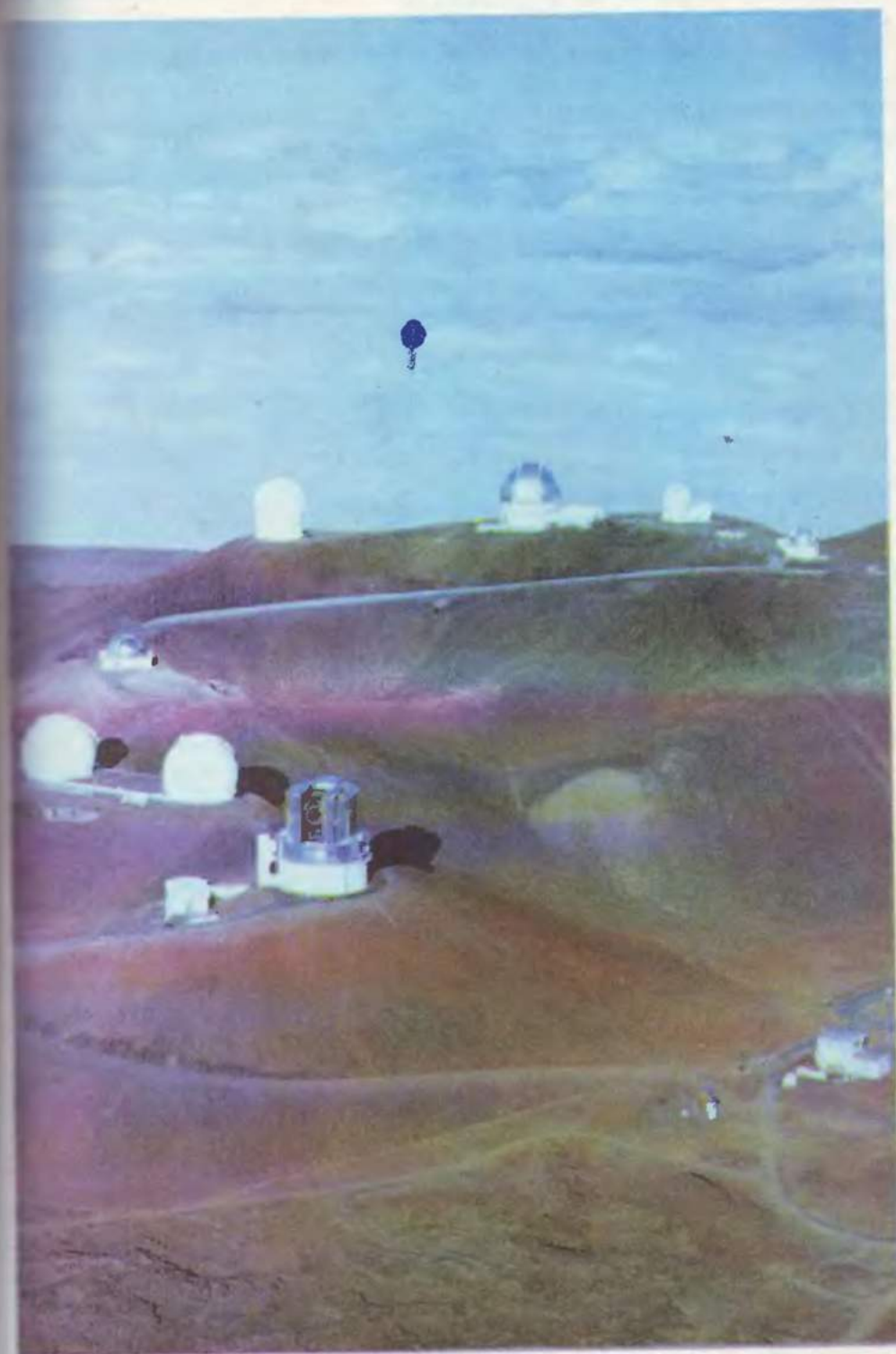
При побудові таких телескопів використовуються найновітніші досягнення техніки, і працюють вони, керовані на відстані зі спеціальних приміщень, без присутності людей поблизу телескопа.

**3. Астрономічні обсерваторії.** Упродовж тривалого часу заняття астрономією було ледь не приватною справою окремих ентузіастів. Але в XVII ст. було усвідомлено її значення для потреб географії та мореплавання. Розпочалось будівництво перших державних астрономічних обсерваторій (АО): Паризької (1671 р.), Гринвіцької (1675 р.) тощо.

В наш час у світі налічують близько 400 АО. В Україні провідними є Головна астрономічна обсерваторія НАН України (1944 р.), Інститут радіоастрономії з його унікальним декаметровим телескопом УТР-2 під Харковом, Кримська астрофізична обсерваторія (1950 р.). Певні традиції досліджень і спостережень зберігають АО університетів – Львівського (1769 р.), Харківського (1898 р.), Київського (1845 р.), Одеського (1871 р.).

Довгий час АО будувались поблизу чи навіть у населених пунктах. З XIX ст. їх почали розташовувати на гірських вершинах. Серед найбільших АО світу найвідомішими сьогодні є: введена в дію 1990 р. АО на вершині древньої вулканічної гори Мауна-Кеа (4215 м





Мал. 11.6. Обсерваторія Мауна-Кеа



Мал. 11.7. Радіотелескоп РТ-22 у Криму

в Гвайї). оголошеної науковим заповідником за свій унікальний астрономічний об'єкт: тут встановлено кілька 4-метрових телескопів, а також телескопи «Кек», «Джеміні», «Субару» (мал. 11.6); англійська АО на о. Ла-Пальма (2327 м, 1986 р.), американська АО Лас-Кампанас (2280 м, 1976 р.) у Чилі і там же європейська АО Ла-Сілла (2347 м, 1976 р.), де встановлено «Дуже великий телескоп».

В останні роки не менше половини наукових публікацій з астрономії ґрунтуються на спостереженнях небесних об'єктів із стратосфери, штучних супутників Землі, орбітальних космічних станцій та автоматичних міжпланетних станцій (АМС). В космосі працює ціла низка інфрачервоних, ультрафіолетових, рентгенівських, гамма-обсерваторій, які досліджують небо у всіх діапазонах електромагнітних хвиль, наприклад рентгенівська обсерваторія «Чандра». Важливою подією для астрономів був запуск 25 квітня 1990 р. на орбіту висотою 612 км «Космічного телескопа ім. Габбла» (мал. на стор. 51) з діаметром дзеркала 2,4 м, який вирішує велику кількість астрофізичних завдань. Загалом з 1962 р. для астрономічних досліджень запущено близько 50 ШСЗ та АМС.

**4. Радіотелескопи і радіоінтерферометри.** Радіовипромінювання від космічних об'єктів приймається спеціальними установками, які називаються радіотелескопами (РТ). Сучасні радіотелескопи досліджують космічні радіохвилі в довжинах від одного міліметра до декількох десятків метрів.

Основними складовими частинами типового радіотелескопа є *антена* і дуже чутливий *приймач*. Антени РТ, які приймають міліметрові, сантиметрові, декаметрові та метрові хвилі – це найчастіше параболічні підбивачі, подібні до дзеркал звичайних оптичних рефлекторів. У фокусі параболоїда встановлюється *опромінювач* – пристрій, який збирає радіовипромінювання, направлене на нього дзеркалом. Опромінювач передає прийнятій енергії на вхід приймача, і після підсилення та виділення заданої частоти сигнал реєструється на стрічці самописного електричного приладу. Сучасні підсилювачі дають змогу виявляти (розрізняти) радіосигнали, що виникають при змінах температури всього на 0,001 К.

Радіоастрономічні дзеркала не вимагають такої точності виготовлення, як оптичні. Щоб дзеркало не спотворювало зображень, його відхилення від заданої параболічної форми не повинно перевищувати  $1/8$  довжини хвилі, яку він приймає. Наприклад, для довжини хвилі 10 см досить мати точність дзеркала близько 1 см. Більше того, дзеркало РТ можна робити не суцільним: досить натягнути металеву сітку на каркас, який надає йому параболічної форми. Нарешті, РТ можна зробити нерухомим, якщо замінити поворот дзеркала зміщенням опромінювача. Завдяки таким особливостям РТ можуть набагато перевищувати оптичні телескопи у розмірах.

Найбільша у світі радіоастрономічна антена, встановлена у кратері згаслого вулкана Аресібо на острові Пуерто-Ріко, має діаметр

305 м (мал. 11.8). Нерухома антена, спрямована в зеніт, не дозволяє приймати радіохвилі з будь-якої точки неба, але завдяки добовому обертанню Землі і можливості зміщувати опромінювач більша частина небесної сфери доступна для спостережень.

Інші найбільші радіотелескопи з параболічною антеною встановлено: в Радіоастрономічному інституті ім. М. Планка (Еффельсберг, ФРН) – діаметр антени 100 м, в обсерваторії Грін Бенк у штаті



Мал. 11.8. Радіотелескоп в Аресібо

Вірджинія (США) – антена 110×100 м, а також 76-метровий РТ в обсерваторії Джодрел Бенк (Англія), 64-метровий РТ в обсерваторії Паркс (Австралія), 22-метровий РТ недалеко від Євпаторії в Криму (мал. 11.7, на стор. 58). Усі вони легко спрямовуються в задану точку неба поворотом навколо двох осей – вертикальної (встановлюється азимут об'єкта) і горизонтальної (установка висоти об'єкта). В подальшому ЕОМ безперервно

подає сигнали керуючим пристроям, які ведуть РТ услід за об'єктом при його зміщенні, зумовленому добовим обертанням небесної сфери.

Радіотелескопи дуже великих розмірів можуть бути побудовані з великої кількості окремих дзеркал, що фокусують випромінювання на один опромінювач. Прикладом є РАТАН-600 («радіотелескоп Академії наук, діаметр 600 м»), встановлений поблизу станиці Зеленчук на Північному Кавказі неподалік від 6-метрового оптичного телескопа. Він являє собою замкнене кільце діаметром 600 м і складається з 900 плоских дзеркал розмірами 2×7,4 м, що утворюють сегмент параболоїда. В такому РТ може працювати як усе кільце, так і його частина.

На довжинах хвиль від кількох метрів і більше параболічна антена не застосовується, замість неї використовують системи з великої кількості плоских дипольних антен, електричний зв'язок між якими забезпечує необхідну для РТ спрямованість прийому. Саме за таким принципом побудовано найбільший у світі радіотелескоп декаметрового діапазону УТР-2 (мал. 11.9), розташований під Харковом.

Використовуючи відоме у фізиці явище інтерференції, дослідники розробили методи радіоінтерферометричних спостережень за використанням двох різних приймачів. Об'єднуючи декілька РТ, створюють так звані *радіоінтерферометри* (PI).

На сьогодні найвідомішим PI є введений у дію 1980 р. РТ VLA («Very Large Array» – «Дуже велика ґратка»), який встановлено в пустельній



Мал. 11.9. Радіотелескоп УТР-2

пустелі штату Нью-Мексико, США (мал. 11.10). Цей РТ складається з 27 повноповоротних 25-метрових параболічних антен, розміщених у формі літери Y з довжиною двох плечей по 21 км, а третього – 19 км. У цьому і багатьох інших випадках антени пов'язані між собою електричними лініями.

Розроблено також методи далекої радіоінтерферометрії, коли використовують попарно великі антени, розташовані на відстанях до 12 000 км. З допомогою таких систем в радіоастрономії вдалось отримати кутове розділення дуже тісних об'єктів порядку  $0,0001''$ , що набагато краще, ніж дають оптичні телескопи (для порівняння: кутове розділення здатність людського ока –  $2'$ ). З 1979 р. однією з антен інтерферометра є РТ, виведений супутником на орбіту Землі. Завдяки радіоінтерферометрам вдається вивчати структуру далеких радіоджерел.



Мал. 11.10. Радіотелескоп VLA

**5. Телескопи для спостережень у високоенергетичних діапазонах електромагнітних хвиль.** Оскільки земна атмосфера затримує електромагнітні хвилі, коротші за 300 нм, всі приймачі ультрафіолетових, рентгенівських та гамма-променів доводиться виносити за її межі. Значну частину досліджень в ультрафіолеті від 300 нм до 120 нм здійснено за допомогою звичайних телескопів з дзеркалами, покритими алюмінієм, для ще коротших хвиль використовують дзеркала, покриті тонким шаром фтористого магнію, та добре відомі лічильники Гейгера-Мюллера. Особливі труднощі виникають при спостереженнях рентгенівського випромінювання з довжиною хвиль від 0,01 нм до 1 нм. Сучасні методи полірування та шліфування матеріалів не дозволяють виготовити дзеркало з такою високою точністю. Однак виявляється, що при падінні і відбиванні променя під дуже малим кутом до дзеркала вимоги до точності його виготовлення значно послаблюються. Такий телескоп є поєднанням двох дзеркал – параболоїда обертання і гіперболоїда обертання. Відбивні поверхні яких покриті шаром хрому і нікелю. Промінь відбивається від першого дзеркала під кутом лише  $1^\circ$  до відбивної поверхні, потрапляє на друге дзеркало, а після цього – у фокальну площину, де й будується зображення, скажімо, Сонця. Усі ж інші промені, що йдуть ближче до головної осі дзеркала, затримуються діафрагмою (непрозорим екраном).

В гамма-діапазоні пристроєм для реєстрації квантів слугують *детектори* (з лат. – «той, що виявляє»).



1. Які спектральні діапазони традиційно виділяють в астрономії? Яку назву отримали відповідні розділи астрономії?
2. Що таке космічні промені?
3. Які типи телескопів використовують в астрономії і хто першим сконструював кожен із них?
4. Де розташовано найбільші телескопи?
5. Що таке радіоінтерферометр і за яким принципом він збудований?

11.1. Знайдіть на картах «Атласу світу» розташування найголовніших астрономічних обсерваторій: Мауна-Кеа ( $\lambda = -155^\circ 29'$ ,  $\varphi = 19^\circ 50'$ ), Лас-Кампанас ( $\lambda = -70^\circ 42'$ ,  $\varphi = -29^\circ 00'$ ), Ла-Сілла ( $\lambda = -70^\circ 44'$ ,  $\varphi = -29^\circ 15'$ ), гора Пастухова ( $\lambda = 41^\circ 26'$ ,  $\varphi = 43^\circ 39'$ ), Маунт Паломар ( $\lambda = -118^\circ 04'$ ,  $\varphi = 34^\circ 13'$ ).

## § 12. Випромінювання: приймання та аналіз

**1. Величини потоків випромінювання.** Інформацію про явища і процеси, що відбуваються у навколишньому Всесвіті, астрономи отримують шляхом реєстрації електромагнітного випромінювання, яке приходить від космічних об'єктів. Досі ми розглядали його як електромагнітні хвилі певної довжини (або частоти), але можна уявити його як частинки, які називаються *фотонами*.

Від Сонця на кожний квадратний метр земної поверхні, перпендикулярної до сонячних променів, в середньому надходить енергія  $1370 \text{ Вт/м}^2$ . Середня частота цього випромінювання  $\nu = 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ . Таким чином, середня енергія одного кванта становить  $h\nu = 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . За одну секунду на площу  $1 \text{ м}^2$  від Сонця надходить  $1370 / (4 \cdot 10^{-19}) = 3,4 \cdot 10^{21}$  квантів електромагнітного випромінювання.

Як відомо, потік енергії через вибрану площу змінюється обернено пропорційно квадрату відстані до джерела. Відстані до найближчих зір в середньому майже у 300 000 разів перевищують відстань до Сонця. Якщо Сонце знаходилося на такій відстані, ми б отримували від нього лише  $4,1 \cdot 10^6$  квант/см<sup>2</sup> за секунду. Найвідоміша галактика *Туманність Андромеди* знаходиться від нас на відстані 2,3 млн/св.р., це майже в  $1,5 \cdot 10^{10}$  разів далі, ніж Сонце. Нехай у ній знаходиться 10 млрд. таких сонць, як наше. Отже, від неї маємо потік квантів  $11 \cdot 10^6$  квант/см<sup>2</sup> за секунду. Від такої ж галактики з відстані в 1 млрд/св.р. отримаємо лише 3 квант/см<sup>2</sup> за секунду, а з відстані в 10 млрд/св.р. – 1 квант/см<sup>2</sup> за 10 секунд.

Ось чому для вивчення явищ і процесів, що відбуваються в таких далеких об'єктах, потрібні потужні телескопи і надчутливі реєструючі пристрої. Ми вже знаємо (§ 3), що освітленості від небесних світил вимірюють у зоряних величинах. Отже, якщо діаметр об'єктива телескопа  $D$  [см], то гранична зоряна величина, яку ще побачить спостерігач у телескоп, така:

$$m_{\text{гр}} \approx 7,0^m + 5 \lg D. \quad (12.1)$$

Зокрема, у телескоп з діаметром дзеркала 6 м можна бачити зорі до 22<sup>ї</sup>. Світловий потік від таких зір у 2,5 млн. разів менший, ніж від найслабкішої зорі, яку ми ще бачимо неозброєним оком.

**2. Приймачі випромінювання.** З 1880 р. в астрономії систематично використовують фотографію. У наш час понад 50% усіх астрономічних спостережень здійснюють саме шляхом фотографування небесних об'єктів. Фотографічна емульсія, на відміну від ока, здатна накопичувати кванти світла, на ній водночас утворюються зображення сотень і тисяч світил. Такі зображення певної ділянки неба чи об'єкта можуть зберігатися багато років. У наш час небо фотографують на кольорову емульсію, що дає змогу, зокрема, виявляти особливості структури газових туманностей тощо.

Якщо  $t$  – тривалість експозиції у хвилинах, то гранична зоряна величина зафіксованого об'єкта оцінюється формулою

$$m_{\text{ph}} \approx 14,8^m + 2,5 \lg D + 1,25 \lg t, \quad (12.2)$$

де, як і раніше,  $D$  – в см. При  $D = 250$  см і  $t = 100$  хв гранична фотографічна зоряна величина дорівнює 24<sup>ї</sup>.

Але за межами земної атмосфери такий же телескоп здатний вловлювати сигнали від об'єктів, у 40 разів слабкіших (до  $28^m$ ).

З 40-х років ХХ ст. успішно використовують *фотоелектронні помножувачі*, в яких потік фотонів, що надходить від небесного світила, перетворюється в електричний струм. Фотоелектронний помножувач (ФЕП) – це скляний прозорий балон, у якому створено вакуум і в який вмонтовані фотокатод, емітери або діоди – загальною кількістю до двох десятків – і анод. Усі вони мають виводи, на які подаються все зростаючі електричні потенціали. Електрон, вирваний внаслідок фотоэффекту з фотокатода, прискорюється в електричному полі, вдаряється об поверхню першого емітера і вибиває з нього декілька електронів, які, у свою чергу, рухаються в напрямку другого емітера, вдаряються об нього і вибивають ще більше електронів і т.д.

У підсумку кількість електронів, що потрапляють на анод, буде у  $10^6$ – $10^9$  разів більшою від початкової кількості, вирваної з катода.

З початку 70-х років в астрономії застосовують приймачі, дія яких ґрунтується на притаманному всім напівпровідникам явищі внутрішнього фотоэффекту. Для зниження шумів прилад охолоджують до температури рідкого азоту (77 К). Одним із варіантів таких фотоприймачів є *прилади із зарядовим зв'язком* (ПЗЗ, англ. мовою аббревіатура CCD). Тут електрони, що вивільнилися при поглинанні речовиною фотонів, зберігаються в окремих елементах кремнієвої кристалічної пластинки – в пікселях, а зчитувальний пристрій підраховує і реєструє величину нагромадженого реального заряду.

Завдяки застосуванню ПЗЗ гранична зоряна величина, яку, зокрема, можна зареєструвати на 5-метровому рефлекторі зросла з  $25^m$  до  $28^m$ , тобто стало можливим реєструвати потоки в 16 разів слабкіші, ніж раніше. Щоб досягти такого прогресу зі старими (фотографічними) приймачами, довелося б побудувати оптичний телескоп з діаметром дзеркала 31 м.

**3.\* Допоміжні прилади.** Саме по собі зображення об'єкта, отримане у фокусі телескопа, особливо якщо це далека зоря, не несе важливої інформації, яка б розкривала його природу. Для того щоб отримати цю інформацію, астрономи використовують найрізноманітніші допоміжні прилади. Найвідомішими серед них є спектрографи. Вивчаючи спектри космічних тіл, можна дізнатися про хімічний склад, температуру, наявність і величини електричних та магнітних полів цих об'єктів, швидкість їхнього руху в просторі тощо.

Дуже часто спостереження проводять із застосуванням світлофільтрів, за допомогою яких виділяють випромінювання об'єкта в окремих діапазонах спектра.

Сконструйовано *електронно-оптичні перетворювачі* (ЕОП), завдяки яким інфрачервоне зображення трансформується у видиме. Найпростіший ЕОП нагадує однокаскадний фотопомножувач, у якому виготовлено у вигляді циліндричної трубки, що виконує функції фотопомножувача.



системи. Фотоелектрони вільно проходять крізь неї і, потрапляючи на екран, покритий люмінофором (сульфідом цинку чи кадмію), гальмуються. При цьому екран починає світитися (флуоресціювати). В такий спосіб електронне зображення перетворюється у світлове, яке потім фотографують.

З 1950-х років в астрономії використовують *телевізійний метод* вимірювань слабких об'єктів, що дає великий виграш у часі. Цей метод дозволяє значно посилювати слабкі за яскравістю об'єкти, передавати їхні зображення від телескопа в лабораторне приміщення, збільшувати масштаб зображення, його контрастність і яскравість, розглядати це зображення або фотографувати його.

Завдяки телевізійному методу з'явилася *спекл-інтерферометрія* – метод отримання моментального зображення об'єкта (за декілька сотих часток секунди), діаметр якого близький до дифракційного. Тим самим усувається ефект розсіювання світлових променів на неоднорідностях земної атмосфери, а тому можна не лише виявляти слабкість окремих астрономічних об'єктів, а й оцінювати головні параметри таких систем. -

Найрізноманітніші допоміжні пристрої та методи реєстрації енергії розроблено для позаоптичних діапазонів спектра. Опишемо коротко принцип роботи *нейтринного телескопа*, тобто детектора нейтрино, які приходять до Землі від Сонця та інших зір.

Якщо в надрах зорі термоядерні реакції відбуваються за схемою так званого протон-протонного циклу ( $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$ ), то при цьому випромінюється нейтрино ( $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ ). Одна з можливих реакцій, що дає змогу реєструвати сонячні нейтрино на Землі, така: при взаємодії нейтрино з ізотопом хлору  $^{37}\text{Cl}$  утворюється радіоактивний ізотоп аргону  $^{37}\text{Ar}$  ( $^{37}\text{Cl} + \nu \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ ); цей ізотоп невдовзі, з періодом розпаду  $T_{1/2} = 34$  доби, розпадається за схемою  $^{37}\text{Ar}_{18} \rightarrow ^{37}\text{Cl}_{17} + e^- + \nu$ . При цьому випромінюються рентгенівські промені з енергією 2,8 кеВ, які можна реєструвати. Для цих експериментів використовують рідкий перхлоретилен –  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ , де один із чотирьох атомів хлору є ізотопом  $^{37}\text{Cl}$ .

У 1967 р. в США на глибині 1 490 м було змонтовано установку (горизонтальний циліндричний бак довжиною близько 14 м і діаметром 6 м), що містить 400 000 л (615 т)  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ . Після кожних 100 днів роботи через нього пропускають 20 000 л газоподібного гелію, який захоплює з собою ізомери  $^{37}\text{Ar}$ . Далі у вугільних фільтрах атоми аргону поглинаються, їхній розпад і реєструється лічильниками.

Інші нейтринні детектори змонтовано, зокрема, у шахтах з видобування золота на глибині 3 км у Південно-Африканській Республіці та на глибині 2 км у Південній Індії. Нейтринну обсерваторію збудовано у надрах гори Андирчі неподалік від Ельбруса в Кабардино-Балкарії.

Слід також відзначити найбільші японські нейтринні детектори, встановлені за 200 км від Токіо: «Каміоканде» та «Суперкаміоканде» з чутливістю, у 100 разів вищою від попереднього. Останній можна по

праву назвати нейтринним телескопом, адже з його допомогою одержано перше нейтринне зображення Сонця.



**1.** Яку роль відіграють телескопи в астрономії? **2.** У чому принципова різниця між фотографічними і фотоелектричним методами спостережень? **3.\*** Як працює електронно-оптичний перетворювач? **4.\*** Що таке детектор нейтрино?

**11.1.** За даними курсу фізики намалюйте схему призмового спектрографа, з'ясовуючи роль кожного з його складових елементів. **11.2.\*** З'ясуйте, що отримає спостерігач, встановивши тригранну призму перед об'єктивом рефрактора.

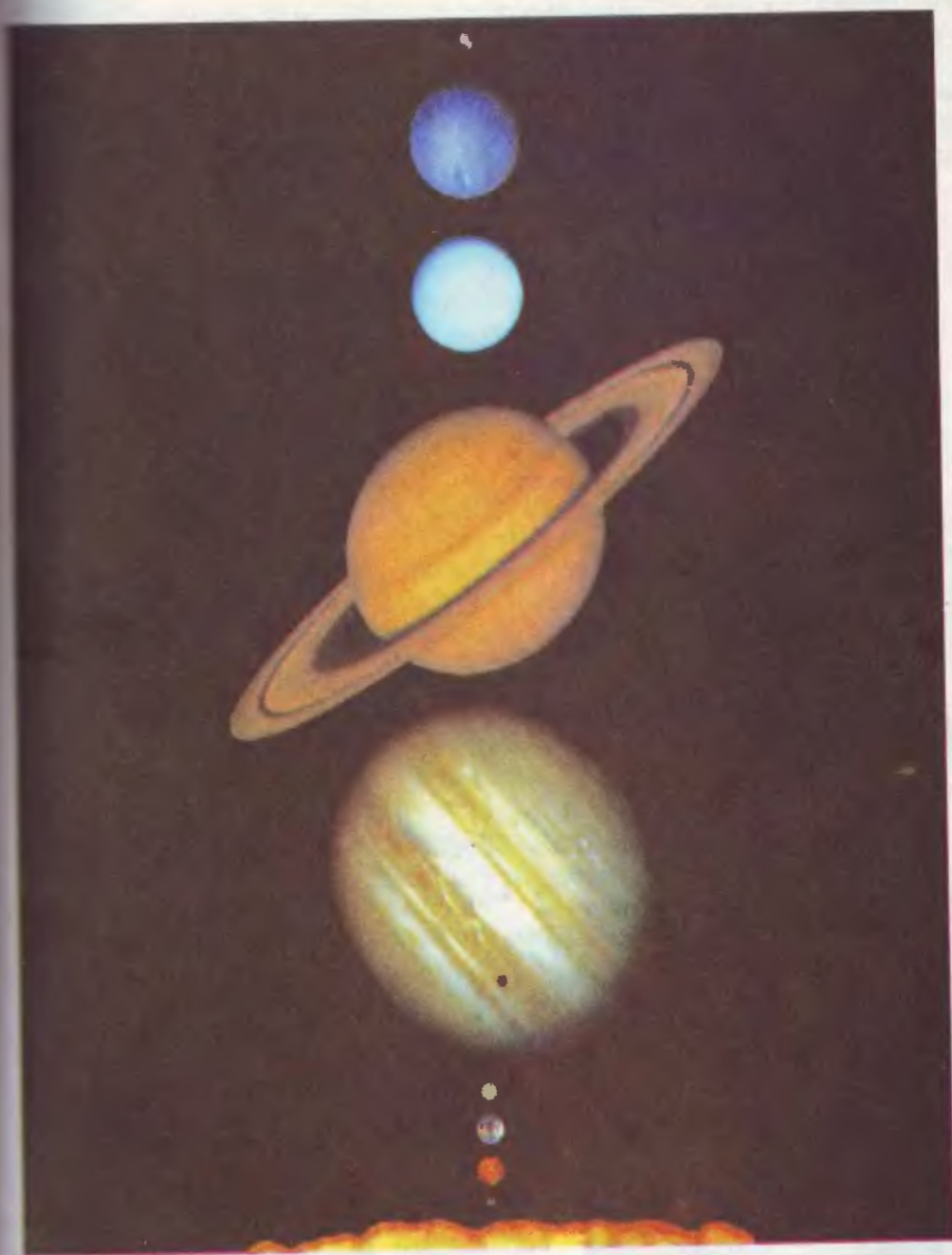
## Вивчивши розділ II «Інструменти і методи астрофізичних досліджень»

### необхідно знати:

- \* Астрономія сьогодні – це всехвильова наука, яка досліджує небесні світила не лише за допомогою видимого людським оком світла.
- \* Основне призначення телескопа – зібрати більше світла і збільшити кут зору, під яким спостерігається те чи інше світило.
- \* Оптичні телескопи бувають лінзові (рефрактори) і дзеркальні (рефлектори).
- \* В сучасній астрономії використовують, окрім оптичних, також інші телескопи: радіотелескопи, інфрачервоні тощо,
- \* як наземні, так і орбітальні.
- \* Астрономічна обсерваторія – це науковий центр, де за допомогою телескопів спостерігають небесні об'єкти.

### бажано вміти:

- \* Проводити спостереження небесних світил за допомогою телескопа.



### III. НАША ПЛАНЕТНА СИСТЕМА

Всі тіла, що рухаються навколо Сонця, утворюють в сукупності планетну систему, яка називається Сонячною. Сонячна система – це розмаїта і густонаселена сім'я. До її складу входять: дев'ять великих планет; понад вісімдесят їхніх супутників; напевне, кілька десятків тисяч малих тіл або астероїдів розмірами від 10 до 1 000 км; комети; безліч метеорних тіл з розмірами меншими за 1 км – так званих метеороїдів; міжпланетні пил та газ.

За своїми характеристиками великі планети поділяються на дві групи: планети земної групи – Меркурій, Венера, Земля та Марс, планети-гіганти – Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун. Щодо планети Плутона, то вона не належить до жодної з цих груп, а швидше нагадує деякі з супутників планет-гігантів. Відмінності між планетами обох груп обумовлені їхніми масами, хімічним складом та віддаленістю від Сонця. Якщо планети земної групи мають порівняно невеликі розміри, велику густину і складаються в основному з щільних речовин, то планети-гіганти, навпаки, мають великі розміри, малу густину і складаються в основному з газів.

Маса планет-гігантів складає 98 % сумарної маси всіх планет Сонячної системи. Великою силою тяжіння вони утримують потужні метаново-аміачні атмосфери, системи кілець та супутників і швидко обертаються.

І нарешті, в окрему групу виділяють сьогодні супутники планет.

У вивченні Сонячної системи за останні 40 років досягнуто значних успіхів. Але й сформульовано нові питання, відповідей на які все ще немає.

## § 13. Земля і Місяць

**1. Земля – планета.** Земля (мал. 13.1) бере участь у двох рухах у просторі: обертається навколо осі та рухається навколо Сонця з середньою швидкістю 30 км/с на середній віддалі 149,6 млн км.



Мал. 13.1. Земля

Завдяки рухові Землі по орбіті з періодом 365 днів 5 год 48 хв 46 с Сонце, відображаючи цей рух, переміщується небом серед зір з тим же періодом у напрямку, протилежному добовому обертанню неба, із заходу на схід.

У першому наближенні Землю можна вважати кулею. Але через обертання, яке спричиняє появу відцентрової сили, вона дещо сплюснута біля полюсів і опукла біля екватора. Тому ближчим до справжньої форми Землі буде еліпсоїд обертання, одержаний обертанням еліпса навколо малої осі. При цьому велику піввісь еліпсоїда приймають

рівною  $a = 6\,378\,160$  м, а малу  $b = 6\,376\,778$  м.

Земля обертається навколо осі, причому швидкість руху точок земної поверхні різна у різних широтах: максимальна на екваторі –

45 м/с – і нульова на полюсах. Відповідно і прискорення сили земного тяжіння в різних широтах різне: мінімальне на екваторі – 9,78 м/с<sup>2</sup>, максимальне на полюсах – 9,83 м/с<sup>2</sup>.

Вивчаючи нашу планету, вчені вже давно виділили ряд притаманних їй оболонок. Найвіддаленішою і найпротяжнішою оболонкою Землі є *магнітосфера* – ділянка навколосезного простору, фізичні властивості якої визначаються магнітним полем Землі та його взаємодією з потоками заряджених частинок. Магнітне поле Землі близьке до поля магнітного диполя, і його напруженість становить біля 40 А/м.

Через дію потоку частинок з боку Сонця (сонячного вітру) на денному боці магнітні силові лінії дещо притиснуті до Землі. З протилежного, нічного боку вони відхиляються сонячним вітром, утворюючи «шлейф» протяжністю до 5 млн км. В області замкнених ліній геомагнітного поля існує пастка для заряджених частинок. Геомагнітне поле захоплює і утримує всередині магнітосфери величезну кількість протонів і електронів, які утворюють *радіаційні пояси* (мал. 13.2). Радіають *внутрішній* і *зовнішній* радіаційні пояси на середній відстані від поверхні Землі відповідно 1 000–1 100 км і 35 000–50 000 км.

Земля оточена повітряною оболонкою – *атмосферою* (мал. 13.3) яка не має чітких меж і за своїми фізичними властивостями на різних

висотах поділяється на *тропосферу* (висота 9–17 км від полюса до екватора, температура зменшується з висотою до -55°), *стратосферу* (до 55 км, температура зростає до 0°), *мезосферу* (до 85 км, температура зменшується до -85°) і *термосферу* (від 90 км і вище, температура знову зростає). З урахуванням електричних властивостей атмосфери на висоті 70–400 км виділяють *іоносферу*, де повітря сильно іонізоване.

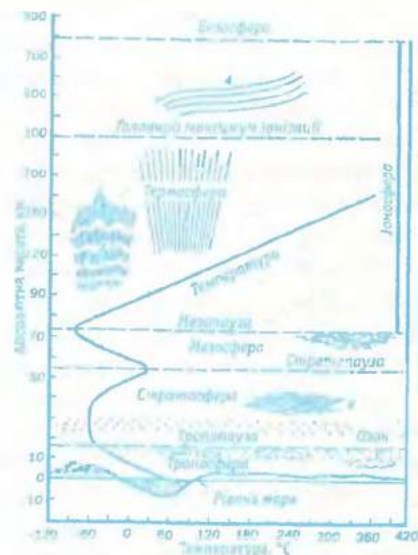
Головні складові (за масою) повітря: азот – 78 %, кисень – 21 %, аргон – 0,93 %, вуглекислий газ – 0,03 %, озон і водяна пара. Інші гази наявні в кількості, меншій 0,01 %.

Під атмосферою лежать *гідросфера* і *літосфера* – оболонки, на яких існує практично все живе на Землі.

Під гідросферою розуміють сукупність усієї води на Землі в твердому, рідкому і газоподібному стані. Найбільше води у рідкому



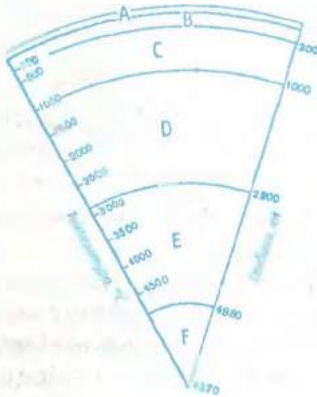
Мал. 13.2. Радіаційні пояси Землі



Мал. 13.3. Будова атмосфери Землі

стані. Вона утворює Світовий океан, що вміщує 97 % усієї поверхневої води і покриває 71 % земної поверхні. 2,5 % води припадає на лід, а на озера, річки і атмосферну вологу – лише 0,5 %.

**Літосфера** – це верхня тверда оболонка Землі. Вона повністю покриває надра планети. Проте за допомогою сейсмічних хвиль, що поширюються в тілі планети під час землетрусів, було з'ясовано внутрішню будову Землі (мал. 13.4). Виходячи зі швидкості поширення сейсмічних хвиль, земні надра поділяють на такі шари: *кора* (зона А) товщиною від 5 км під океанами до 70–80 км під найвищими горами; *мантії верхня і нижня* (зони С і D) загальною товщиною до 2 900 км; *зовнішнє ядро* (зона E) до 2 100 км завтовшки; *внутрішнє ядро* (зона F) радіусом до 1 300 км.



Мал. 13.4. Внутрішня будова Землі

Є думка, що на відміну від кори і мантії, які загалом перебувають у твердому стані, зовнішнє ядро рідке. З ним пов'язують наявність геомагнітного поля. Вважається, що у рідкому зовнішньому ядрі Землі можуть відбуватися досить складні інтенсивні рухи речовини, яка має високу електропровідність. При цьому виникають сильні електричні струми, які і генерують магнітне поле нашої планети.

Тверде внутрішнє ядро за температури до 7 000 К і тиску до 3,5 млн атмосфер перебуває у незвичайному стані. За таких фізичних умов електронні оболонки атомів руйнуються і утворюється щільна плазма, насичена вільними електронами. При цьому речовина, як і метал, починає добре проводити струм, отже, за аналогією, такий її стан називається *металічною фазою*.

Земля має багатий хімічний склад. 90 % її маси припадає на залізо, кисень, магній і кремній. Земна кора майже наполовину складається з кисню, що входить до складу різних окислів, і на чверть – з кремнію. Значний відсоток припадає також на алюміній. Кисень, кремній і алюміній утворюють найпоширеніші у природі сполуки – кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) та глинозем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Найпоширенішим компонентом мантії є кремнезем у складі силікатів. Щодо ядра, то воно, імовірно, складається із заліза з домішками нікелю і сірки чи нікелю і кремнію.

**2. Руки та зміни в земних оболонках.** Всі оболонки Землі – і зовнішні, і внутрішні – постійно рухаються і змінюються. Магнітосфера Землі залежно від активності Сонця змінює форму, змінюється кількість частинок у радіаційних поясах і їхня висота над Землею.

Магнітне поле планети змінює свою напрямленість і напруженість, а магнітні полюси «сповзають» зі своїх місць. З'ясовано, що в давнину напрямленість геомагнітного поля була іншою, ніж тепер, що магнітні полюси дрейфують по поверхні, і північний магнітний полюс колись знаходився поблизу екватора. А час від часу взагалі відбувається переорієнтація (*інверсія*) геомагнітного поля: північний магнітний полюс стає південним і навпаки.

Атмосфера Землі постійно розсіюється у космічному просторі, але вона поповнюється за рахунок вулканічної діяльності та випаровування води з поверхні морів і океанів. Час від часу змінюється співвідношення кількості газів в атмосфері (передусім водяної пари, озону  $O_3$  та двоокису вуглецю  $CO_2$ ).

Істотно змінює свій вигляд і тверда поверхня Землі через дію Сонця, вітру та води на гірські породи, а також через тектонічні процеси, що відбуваються в надрах.

Та зміни, пов'язані з планетою Земля, відбуваються не тільки в її оболонках. Змінюються в астрономічних масштабах геометричні зв'язки між Землею і Сонцем. Через вплив притягання з боку планет, Місяця та Сонця відбувається збурення поступального руху Землі навколо Сонця та обертового руху навколо осі.

З періодом у 100 тис. років, пересуваючись уздовж екліптики, але в тому ж напрямку, що і Земля по орбіті, повертається до попереднього положення серед зір точка перигелію земної орбіти. З періодом у 90–100 тис. років у межах 0,0163–0,066 змінюється ексцентриситет земної орбіти. З періодом у 41 тис. років у межах  $22^\circ$ – $24,5^\circ$  змінюється кут нахилу площини екватора до площини екліптики.

**3. Вплив рухів і змін в оболонках Землі на її клімат.** Відомо, що впродовж геологічної історії Землі її клімат неодноразово змінювався (хоча в цілому ці зміни не виходили за межі умов, при яких можливе існування життя). Геологічні дані вказують на чергування холодних періодів, коли великі ділянки суші вкривалися льодовиками, а рівень Світового океану знижувався, з періодами значного потепління, коли за північним полярним колом буяла рослинність. Такі зміни пов'язують з певними змінами та рухами в земних оболонках, а також з астрономічними факторами, які визначають кількість сонячної енергії, що надходить на Землю.

Зараз достовірно встановлено, що різкі зміни орієнтації геомагнітного поля пов'язані з різкими коливаннями клімату – появою великих льодових масивів (заледенінь) і їхнього наступного танення, та похолоданнями і потепліннями, які охоплювали Землю в цілому. Проте механізм цього взаємозв'язку поки що не розкрито.

Активне горотворення і переміщення земної кори внаслідок глобальних тектонічних процесів, які відбувалися впродовж геологічної історії Землі, впливають на перерозподіл морських течій та на загальну атмосферну циркуляцію, що, у свою чергу, також призводить до кліматичних змін на планеті.

Великий вплив на клімат має стан атмосфери, зокрема кількість водяної пари та вуглекислого газу, які в ній містяться. Значне підвищення вмісту водяної пари викликає збільшення хмарності, а отже зменшення кількості сонячного тепла, що надходить на поверхню. А зміна вмісту вуглекислого газу  $CO_2$  спричиняє послаблення чи посилення *парникового ефекту*, при якому вуглекислий газ частково поглинає тепло, випромінюване Землею в космос, затримує його в атмосфері й підвищує тим самим температуру поверхні та нижніх шарів атмосфери. Відомо, що явище парникового ефекту відіграє вирішальну роль у пом'якшенні

клімату Землі. За його відсутності середня температура планети була б на  $30-40^\circ$  нижчою, ніж є насправді, і становила б не  $+15^\circ\text{C}$ , а  $-15^\circ\text{C}$ , а то і  $-25^\circ\text{C}$ . За таких середніх значень температури океани дуже швидко вкрилися б льодом, перетворившись у величезні морозильники, і життя на планеті стало б неможливим. Отже, зменшення у повітрі вмісту  $\text{CO}_2$  послаблює парниковий ефект і сприяє похолоданню. Впливають на кількість вуглекислого газу багато причин, серед них найголовнішими є вулканічна діяльність і життєдіяльність земних організмів.

Та найбільший вплив на стан атмосфери, а отже і на клімат Землі у всепланетному масштабі, мають зовнішні, астрономічні фактори, такі як зміна потоків сонячної радіації внаслідок непостійності сонячної діяльності та зміни параметрів земної орбіти. Астрономічну теорію коливань клімату було створено ще у 20-ті роки ХХ ст. В цій теорії показано, що зміна ексцентриситету орбіти Землі від можливого мінімального 0,0163 до можливого максимального 0,066 може призвести до різниці кількості сонячної енергії, що падає на поверхню Землі в афелії і перигелії, на 25% за рік. Залежно від того, влітку чи взимку (для північної півкулі) Земля проходить свій перигелій, така величина зміни потоку сонячної радіації може призвести до загального похолодання чи потепління на планеті.

Теорія дала змогу обчислити час льодовикових періодів у минулому. З точністю до похибок визначення геологічних дат, вік десятка попередніх заледенінь збігся з передбаченнями теорії. Вона ж дозволяє відповісти на питання, коли повинне настати наступне найближче заледеніння: сьогодні ми живемо у міжльодовикову епоху, і в найближчі 5 000–10 000 років воно нам не загрожує.

**4. Супутник Землі – Місяць.** Місяць – найближче до Землі небесне тіло (мал. 13.6), яке знаходиться від неї на середній віддалі 384 400 км і має радіус 1 738 км. Маса Місяця значно поступається масі Землі, а сила тяжіння на його поверхні приблизно у 6 разів менша, ніж на Землі.



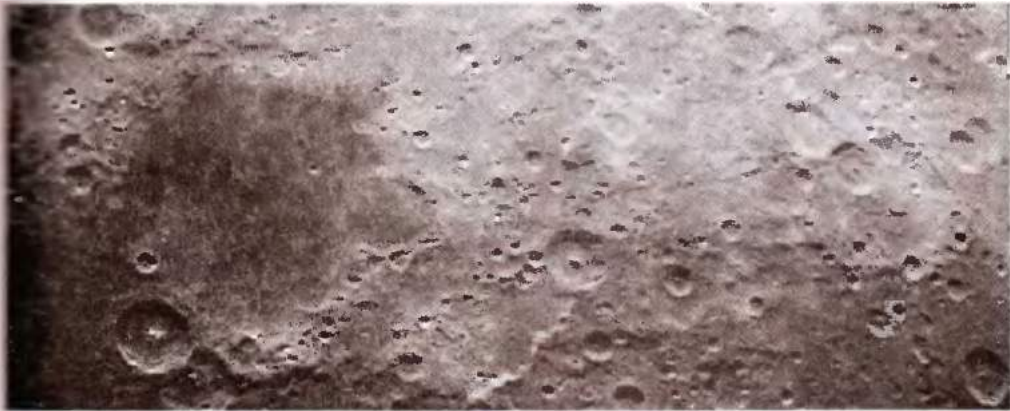
Мал. 13.5. Місяць

Відношення маси Місяця до маси Землі у порівнянні з подібною величиною для супутників інших планет дуже велике і становить 1:81. Друге місце (якщо не враховувати систему Плутона-Харон, 7:1) посідає супутник Нептуна Тритон, але його маса вже у 700 разів менша за масу планети. Тому є всі підстави вважати систему Земля–Місяць *подвійною планетою*.

Період обертання Місяця навколо осі дорівнює періоду його обертання навколо Землі. І через це Місяць завжди повернутий до Землі одним боком. Обертання такого типу називається *синхронним*. Однак, хоча в кожний даний момент спостерігач на Землі бачить рівно половину поверхні Місяця, через особливості його руху по орбіті насправді можна бачити не 50 %, а 60 % поверхні.



Найкрупніші деталі поверхні Місяця можна бачити з Землі навіть неозброєним оком. До них належать світлі й темні ділянки. Першим спостерігав Місяць у телескоп Галілей, він і назвав темні ділянки *морями*. Ця назва за традицією збереглася, хоча відомо, що у місячних морях немає води. Світлі ділянки – *материки* – займають близько 60% видимої з Землі місячної поверхні. Це нерівні, гористі райони, пересічені гірськими хребтами. Більшість із них мають земні назви: *Карпати*, *Кавказ*, *Альпи* тощо. Моря являють собою рівнинні ділянки місячної поверхні. Ще у XVII сторіччі деяким з них було присвоєно екзотичні назви: *Море Віногости*, *Море Достатку*, *Море Криз* тощо. Найбільша різниця у висо-



Мал. 13.6. Кратери на Місяці

тах на Місяці 11 км, а по регіонах вона коливається в межах 4–6 км. На окремих ділянках місячної поверхні є також тріщини та рови, довгі й круті урвища, загадкові форми, що нагадують русла висохлих річок.

Проте найефектнішими деталями місячної поверхні є *кратери* (мал. 13.6), які носять імена видатних учених. Серед них одинадцять імен належать українцям. Кратерів на видимому із Землі боці налічується близько 30 000. Найбільші серед них – кратер *Клавій* з діаметром 235 км і *Гримальді* – 200 км. На фотографіях з космічних апаратів кратерів з діаметром від 60 см налічується більше 200 000. Біля деяких кратерів добре видно яскраві промені, де речовина відбиває до 20 % падаючого на неї світла. Найвідоміші серед таких кратерів – *Тіхо* і *Коперник*. У деяких кратерах є *центральні гірки*. Більшість кратерів на Місяці мають метеоритне походження.

Відповідні вимірювання показали, що в полудень на екваторі температура поверхні Місяця сягає 390 К, а вночі 120 К.

Близько 40 % невидимої з Землі місячної поверхні залишалися недоступними для досліджень доти, доки радянська міжпланетна станція «Луна-3» (1959 р.) не здійснила обліт навколо Місяця. З'ясувалося, що на зворотному боці Місяця є такі ж деталі рельєфа, що й на видимому, але в меншій кількості. Найбільший кратер – *Ціолковський* (діаметр 789 км).

Від початку космічної ери досліджень в астрономії до Місяця було відправлено понад 60 космічних апаратів. Два з них доставили на Місяць

самоходи «Луноход-1» і «Луноход-2», а дев'ять були пілотовані американськими астронавтами (з них шість апаратів здійснили м'яку посадку).

Першою людиною, яка 20 липня 1969 р. ступила на Місяць, був американський астронавт Нейл Армстронг (мал. 13.7). Разом з Едвіном Олдріном вони здійснили м'яку посадку у місячному модулі корабля «Аполлон-11» на західній околиці Моря Спокою, тоді як третій астронавт, Майкл Коллінз, залишався на орбіті Місяця. Відтоді і до грудня 1972 р. 12 дослідників США провели на поверхні Місяця загалом близько 300 годин, встановили там різноманітні наукові прилади, зібрали і доставили на Землю 400 кг зразків місячного ґрунту.

Зразки місячних порід мають магматичне походження, їхній хімічний склад загалом такий же, як і склад земних порід, але з нестачею нікелю і кобальту і перевагою заліза, титану, цирконію та ітрію.



Мал. 13.7. Перша висадка людини на Місяці

В місячних породах особливо багато кремнезему, глинозему, окислів заліза та кальцію. Вік місячних порід становить 3–4,6 млрд років.

Місяць – спокійне в тектонічному відношенні небесне тіло. Найбурхливіша епоха у його формуванні закінчилася ще 3,16 млрд років тому. У наш час повна енергія місяцетрусів, зареєстрована сейсмометрами, менша, ніж енергія землетрусів, на 1 млрд разів. В основному це місяцетруси, викликані падінням метеоритів. Але у 1958 р. співробітники Кримської астрофізичної обсерваторії М. Козирев та В. Єзерський спостерігали в телескоп виверження газів з кратера *Альфонс*. А в листопаді

1971 р. група американських дослідників виявила в районі *Океану Бур* діючий гейзер.

Стале магнітне поле Місяця принаймні у 1 000 разів менше, ніж геомагнітне. Це свідчить про відсутність у Місяця рідкого ядра. Місяць оточений надзвичайно розрідженою газовою оболонкою з водню, гелію, неону та аргону, а також протяжною пиловою хмарою.

**5. Припливи і відпливи.** Перебуваючи на невеликій відстані від Землі, Місяць спричинає на її поверхні явища *припливів і відпливів*. Припливи і відпливи виникають через те, що розміри Землі порівняно з відстанню до Місяця не безмежно малі, тому дія сили місячного тяжіння на різні її точки неоднакова (мал. 13.8). Уявимо собі, що вся поверхня Землі вкрита океаном. Тоді частинки води, найближчі до Місяця у певний момент (у т. А), притягаються сильніше, а частинки найвіддаленіші від нього (у т. В) – слабкіше, ніж частинки в центрі Землі. Як наслідок, водна оболонка, створюючи припливний горб, набирає форми еліпсоїда, витягнутого в напрямку до Місяця. На відверненому від Місяця боці Землі також спостерігається припливний горб, але менших розмірів.

Земля обертається навколо осі, а тому припливні виступи пересуваються вздовж поверхні морів та океанів услід за Місяцем зі сходу на захід зі швидкістю 1 800 км/год. Над кожним пунктом припливна хвиля проходить двічі на добу. У відкритому морі рівень води піднімається на 1–1 м, а біля узбережжя, особливо у вузьких затоках чи бухтах, рівень води піднімається значно вище – на 4–5 м. Найбільші припливи – близько 18 м – спостерігаються на узбережжі Канади, де берег порізають вузькими глибокими фіордами.

Тяжіння Місяця створює припливні деформації не тільки у гідросфері, але і в атмосфері, викликаючи двічі на добу зміну тиску повітря на кілька мм рт. ст., і в літосфері, викликаючи підйом поверхні Землі у середньому на 40 см.

Сонячне тяжіння також спричиняє припливи і відпливи, але через значно більшу віддаленість Землі від Сонця вони у 2,2 рази менші, ніж місячні. Через систематичну дію припливного тертя Земля поступово збільшує своє обертання на 0,001 секунди за 100 років. Вивчення рифових кілець у коралів дозволило встановити, що близько 500 млн років тому тривалість земної доби становила приблизно 21 год.



Мал. 13.8. Схема виникнення припливів

1. Які оболонки Землі вам відомі? 2. Що ви знаєте про внутрішню будову Землі? 3. Що таке парниковий ефект і як він проявляється у встановленні температури поверхні нашої планети? 4. Які ефекти, пов'язані з особливостями руху Землі навколо Сонця, можуть обумовлювати коливання клімату на ній? 5. З яких причин поверхня Місяця густо вкрита кратерами і не схожа на поверхню Землі?

**13.1.** За даними курсу біології порівняйте вміст хімічних елементів в організмі людини з їхньою середньою поширеністю в речовині Землі. **13.2.** Поясніть з допомогою малюнка схему виникнення припливів і відпливів.

## 6 14. Планети земної групи

**1. Подібність і несхожість.** Планетам земної групи властиві порівняно невеликі розміри і маси, велика середня густина (для Меркурія, Венери і Землі відповідно 5,4, 5,2 і 5,5 г/см<sup>3</sup>, для Марса 3,97 г/см<sup>3</sup>) і тверда поверхня. Практично однакові значення густин свідчать про подібність співвідношень вмісту хімічних елементів, з яких утворені надра планет.

Зовсім інший вигляд має порівняння хімічного складу атмосфер. Так, Меркурій має дуже розріджену газову оболонку, основним компонентом якої є гелій. Атмосфера Венери на 97 % складається з вуглекислого газу; азоту в ній менше 2 %, вміст водяної пари поблизу поверхні планети – всього 0,002 %. Аналогічно в атмосфері Марса вуглекислого газу 95 %, азоту 2,7 %, водяної пари 0,1 %. Щоправда, маси цих двох атмосфер різні. Атмосфера Марса дуже розріджена, і тиск

біля його поверхні з середньому в 160 разів менший, ніж на рівні моря для Землі. Атмосфера Венери, навпаки, дуже густа, біля поверхні її густина лише у 15 разів менша від густини води і тиск – близько 90 атм. Отже, порівняно з іншими планетами земної групи Земля має унікальний склад атмосфери, де переважають азот і кисень.

Згідно з сучасними теоріями колись у земній атмосфері також було багато вуглекислого газу, який посідав у ній друге місце за вмістом. Однак за наявності на Землі води, яка дуже добре розчиняє вуглекислий газ, при формуванні осадкових порід на дні океану він досить швидко був зв'язаний у вигляді карбонату в крейді та вапняку. Живі організми сприяють цьому процесу впродовж мільярдів років, тому практично весь вуглекислий газ зник з атмосфери планети. Якби зараз цей газ раптово виділився, тиск біля поверхні Землі збільшився б до 40 атм.

Ще одна особливість планет земної групи: вони повільно обертаються навколо своїх осей. Зоряна доба на Меркурії триває близько 59 земних діб, а на Венері, як було виявлено у 1966 р. радіолокаційним методом, – 243,2 земної доби, причому обертається вона навколо осі у зворотному напрямку, тобто за годинниковою стрілкою, якщо дивитися на неї з боку північного полюса, а не проти, як більшість планет Сонячної системи. Земля і Марс обертаються навколо осей значно швидше, відповідно за 23 год 56 хв і 24 год 37 хв. Але це все одно набагато повільніше, ніж планети-гіганти.

**2. Меркурій.** Меркурій – найближча до Сонця планета (мал. 14.1). За розмірами вона не набагато більша від Місяця: її екваторіальний радіус становить 2439 км, а сила тяжіння у 2,6 рази менша від земної. Планета рухається навколо Сонця з періодом 87,97 земних діб по витягнутій еліптичній орбіті з ексцентриситетом 0,21. Тому в перигелії Меркурій перебуває від Сонця на відстані 45,9 млн. км, а в афелії – 69,7 млн. км. Вісь обертання Меркурія нахилена до площини його орбіти на  $83^\circ$ , тобто лише на  $7^\circ$  відхиляється від перпендикуляра.

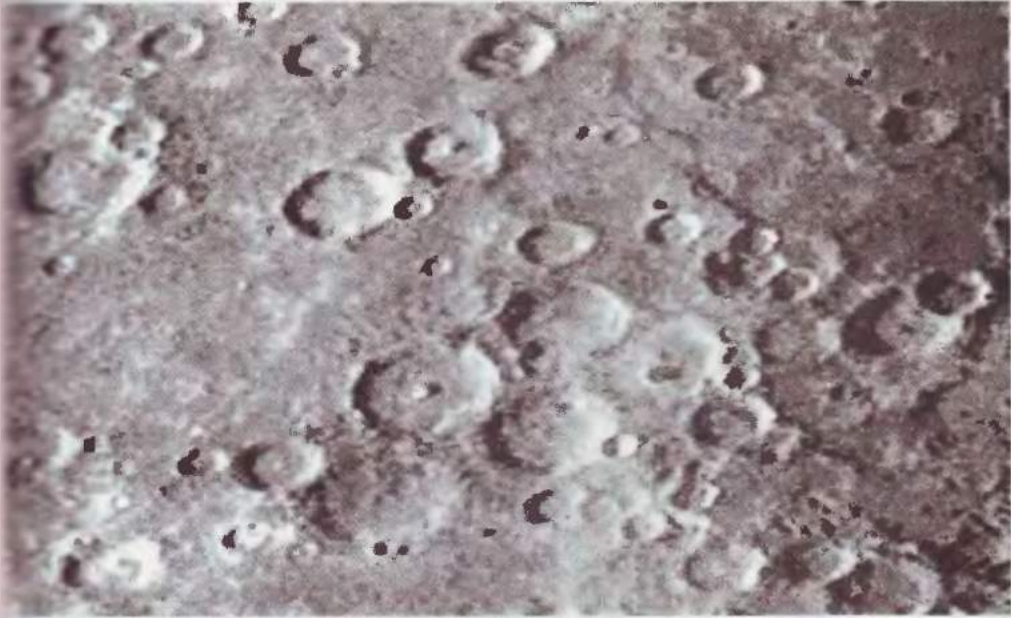


Мал. 14.1. Меркурій

Оскільки період осьового обертання Меркурія становить  $\frac{2}{3}$  періоду обертання навколо Сонця, то за кожні свої два роки він робить три оберти відносно зір і один оберт відносно Сонця. Тобто, одна сонячна доба на цій планеті триває майже два її роки.

Через велику витягнутість орбіти Меркурія здається, що Сонце дивним чином рухається його небосхилом. У своєму русі воно може прискорюватися чи сповільнюватися, зупинятися і навіть рухатися у зворотному напрямку.

У деяких районах Меркурія можна спостерігати ще більш вражаюче звище: через деякий час після сходу, піднявшись на невелику висоту над обрієм, Сонце, наче «забувши» щось важливе під обрієм, повертає назад, заходить там, де зійшло і знову сходить. Така ж картина відбувається і на заході: Сонце заходить, потім знову сходить на невелику висоту, підіймається на невелику висоту і знову заходить.



Мал. 14.2. Поверхня Меркурія

Через відсутність атмосфери і близькість до Сонця фізичні умови на поверхні Меркурія дуже суворі. Для нього властиві різкі перепади температури впродовж доби. В полудень на екваторі максимальна температура сягає 700 К, вночі вона знижується до 100 К і нижче.

З допомогою КА з'ясовано, що Меркурій має дуже розріджену газову оболонку, яка в основному складається з гелію, а також водню (він представлений у набагато меншій кількості), є незначна кількість аргону, неону, ксенону. Концентрація частинок така, як у земній атмосфері на висоті 700 км. Ця газова оболонка не є власною атмосферою планети: силою свого тяжіння Меркурій захоплює частинки сонячного вітру, які в середньому через 200 діб покидають планету, а на їхнє місце надходять нові.

Через значну близькість до Сонця спостерігати подробиці на поверхні Меркурія з Землі було неможливо. І лише у 1974–1975 рр. АМС «Маринер-10» (США) передала на Землю близько 10 000 знімків Меркурія. На цих знімках добре видно, що поверхня Меркурія суцільно покрита кратерами (мал. 14.2), чим він дуже схожий на Місяць. От тільки кратери розташовані густіше і вони плоскіші, ніж на Місяці: мають меншу глибину і меншу висоту

кільцевих валів, що їх оточують. На Меркурії немає характерних для Місяця морів, але є цілком нові деталі – величезні, довжиною в кілька сотень (часом до тисячі) кілометрів сходинкоподібні скиди висотою до 2–3 км.

Несподівано було виявлено магнітне поле Меркурія, напруженість якого становить близько 1% напруженості магнітного поля біля поверхні Землі. Наявність магнітного поля дозволяє припустити, що Меркурій має досить велике металеве ядро, розміри якого можуть досягати  $\frac{2}{3}$  діаметра планети. Вважається, що в ядрі зосереджено до 80% усієї маси Меркурія, і цим визначається його найбільша середня густина серед усіх планет Сонячної системи.

**3. Венера.** Венера – друга в Сонячній системі й найближча до Землі планета (мал. 14.3). З періодом 224,7 земних діб вона рухається навколо Сонця на середній відстані 108,2 млн км по майже коловій орбіті. Радіус і маса планети мало відрізняються від земних, відповідно 6051 км і  $0,82m_{\oplus}$ . Сила тяжіння на Венері становить 0,9 сили тяжіння на Землі. Вісь обертання планети лише на 3° відхиляється від перпендикуляра до площини її орбіти.



Мал. 14.3. Венера

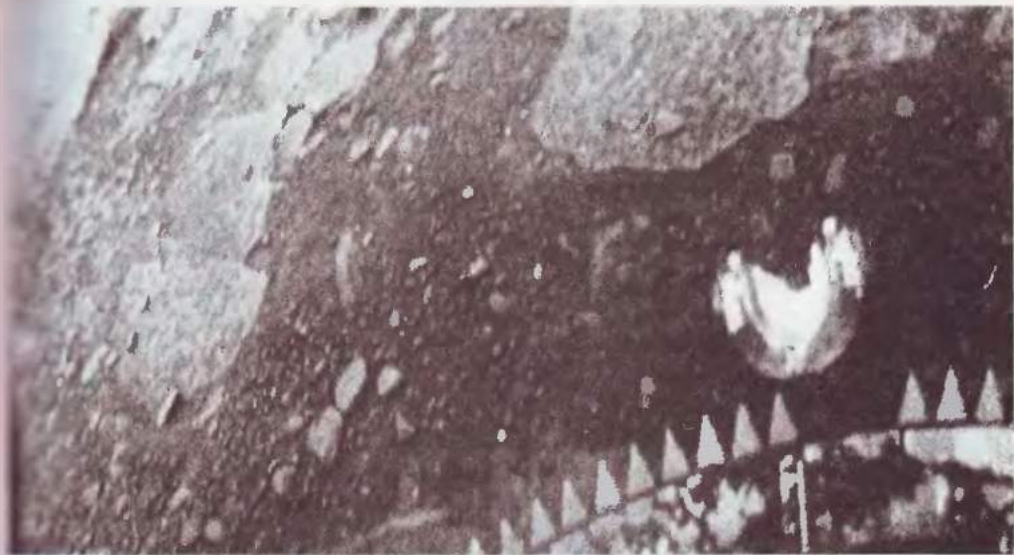
Венера дуже повільно обертається навколо осі у зворотному напрямку з періодом 243 земних доби. Оскільки періоди обертання навколо осі та навколо Сонця виявилися близькими, і обертання відбуваються в протилежних напрямках, то за один свій рік Венера тільки двічі встигає здійснити оберт навколо осі по відношенню до Сонця. В результаті сонячна доба на Венері триває 117 земних діб.

Ще в 1761 р. під час проходження Венери по диску Сонця М. Ломоносов з'ясував, що ця планета має атмосферу. Вона виявилася такою щільною, що через неї поверхню планети побачити неможливо.

Потужний хмаровий шар відбиває у космос 75% сонячного світла (для порівняння: Земля відбиває 36% сонячного світла). А тому за своєю яскравістю на земному небосхилі Венера посідає третє місце після Сонця і Місяця. Це єдина планета, від світла якої земні предмети можуть відкидати тінь.

З'ясувалося, що температура на поверхні планети досягає 780 К, а тиск – порядку 80–100 атм. Головна складова атмосфери – вуглекислий газ, 96% за об'ємом. Окрім того, до складу атмосфери входить багато інших газів, не типових для земного повітря: чадний газ, метан, аміак, двоокис сірки, соляна та плавикова кислоти, азотистий газ, етан.

Наявність в атмосфері Венери великої кількості вуглекислого газу спричиняє явище *парникового ефекту*, яке проявляється значно більше, ніж на Землі. Через високий коефіцієнт відбиття сонячного світла хмаровим шаром поверхня Венери отримує менше сонячної енергії, ніж земля. Але через інтенсивне поглинання великою кількістю вуглекислого газу теплової радіації у нижніх шарах атмосфери за мільярди років існування планети поверхня розігрілась так, що планета буквально світиться.



Мал. 14.4. Поверхня Венери

Денна температура атмосфери нижча, ніж температура поверхні, а уночі вона стає ще нижчою – до 420 К. У зв'язку з високою температурою на Венері немає води. Більше того, конденсовані на великій висоті краплі дощу випаровуються, не досягаючи поверхні.

Від початку 1970-х років цю планету досліджували понад 20 АМС. Зокрема, АМС «Венера-9» (СРСР, 1975 р.) передала на Землю перші зображення поверхні Венери (мал. 14.4). Надзвичайно цікаву інформацію було отримано за допомогою радіолокаторів АМС «Магеллан» (США, 1990 р.). Було виявлено велетенські кратери, сотні згаслих вулканів з діаметрами до 50 км, просторі низовини і плато, високі гірські масиви. Отримані дані свідчать про те, що у минулому Венера пережила період високої тектонічної активності, але у наш час не має жодної ознаки її продовження.

Деталям поверхні Венери за традицією надають лише жіночі імена. Кратери *Аксентьева* і *Федорець* названі на честь астрономів України.

**4. Марс.** Марс – четверта планета Сонячної системи (мал. 14.5), яка з періодом 687 земних діб рухається навколо Сонця на середній відстані 228 млн км. За розмірами Марс майже удвічі, а за масою – в дев'ять разів менший від Землі, сила тяжіння на Марсі

становить 0,39 земної. Вісь його обертання нахилена до площини орбіти під кутом 25°, завдяки чому на Марсі відбувається зміна пір року, а тривалість доби лише на 20 хв менша за земну. Напрямок на точку перигелію Марса близький до напрямку на точку афелію Землі. Тому коли обидві планети у своєму русі навколо Сонця опиняються поблизу цих точок водночас, тобто Марс перебуває у протистоянні до Землі, віддаль між ними стає найменшою – 56 млн км. Таке взаємне положення Землі та Марса називається великим протистоянням.

Великі протистояння повторюються через кожні 15 років і трапляються у серпні – на початку вересня. У цей час Марс повернутий до Землі південним полюсом, і тому його південна півкуля вивчена краще, ніж північна.

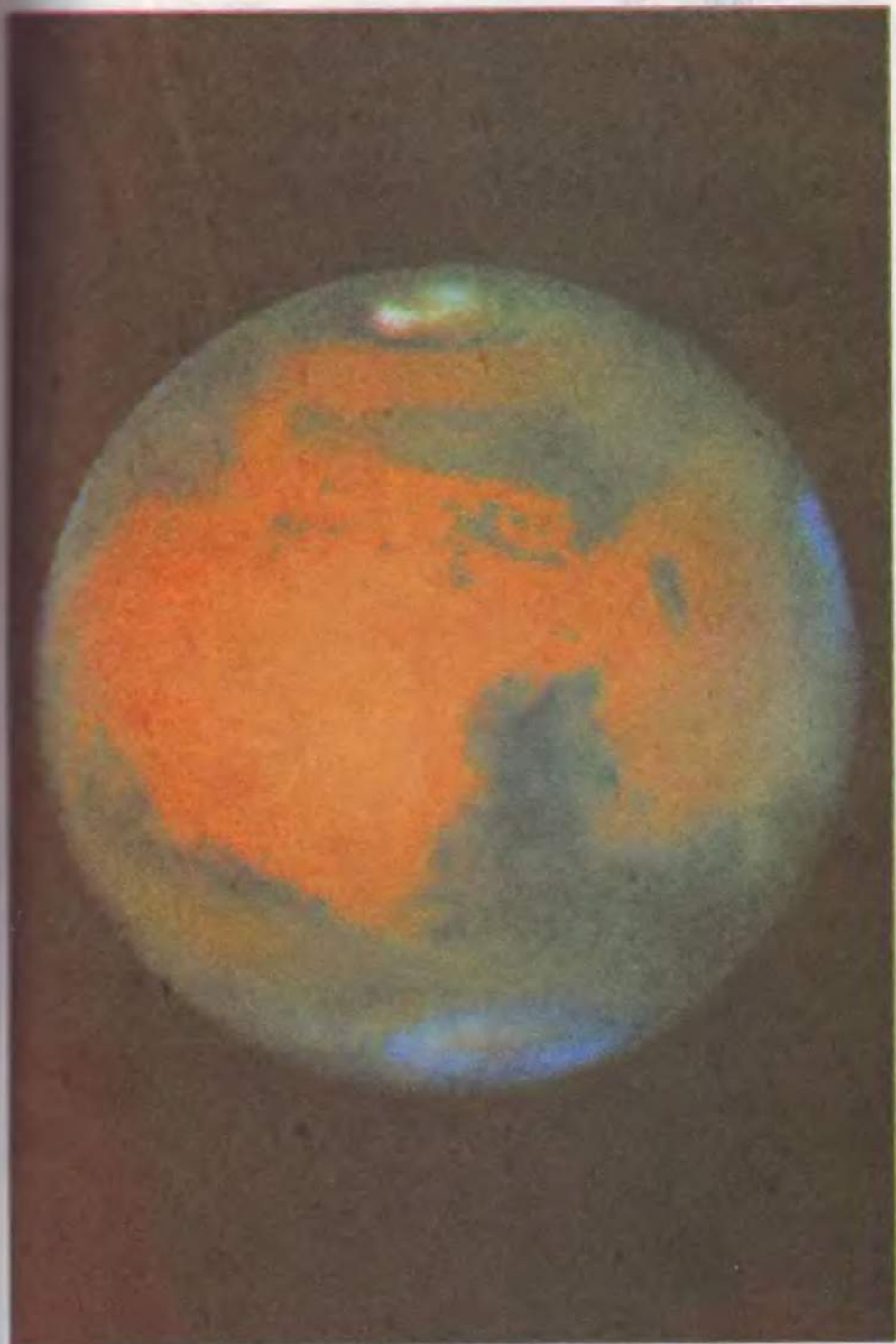
Марс має розріджену атмосферу. Це дозволяє вивчати його поверхню безпосередньо з Землі. Дві третини поверхні Марса займають світлі ділянки, які отримали назву *материків*, близько третини – темні ділянки, названі *морями*. Вони зберігають свою форму в часі, що дозволило скласти точні карти поверхні. Поблизу полюсів восени утворюються білі плями – *полярні шапки*, які зникають повністю або значно зменшуються в розмірах на початку літа.

Під час великого протистояння 1877 р. італійський астроном Дж. Скіапареллі повідомив про відкриття ним на поверхні Марса чітких ліній, які ніби перетинають марсіанські пустелі, і дав їм назву *канали*. Було навіть висловлено припущення, що це споруди, створені розумними істотами для транспортування води від полюсів планети у зневоднені приекваторіальні райони.

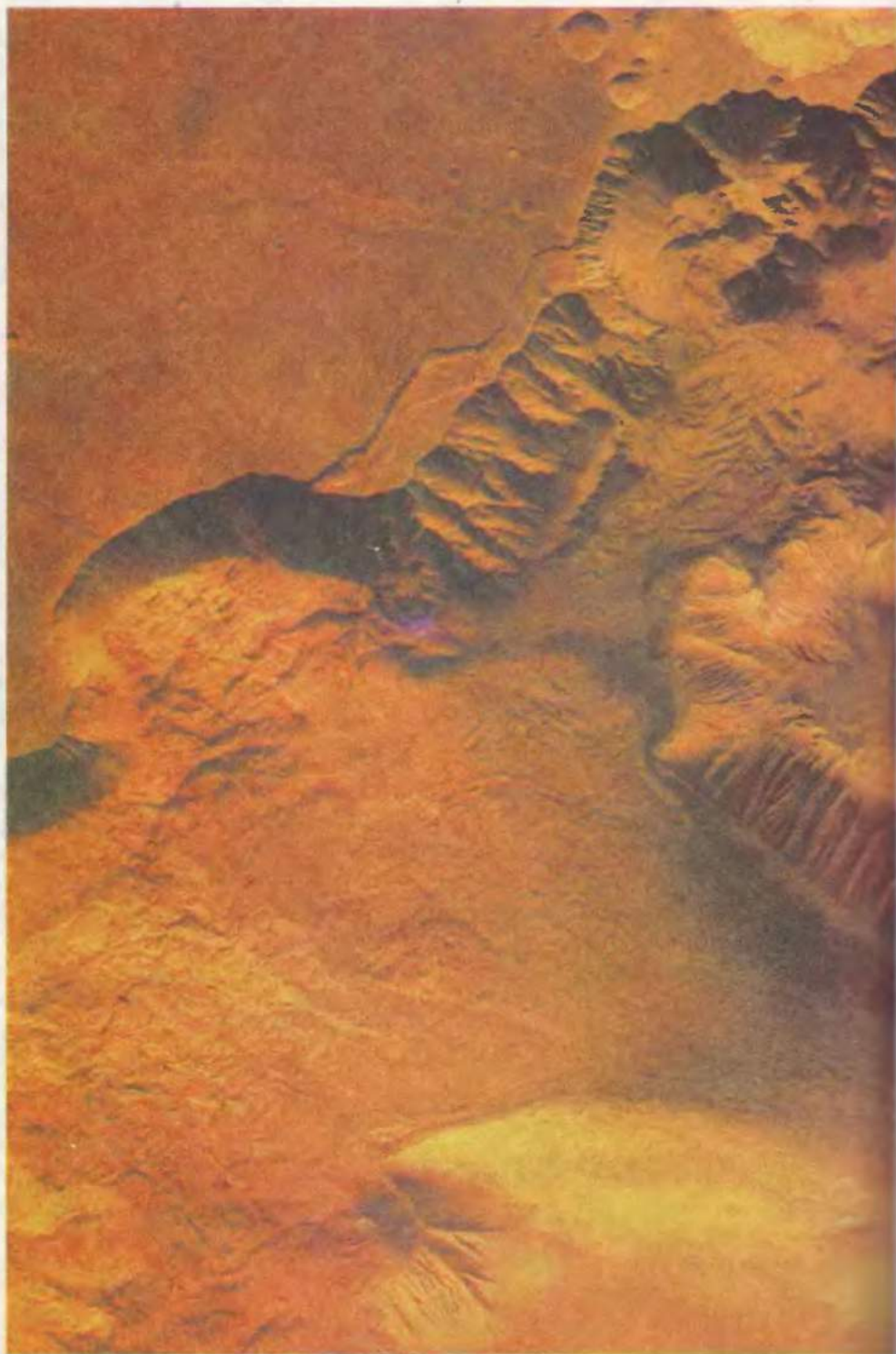
З початку 1960 р. до Марса було спрямовано біля трьох десятків АМС. Високоякісні зображення поверхні планети відкрили для землян новий образ Марса. Виявилось, що Марс, як і Місяць, укритий кратерами. (До речі, п'ять кратерів мають імена астрономів, які народились або працювали в Україні – *Барабашов, Фесенков, Герасимович, Струве, Сімейкін*; є також кратери *Євпаторія* та *Фастів*). Але, наприклад, така ділянка, як *Еллада* – величезна чаша діаметром 1 700 км, що лежить нижче навколишнього ландшафту на 5,5 км, – практично позбавлена кратерів. Є на Марсі також безладно розташовані пагорби і провали різного роду утворення, схожі на русла висохлих річок, системи вузьких тріщин, гірські райони і окремі гори вулканічного походження (мал. 14.6, на стор. 82).

Біля екватора планети розташована головна геологічна особливість Марса – вулкано-тектонічний *регіон Фарсида*, який, окрім того, є найважливішим погодотворчим фактором на планеті. Це вулканічне плато, яке здіймається над навколишньою територією на висоту до 4–5 км, а третина його площі – навіть на 8–9 км, є лише п'єдесталом для велетенських і давно згаслих вулканів 19–27 км заввишки. Три з них розташовані в одну лінію, яка перетинає екватор. А четвертий, феноменальний у своїй грандіозності, знаходиться осторонь від них.





Март. 14.5. Марс



Мал. 14.6. Поверхня Марса

Цей найбільший у Сонячній системі вулкан носить назву *Олімп* (мал. 14.7). Діаметр основи щита, на якому він розташований, становить 600 км. Щит обривається прямовисним скелястим уступом висотою 6 км. Вивершує щит вулканічна вершина з кратером розмірами 30 км і висотою 27,4 км над середнім рівнем поверхні.



Мал. 14.7. Вулкан Олімп

На особливу увагу заслуговує рифтова *долина Маринер* (мал. 14.8) завдовжки 4 000 км і до 200 км завширшки. Основою цієї рифтової долини є величезний (2 500 км завдовжки, 75–150 км завширшки і до 6 км завглибшки) *каньйон Титоніус Часма*, що означає «величезна безодня». На крутих схилах каньйону – зсуви та осипи, глибокі яруги. Всього дно несе на собі сліди бурхливої діяльності потоків води. Оскільки зараз рідкої води на Марсі немає, то існує припущення, що у минулому клімат планети був значно теплішим, так що на ній існували моря і протікали річки.



Мал. 14.8. Долина Маринер

Марсіанський ґрунт – це дрібнодисперсний матеріал (реголіт), у якому міститься 15–20 % кремнію, 12–16 % заліза, близько 10 % фосфору, 7 % марганцю та кобальту, а також кальцій, хром, нікель, ванадій, титан, молібден, цирконій та ін. Жодна з відомих земних гірських порід не збігається за складом з марсіанськими.

Червонуватий колір марсіанської поверхні обумовлений великою кількістю окислів заліза, тобто звичайнісінької іржі. Тому панорами марсіанської рівнини, передані в різні роки американськими станціями, – це оранжево-червона пустеля, вкрита численними каменями з різкими краями (мал. 14.9).

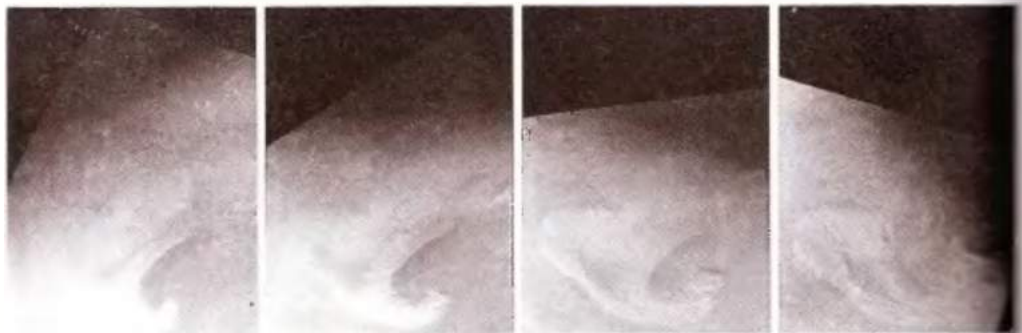
Температурні умови на Марсі визначаються його відстанню від Сонця, густиною та складом атмосфери, а також оптичними властивостями ґрунту. Найвища температура, зареєстрована на поверхні Марса, становить 300 К, але вона різна для світлих і темних ділянок, що лежать по-



Мал. 14.9. Марсіанська рівнина

ряд. Тому потрібно говорити про середню температуру 230 К. На екваторі вона встановлюється приблизно через годину після полудня. Вночі температура навіть в екваторіальних районах знижується до 170 К, а в полярних – до 140 К. Такий великий перепад температур пояснюється малою теплопровідністю ґрунту.

Атмосфера на Марсі дуже розріджена, її тиск біля поверхні становить в середньому 0,006 тиску земної атмосфери. За складом вона нагадує атмосферу Венери: 95 % належить вуглекислому газу, близько 4 % – азоту і аргону. Кисню і водяної пари в атмосфері Марса менше 1 %, проте в ній є хмари з кристаликів льоду, так що вони рідко бувають цілком прозорою. Швидкість вітру, як правило, невелика, але часом досягає значення 40–50 м/с, і тоді вітер піднімає марсіанський пил високо догори, утворюючи *пилову бурю* (мал. 14.10).



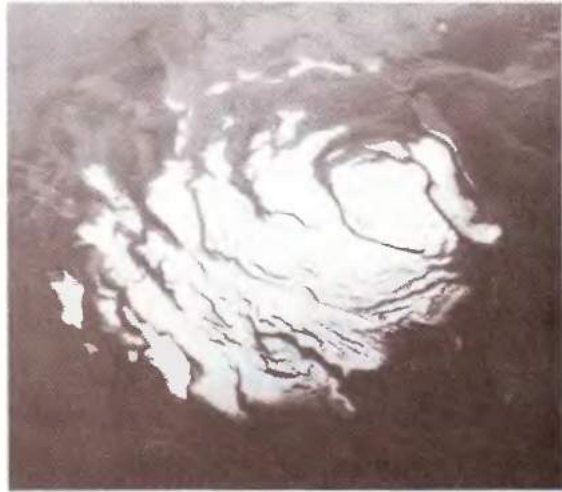
Мал. 14.10. Розвиток пилової бурі в атмосфері Марса

Найсильніші пилові бурі можуть тривати по декілька місяців і повністю закривати поверхню. Через невелику силу тяжіння навіть після закінчення пилової бурі в повітрі зависає значна кількість пилу, забарвлюючи небо у рожевий колір.

Полярні шапки (мал. 14.11), які змінюють свої розміри в залежності від марсіанської пори року, складаються з твердої вуглекислоти. Вона випаровується, залишаючи невелику ділянку водяного льоду завтовшки в кілька сот метрів. Вважається, що вся вода на Марсі зберігається у зв'язаному стані на полярних шапках і в формі вічної мерзлоти.

Багато цінної інформації отримали астрономи від марсіанського ровера «Соджорнер», який працював на поверхні Марса з другої половини 1997 р. Зокрема, він передав на Землю близько 40 стереоскопічних знімків поверхні планети.

Та найголовніший і невідомий для землян результат експедиції «Соджорнер» полягає у негативній відповіді на сакраментальне питання – чи є життя на Марсі? Життя не виявлено.



Мал. 14.11. Полярна шапка Марса

**5. Супутники Марса.** В існуванні двох супутників Марса не сумнівався свого часу Кеплер, як це видно з його листа до Галілея: «Я ... шалено хочу мати телескоп, щоб, якщо зможу, випередити вас у відкритті двох супутників, які обертаються навколо Марса». А письменник Дж. Свіфт у «Мандрах Гуллівера» (1726 р.) написав: «Вчені Лапути відкрили два супутники, що обертаються навколо Марса, ... з яких внутрішній віддалений від центра планети точно на три її діаметри, а зовнішній – на п'ять, перший обертається в просторі за 10 днів, а другий – за  $21\frac{1}{2}$ ».

Під час протистояння Марса у серпні 1877 р. американець А. Холл (1829–1907), архітектор за фахом, випробовуючи новий 66-сантиметровий рефрактор, узявся відкрити ці супутники. Ось його спогади: «Шанси виявити супутник здавалися дуже малими, так що я міг би відмовитись від пошуку, якби не моя дружина, яка наполегливо вселяла мені віру в успіх». Проте трапилось неймовірне: 2 серпня Холл уперше побачив супутник, згодом названий *Деймосом*, а 17 серпня він відкрив *Фобос*. Імена супутників – Фобос і Деймос – в перекладі з давньогрецької означають відповідно «страх» і «жах». Це, за легендою, – сини бога війни Ареса (Марса), вічні супутники свого батька.

Відстань Фобоса і Деймоса від центра Марса відповідно 2,76 і 6,9 радіуса планети (Фобос у 40 разів ближчий до поверхні Марса, ніж Місяць до Землі), період обертання відповідно 7 год 39 хв і 30 год 18 хв. Супутники Марса дуже «оригінально» поводять себе на його небі: Фобос за одну марсіанську добу встигає зробити три оберти навколо планети, сходячи на заході і заходячи на сході, а Деймос,

зійшовши на сході, перебуває над горизонтом близько 65 год, тобто понад 2,5 марсіанської доби. Супутники рухаються в площині екватора і по колових орбітах.



Мал. 14.12. Фобос

Супутники Марса – дрібні небесні тіла, які за формою нагадують картоплини. Розміри Фобоса становлять  $28 \times 20 \times 18$  км, Деймоса –  $16 \times 12 \times 10$  км. Поверхні супутників поцятковані кратерами набагато сильніше, ніж поверхня Марса. На знімках Фобоса (мал. 14.12) добре видно найбільший кратер на його поверхні – *Стікні* діаметром 10 км. Відстань між борознами глибиною до 30 м становить 200–300 м. Природа цих утворень досі залишається нез'ясованою.

1. У чому полягає подібність і в чому – несхожість планет земної групи?
2. Чому дорівнює сонячна доба на Меркурії? на Венері? 3. Чому на Венері парниковий ефект проявляє себе значно сильніше, ніж на Землі? 4. Чи справді на поверхні Марса є канали в тому розумінні, як це уявляли собі астрономи сто років тому?



**14.1.** Покладаючи, що Меркурій рухається навколо Сонця рівномірно по коловій орбіті, доведіть графічно, що за одну його сонячну добу він здійснює два оберти навколо Сонця і три – навколо своєї осі відносно зір.

**14.2.** Для гіпотетичного спостерігача на Венері запропонуйте метод визначення тривалості доби, враховуючи неможливість візуально спостерігати небесні світила (зокрема Сонце і зорі).

## § 15. Планети-гіганти та їхні супутники

Основна відмінність планет-гігантів від планет земної групи – їхні істотно більші маси і розміри. Водночас густини планет цієї групи значно менші, ніж у планет земної групи, що свідчить про різницю хімічного складу. Всі планети-гіганти мають потужні воднево-гелійові атмосфери з домішками аміаку і метану (до 0,1%), а також великі системи супутників і кільця. Планети цієї групи обертаються навколо Сонця набагато швидше, ніж планети земної групи. При цьому кожний з них має помітно менший період обертання екваторіальних широт у порівнянні з приполюсними.

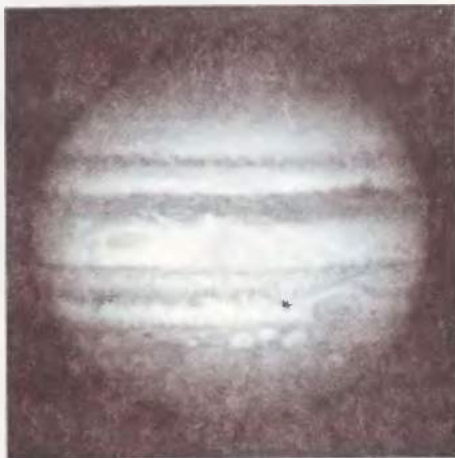
Такий закон обертання, типовий для всіх газоподібних тіл, спостерігається і в Сонця. При цьому Юпітер і Сатурн та Уран і Нептун також досить чітко поділяються між собою на дві пари. Юпітер і Сатурн мають більші розміри, менші густини і менші періоди обертання, Уран і Нептун.

Чіткий поділ планет-гігантів на дві групи – це дуже важливий експериментальний факт, який вимагає обов'язкового пояснення сучасною теорією походження і еволюції Сонячної системи.

**1. Юпітер.** Юпітер – найбільша планета Сонячної системи (мал. 15.1), яка з періодом 11,86 земного року обертається навколо Сонця на відстані близько 5,2 а. о. Юпітер швидше за всі інші планети обертається навколо своєї осі – зоряна доба на Юпітері триває 9 год 55 хв. Через швидке обертання його екваторіальний радіус (71 400 км) значно перевищує полярний (68 900 км) – планета помітно сплюснута біля полюсів. Маса Юпітера і сила тяжіння на його поверхні відповідно у 318 і 2,5 рази більші за земні показники. Середня густина становить  $1,3 \text{ г/см}^3$ .

Навіть у невеликий телескоп на Юпітері добре помітні світлі та темні смуги, що простягаються паралельно екватору. Вони порівняно стійкі протягом днів та тижнів, але поступово змінюються впродовж років. Це вказує на їхню хмарову природу та на відносно стійкий тип атмосферної циркуляції. Смуги мають різноманітне забарвлення, що змінюється часом. Період обертання Юпітера, визначений за рухом деталей, розташованих на різних широтах, виявляється різним: він збільшується з ростом широти. Отже, смуги в середніх широтах рухаються повільніше, ніж на екваторі..

У 1831 р. в південній півкулі Юпітера було виявлено славозвісну *Велику Червону Пляму* (ВЧП). Про неї було відомо й раніше, бо є свідчення спостережень Гука, на малюнках якого, виконаних ще 1664–1672 рр., теж є пляма. ВЧП (мал. 15.2) орієнтована вздовж паралелі й має розміри  $15\,000 \times 30\,000 \text{ км}$ , а сто років тому вони були удвічі більшими. Ця пляма – це потужний антициклон, що обертається проти годинникової стрілки. Обертання всередині плями відбувається за 6 земних діб. Виникнення та існування ВЧП пов'язане з різною швидкістю руху атмосферних мас, між якими вона знаходиться: маси, розташовані вище, рухаються проти годинникової стрілки повільніше, ніж ті, що нижче. Через тертя верхня частина ВЧП трохи гальмується, а нижня – прискорюється, що і призводить до утворення цього на диво стійкого вихора.



Мал. 15.1. Юпітер



Мал. 15.2. Велика Червона Пляма

В атмосфері Юпітера міститься близько 86 % водню, 14 % гелію, 0,07 % метану, 0,06 % аміаку, а також вода, ацетилен, фосфін. Хмари складаються в основному з аміаку.

В розрахунку на одиницю площі Юпітер отримує у 27 разів менше тепла від Сонця, ніж Земля. Його верхні шари, відбиваючи 50 % сонячної енергії, повинні були б мати температуру близько 210 К, проте прямі вимірювання як наземними засобами, так і за допомогою космічних апаратів вказують на більшу температуру: вона на 17 К вища. Тобто надра планети дають свій власний потік енергії, в середньому удвічі більший, ніж вона отримує від Сонця. Цей додатковий потік тепла приводить до появи в атмосфері Юпітера бурхливих вертикальних течій з виносом догори гарячих мас газу, які після охолодження поринають назад.

Причиною переважання випромінюваної енергії над отриманою від Сонця можуть бути процеси гравітаційного стискування первинної речовини, з якої сформувався Юпітер. За своїми характеристиками Юпітер займає проміжне положення між планетними і зоряними утвореннями, і його остаточне формування ще й досі не завершилось.

Юпітер не має твердої поверхні. За підрахунками вже на глибині кількох тисяч кілометрів речовина атмосфери являно переходить у газорідкий стан, ще глибше під ним залягає зона рідкого водню з гелієм, а ще глибше рідкий водень переходить у металічну фазу – перетворюється на метал, у якому протони і електрони існують окремо. Останній перехід відбувається стрибком; речовина, змінюючи свою фазу, стискається, при цьому і виділяється додаткова енергія.

У 1955 р. виявлено, що Юпітер є потужним джерелом радіовипромінювання. Планета має магнітне поле, напруженість якого у 50 разів більша, ніж у земного. Це поле формує навколо планети протяжну магнітосферу з декількома радіаційними поясами. Електрони, прискорені в магнітосфері планети, тут же гальмуються



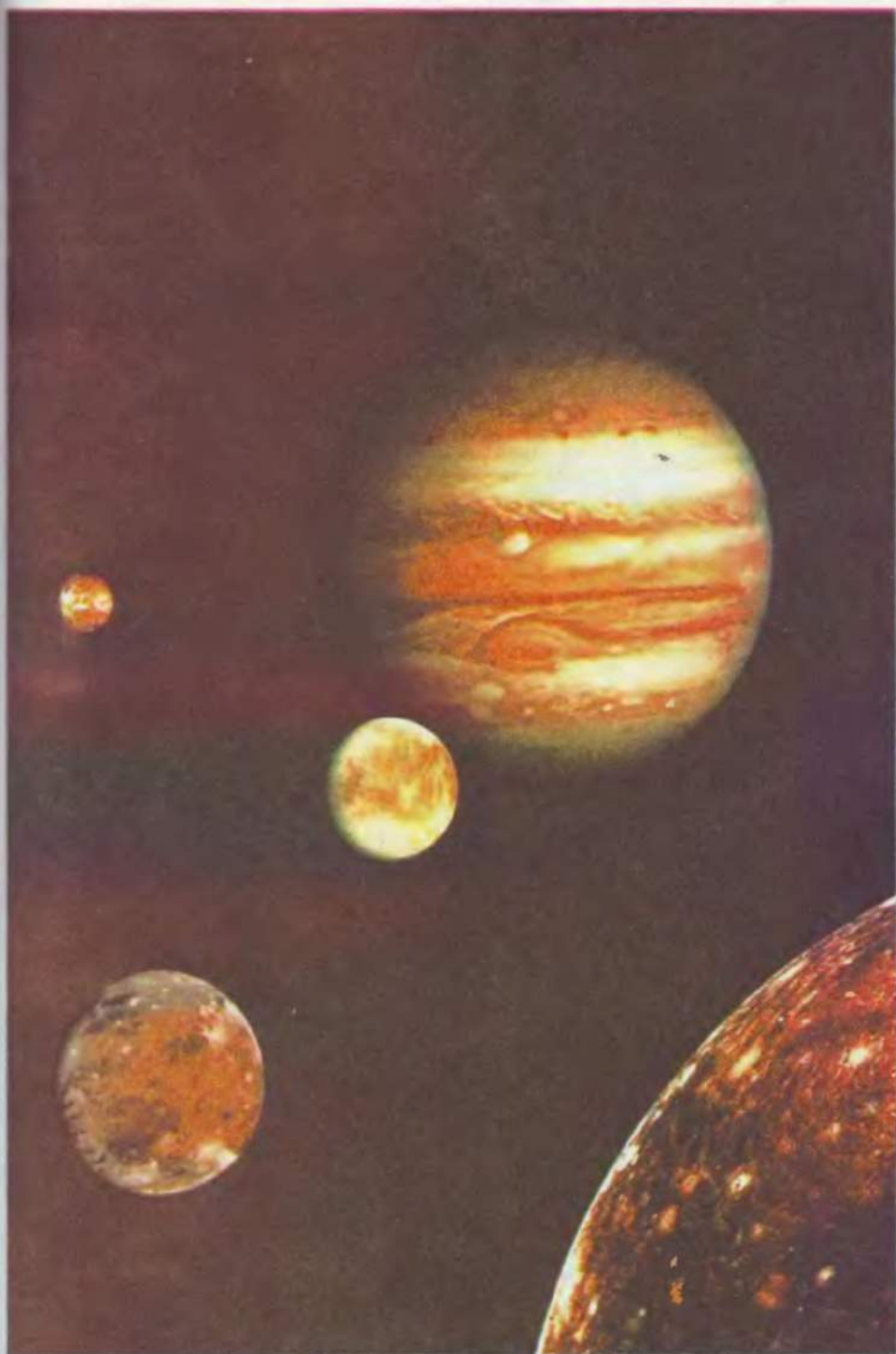
Мал. 15.4. Io

магнітним полем, випромінюючи головним чином у радіодіапазоні.

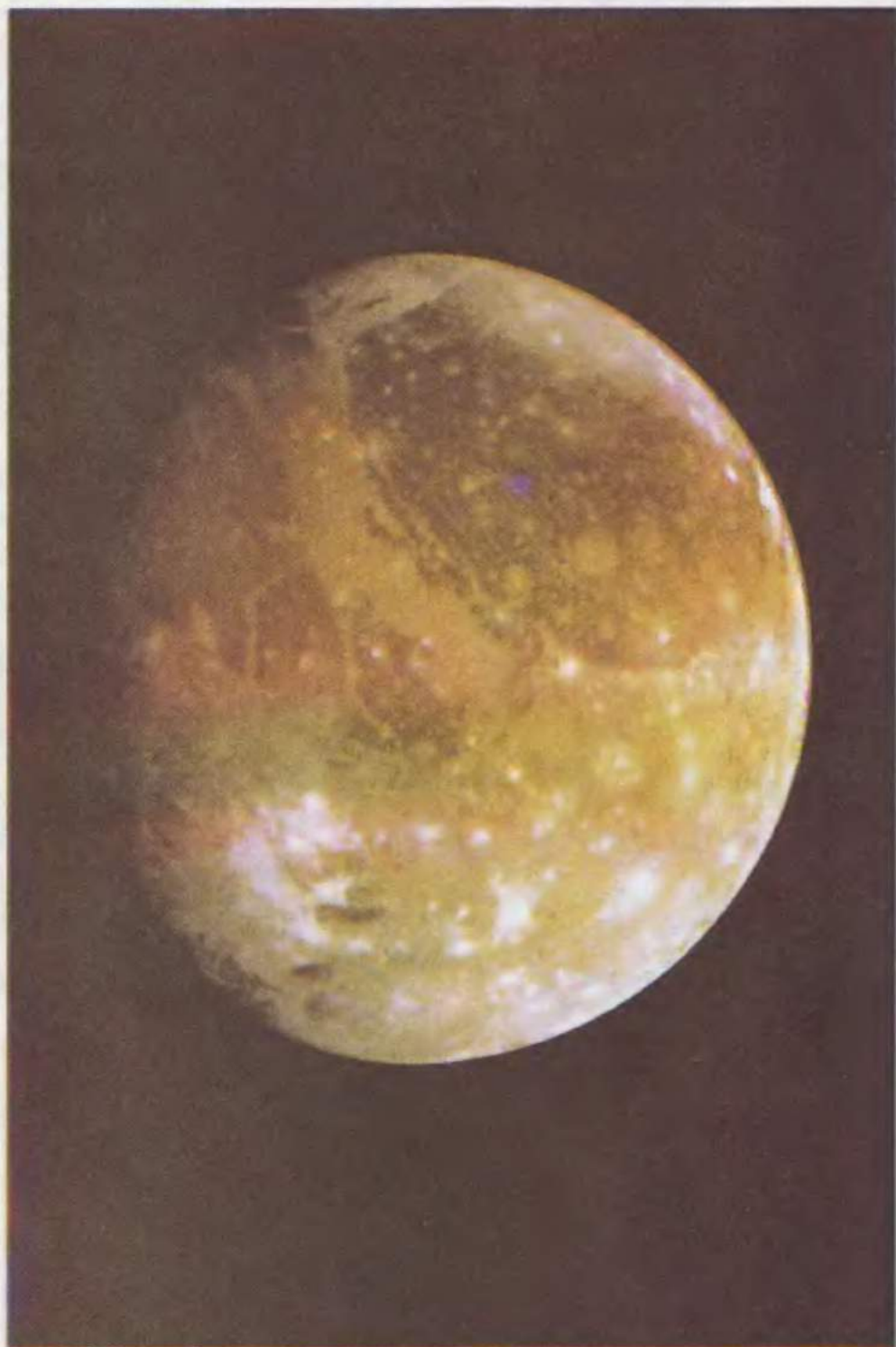
Чотири із 28 супутників Юпітера – *Іо*, *Європа*, *Ганімед* і *Каллісто* – ще у 1610 р. були відкриті Галілеєм, він же дав їм назви, а тому їх то називають *галілеєвими*. В 1979 р. поблизу планети пройшли АМС «Вояджер-1» і «Вояджер-2» (США). Вони передали на Землю зображення планети і супутників з близьких відстаней (мал. 15.3). Особливо вражають поверхні галілеєвих супутників.

Поверхня *Іо* (мал. 15.4) має жовтувато-червоний колір. На супутнику зареєстровано 7 діючих вулканів. Вулканічні процеси на *Іо* проходять досить бурхливо: продукти викиду (в основному це сульфати сірки) піднімаються на висоту до 300 км.





Мал. 15.3. Галілеєві супутники Юпітера



Мал. 15.6. Ганімед - найбільший супутник планети у Сонячній системі

Практично вся поверхня Європи вкрита мережею тріщин, довжина яких в окремих випадках сягає 1 500 км (мал. 15.5). Напевно, зовнішня оболонка Європи до глибин від 10 до 100 км складається з водяного льоду. Вона відбиває до 70% сонячного світла, а тому середня температура поверхні Європи нижча, ніж у Іо, і становить 120 К.

Ганімед – найбільший серед супутників Юпітера і взагалі у Сонячній системі (мал. 15.6). Існує припущення, що він значною мірою складається з води або льоду. Його поверхня відбиває до 40% сонячного світла і має температуру 140 К.

Каллісто – четвертий галілеєвий супутник, цікавий тим, що його відвернена від Юпітера сторона вкрита кратерами. Вважають, що їхній вік становить 4 млрд років, і виникли вони внаслідок потужного метеоритного бомбардування на ранній стадії існування Сонячної системи. Каллісто – темний супутник, бо його поверхня – лід, забруднений пилом, – відбиває лише 20 % сонячного світла. Через це і температура на його поверхні найвища серед галілеєвих супутників – 150 К.



Мал. 15.5. Європа

Всі галілеєві супутники за своїми розмірами наближаються до планет, їхні середні густини більші, ніж у Юпітера, а періоди їхнього осьового обертання і обертання навколо Юпітера майже збігаються.

У березні 1979 р. «Вояджер-2» відкрив навколо Юпітера *кільце*. Воно подібне до кілець Сатурна, але значно менше за розмірами і дуже тонке. Доречно згадати, що думку про існування у Юпітера кільця, а також існування на супутниках великих планет інтенсивних вулканічних процесів ще 1955 р. сміливо висловив київський астроном Сергій Костянтинівич Всехсвятський (1905–1984).

**2. Сатурн.** Сатурн – друга планета-велетеня і шоста числом планета в Сонячній системі (мал. 15.7). Майже у всьому подібна до Юпітера, вона обертається навколо Сонця з періодом 29,5 земних років на відстані близько 9,5 а. о. Зоряна доба на Сатурні триває 10 год 14 хв. Через швидке обертання він також сплюснутий біля полюсів: полярний радіус планети менший від екваторіального. Як і в Юпітера, періоди його обертання у різних широтах не однакові. Маса Сатурна в 95 разів більша за масу Землі, а сила тяжіння в 1,12 рази більша за земну.



Мал. 15.7. Сатурн

Сатурн має на диво низьку густину, нижчу за густину води – лише 0,7 г/см<sup>3</sup>. І якби знайшовся такий велетенський океан з води, куди можна було б занурити Сатурн, він би не потонув. Така маленька густина свідчить про те, що, як і решта планет-гігантів, Сатурн переважно складається з водню і гелію.

Оскільки Сатурн знаходиться в 9,5 разів далі від Сонця, ніж Земля, то на одиницю площі він отримує в 90 разів менше тепла, ніж вона. Згідно з розрахунками температура зовнішнього шару хмарового покриву повинна становити 80 К, насправді ж температура атмосфери планети дорівнює 90 К. Отже, Сатурн, як і Юпітер, перебуває у стані повільного стискання.

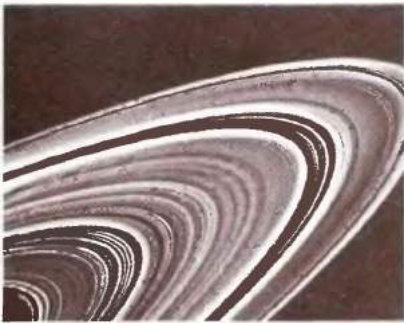
На диску жовтуватого кольору окремі деталі верхніх шарів атмосфери Сатурна проявляються значно слабкіше, ніж на Юпітері.



Мал. 15.8. Зміна умов видимості кільця Сатурна

простіший телескоп. Вони були відкриті Х. Гюйгенсом ще у XVII ст. Їхня площина лежить точно у площині екватора планети, нахилений до площини екліптики під кутом  $28,5^\circ$ . Тому залежно від того, як зорієнтований Сатурн по відношенню до Землі, кільця видно максимально розкритими під тим же кутом, або, коли Земля знаходиться в площині кільця, їх взагалі не видно (мал. 15.8).

Кільця Сатурна мають складну структуру. «Вояджер-1» і «Вояджер-2», які пролетіли повз Сатурн у 1980–1981 рр., передали на Землю зображення кільця з близької відстані (мал. 15.9). На фотографії видно, що кільця Сатурна складаються з сотень окремих вузьких кільць, розділених такими ж вузькими проміжками. Самі ж кільця складаються з окремих часток водяного крихкого снігу розмірами від дрібних пилинок до брил у 10–15 м завбільшки, які добре відбивають сонячне світло. Ширина кільця разом із найвіддаленішим дуже слабким кільцем, відкритим «Вояджером», становить 65 000 км, а товщина не перевищує 1 км.



Мал. 15.9. Кільце Сатурна

Окрім кільця, Сатурн має 30 відомих на сьогодні супутників. «Вояджери» передали на Землю зображення деяких із них. Як і всі інші

Та все ж приекваторіальні темні смуги видно досить добре. Помітно також, що приполярні зони здаються злегка зеленуватими. Окрім того, час від часу з'являються світлі й темні плями, завдяки яким і було визначено період обертання Сатурна. У верхніх шарах хмарового покриву спостерігаються сильні вітри, швидкість яких в екваторіальній зоні досягає 110 м/с.

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

Серед планет-гігантів Сатурн найбільше вражає уяву величюною системою кільця, які добре видно в най-

тла в Сонячній системі, що не мають атмосфери, вони вкриті безліччю кратерів. Найбільший супутник Сатурна, *Титан*, має потужну непрозору атмосферу товщиною до 200 км. Вона складається з азоту з домішками метану і водню.

**3. Уран і Нептун.** Уран (мал. 15.10) був відкритий англійським астрономом В. Гершелем 1781 р., а Нептун (мал. 15.11) – німецьким астрономом Галле 1846 р. після теоретичних розрахунків француза Левер'є і англійця Адамса.

До початку космічної ери відомостей про ці планети було мало. Так було відомо, що Уран – це планета, майже у 4 рази більша за Землю. Вона рухається навколо Сонця з періодом 84 земних роки на відстані 19,2 а. о. і має екваторіальний період обертання навколо осі 17 год 14 хв. Нахил її осі обертання до площини орбіти становить  $98^\circ$ , тобто Уран рухається навколо Сонця

«лежачи на боці» та ще й обертається, як і Венера, у зворотному напрямку. Маса Урана у 14,6 рази більша за земну, а екваторіальний радіус становить 25 600 км. Середня густина Урана –  $1,19 \text{ г/см}^3$ .

Нептун у 4 рази більший за Землю. Він рухається навколо Сонця з періодом 164,8 земних років на відстані 30 а. о. і має екваторіальний період обертання 17 год 42 хв. Нахил його осі обертання до площини орбіти становить  $29^\circ$ , маса у 17 разів більша за земну, а екваторіальний радіус становить 24 800 км. Середня густина Нептуна найбільша серед усіх планет-велетнів –  $1,66 \text{ г/см}^3$ .

Виміряні температури зовнішнього хмарового покриву для обох планет на 10–20 К перевищують розрахункові. Отже, у обох планет є додаткове джерело тепла із надр. Можливо, це тепло має таку ж природу, як і в Юпітера чи Сатурна. В атмосферах обох планет є молекули водню, метану, ацетилену.

Детальну інформацію про ці далекі планети вдалось отримати тільки після проходження АМС «Вояджер-2» поблизу Урана в січні 1986 р. і Нептуна в серпні 1989 р.



Мал. 15.10. Уран



Мал. 15.11. Нептун

Виходячи з останніх даних, робляться припущення, що Уран на 50 % складається з водяного льоду, на 40 % – з різних кам'янистих порід і на 10 % – з водню та інших газів.

У 1977 р. при покритті Ураном зорі у нього було відкрито 5 вузьких кілець. Згодом з'ясувалося, що їх 9. А при прольоті АМС «Вояджер-2» було виявлено слабке десяте кільце. Кільця Урана дуже вузькі, 1–10 км завширшки, і тільки зовнішнє кільце в найширшій частині досягає 96 км. Мабуть, вони складаються з дрібного темного пилового матеріалу, бо погано відбивають сонячне світло. Товщина кілець – кілька десятків метрів.



Мал. 15.12. Супутники Урана

Після прольоту АМС стала відомою геологічна будова п'яти великих супутників Урана: *Аріеля*, *Умбріеля*, *Титанії*, *Оберона* і *Міранди* (мал. 15.12). Було відкрито ще 12 супутників, які мають вигляд безформних брил невеликих розмірів від 10 до 100 км.

Щодо планети Нептун, то у неї виявлено досить динамічну блакитного кольору атмосферу, на тлі якої видно білі метанові хмари і дві темні плями – велику і малу. Їхня природа, мабуть, така ж, як і природа Великої Червоної Плями на Юпітері.

У Нептуна, окрім двох відомих раніше, відкрито ще 6 супутників. Найбільший із них, *Тритон*, має дуже розріджену азотну атмосферу і поверхню, яка нагадує Місяць. Рухається Тритон навколо Нептуна у зворотному напрямку.

АМС «Вояджер-2» відкрила навколо Нептуна кільця, що складаються з дрібних пилових частинок.

**4. Система Плутон–Харон.** Найдальшу, дев'яту числом планету Сонячної системи – Плутон – було відкрито у 1930 році. Плутон рухається навколо Сонця з періодом 248,4 земних років по еліптичній

орбіті з великою піввіссю 39,4 а. о., витягнутій настільки, що він іноді опиняється навіть ближче до Сонця, ніж Нептун. До того ж площина його орбіти нахилена до площини екліптики під значним кутом у  $17^\circ$ , так що, рухаючись небесною сферою, Плутон виходить за межі зодіакальних сузір'їв. Визначено, що Плутон обертається навколо осі, як і Уран чи Венера, у зворотному напрямку, а кут нахилу осі обертання до площини орбіти становить  $32^\circ$ .

У 1978 р. під час фотографічного спостереження Плутона було виявлено асиметрію його зображення. Це дало підставу стверджувати, що Плутон має супутник,



Мал. 15.13. Система Плутон-Харон

який здійснює оберт навколо нього за 6,4 доби. Радіус орбіти Харона (таку назву отримав супутник) дорівнює 19 640 км.

Як слабкий об'єкт  $14^m$ , Плутон було вивчено погано (мал. 15.13). Та після винятково успішних спостережень Плутона за допомогою Космічного телескопа ім. Габбла (1991 р.) отримано такі дані: радіус і маса Плутона дорівнюють відповідно 1 162 км і  $0,0022 m_\oplus$ , радіус і маса Харона – відповідно 606 км і  $0,0003 m_\oplus$ . Таким чином, Плутон виявився удвічі меншим від Меркурія і найменшою планетою Сонячної системи. Оскільки відношення мас Плутон-Харон дорівнює 7:1, то аналогічно системі Земля-Місяць, де воно становить 81:1, також мовиться про подвійну планету. Судячи з розмірів, Плутон, мабуть, лише один із найближчих представників групи астероїдів із поясу Койпера (§ 16), серед яких є безліч претендентів на «десяту планету». За спостережними даними Харон значно темніший, ніж Плутон, очевидно тому, що Плутон, маючи більшу масу, зберіг метан, тоді як з поверхні супутника він розсіявся в космічний простір. Виходячи з мізерної кількості сонячної енергії, яку отримують Плутон-Харон, планета мусить бути вкрита льодом із метану і мати червонуватий відтінок, тоді як супутник повинен бути вкритий водяним льодом і мати сіруватий колір.



1. За якими характерними ознаками планети-гіганти виділено в окрему групу?
2. Що собою являє Велика Червона Пляма на Юпітері? 3. Чим пояснюється виділення додаткової енергії з надр планет-гігантів? 4. Який український астроном і коли висловив думку, що на супутниках великих планет можуть відбуватись інтенсивні вулканічні процеси? 5. Чому систему Плутон-Харон можна назвати подвійною планетою?

**15.1.** З'ясуйте, скільки разом супутників налічується в Сонячній системі.

Які з них мають розміри, сумірні з розмірами Місяця?

**15.2.** У серпні 1995 р. астрономи Землі спостерігали кільця Сатурна «з ребра», тобто вони були невидимі на диску планети. За допомогою мал. 15.8, знаючи, що сидеричний період обертання Сатурна навколо Сонця рівний 29,4577 року, спробуйте оцінити, якими були умови видимості кілець Сатурна у липні 1610 р., коли Галілей зафіксував їх відкриття словами «найвищу планету спостерігав потрійною». **15.3.** Знаючи, що прискорення вільного падіння на Урані становить  $9,50 \text{ м/с}^2$ , і використовуючи другий закон Ньютона, підрахуйте, якою буде Ваша вага на цій планеті. Спробуйте пояснити результат.

## § 16. Малі тіла у Сонячній системі

У Сонячній системі, окрім Сонця і дев'яти великих планет, є ще так звані *малі тіла*. Це малі планети або *астероїди*, *комети*, метеорні тіла або *метеороїди* і міжпланетний пил. У наш час доводиться говорити і про *космічне сміття* – сукупність штучних об'єктів та їхніх фрагментів у космосі, які не функціонують, але здатні пошкодити або навіть зруйнувати штучний супутник чи міжпланетну станцію.

Малі планети (астероїди). З 1766 року відоме правило Тиціуса-Бодє, за яким можна було наближено визначити відстані планет від Сонця за допомогою простої залежності:

$$r = (0,3 \cdot 2^n + 0,4) \text{ а. о.}, \quad (16.1)$$

де  $n = -\infty$  для Меркурія,  $n = 0$  для Венери,  $n = 1$  для Землі,  $n = 2$  для Марса і т.д., а  $r$  – середня відстань планети від Сонця в астрономічних одиницях.

Порівняємо справжні відстані планет  $r_d$  з обчисленими  $r_o$  за цим правилом:

	$n$	$r_o$	$r_d$		$n$	$r_o$	$r_d$
Меркурій	$-\infty$	0,4	0,39	???	3	2,8	?
Венера	0	0,7	0,72	Юпітер	4	5,2	5,20
Земля	1	1	1,0	Сатурн	5	10	9,54
Марс	2	1,6	1,52	Уран	6	19,6	19,19

З цієї таблиці видно, що середні відстані планет аж до Урана задовільно представлені правилом Тиціуса-Бодє. От тільки між Марсом і Юпітером на той час ніякої планети відомо не було.

Після появи правила група астрономів у 1796 р. розпочала пошук небесного тіла, яке мало б знаходитися на відстані 2,8 а. о. Але відкриття цього тіла цілком випадково зробив італійський астроном Джузеппе Піацці (1746–1826). 1 січня 1801 р., займаючись складанням каталогу зір, він знайшов зореподібний об'єкт  $7^m$ , який за добу



змістився на 6'. Цю першу з малих планет або астероїдів назвали іменем античної богині плодючості – *Церера*. Вона найбільша серед відомих малих планет, її діаметр оцінюють у 1 000 км. Зразу ж було відкрито ще три малих планети: *Паллада* (діаметр близько 600 км), *Веста* (540 км) і *Юнона* (245 км).

Впродовж XIX ст. кількість малих планет поступово збільшувалась, а з кінця століття їх стали відшукувати фотографічним методом: під час тривалих експозицій зображення астероїда внаслідок швидкого руху має вигляд рисочки, а тому його неважко відрізнити від зір. Згодом на відстані від 2,2 а. о. до 3,2 а. о., у так званому поясі астероїдів, до кінця XX ст. було виявлено і надійно встановлено параметри орбіт понад 9 000 малих планет. Найяскравіша серед них – *Веста* – має блиск 6,5<sup>m</sup>, всі інші – слабкіші.

Астероїдам з добре визначеними орбітами привласнюють номери (в порядку відкриття) і назви. Перша сотня, за деякими винятками, названа іменами богинь грецької і римської міфології. Згодом астрономи звернулися до міфів інших народів, потім – до епосу. Зараз астероїди мають найрізноманітніші назви, де є імена видатних вчених: *Коперник* (1822), *Ейнштейн* (2001); географічні назви: *Амазонка* (1042), *Україна* (1709); імена персонажів художніх творів та героїнь опер: *Кармен* (558), *Аїда* (861); назви наук: *Геометрія* (876), *Астрономія* (1154); квітів: *Мальва* (1072). Серед астероїдів є такі, назви яких пов'язані з Україною, як-от: *Ялта* (1475), *Одеса* (2606), *Київ* (2171), є також *Кобзар* (2427), *Каменярь* (2428), астероїди *Всехсвятський* (2721), *Амосов* (2948), *Філатов* (5316) тощо.

Загалом право надати ім'я астероїдові має вчений, який його відкрив, після чого пропозиція розглядається Комісією Міжнародного Астрономічного Союзу і затверджується Конгресом МАС.

Більшість астероїдів з відомими орбітами мають розміри до кількох десятків кілометрів; це – тверді кам'яністі тіла. Кількість астероїдів з розмірами понад 1 км, можливо, сягає 50 тис., а менших від 1 км – сотні тисяч. Однак повна маса малих тіл, очевидно, не перевищує  $\frac{1}{20}$  маси Місяця, і з усіх астероїдів, разом узятих, скомпонувалася б планета не більша 1 500 км в діаметрі.

Рухаються астероїди навколо Сонця в той же бік, що й планети, і мають витягнуті еліптичні орбіти. Деякі виходять далеко за межі поясу астероїдів. Одні з них в афелії віддаляються за орбіту Сатурна, інші в перигелії навіть проникають усередину орбіти Меркурія. Наприклад, *Ікар*, відкритий 1949 р., має перигелій 28 млн км і кожні 19 років наближається до Землі. Останній раз це відбулося 1987 р., коли відстань до астероїда становила кілька мільйонів кілометрів.

Подорожуючи до Юпітера, АМС «Галілей» (США) у 1993 р. передала на Землю зображення двох астероїдів – *Гаспри* та *Іди*. Зокрема на *Іді* (мал. 16.1 на стор. 99) поперечником 56 км вдалося розгледіти величезну кількість дрібних кратерів, і на віддалі до 100 км від неї – маленький супутник розміром лише 1,5 км.

З 1992 р. розпочалось відкриття нових об'єктів – астероїдів з поясу Койпера або планетоїдів («планетоподобних»). Включаючи Плутон, пояс Койпера починається за орбітою Нептуна і тягнеться, як гадають, на відстань до 150 а.о. На початок 2000 р. було відомо близько 120 планетоїдів з розмірами до 400 кілометрів. А найбільший серед них, відкритий 1996 р., має розмір близько 800 км, що становить третину поперечника Плутона. За попередніми оцінками, окрім великих планетоїдів, у поясі Койпера мусять знаходитись біля 200 млн невеликих тіл розмірами 5–10 км і менше. На відміну від малих планет із поясу астероїдів, ці тіла в основному складаються з льоду.

**2. Комети.** Певно, найефектнішими малими тілами Сонячної системи є комети. У перекладі з грецької слово «комета» означає «довговолоса» (мал. 16.2 на стор. 100). Довгий час, услід за Арістотелем, дотримувалися думки, нібито комети – це згущення газів у земній атмосфері. Лише датський астроном Тіхо Браге переконливо довів: ці об'єкти знаходяться далі від Місяця. А сподвижник Ньютона Едмонд Галлей (1656–1742) визначив, що ці світила належать до Сонячної системи. Дотепер зареєстровано близько 1 100 комет.

На відміну від астероїдів, що мають орбіти з малим ексцентриситетом, орбіти комет – це дуже витягнуті еліпси. Частіше за все еліпси витягнуті так, що ділянки орбіт, які пролягають усередині Сонячної системи, мають вигляд параболи чи гіперболи. Від ступеня витягнутості еліпса залежить і період обертання комети навколо Сонця. Наприклад, комета *Енке* має період обертання навколо Сонця 3,31 роки. Найвідоміша серед комет – комета *Галлея* – повертається до Сонця кожні 75,5 років. Її появу у близьких до Сонця околицях зареєстровано вже 30 разів, із них двічі – у ХХ ст. (1910 і 1986 рр.).

Комети, відомі за їхніми попередніми появами, астрономи називають *періодичними*. Але таких комет небагато, близько 330. Основна маса комет, а їх відкривають щороку кілька десятків, влітають в Сонячну систему з величезною швидкістю і точнісінько так само, обігнувши Сонце, покидають її. Їхні періоди обертання становлять від тисяч до десятків мільйонів років. Прилітають вони до Сонця з величезної кометної хмари, так званої *хмари Оорта*.

Згідно з теорією, розробленою у 1950 р. нідерландським астрономом Я. Оортом, на відстані приблизно 100–150 тис. а. о. від Сонця знаходиться величезна кількість – сотні мільйонів чи може й мільярди окремих комет. За припущенням, хмара Оорта – це залишки матеріалу, які не пішли на утворення планет Уран і Нептун. Ще на ранніх стадіях розвитку Сонячної системи під дією збурюючих сил з боку планет-гігантів вони були викинуті на велику відстань за межі планетних орбіт.

В середньому раз на 20 років з'являється комета, яку добре видно неозброєним оком, усі ж інші спостерігаються лише в телескоп.

Відомий астроном Ф. Уїпл із Кембриджа припустив, що кометні ядра – це величезні грудки зі снігу, куди вкраплені тугоплавкі частинки. Безпосередня зустріч космічних апаратів «Вега-1»,



Мал. 16.1. Астероїд Іда



Мал. 16.2. Комета Хейла-Боппа

«Вега-2» і «Джотто» в 1985–1986 рр. з кометою Галлея підтвердила цю здогадку. До складу ядер комет входять в основному водяний лід та інші льоди – метановий, аміачний, з вуглекислого газу. Тугоплавкі частинки складаються з металів та силікатів.

На великих відстанях від Сонця кометне ядро побачити неможливо. Адже розміри його, як правило, не перевищують 10–20 км, і світла воно відбиває дуже мало. Наприклад, у комети Галлея ядро має неправильну форму і розміри 16×8×8 км (мал. 16.3). Та з наближенням до Сонця, починаючи з відстані 6 а. о., кометний лід починає випаровуватись. Газ, що випаровується, тягне за собою пилінки. Продукти випаровування і пилінки навколо ядра утворюють кому або голову комети, яскравість якої швидко зменшується в напрямку до краю.

Під дією тиску сонячного світла і сонячного вітру (потоків заряджених частинок з боку Сонця) речовина голови комети відкидається у бік, протилежний від Сонця, утворюючи протяжний хвіст комети. От тоді, власне кажучи, комета і стає «кометою» – «довговолосою».

Через дію тих же сил тиску, віддаляючись від Сонця, комета рухається вже хвостом уперед. Чим ближча комета до Сонця, тим довшим стає її хвіст, збільшується і голова комети. В момент проходження комети біля Сонця діаметр її голови може перевищувати відстань від Землі до Місяця. А хвіст комети іноді простягається на відстань до 150 млн км. Залежно від того, яка сила має переважну дію на комету – сила відштовхування за рахунок тиску сонячного вітру і сонячного світла чи сила притягання з боку Сонця, – кометні хвости набувають різної форми.

За рахунок випаровування речовина комети безперервно розсіюється у просторі, і її маса зменшується, так само як і вміст летких складових у зовнішніх шарах ядра. При проходженні перигелію поблизу земної орбіти комета може втратити поверхневий шар товщиною до кількох метрів. Тривале існування таких комет, як комета Галлея, пояснюють утворенням пористого теплоізоляційного шару, який перешкоджає занадто інтенсивному випаровуванню.

Густина речовини в голові (окрім центральної її частини) та хвості комети дуже мала. А тому, якщо навіть Земля пройде крізь хвіст комети, це не буде загрозою для біосфери Землі. Однак, відбиваючи сонячне світло, комети яскраво світяться на тлі ще більш розрідженого космічного простору. Але при зіткненні Землі безпосередньо з ядром комети може статися катастрофа. Її масштаби залежать від розмірів ядра. За однією з гіпотез, Тунгуська катастрофа 1908 року була викликана падінням на Землю невеликої комети, що мала ядро діаметром близько 500 м. А в липні 1994 р. астрономи спостерігали явище падіння на Юпітер комети *Шумейкера–Леві 9*, яка перед тим завдяки притяганням планети розділилась на понад 20 фрагментів.

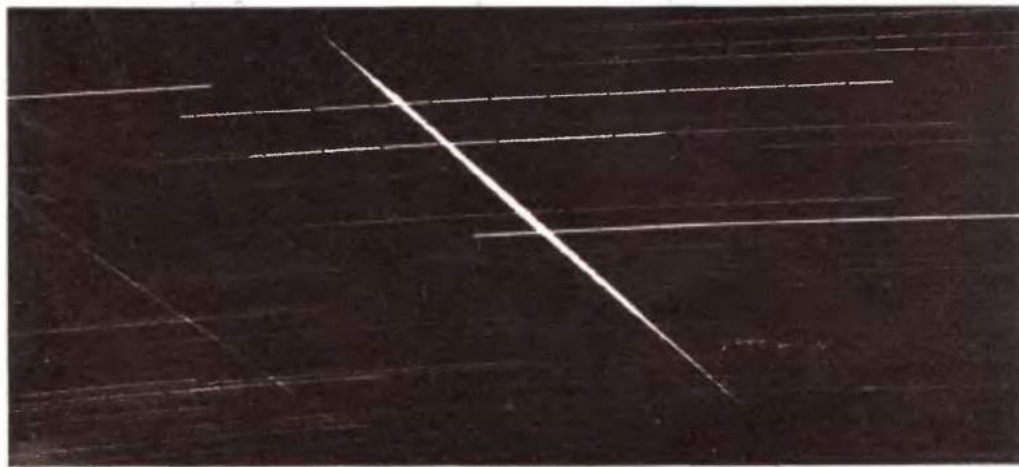


Мал. 16.3. Ядро комети

За традицією кометам присвоюють ім'я першовідкривача. Це заохочує багатьох аматорів до пошуків. У ХХ ст. з кожних чотирьох комет лише одну відкривали астрономи-фахівці. В наш час у космічних просторах мандрують комети, названі іменами таких українських астрономів, як Г. Неуймін, Г. Шайн, М. Черних, К. Чурюмов, С. Герасименко, та аматора астрономії В. Скоритченка.

**3. Метеори і метеорні потоки.** Пилові частинки, що виділяються із хвоста й голови комети, розсіюються вздовж її орбіти. Якщо ця орбіта перетинається з орбітою Землі, то час від часу потік пилових частинок буде зустрічатися з земною атмосферою.

Пилові частинки, які рухаються параболічними орбітами, мають швидкість 42 км/с. З іншого боку, швидкість руху Землі по орбіті – майже 30 км/с. Тому залежно від того, наздоганяють частинки Землю чи



Мал. 16.4. Метеор

рухаються їй назустріч, швидкість входження в атмосферу Землі може становити 12–72 км/с.

При рухові крізь атмосферу на висоті 110–80 км маломасивна частинка повністю руйнується. Світлове явище, яке спостерігається при цьому, називається метеором (мал. 16.4).

Якщо ж падає одразу багато метеорів, спостерігається незвичайне небесне явище – метеорний дощ (мал. 16.5). Здається, що всі метеори падають з однієї точки неба. Ця точка називається радіантом метеорного потоку. Назва метеорного потоку пов'язується з тим сузір'ям, у якому знаходиться радіант.

Наприклад, з 12 по 14 серпня спостерігається метеорний потік *Персеїди* з радіантом у сузір'ї Персея. Цей потік пов'язаний з періодичною кометою Свіфта–Туттля, яка спостерігалась востаннє 1992 р. Щороку 18–19 листопада спостерігається метеорний потік *Леоніди* з радіантом у сузір'ї Лева, пов'язаний з періодичною кометою Темпеля–Туттля, відкритою 1865 р. Метеорний потік *Оріоніди* з 16 по 26 жовтня породжений кометою Галлея.

Серед метеорів, які спостерігаються на нічному небі, є й такі, що не пов'язані з метеорними потоками. Метеорні тіла або метеороїди, що їх спричиняють, мають індивідуальні орбіти. Це – випадкові, *спорадичні* метеори. Як правило, це пилинки невеликих розмірів і мас.

Загалом за добу спалахує приблизно 100 млн метеорів, яскравіших за 5<sup>m</sup>. Ще більше – *телескопічних* метеорів. Таким чином, щорічно на Землю випадає до 500 000 тонн космічної речовини. Але порівняно з масою Землі це – мізерна величина, яка не відіграє істотної ролі у збільшенні її маси.

Якщо в атмосферу Землі вривається метеороїд, маса якого становить десятки чи сотні грам, то він породжує явище *боліда*. Яскраві боліди видно навіть удень.

**4. Метеорити.** Метеорне тіло, яке впало на Землю, називається *метеоритом* (мал. 16.6). Через роздроблення в атмосфері падіння на поверхню Землі цілою метеорита – велика рідкість.

У 1947 р. в горах Сіхоте-Аліня (Росія) впали залишки дуже великого метеорита загальною масою 23 тонн, що склало третину його початкової маси.

Якщо маса метеорита становить сотні тонн, то при ударі об поверхню Землі утворюється кратер із розмірами, які дорівнюють поперечнику метеорита. Якщо маса метеорита становить десятки і сотні *тисяч* тонн, космічне



Мал. 16.5. Метеорний дощ



Мал. 16.6. Метеорит



Мал. 16.7. Аризонський метеоритний кратер

тіло вдаряється об Землю з виділенням значної кількості теплової енергії, що породжує вибух. Такий вибух може призвести до дуже великих руйнувань, а від метеорного тіла залишаться лише незначні уламки. Яскравим прикладом подібного є *Аризонський кратер* діаметром 1 200 м і глибиною 180 м (мал. 16.7). Розрахунки показують, що метеорит, який утворив цей кратер, мусив мати масу від 60 до 200 тис. тонн і розміри не менше 100 м.

На «обличчі» нашої планети зараз відомо не менше 150 кратерів, які отримали назву *астроблем* («зоряних ран»), їхній вік сягає десятків та сотень мільйонів років. Є астроблеми і на території України: це кільцеві структури діаметром у кілька сотень кілометрів на півночі та на півдні країни. Найдавніша з них Іллінецька (Вінницька область), вік якої близько 400 млн років, кратер має діаметр 7 км і глибину 700 м.

Щороку на поверхню Землі випадає близько 500 метеоритів масою від 1 кг і більше, проте знаходять їх лише приблизно 20. Колекції цих об'єктів налічують майже 700 метеоритів, падіння яких спостерігали, і близько 900, знайдених випадково. Найбільший метеорит *Гоба*, знайдений у Південно-Західній Африці, має масу майже 60 тонн.

У наш час найбільше метеоритів збирають в Антарктиді. У місцях, де сильні вітри зривають льодові шапки, метеорит, який упав сотні тисяч років тому, опиняється на поверхні. Знаходять їх багато і в сухих кам'янистих пустелях Західної Австралії та Намібії.

Залежно від хімічного складу метеорити поділяють на кам'яні хондрити – близько 85 %, і кам'яні ахондрити (від грец. «хондрос» – «зерно») – 7 %. Таку назву метеорити отримали через наявність або, відсутність у їхньому складі маленьких кулястих залізо-магнієвих силікатних включень у вигляді зерен.



Мал. 16.8. Зодіакальне світло

Серед них трапляються такі, що містять вуглецеві хондри (1 %).

Окрему групу метеоритів складають залізні метеорити з високим вмістом нікелістого заліза (5 %) і залізо-кам'яні (2 %) з невеликими кам'яними включеннями.

Вважається, що метеорити генетично пов'язані з астероїдами. За винятком зразків місячного ґрунту, це єдині космічні тіла, які можна досліджувати в земних лабораторіях. Припускається, що речовина метеоритів являє собою первинну речовину з часів утворення Сонячної системи, а тому за їхньою допомогою визначається її вік – приблизно 4,6 млрд років.

Весь міжпланетний простір заповнено пилом з частинок розмірами в кілька мікронів і газом у вигляді електронів і протонів. Сонячне світло, яке відбивається пилом і розсіюється на вільних електронах, утворює явище *зодіакального світла* (мал. 16.8). Зодіакальне світло спостерігається або на вечірньому небосхилі на заході, або вранці на сході перед появою Сонця. Воно має вигляд слабкого сйива у формі конуса, вісь якого лежить вздовж екліптики.

**5. Проблема астероїдної безпеки.** Серед усього розмаїття астероїдів і метеороїдів астрономи виділили понад сотню тіл, які через можливість зіткнення з Землею несуть із собою потенційну небезпеку для її мешканців. І хоча досі не зареєстровано жодного випадку загибелі людей від метеоритів, небезпека існує цілком реально.

Так, у штаті Індіана (США) метеорит упав не далі ніж за 4 м від хлопчиків, які гралися. Іншим разом, також у США, великий метеорит влучив у поштову скриньку біля сільського будинку і залишився там. У 1992 р. в Нью-Йорку метеорит вагою 12,4 кг влучив у автомобіль. Зрозуміло, що це не єдині випадки і не виключено, що за довгу історію Землі



відбувалися зіткнення планети не тільки з метеороїдами невеликої маси, але і з астероїдами, що призводило до катастрофічних наслідків. З подібною катастрофою пов'язують загибель динозаврів 65 млн років тому.

Окрім тіл природного походження, в навколосемному просторі налічують понад 7 500 штучних об'єктів. Серед них лише 6 % функціонують, а решта – залишки ракет-носіїв, фрагменти зруйнованих КА, тіла супутників, які виробили свій ресурс тощо – це так зване *космічне сміття*. Воно може випадати на Землю, створюючи космічну загрозу.

Тому не дивно, що вчені розробляють методи своєчасного виявлення, а при потребі – і знищення небезпечних «прибульців». Спеціальні служби контролю, створені в провідних космічних державах, з допомогою радарних, оптичних та інших методів слідкують за навколосемним простором. Сучасні методики дозволяють на висотах 40–50 тис. км виявляти об'єкти до 100 см, а на висотах 200–500 км – навіть до 10 см. Розробляються також проекти «космічних сміттевозів». Таким чином людство намагається захистити себе від можливої метеоритної небезпеки.

1. Сформулюйте правило Тиціуса–Бодє. Як у відповідності з ним зростає відстань кожної наступної планети від Сонця? 2. Які складові виділяють у будові комети, коли вона проходить поблизу Сонця? 3. У чому полягає різниця між метеором, метеорним тілом (метеороїдом) і метеоритом? 4. Що таке «космічне сміття»?

**16.1.** Кільце астероїдів (К. а.) поділило планети на внутрішні (орбіти яких всередині К. а.) і зовнішні (їхні орбіти охоплюють К. а.). З'ясуйте, які з планет віднесено до одної і які до іншої групи і зіставте це з поняттями нижні і верхні планети. Визначте, у чому принципова різниця між поняттями нижня і верхня планета, внутрішня і зовнішня планета.

## § 17. Формування планетної системи

### 1. Закономірності будови Сонячної системи.

Теорія, яка розглядає походження Сонячної системи, повинна пояснювати такі факти:

- орбіти всіх планет лежать практично у площині сонячного екватора;
- планети рухаються навколо Сонця по орбітах, близьких до кола;
- напрямок обертання планет навколо Сонця однаковий для всіх планет і збігається з напрямком обертання Сонця і власним обертанням планет (окрім Венери, Урана і Плутона); у тому ж напрямку, що і планети навколо Сонця, обертається навколо них більшість їхніх супутників;
- середня відстань планет від Сонця (за винятком Нептуна і Плутона) підлягає правилу Тиціуса–Бодє;
- 99,86 % маси Сонячної системи припадає на Сонце і лише 0,14 % на планети, тоді як планетам належить 98 % моменту загальної кількості руху Сонячної системи;
- планети поділяються на дві групи, різко відмінні між собою за середньою густиною, хімічним складом, розмірами і внутрішньою будовою.

**2. Трохи історії.** Впродовж останніх 300 років, починаючи з Декарта (1596–1650), було висловлено кілька десятків космогонічних гіпотез і розглянуто найрізноманітніші варіанти ранньої історії Сонячної системи. Серед мислителів минулого, які намагалися пояснити її походження, були Ж. Бюффо (1707–1788), І. Кант (1724–1804), П. Лаплас (1749–1827), Дж. Джінс (1877–1946) та інші. Але всі гіпотези мали один недолік – добре пояснюючи одну частину спостережних фактів, вони виявлялися безпорадними перед іншою. Наприклад, гіпотеза Лапласа, що припускала виникнення планет із розжареної туманності, не змогла пояснити особливості розподілу моменту кількості руху між планетами і Сонцем.

При розробці космогонічної гіпотези перш за все необхідно вирішити питання: звідки взялася матерія, з якої утворились планети?

На сьогодні найбільш імовірним видається варіант, за яким планети утворились із того ж газово-пиллового диска, що й Сонце. Велика роль у розробці цього варіанту належить О. Ю. Шмідту (видатний математик і астроном, 1891–1956), котрий першим висунув гіпотезу про те, що Земля та інші планети сформувалися з холодних допланетних тіл – *планетезималей*.

Спостережні дані, отримані за допомогою космічних і найпотужніших земних телескопів, підтверджують, що біля багатьох молодих зір головної послідовності (§ 21) справді є навколосорянні пилові оболонки дисковидної форми, які утворилися разом із зорею під час її формування з протозоряної туманності (§ 23).

Розглянемо можливий сценарій утворення планетної системи, уточнений сучасними теоретиками. Найважливіше в цьому сценарії те, що він спирається не тільки на єдиний ще до недавнього часу приклад Сонячної системи, але і на приклади інших планетних систем, відкритих за останні роки. Теорія походження планетних систем біля зір, хоча і не сформульована ще остаточно, має тепер під собою надійну спостережну основу.

**3. Етапи формування протопланетного диска.** Маса газово-пиллового диска, який оточує протозорю, становить кілька відсотків від маси Сонця і спочатку може мати розміри, порівнянні з її розмірами. Хімічний склад такого диска відповідає складу міжзоряних туманностей – 99 % газу і 1 % пилових частинок розмірами від 0,1 мкм до 1 мм.

При підвищенні температури протозорі нагрівається і диск, частинки пилу випаровуються, молекули газу розпадаються на атоми, атоми іонізуються, а розміри диска за рахунок сильної турбуленції – різнонаправленого хаотичного руху частинок – збільшуються до кількох десятків астрономічних одиниць.

Для подолання класичних труднощів з перерозподілом моменту кількості руху між Сонцем і планетами припускається, що Протосонце мало відчутне магнітне поле, яке, взаємодіючи з іонізованим газом, гальмувало його власне обертання і прискорювало обертальний рух протопланетної речовини. Далі диск охолоджується, турбулентність стихає. У ньому знову утворюються тверді пилові частинки – відбувається *конденсація*. При цьому основні космічні елементи – водень і гелій –

залишаються у вигляді газу. А просторовий розподіл пилинок за їхнім хімічним складом залежить від розподілу температури, яка зменшується по мірі віддалення від Протосонця.

Такий *перший етап* еволюції *протопланетного диска* (ППД), який триває близько 1 000 років.

На *другому етапі* формування ППД частинки збільшуються у розмірах, зіштовхуються одна з одною, злипаються. І коли густина пилу стає вищою за густину газу в десятки разів, пиловий диск переходить у стан гравітаційної нестійкості, за якої навіть дуже маленькі згустки, що виникли випадково, не розсіюються, а навпаки, з часом стають ще більшими.

Як наслідок, на *третьому етапі* еволюції ППД розпадається на безліч окремих малих згустків, які далі, зіштовхуючись і злипаючись, утворюють рій допланетних тіл різного розміру – планетезималі.

**4: Акумуляція планет.** Утворення планетезималей тривало десятки тисяч років. Подальше об'єднання їх у планети – набагато довший процес, який тривав сотні мільйонів років.

Допланетний рій був складною системою великої кількості планетезималей. Всі вони, окрім однакової швидкості для тіл на однаковій відстані від Сонця, мали ще й власні швидкості з випадковим розподілом напрямків. Планетезималі зіштовхувались, дробились, і тільки найбільші серед них поступово збільшували свої маси за умови, що швидкість зіткнення не перевищувала 1 м/с.

Внутрішню частину Сонячної системи утворили планети земної групи. Їхній ріст відбувався за відсутності легких газів за рахунок кам'янистих частинок і тіл, що містили в собі залізо та інші метали. Основна маса газів розсіялась із зони планет земної групи через видування їх сонячним вітром, який очистив від них і віддаленіші простори Сонячної системи. Проте планети-гіганти Юпітер і Сатурн встигли увібрати в себе достатню кількість газів, як і взагалі переважну частину речовини всієї планетної системи. Причому спочатку, як і в планетах земної групи, у них утворилися ядра із кам'янистих і льодових планетезималей, а потім поверх них нарощувались воднево-гелійові оболонки.

Така схема утворення планет-гігантів підтверджується фактами. По-перше, з'ясувалося, що їхні ядра мають приблизно однакову масу – 14–20 мас Землі, тоді як частка водню і гелію закономірно зменшується. По-друге, існують такі «речові докази» ранньої історії планет-гігантів, як їхні супутники та кільця. Адже випадання газу на планети також супроводжується утворенням навколо них газово-пилових дисків. Із цих дисків і утворилися супутники, причому розподіл їхніх густин, розмірів і мас повторює розподіл планет на земну групу і планети-гіганти.

Щодо найдальшої планети Плутон з його супутником Хароном, то, очевидно, ці два тіла – найближчі та найбільші серед понад стотисячної сім'ї транснептунових об'єктів поясу Койпера. Формування з них ще більш масивної планети через дуже повільний рух і низьку густину речовини йшло так повільно, що не завершилось і досі. І вже ніколи не завершиться, бо взаємні зіткнення, а також збурююча дія Урана і Нептуна значно зменшила їхню кількість.

Особливості обертання навколо своїх осей Венери і Урана пояснюються тим, що в період «бурхливої» юності Сонячної системи ці планети пережили зустріч з дуже масивними планетезималями, такими, що енергії зіткнення виявилось достатньо для того, щоб Уран «покласти на бік», а у Венери змінити напрямок обертання навколо осі на протилежний.

**5. Утворення астероїдів і комет.** Оскільки загальна маса всіх астероїдів не перевищує  $\frac{1}{20}$  маси Місяця, то пояс астероїдів, подібно до кілець Сатурна, – це речовина, що не спромоглася стати планетою. Таке визначення дав свого часу О. Ю. Шмідт, який припустив, що процесові акумуляції завадило сусідство масивного Юпітера. Але чому ж тоді сам Юпітер сформувався не на місці поясу астероїдів, на відстані 3–4 а.о., а далі – на відстані 6 а.о.?

Як вказують розрахунки, на відстані 3–4 а.о. ще є леткі речовини у газоподібному стані, тоді як на відстані Юпітера пролягає межа конденсації водяної пари. Тому в його зоні гравітаційна нестійкість виявилась раніше, тверді згущення росли набагато стрімкіше, ніж у зоні астероїдів. А далі Протоюпітер, набравши масу, своїм гравітаційним збуренням не дав сформуватися планеті у поясі астероїдів.

Більше того, він змінив орбіти деяких із астероїдів так, що ті стали рухатися по витягнутих, а не колових орбітах, перетинаючи орбіти Марса, Землі і навіть Венери та Меркурія. Два таких невеликих астероїди свого часу були захоплені Марсом, перетворившись на його супутники. Деякі астероїди перетворилися з часом на супутники планет-велетнів і рухаються тепер навколо них не в прямому, а у зворотному напрямку (проти обертання планети навколо осі).

Астероїди продовжують зіштовхуватися, дробитись на менші уламки, даючи початок метеорним тілам – метеороїдам, які й у наш час випадають на Землю та на інші небесні тіла у вигляді метеоритів.

Щодо комет, то за сучасними уявленнями періодичні комети приходять до Сонця із поясу Койпера. Всі інші комети – це льодяні планетезималі, закинуті планетами-велетнями в період формування планетної системи на відстань 100–150 тисяч а.о., де вони утворюють уже згадану велетенську і дуже розріджену кометну хмару Оорта. Кометна речовина під час руху комет поблизу Сонця поповнює міжпланетний простір пилом та газом, який вимітається сонячним вітром за її межі.

**6. Земля на початку історії.** Початок геологічної історії Землі тісно пов'язаний з її утворенням. Розрахунки показують, що ріст Землі до сучасних розмірів і маси тривав не менше 100 млн років. При цьому температура її поверхні не перевищувала 350–400 К. Її надра під дією гравітаційного стискання були дещо теплішими, але не набагато. Земля прогрілася завдяки тому, що в акумуляції брали участь дуже великі тіла радіусом до сотень кілометрів. Падіння таких тіл спричиняло утворення величезних кратерів, під якими до глибини 1–2 тис. км формувались зони високої температури, до 1 500–2 500 К.

Іноді температура сягала точки плавлення гірських порід, і тоді вони розділялися за складом: важкі хімічні елементи (метали) опускалися до центра, а легкі спливали. Додатковий розігрів надр відбувався

і за рахунок стиснення порід шарами, що лежали вище. Але основним джерелом розігріву планети був розпад радіоактивних елементів – урану, торію і калію, які в невеликих кількостях були в кам'янистій речовині.



Мал. 17.1. Схема формування Сонячної системи

Атмосфера і гідросфера поступово виділилися з твердої речовини планети, оскільки гази і вода входять як складові у гірські породи.

Аналізуючи хімічний склад Сонячної системи, ми знаходимо в планетах високий вміст тих хімічних елементів, які синтезуються під час термоядерних реакцій у надрах зір.

Як вони потрапили у протопланетний диск? Відповідь одна – під час появи наднових (§ 24), які шаленою силою вибуху розкидають їх у навколишній простір. Отже, слід припустити, що перш ніж з'явилася Сонячна система, речовина, з якої вона формувалась, безперервно поповнювалась важкими хімічними елементами внаслідок спалахів наднових у Галактиці.

Ось такі основні риси сценарію, згідно з яким утворилась Сонячна планетна сім'я (мал. 17.1). Але цей сценарій дає відповіді не на всі запитання. Наприклад, не зовсім ясно, як утворився Місяць – супутник Землі; незрозуміло, чому у Венери і Меркурія супутники взагалі відсутні, тоді як навіть у деяких астероїдів і супутників планет, не кажучи вже про всі інші великі планети, супутники є? А зараз, коли відкрито інші планетні системи, ми знаходимо, що вони не зовсім схожі на Сонячну. Це свідчить про те, що в питанні походження та розвитку планет ще рано ставити крапку.

1. Які закономірності будови нашої планетної системи слід пояснити теоретично?
2. У чому полягають основні етапи формування протопланетного диска?
3. Як пояснюється несхожість хімічного складу, розмірів і густин між планетами земної групи і планетами-гігантами?
4. Довгий час існувала гіпотеза про утворення поясу астероїдів внаслідок розпаду гіпотетичної планети Фаєтон між орбітою Марса і Юпітера. Подумайте, чи могло так бути насправді?
5. Скільки часу пішло на зростання Землі до її сучасних розмірів?



### Вивчивши тему III «Наша планетна система»

#### *необхідно знати:*

- ★ Місяць – найближче до Землі небесне тіло, природний супутник нашої планети.
- ★ Сонячна система в наш час нараховує дев'ять великих планет, які поділяються на дві групи – планети земного типу і планети-гіганти.
- ★ Астероїди – малі планети Сонячної системи, розташовані у поясі астероїдів між Марсом і Юпітером.
- ★ Суть питання «Астероїдна небезпека».
- ★ Всі планети Сонячної системи (окрім Меркурія і Венери) мають супутники, а планети-гіганти – ще й кільця.
- ★ «Падаюча зірка» – це явище метеора, яке до справжніх зір жодного відношення не має.
- ★ Астрономи відкрили масивні планети біля інших зір і розглядають можливість пошуку планет земного типу.

#### *необхідно вміти:*

- ★ Розрізняти основні (чотири) фази Місяця.
- ★ Відрізняти на зоряному небі планети від зір.



**IV. СОНЦЕ –  
НАЙБЛИЖЧА ЗОРЯ**

Сонце – центральне світило у Сонячній системі. Події та явища, що відбуваються на ньому, значною мірою визначають процеси, які відбуваються на планетах, зокрема і на планеті Земля.

Водночас Сонце – типова жовта зоря серед багатьох мільярдів інших, що населяють нашу Галактику. Завдяки винятковій близькості до Землі Сонце – єдина зоря, на поверхні якої ми бачимо окремі деталі і чіткі властивості порівняно з іншими зорями добре вивчені.

Отже, вивчаючи Сонце, ми починаємо краще розуміти природу інших зір, недосяжних для безпосереднього дослідження через їхню віддаленість. Важливо досліджувати Сонце і з огляду на те, що воно – джерело життя на Землі.

## § 18. Основні відомості про Сонце

**1. Атмосфера і «поверхня» Сонця.** Спостерігачеві Сонце (мал. 18.1) здається ідеально круглим диском, яскравість якого дещо зменшується від центра до чітко окресленого краю. Цей факт дозволяє ввести поняття «поверхні» Сонця, хоча насправді, як у будь-якої газової кулі – поверхні у звичному для нас розумінні у нього немає. Є плавне зменшення густини з висотою від стану умовно щільного до дуже розрідженого.



Мал. 18.1. Сонце

Сонце має складну будову як внутрішніх, так і зовнішніх шарів. Зовнішні шари Сонця – це його атмосфера, яку умовно поділяють на три концентричні оболонки.

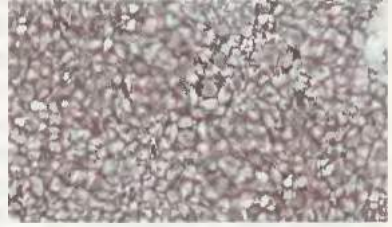
**Фотосфера** (з грец. – «сфера світла») – це найнижчий і найщільніший шар атмосфери, 300 км завтовшки, від якого ми отримуємо основний потік сонячного випромінювання. Оскільки товщина фотосфери становить не більше однієї тритисячної частки радіуса Сонця, саме її умовно називають *поверхнею* Сонця.

Фотосфера має жовто-білий колір і густину, в сотні разів меншу від густини атмосфери при поверхні Землі. Температура фотосфери зменшується з висотою, і той її шар, випромінювання якого сприймає людське око, має температуру біля 6 000 К. За таких умов майже всі молекули розпадаються на окремі атоми і лише у верхніх шарах зберігається відносно небагато найпростіших молекул, таких як  $H_2$ ,  $OH$ ,  $CH$ .

Розглядаючи фотографії Сонця, можна на його поверхні побачити тонкі деталі фотосфери: здається, що всю її засіяно дрібними яскравими



зернятками, розділеними вузькими темними доріжками (мал. 18.2). Ці зернятка називаються *гранулами*. Температура гранул у середньому на 500 К вища, ніж у проміжках між ними, розміри – близько 700 км. Гранули з'являються та існують пересічно близько 7 хв, після чого розпадаються, і на їхньому місці виникають нові. Дослідження показали, що гранули – це потоки гарячого газу, які підіймаються догори, тоді як у темних, дещо прохолодніших місцях, газ опускається вниз. Гранули свідчать про те, що під фотосферою у глибших шарах Сонця перенесення енергії до поверхні здійснюється шляхом конвекції.



Мал. 18.2. Фотосфера Сонця

Над фотосферою лежить наступний шар атмосфери Сонця – *хромосфера* (з грец. – «забарвлена сфера», мал. 18.3). Її можна побачити під час повного сонячного затемнення у вигляді вузького жовто-червоного кільця.

Товщина хромосфери становить 12–15 тис. км, а температура зростає від 4 500 К на межі з фотосферою до 100 000 К у її верхніх шарах.

Сонячна хромосфера дуже неоднорідна: в ній є довгасті, схожі на язички полум'я утворення – так звані *спікули*. Тому хромосфера нагадує траву, що горить. Час життя окремої спікули – до 5 хв, діаметр біля основи – від 500 до 3 000 км, температура у 2–3 рази вища, а густина менша, ніж у фотосфері. Речовина спікул піднімається із хромосфери в корону і розчиняється в ній. Таким чином, через спікули відбувається обмін речовини хромосфери з короною, яка лежить вище.



Мал. 18.3. Хромосфера Сонця

Над хромосферою знаходиться найпротяжніший шар сонячної атмосфери – *сонячна корона* (мал. 8.5 на стор. 39). Вона має сріблясто-білий колір і простягається на висоту в кілька сонячних радіусів, поступово переходячи у міжпланетний простір. Температура її на межі з хромосферою становить 100 000 К, а далі зростає до 2 000 000 К.

Корона у мільйон разів менш яскрава, ніж фотосфера, і не перевищує яскравості Місяця у повні, а тому спостерігається лише під час повної фази сонячного затемнення чи за допомогою спеціальних телескопів. Корона не має чітких обрисів, її неправильна форма змінюється з часом.

Найвіддаленіші частини корони не утримуються сонячним тяжінням, і тому речовина корони неперервно витікає в міжпланетне середовище, формуючи явище *сонячного вітру*. Речовина сонячного вітру складається в основному з ядра водню (протонів) і гелію ( $\alpha$ -частинок). Біля основи корони швидкості частинок не перевищують 0,3 км/с. Але на відстані орбіти Землі їхні швидкості досягають 500 км/с за концентрації частинок 1–10 в 1 см<sup>3</sup>.

Поширюючись на величезну відстань, аж за орбіту Сатурна, сонячний вітер утворює велетенську геліосферу, яка межує зі ще більш розрідженим міжзор'яним середовищем.

**2. Радіус, маса і світність Сонця.** Уявлення про фотосферу, хромосферу і корону Сонця склалися безпосередньо зі спостережень, зокрема під час повних сонячних затемнень. Але про такі параметри Сонця як радіус, маса чи світність, можна було отримати певні дані лише після того, як вдалося встановити відстань до нього, тобто з другої половини XVII ст. Знаючи відстань Земля–Сонце (1 а. о. = 150 млн км) і кутовий радіус Сонця  $r_{\odot} = 16'$ , можна знайти його лінійний радіус  $R_{\odot} = 700\,000\text{ км} = 109R_{\oplus}$ .

Маса Сонця визначається за третім узагальненим законом Кеплера (3.2):  $M_{\odot} = 330\,000M_{\oplus} = 2 \cdot 10^{30}\text{ кг}$ . Відповідно середня густина Сонця  $\rho_{\odot} = 1,4\text{ г/см}^3$ , що в 4 рази менше від середньої густини Землі.

Вимірявши сонячну сталу – енергію, що надходить від Сонця на одиницю поверхні Землі за одиницю часу (з урахуванням поглинання в земній атмосфері),  $q = 1,9\text{ кал/см}^2 \cdot \text{хв} = 1,37\text{ кВт/м}^2$ , можна знайти повну енергію, яка проходить через сферу радіуса  $a$ , тобто світність Сонця  $L_{\odot}$ :

$$L_{\odot} = 4\pi a^2 q = 3,85 \cdot 10^{26}\text{ Вт},$$

де  $a$  – відстань від Землі до Сонця.

Розрахунки показують, що Земля отримує лише одну двохмільярдну частку цієї енергії.

**3. Температура і спектр Сонця.** Якщо радіус Сонця  $R_{\odot}$  і його світність  $L_{\odot}$  відомі, то можна знайти кількість енергії, яку Сонце випромінює з одиниці своєї поверхні за секунду:

$$E_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2} = 6,3 \cdot 10^7\text{ Вт/м}^2.$$

Знаючи кількість енергії, яку випромінює тіло, і враховуючи відомі залежності між температурою і енергією, можна знайти температуру сонячної поверхні. Вона виявилася рівною 5 770 К. Проте ця температура має нерівномірний розподіл по поверхні Сонця. Встановлено, що в окремих спектральних діапазонах температура сонячної поверхні досягає 6 500 К, але в середньому її можна приймати рівною 6 000 К.

Неперервний спектр Сонця містить понад 10 000 ліній поглинання, які називаються *фраунгоферовими* (Й. Фраунгофер, німецький фізик, першим описав ці лінії 1814 р.). Як виявилось, фраунгоферові лінії відповідають вузьким ділянкам спектра, які сильно поглинаються атомами різних речовин. Загальна кількість ліній становить близько 30 000. Але значна їх частина, особливо в інфрачервоній ділянці спектра, – це лінії *телуричні* (від лат. «телус» – «земний»). Вони утворюються внаслідок поглинання світла Сонця молекулами газів земної атмосфери.

**4. Хімічний склад Сонця.** Й. Фраунгофер описав у спектрі Сонця понад 570 окремих темних ліній. Найвиразніші з них він позначив великими літерами латинського алфавіту (від червоного до фіолетового діапазону спектра) – A, B, C, D, E, F, G, H.

У 1857 р. німецькі фізики Г. Кірхгоф і Р. Бунзен порівняли довжини хвиль фраунгоферових ліній з досліджуваними в земних лабораторіях довжинами хвиль, що їх випромінюють (і поглинають) відомі хімічні елементи. Так було ототожнено близько десяти елементів. А справжнім тріумфом астрофізики стало відкриття нового хімічного елемента – гелію. Спостерігаючи 1868 р. спектр Сонця, англійський астроном Джозеф Лок'єр виявив у ньому яскраву жовту лінію поблизу лінії натрію D. Невідомий елемент, якому належала ця лінія, отримав назву гелій, тобто «сонячний». І лише у 1895 р. гелій було знайдено на Землі при дослідженнях спектрів окремих мінералів.

Загалом у спектрі Сонця виявлено лінії 72 хімічних елементів, визначено їхню відносну кількість. Найбільше у речовині Сонця водню, друге місце посідає гелій. Разом вони складають 98% маси Сонця. Кількість усіх інших елементів (за масою) не перевищує 2%.

**5. Обертання Сонця.** Регулярні спостереження поверхні Сонця, зокрема за положенням на ній окремих деталей, привели до висновку, що Сонце обертається навколо своєї осі в тому ж напрямку, що і планети навколо нього, тобто проти годинникової стрілки, якщо розглядати цей рух з боку Північного полюса світу. Було визначено і кут нахилу осі обертання Сонця до площини екліптики:  $82^{\circ}45'$ .

Виявилось також, що Сонце обертається не як тверде тіло: його кутова швидкість зменшується з віддаленням від екватора. Так, сидеричний період обертання Сонця на екваторі становить 25 діб, а біля полюсів – 30 діб. Для спостерігача, який разом із Землею рухається навколо Сонця, ці періоди відповідно дорівнюють 27 і 33 доби.

1. Як розуміти поняття «поверхня Сонця»?
2. Що таке гранули? Що таке спікули?
3. Як змінюється температура в атмосфері Сонця?
4. Що на сьогодні відомо про хімічний склад Сонця?
5. На якій підставі зроблений висновок про те, що Сонце обертається не як тверде тіло?



**18.1.** Перевірте твердження про те, що Земля отримує одну двохмільярдну частку енергії, яка випромінюється Сонцем у навколишній простір.

**18.2.** Встановіть, чому дорівнює період обертання Сонця, якщо із спостережень визначено, що пляма, розміщена поблизу екватора, змістилась за 3 доби на  $40^{\circ}$ ?

## § 19. Будова Сонця. Джерела його енергії

**1. Умова рівноваги і температура в центрі Сонця.** Сонце – велетенська газова куля. Кожен елемент її маси  $M$ , що знаходиться на відстані  $r$  від центра, притягається у напрямку до центра. Здавалося б, під дією сили тяжіння повинен настати колапс – швидке падіння речовини у центр Сонця. Тим часом Сонце існує близько 5 млрд років, і астрономи «віщують» йому ще стільки ж у майбутньому. Чому це можливо?

Й. С. Шкловський, відомий астроном радянських часів, дуже образно висловився з цього приводу: «...Історія існування будь-якої зорі – це справді титанічна боротьба між силою гравітації, яка намагається її необмежено стиснути, і силою газового тиску, що намагається її «розпорошити», розсіяти у навколишньому міжзоряному просторі. Мільйони і мільйони років триває ця «боротьба». Упродовж цих дивовижно великих строків сили рівні. Та врешті-решт перемога буде за гравітацією. Така драма еволюції кожної зорі».

Справді, якби сила тяжіння нічим не зрівноважувалась, то речовина зовнішніх шарів під дією гравітації вже за 5 хвилин вільно упала б у центр Сонця. Протидіє силам гравітації сила газового тиску, спрямована від центра Сонця назовні. Стан зорі (в даному разі Сонця), в якому внутрішній тиск газу і випромінювання зрівноважує вагу речовини, розміщеної вище, називається станом гравітаційної рівноваги.

В умовах гравітаційної рівноваги температура  $T$  всередині зорі радіусом  $R$  і масою  $M$  пропорційна відношенню  $M/R$ . Теоретичні розрахунки дають для Сонця температуру в центрі близько  $T_c \approx 15\,000\,000$  К. За такої температури всередині тиск протистоїть силі тяжіння. Густина речовини в центрі Сонця  $\rho \approx 100$  г/см<sup>3</sup>, тиск – близько 220 млрд атмосфер.

**2. Джерела енергії Сонця.** За останні 150 років було висловлено багато гіпотез щодо природи джерел енергії Сонця і зір. Зрештою було з'ясовано, що реальне значення мають лише такі джерела як *гравітаційне стискання і термоядерний синтез*.

За сучасними уявленнями, зорі формуються з фрагментів газово-пилових хмар. У центрі такої хмари виникає зародок зорі, на який «намагається» впасти вся навколишня речовина. У процесі падіння потенціальна енергія перетворюється в кінетичну, а та, у свою чергу, внаслідок зіткнень окремих частинок перетворюється в теплову енергію. І якщо спочатку температура у згаданому фрагменті була низькою, то зі зменшенням радіуса майбутньої зорі температура в її центрі починає зростати.

З теорії випливає, що під час гравітаційного стискання протозоря випромінює практично половину звільненої потенціальної енергії в навколишній простір. Друга її половина іде на нагрівання речовини самої зорі.

Підрахуймо, як довго вона буде світитися за рахунок своєї потенціальної енергії.

Отже, зоря з масою  $M$  і радіусом  $R$  характеризується потенціальною енергією  $W$  :

$$W = \frac{3 GM^2}{2 R} \quad (19.1)$$

Якщо прийняти, що світність зорі (протозорі) з часом не змінюється і рівна спостережуваній тепер, то час стискання зорі або час, на який вистачить її потенціальної енергії, дорівнює

$$t = \frac{3 GM^2}{2 R L} \quad (19.2)$$

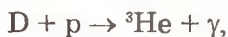
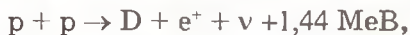
За сучасної світності Сонця  $L_{\odot} = 3,85 \cdot 10^{26}$  Вт/с і значенні його потенціальної енергії  $W_{\odot} = 5,9 \cdot 10^{11}$  Дж неважко підрахувати, що Сонце висвітило б половину цієї енергії за 24 млн років, і якби не існувало інших джерел енергії, то воно вже давно припинило б своє існування. Тому гравітаційне стискання може бути джерелом енергії зір лише на відносно коротких етапах їхнього розвитку.

У процесі стискання протозорі зростає температура в її центрі, і через деякий час вона може досягти величини 10 000 000 К. За такої температури починаються термоядерні реакції перетворення водню на гелій. Першою і найефективнішою з реакцій термоядерного синтезу в умовах Сонця є утворення з чотирьох протонів ядра атома гелію за схемою  $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$ .

Винятково важливою обставиною є те, що маса ядра гелію майже на 1% менша за масу чотирьох протонів. Ця втрата маси, що називається *дефектом маси*, і є причиною виділення внаслідок ядерних реакцій великої кількості енергії. Її величина, згідно з формулою Ейнштейна, дорівнює  $\Delta E = \Delta mc^2$ . Енергія, що виділяється під час утворення одного ядра гелію, дорівнює  $4,3 \cdot 10^{11}$  Дж.

Реакції синтезу гелію і енерговиділення, яке їх супроводжує, найбільш інтенсивно відбуваються в центрі Сонця, де температура і тиск найвищі. Вони загалом можуть перебігати двома шляхами.

Найістотною в надрах Сонця є реакція *протон-протонного (p-p) циклу*. Цикл починається з украй рідкісної події – перетворення протона на нейтрон при його особливо тісному зближенні з іншим протоном; ця подія називається  $\beta$ -розпадом протона, бо під час розпаду утворюється позитивна  $\beta$ -частинка – позитрон. Схема цього циклу така:



Виникає питання: якщо у надрах Сонця відбуваються ядерні реакції, то що регулює їхню швидкість, чому Сонце не вибухає, як термоядерна бомба? Відповідь приховується у першій із трьох реакцій циклу. Ймовірність того, що при зближенні двох протонів один із них перетвориться в нейтрон ( $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ ), надзвичайно мала. Ця подія може відбутись один раз на 14 млрд років. За такий час число протонів у певному об'ємі зменшується удвічі. І тільки тому, що число протонів у Сонці надзвичайно велике, цих реакцій відбувається достатньо для того, щоб підтримувати необхідну для їхнього перебігу температуру.

У другому, *вуглецево-азотному циклі*, також із чотирьох ядер водню (протонів) утворюється одне ядро гелію, але при цьому вуглець і азот відіграють роль каталізаторів. Ця реакція значно менш істотна в умовах Сонця, бо потребує як більшого вмісту вуглецю, так і вищої температури в його надрах.

Маючи таке джерело енергії як термоядерний синтез, Сонце може світити близько 10 мільярдів років.

**3. Внутрішня будова Сонця.** Від центра Сонця і до віддалі  $(0,2-0,3)R_{\odot}$  знаходиться його ядро – зона, де зосереджена половина сонячної маси і виділяється практично вся енергія, що змушує його світитись. Оскільки перенос енергії в ядрі відбувається не конвекцією, а перевипромінюванням квантів, такий стан ядра називають променистим.

На віддалі понад  $0,3R_{\odot}$  від центра температура і тиск стають меншими ніж 5 млн К і 10 млрд атмосфер. За таких умов ядерні реакції відбуватися не можуть. Енергія, утворена в ядрі, лише передається далі шляхом поглинання  $\gamma$ -квантів із більших глибин і наступного їх перевипромінювання. При цьому замість одного поглинутого  $\gamma$ -кванта великої енергії атоми, як правило, послідовно випромінюють кілька квантів з меншою енергією. Як наслідок, жорсткі  $\gamma$ -кванти дробляться на менш енергійні, і врешті-решт до фотосфери дістаються кванти видимого і теплового випромінювання, які остаточно і вивільняються назовні.

Зона, в якій енергія переноситься шляхом поглинання випромінювання і наступного його перевипромінювання, називається зоною променистої рівноваги. Практично усі надра Сонця перебувають у стані променистої рівноваги.

Вище цього рівня зростає непрозорість речовини, і випромінювання, замкнуте під її товщею, не встигає відводити все вироблене «тепло». Тому в перенесенні енергії починає брати участь сама речовина, і безпосередньо під фотосферою вздовж останніх  $0,2R_{\odot}$  утворюється конвективна зона, де енергія переноситься шляхом конвекції. Інакше кажучи, приповерхневий шар Сонця «кипить», тобто перебуває у стані конвективної рівноваги. Одним із проявів конвекції у фотосфері Сонця є грануляція (§ 18).

За розрахунками близько 5 % енергії, яка вивільняється в надрах Сонця, вносять нейтрино. З 1967 р. (§ 12) дослідники намагаються зареєструвати теоретично обчислену кількість нейтрино з допомогою нейтринних детекторів. Але і в наш час, коли вже отримано нейтринні зображення Сонця, такої їхньої кількості, яка б відповідала теоретичним розрахункам, не виявлено. Можливо, це пов'язано з недосконалістю методик реєстрації нейтрино, а, може, найближчим часом доведеться переглядати наші уявлення про ті процеси, які відбуваються в надрах Сонця та про природу нейтрино.

В цілому процес передачі енергії від центральних областей до фотосфери дуже повільний і триває мільйони років.



1. Що таке гравітаційна рівновага? 2. Що таке потенціальна енергія зорі?
3. За рахунок яких джерел енергії Сонце випромінює? Які зміни при цьому відбуваються з його речовиною? 4. Чому Сонце не вибухає як термоядерна бомба?

## § 20. Сонячна активність та її вплив на Землю

На сонячній поверхні часто спостерігаються особливі утворення: ділянки з підвищеною яскравістю – *факели*, ділянки із зниженою яскравістю – *плями*, інколи з'являються короткоживучі дуже яскраві

спалахи, а на краю диска помітні *протуберанці*. Всі вони є активними утворами на Сонці, а їхня поява і розвиток – це прояв сонячної активності.

Місця, де спостерігаються активні утвори, отримали назву *активних зон*. Їхня головна характеристика – це сильні локальні магнітні поля, які виходять на поверхню Сонця і є набагато сильнішими від його регулярного магнітного поля.

**1. Сонячні плями.** Активні зони у фотосфері проявляють себе передовсім *сонячними плямами*. За контрастом із фотосферою сонячні плями мають вигляд темних утворень, тому що температура речовини в них менша, ніж у навколишніх ділянках фотосфери: у великих плямах вона сягає лише 4 500 К. Трапляються як поодинокі плями, так і їхні групи. Розміри плям в середньому рівні 40 000 км, проте бувають плями діаметром до 180 000 км.

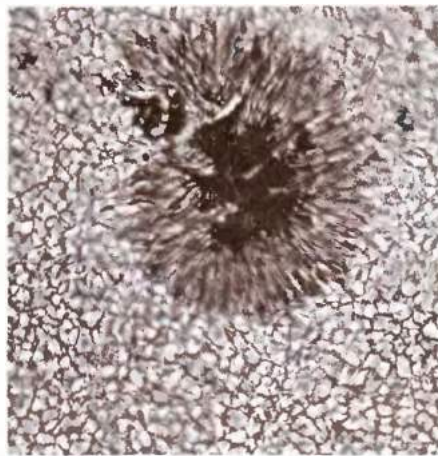
У великій плямі виділяють значно темніше *ядро* і *півтінь* (мал. 20.1). Час життя поодиноких плям досягає кількох місяців, для груп плям він іноді обмежений кількома годинами.

Ще 1908 р. було доведено, що в плямах є сильні магнітні поля, які виникають при конвективних рухах речовини у підфотосферних шарах. Індукція магнітного поля в плямах досягає 0,5 Тл. Сильне магнітне поле гальмує вихід гарячої сонячної речовини з його надр, і саме тому температура поверхні Сонця у цьому місці знижується.

Пляма, в якій магнітні силові лінії виходять з-під поверхні, має північну полярність *N*, якщо ж ці лінії йдуть під поверхню – південну *S*. Магнітні силові лінії, які виходять із плям, іноді простягаються далеко за поверхню Сонця, у хромосферу і корону.

На сонячному диску спостерігаються світлі утвори – *факели* (мал. 20.2), вони є повсюдними супутниками плям. Оскільки в самій плямі потік енергії менший (а з глибини Сонця він рівномірний у всіх напрямках), то ділянка поруч з плямою – факел – це місце, де її надходить більше.

**2. Циклічність сонячної активності.** В середині XIX ст. було виявлено, що в різні роки кількість плям на Сонці неоднакова. Є роки, коли їх багато – це максимум активності. І навпаки, бувають роки, коли їх на Сонці дуже мало – це мінімум активності.



Мал. 20.1. Сонячна пляма



Мал. 20.2. Факели

За міру плямотворної діяльності Сонця прийнято число Вольфа

$$W = 10g + f, \quad (20.1)$$

де  $g$  – кількість груп плям,  $f$  – загальна кількість усіх плям, які є в цей момент на диску Сонця.

Обчислення чисел Вольфа проводять на кожний день. Після чого, знаходять середнє за місяць і середнє за рік значення числа Вольфа. Зрештою, можна скласти графік зміни цього статистичного параметра від року до року (мал. 20.3). Як видно, кількість плям на Сонці в наш час змінюється в середньому з періодом 11,1 року, тобто існує *11-річний цикл* активності Сонця. Проте проміжки часу між двома максимумами можуть коливатись від 7,5 до 16 років, тому передбачити настання конкретного максимуму нелегко.



Мал. 20.3. Графік чисел Вольфа



Мал. 20.4. Графік чисел Вольфа за останні 250 років

Введено умовну нумерацію циклів, починаючи від того, що мав початок у 1755 р. У 1996 р. розпочався 23-й цикл.

Максимуми числа  $W$  від циклу до циклу неоднакові (мал. 20.4). Імовірно, існує й *віковий цикл* сонячної активності – певна повторюваність найбільших максимумів через 80–90 років. Є припущення, що існує *тисячолітній цикл*, з періодом близько 1 100 років.

**3. Протуберанці.** При спостереженнях Сонця через густочервоний світлофільтр на краю диска видно своєрідні світлі виступи над поверхнею, його, які можуть простягатися далеко за межі хромосфери аж у корону (мал. 20.5).

Такі викиди речовини називаються *протуберанцями* (вілат. «протуберо» – «здуваюся»). Протуберанці – це речовина, яка підіймається над сонячною поверхнею і утримується над нею завдяки магнітному полю.



Мал. 20.5. Протуберанці

Протуберанці – найграндіозніші утворення в атмосфері Сонця. Довжина деяких з них сягає 200 000 км, товщина – кілька тисяч кілометрів. Оскільки найчастіше протуберанці – це дуже плоскі й довгі щільні й холодніші від корони хмари газу, розташовані своєю площиною майже перпендикулярно до поверхні Сонця, то в проекції на сонячний диск вони мають вигляд вигнутих темних волокон, часто витягнутих у напрямку схід–захід уздовж паралелі.



**4. Сонячні спалахи.** Досить часто над сонячними плямами у хромосфері відбуваються *хромосферні спалахи* (мал. 20.6) – найбільш вражаючий прояв сонячної активності. В роки максимумів сонячної активності може трапитись до десяти спалахів за добу, тоді як у мінімумі впродовж багатьох місяців може не бути жодного.

Як правило, спалах починається зі швидкого зростання температури корони до 40 млн К, що призводить до сплеску м'якого рентгенівського випромінювання. Потім під зоною зростання температури в короні підвищується температура хромосфери. Найпотужніші спалахи видно без допомоги фільтра. Яскравість спалахів може бути на 50% більшою за яскравість фотосфери.

За сучасними уявленнями, спалах – це раптове виділення енергії, накопиченої у магнітному полі активної зони. На певній висоті над поверхнею Сонця виникає зона, де магнітне поле на невеликому відрізку різко змінюється за величиною і напрямком. Це супроводжується прискоренням заряджених частинок і перетворенням їх на високоенергійні. При цьому речовина нагрівається, з'являється потужне електромагнітне випромінювання у рентгенівському, ультрафіолетовому та радіодіапазоні, а також у міжпланетний простір у радіальному напрямку викидається вузький струмінь частинок високої енергії зі швидкостями 3 000–30 000 км/с. У деяких найпотужніших спалахах навіть народжуються *сонячні космічні промені* – електрони, протони, нейтрони,  $\alpha$ -частинки та інші, що рухаються зі швидкостями до 0,2–0,8 швидкості світла.



Мал. 20.6. Хромосферний спалах

Процес розвитку невеликих спалахів триває 5–10 хв, найпотужніших – до семи годин. За цей час у ділянці сонячної поверхні протяжністю лише 1 000 км виділяється енергія близько  $10^{21}$ – $10^{25}$  Дж, сумірна з енергією, що її випромінює Сонце з усієї своєї поверхні за 1 с, або з кількістю тепла, що його отримує Земля від Сонця за цілий рік.

З усіх активних утворень спалахи вирізняються своєю особливою здатністю впливати на геофізичний стан Землі. І хоча принцип утворення спалахів вчені зрозуміли, детальної теорії поки що немає.

**5. Вплив сонячної активності на магнітосферу і атмосферу Землі.** Оскільки під час спалаху потік рентгенівських квантів зростає у 100–400 разів, то вже через 8 хв 20 с вони досягають орбіти Землі й проникають в іоносферу. Жорстке випромінювання спричиняє додаткову іонізацію повітря. Як наслідок, змінюється щільність іоносферних шарів і їхня відбивна здатність, а тому одразу ж порушується зв'язок на коротких радіохвилях. Почасти також руйнується озоновий шар, і до поверхні Землі проникає підвищена кількість ультрафіолету.

Через декілька годин після спалаху Землі досягає потік високоенергійних частинок. Завдяки наявності геомагнітного поля вони не

потрапляють на земну поверхню, але в районах магнітних полюсів, де силові магнітні лінії виходять з поверхні або входять у неї, частинки



Мал. 20.7. Полярне сяйво

проникають до висот 100 км, іонізують і збуджують атоми повітря. При поверненні атомів до нейтрального стану відбувається висвічування, яке спостерігається у вигляді *полярних сяйв* – дивовижних за красою явищ (мал. 20.7).

**6.\* Магнітні бурі.** Ще через 1–2 доби Землі досягає підсилений потік сонячного вітру. Під його дією земна магнітосфера стискається. Але, як відомо з § 13, навколо Землі у пастці силових геомагнітних ліній є багато заряджених частинок (радіаційні пояси). На висоті 3–5 $R_{\oplus}$  вони утворюють в екваторіальній площині електричний струм, що тече зі сходу на захід. Цей струм, у свою чергу, створює власне магнітне поле, яке додається до геомагнітного. При посиленні сонячного вітру збільшується кількість заряджених частинок в радіаційних поясах, тому збільшується і екваторіальний електричний струм. Зростає при цьому і його магнітне поле, яке перешкоджає подальшому стисненню магнітосфери; більше того, вона розширюється.

При стисненні магнітосфери напруженість магнітного поля збільшується, при розширенні, навпаки, зменшується. Так виникає окремий сплеск геомагнітного збурення тривалістю близько години. Потужні сонячні збурення обумовлюють тривале підсилення сонячного вітру. В магнітосферу надходить один імпульс за іншим. Виникає послідовна серія збурень геомагнітного поля, коли його напруженість швидко і різко змінюється – настає магнітна буря.

Під час магнітних бур збурення геомагнітного поля можуть досягати такої сили, що в земній корі, у металевих предметах, у провідниках тощо індукуються досить сильні хаотичні електричні струми. Вони здатні спричиняти навіть аварії в телеграфно-телефонному зв'язку і виводити з ладу електричні прилади.

Так, під час сильної магнітної бурі 11 лютого 1958 р. у Швеції був зареєстрований вихід з ладу електричної лінії, на кабелях горіла ізоляція, горіли запобіжники і трансформатори. А електричні збурення в земній корі можуть спровокувати землетруси в сейсмічно активних районах.

**7.\* Вплив активності Сонця на погоду.** Активність Сонця впливає на погоду. Цей зв'язок можна прослідкувати таким чином. Встановлено, що крім екваторіального кільцевого струму, в районах геомагнітних полюсів на віддалі 20° вночі та 10° удень на висоті близько 100 км приблизно вздовж магнітних паралелей також тече електричний струм. Після надходження від Сонця посиленого потоку заряджених частинок деяка їхня кількість затримується у високих широтах і підсилює цю течію. Збільшення струму призводить до додаткового розігріву атмосфери. Від місця розігріву вниз до тропосфери проникає хвилеподібний імпульс, який далі вздовж поверхні Землі поширюється впродовж кількох годин до низьких широт. Ці хвилі

тим енергетичним мостом між іоносферою і тропосферою, який передає енергію корпускулярних сонячних потоків погодному шару повітря. Вони підсилюють меридіональну циркуляцію повітря і зменшують зональну. Там, де тиск був низьким, він стає ще нижчим, а де був високим – ще вищим. За таких умов у тропічній зоні народжуються тайфуни, а у місцях з різко вираженим континентальним кліматом – засухи.

**8. Сонячна активність і коливання клімату Землі.** У ритмі циклами сонячної активності настають певні коливання клімату Землі. У тисячолітньому циклі істотно коливається рівень води в озерах і морях, що видно на наступному прикладі.

У V ст. н. е. на березі Каспійського моря були збудовані порт Дербент і фортеця. Тепер залишки її стін перебувають на глибині близько 5 м, а в XI–XIV ст. ця глибина сягала 8 м.

Цікава також історія колонізації Ісландії. У 860 р. клімат цього острова був значно м'якшим, ніж тепер. Родючі землі й багаті на рослинність пасовиська були і в Гренландії, де в IX ст. існували два поселення із числом мешканців близько 5 000. Але з XIV ст. у північній півкулі, зокрема в Європі, різко похолодало, кількість опадів зросла. Заледеніння Арктики досягло значних розмірів, Гренландія була блокована льодом, і на 200 років зв'язок з нею перервався. А коли до неї зробилися через криги, там не було знайдено жодного мешканця.

**9. Сонячна активність і біосфера Землі.** Впливаючи на погоду і клімат, сонячна активність не може не впливати на рослинний світ. Було зібрано багато зрізів дерев з чітко вираженими річними кільцями. Серед них були зрізи секвойї віком 3 200 років і дев'ятнадцяти 500-річних дерев. У всіх дерев визначали товщину річних кілець з точністю до 0,01 мм. Виявилось, що в роки максимумів сонячної активності приріст дерев був більшим, ніж у роки мінімумів. А те, що врожайність сільськогосподарських культур і відповідно ціни на них співвідносяться з кількістю сонячних плям, стало вже класичним прикладом.

До сонячної активності небайдужий і тваринний світ. Тісно пов'язані з 11-річним циклом періоди підвищеного розмноження каракуртів, білих, пустельної саранчі тощо. Останню в періоди між піками сонячної активності взагалі не можна виявити.

До тваринного світу належать бактерії та віруси, що спричиняють різноманітні захворювання у людей і тварин. Через зміну їхньої чисельності та поведінки сонячна активність впливає на поширення епідемій і пандемій (розповсюдження хвороби на цілі країни та материки), а також на поширення епізоотій (масових захворювань тварин). Як показав О. Чижевський, у роки високої сонячної активності виникають пандемії холери, грипу, дизентерії, дифтерії тощо.

**10. Вплив сонячної активності на людину.** Численні дослідження показали, що найчутливішими до змін напруженості геомагнітного поля, обумовлених сонячною активністю, є нервова і серцево-судинна системи людини.

Вплив виявляється по-різному: через зміну електричних властивостей тканин людського організму; через вільні радикали у клітинах; через

індукційні струми, що виникають в організмі під впливом геомагнітних полів; через зміну проникності клітинних мембран тощо. Як наслідок, у людей з хворобами серцево-судинної системи під час геомагнітних бур погіршується стан, збільшується число інфарктів та інсультів.

У здорових людей змінюється сприйняття часу, сповільнюється рухова реакція, різко знижується короткочасна пам'ять, об'єм та інтенсивність уваги. Навіть у спеціально тренуваних людей – спортсменів вищого класу та льотчиків – зафіксовано підвищену кількість помилок при виконанні контрольних завдань. Різкі й часті збільшення збуденості геомагнітного поля, впливаючи на візерунок біопотенціалів мозку, погіршують сон.

Все це відбивається на виконанні робіт, які вимагають точності та уваги, спричиняє збільшення травматизму на виробництві та кількості автотранспортних пригод. А люди з порушеннями функцій головного мозку в такі дні часто потрапляють на лікарняне ліжко.

Сонячна активність впливає на систему крові людини. Під час геомагнітних бур швидкість згортання крові зменшується на 8%. А кількість білих кров'яних тілець – лейкоцитів, від яких, як відомо, залежить опірність організму різним інфекційним захворюванням, у роки активного Сонця знижується в 1,5–1,7 раза. Так що поширеність епідемій у цей час може залежати не лише від посилення діяльності патогенних мікроорганізмів.

Отже, можна з упевненістю сказати, що ізоляція біосфери від дії космічних чинників відносна. Біосфера дуже чуйно реагує на зміну параметрів зовнішнього середовища.

У зв'язку з цим дуже важливо вести регулярні спостереження за Сонцем і вміти аналізувати різні явища на ньому. Саме цим і займаються багато обсерваторій світу.

1. Що спричиняє появу плям на поверхні Сонця?
2. Що таке число Вольфа? 3. Що таке протуберанці?
4. Звідки береться енергія сонячних спалахів?
5. Що відомо про вплив окремих проявів сонячної активності на організм людини?

## Вивчивши тему IV «СОНЦЕ – НАЙБЛИЖЧА ЗОРЯ»

### необхідно знати:

- ★ Сонце – найближча до нас зоря, джерело життя на Землі.
- ★ Сонце як газова куля не має твердої поверхні.
- ★ Сонце обертається навколо своєї осі не як тверде тіло.
- ★ Сонце, як і інші зорі, існує завдяки протидії двох сил – гравітації та газового тиску.
- ★ Джерелом енергії Сонця є термоядерні реакції в його ядрі.
- ★ Активність Сонця проявляється, зокрема, у кількості плям і спалахів на ньому.
- ★ Існує тісний зв'язок між сонячною активністю і біосферою Землі.



## V. ЗОРІ. ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР

Уявлення, за яким зорі – це далекі сонця, зародилося вже у давній Греції. Однак, як здавалось, природа і цих далеких світил, і близького Сонця назавжди залишиться нез'ясованою. Так і повчав своїх учнів філософ Сократ (469–399 рр. до н. е.): «Усе це назавжди залишиться таємницею для смертного, і певно, самим богам сумно бачити намагання людини розгадати те, що вони назавжди приховали від неї...» А тому «все що вище від нас, те нас не стосується».

Через 2000 років те саме твердив французький філософ О. Конт (1798–1857): «Ми нічого не можемо дізнатися про зорі, крім того, що вони існують». Тому заняття астрономією – «це марна трата часу, яка не може дати ні корисних, ні цікавих результатів».

Проте за останні сто років астрономам, всупереч песимістичним прогнозам Конта, вдалося з'ясувати основні питання, що стосуються природи зір і фізики процесів, які відбуваються в їхніх надрах.

## § 21. Звичайні зорі

**1. Відстані до зір.** Як уже було сказано в § 3, прямі вимірювання відстані до тієї чи іншої зорі можна проводити, визначаючи річний паралакс  $\pi$  – кут, під яким із зорі було б видно радіус земної орбіти. Загалом ця операція зводиться до фотографування зір за допомогою телескопа через кожні 6 місяців, тобто із двох протилежних точок земної орбіти. На фотографіях близька зоря дещо змінить своє положення на фоні інших, більш далеких зір. Якщо це переміщення достатнє для вимірювання, то можна обчислити відповідний кут, а отже, і відстань до зорі (мал. 3.4):

$$r = \frac{a}{\sin \pi}, \quad (21.1)$$

де  $a$  – середній радіус земної орбіти,  $r$  – відстань до зорі,  $\pi$  – її річний паралакс. Оскільки річні паралакси зір менші за  $1''$ , то можна записати інакше, поклавши

$$\sin \pi = \pi'' \cdot \sin 1'' = \frac{\pi''}{206\,265''}, \quad \text{тобто } r = 206\,265'' \frac{a}{\pi''}. \quad (21.2)$$

Відстань  $r$  у цих формулах виражена в астрономічних одиницях. Відстань до небесних тіл за межами Сонячної системи, як правило, вимірюють у парсеках чи світлових роках, і тоді

$$r = \frac{1}{\pi''} \text{ пк} = \frac{3,26}{\pi''} \text{ св.р.} \quad (21.3)$$

Найближча до нас зоря Проксима Кентавра має річний паралакс  $\pi = 0,762''$  і знаходиться від нас на відстані 1,3 пк або 4,26 св. р.

Знаючи відстань до зорі, її видиму зоряну величину та використовувачи формули (3.3) і (3.4), можна обчислити два інших її параметри: абсолютну зоряну величину  $M$  і світність  $L$ .

Від середини XIX ст. до кінця XX ст. було визначено паралакси більш ніж 100 000 об'єктів, тобто встановлено характеристики кожної мільйонної зорі з усіх, що населяють нашу Галактику. На основі методу річного паралаксу астрономи розробили близько десяти інших методів визначення відстаней, а отже, і основних фізичних параметрів зір. Серед них – широкоживаний *метод типового представника*, суть якого ось у чому.

Якщо для об'єкта з певним набором характеристик (температура  $T$ , колір, маса  $M$  тощо) ми знаємо відстань  $r$  і його видиму зоряну величину  $m$ , то визначивши за (3.3) і (3.4) його абсолютну зоряну величину  $M$  і світність  $L$ , вважаємо його надалі «стандартом». Досліджуючи навколишній зоряний світ, виявляємо в ньому об'єкт з таким же набором характеристик ( $T$ ,  $M$  тощо). Приймаючи, що обидва об'єкти мають однакову абсолютну зоряну величину  $M$ , і визначивши видиму величину  $m$  досліджуваного об'єкта, за формулою (3.3) знаходимо відстань до нього.

**2. Світності, радіуси і температури зір.** Дослідження багатьох тисяч об'єктів зоряного неба привели до висновку, що за своєю світністю зорі істотно відрізняються між собою. Одні з них мають світності у сотні, тисячі чи навіть мільйони разів більші від світності Сонця, а інші, навпаки, у сотні, тисячі й навіть сотні тисяч разів менші за неї. Найбільшу світність у Галактиці має зоря *HD93129A* з комплексу  $\eta$  в сузір'ї Кіля – вона світиться як мільйон наших Сонць. З іншого боку, світність найближчої до Сонця зорі Проксими Кентавра становить лише  $0,000056L_{\odot}$ . Тільки 18 000 таких Проксим, разом узятих, будуть світити як наше Сонце.

Як виявляється, у Галактиці зір з малими і дуже малими світностями в десятки разів більше, ніж таких, як Сонце, і в тисячі разів більше, ніж потужних зір, світності яких перевищують сонячну. Із 40 найближчих до нас зір лише три мають світність більшу за сонячну.

Те ж саме можна сказати і про розміри зір. Є зорі-гіганти і надгіганти, радіуси яких у сотні й тисячі разів перевершують сонячні. І навпаки, є зорі-карлики, радіуси яких у десятки і сотні разів менші від  $R_{\odot}$ . А радіуси нейтронних зір становлять лише 10–30 км (мал. 21.1 на стор. 129).

Температура більшості зір знаходиться в межах від 2 500 К до 30 000 К, хоча відомі й такі зорі, для яких вона менша або більша вказаних меж.

**3. Спектри і спектральна класифікація зір.** Вже при першому знайомстві з зоряним небом привертає увагу відмінність зір за їхніми кольорами. Набагато сильніше ця відмінність проявляється при розгляданні спектрів. Як правило, зорі мають *неперервний спектр*, на який накладаються спектральні лінії, частіше за все *поглинання*, але в спектрах деяких зір видно і яскраві лінії *випромінювання*.

Найважливіші відмінності спектрів зір полягають у кількості та інтенсивності спектральних ліній, а також у розподілі енергії в неперервному спектрі.

Як виявилось, серед сотень тисяч зір важко знайти хоча б дві, спектри яких були б однаковими. І все ж, якщо нехтувати дрібнішими відмінностями, ці спектри можна поділити на декілька спектральних класів. Загальнозживаною є *Гарвардська класифікація*, створена в Гарвардському університеті в США. Спектральні класи в цій класифікації позначено літерами латинського алфавіту в такому порядку:

$$\begin{array}{cccccccc} & & & & R - N & & & \\ & & & & | & & & \\ O - B - A - F - G - K - M & & & & | & & & \\ & & & & S & & & \end{array}$$

Причому всередині кожного класу введено поділ на 10 підкласів, які позначаються цифрами від 0 до 9, цифри ставляться після букви (наприклад, A0, A1..., A9, F0...). Так утворюється плавна послідовність підкласів.

Класи *O*, *B*, *A* названо гарячими, або *ранніми*, класи *F* і *G* – *сонячними*, *K*, *M* – холодними або *пізніми*.

Для запам'ятовування послідовності спектральних класів придумано декілька жартівливих фраз, як ось англійською мовою: «Oh Be A Fine Girl Kiss Me», або українською: «ОБидва Фазани Жовтим Кольором Мазані Рядком Надуті Сидять».

Основним критерієм спектральної класифікації є інтенсивність атомних спектральних ліній і молекулярних смуг.

Фізичне обґрунтування спектральної класифікації полягає в тому, що вона фактично є *температурною* класифікацією. Тобто зовнішній вигляд спектра залежить від температури на поверхні зорі, і при переході від пізніх спектральних класів до ранніх температури збільшуються.

Водночас спектральна послідовність є і послідовністю кольору, адже різний колір зір також залежить від температури. За різних температур максимум інтенсивності неперервного спектра припадає на різні його ділянки. Якщо максимум випромінювання зорі знаходиться у червоній частині спектра, то її колір буде червоним, якщо у блакитній – блакитним. А якщо зоря випромінює з однаковою інтенсивністю весь неперервний спектр, то її колір буде білим. Тому навіть без фотометричних вимірів, тільки за зовнішнім виглядом спектрограми зорі, як кажуть, «на око», можна оцінити її температуру.

**4. Діаграма спектр–світність.** Датський астроном Е. Герцшпрунг і дещо пізніше американський астрофізик Г. Рессел у 1905–1913 рр. виявили існування залежності між виглядом спектра (тобто температурою) і світністю зір.

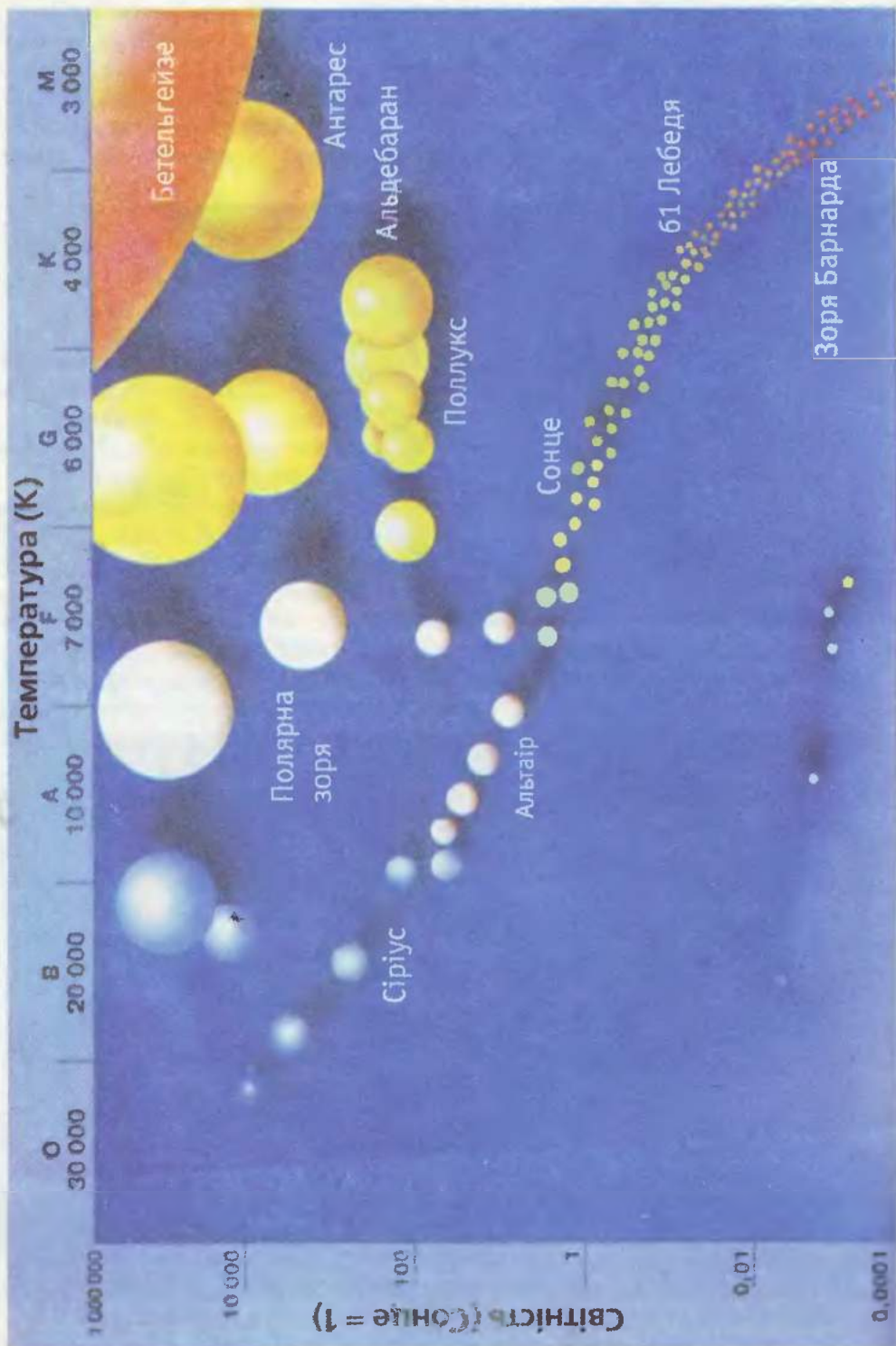
Ця залежність ілюструється графіком, по одній осі якого відкладають спектральний клас, а по другій – абсолютну зоряну величину. Такий графік названо діаграмою спектр–світність або діаграмою Герцшпрунга–Рессела (ГР) (мал. 21.2 на стор. 130). Замість абсолютної зоряної величини можна відкладати світність, а замість спектральних класів – температуру.

Як виявилось, зорі не заповнюють поле діаграми рівномірно, а утворюють на ній декілька послідовностей. Близько 90% зір із околиць





Мал. 21.1. Порівняльні розміри зір



Сонця зосереджені вздовж вузької смуги, яка перетинає поле діаграми від її лівого верхнього кута до правого нижнього. Ця смуга називається головною послідовністю.

У правому нижньому куті знаходяться зорі пізніх спектральних класів  $K, M$  з малою світністю – червоні карлики.

У лівому верхньому куті знаходяться зорі ранніх спектральних класів  $O, B$  – блакитні гіганти.

Над головною послідовністю розташовується група гігантів пізніх класів  $G-M$  з великою світністю. Їхній типовий представник – зоря  $\beta$  Близнят (*Поллукс*).

У верхньому правому куті знаходяться надгіганти. Їхній типовий представник – зоря  $\alpha$  Оріона (*Бетельгейзе*).

На 1 000 зір головної послідовності припадає один гігант, а на 1 000 гігантів – один надгігант.

Паралельно головній послідовності, але дещо нижче від неї, розташована послідовність субкарликів. Від зір головної послідовності вони відрізняються значно меншим вмістом металів.

І нарешті, в лівому нижньому куті діаграми розташовані білі карлики – група зір, світності яких у сотні разів менші від сонячної. Тут перебуває близько 10 % загальної кількості зір із околиць Сонця.

Ключ до розуміння діаграми ГР було знайдено тоді, коли з'ясувалося, що місце, яке займає зоря на головній послідовності, залежить від її маси. Середня маса зір головної послідовності (у масах Сонця) становить: класу  $M0 - 0,5M_{\odot}$ ,  $K0 - 0,8M_{\odot}$ ,  $G0 - 1,2M_{\odot}$ ,  $F0 - 1,8M_{\odot}$ ,  $A0 - 4M_{\odot}$ ,  $B0 - 14M_{\odot}$ , класу  $O5$  – близько  $35M_{\odot}$ .

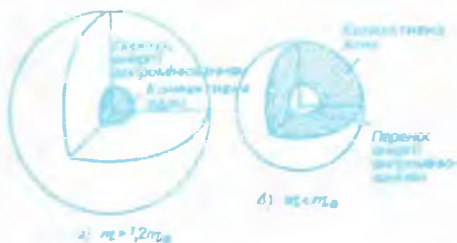
Звернімо увагу на цікаву обставину: зорі однакового спектрального класу, і отже й температури, на діаграмі ГР розташовуються в різних її точках. Є зорі класу  $M$ , які знаходяться на діаграмі високо, тобто мають великі маси, і є зорі того ж класу, але розташовані в самому низу головної послідовності, тобто мають маленькі маси. Перші з них належать до надгігантів, а другі до карликів.

Яким же чином можна відрізнити перші від других, якщо вони мають однакову температуру поверхні та схожі спектри? Належність зорі до гігантів чи карликів визначається за зовнішнім виглядом одних і тих же спектральних ліній, адже у гігантів і карликів вони дещо різняться за інтенсивністю і шириною. Порівнюючи інтенсивності ліній певних елементів, досить просто виявити, яка ця зоря – карлик чи гігант.

За допомогою діаграми ГР можна визначати відстані до зір, адже зорі однакового спектрального класу, розташовані в однакою ділянках діаграми, мають однакові світності та абсолютні зоряні величини. Якщо ми маємо спектр зорі, то з діаграми ГР дізнаємося про її світність  $L$  і абсолютну зоряну величину  $M$ . А далі, використовуючи співвідношення (3.3), обчислимо відстань до неї. Такий метод визначення відстаней називається *методом спектральних паралаксів*. Він дозволяє визначити відстані практично до всіх зір, спектри яких відомі. Оскільки можна одержати спектри дуже далеких зір, метод спектральних паралаксів виявляється дійовим для значної частини Галактики і для найяскравіших зір, які можна спостерігати в інших галактиках.

**5. Моделі зір.** Про внутрішню будову зір можна дізнатись тільки шляхом розрахунків і подальшим порівнянням їх зі спостережними даними. Якщо для будь-якої зорі відомі маса і радіус, то можна отримати уявлення про фізичні умови в її надрах тим же шляхом, як це було зроблено для Сонця. З'ясувалося, що при переміщенні вгору вздовж головної послідовності радіуси й температури в надрах зір зростають. Залежно від того змінюється й характер термоядерних реакцій у їхніх надрах.

У зорях пізніх спектральних класів *G*, *K*, *M*, як і в Сонці, виділення ядерної енергії відбувається внаслідок реакції протон-протонного циклу. В гарячих зорях ранніх спектральних класів *O*, *B*, *A* температура в надрах яких вища і становить десятки мільйонів К, головну роль у



Мал. 21.3. Моделі зір

перетворенні водню на гелій відіграє вуглецево-азотний цикл, що дає значно більше енергії. Цим і пояснюється їхня велика світність.

Таким чином, слід чекати, що зорі на різних ділянках діаграми ГР, мають різну будову, що підтверджується розрахунками (мал. 21.3).

Згідно з розрахунками у зорях верхньої частини головної послідовності внаслідок дуже інтенсивного виділення енергії випромінювання не здатне винести з надр усю енергію, яка утворилась. А тому в зорях, маса яких становить більше ніж  $1,2M_{\odot}$ , енергію переносить сама речовина, яка починає переміщуватись у центральних районах. На відміну від Сонця, де існує *променисте ядро*, в таких зорях виникає центральна *конвективна зона*, розміри якої становлять близько чверті її радіуса. Шари, що оточують центральну конвективну зону, аж до фотосфери, перебувають у стані променистої рівноваги, як це має місце на Сонці у відповідній зоні.

Зорі нижньої частини головної послідовності за своєю будовою подібні до Сонця, тобто мають променисте ядро, зону променистої рівноваги і конвективну зону. Що холодніша зоря, то протяжніша у неї конвективна зона.

Вкрай неоднорідну структуру мають червоні гіганти. З вигоранням водню в центральних зонах зорі область енерговиділення поступово зміщується на периферію. Внаслідок цього утворюється тонкий шар, де тільки і може відбуватись воднева реакція. Цей шар ділить зорю на дві істотно різні частини: внутрішню («гелієве ядро»), де реакції не відбуваються з причини відсутності водню, і зовнішню потужну конвективну зону, де водень є, але реакції не відбуваються через низьку температуру.



1. Наскільки переконливим для Вас є знаходження відстаней до об'єктів Галактики «методом типового представника»?
2. Чим пояснюються відмінності спектрів зір?
3. Як буде виглядати діаграма спектр-світність?
4. У чому суть методу спектральних паралаксів?
5. У чому полягає несхожість внутрішньої будови зір з масою  $2M_{\odot}$  і  $0,5M_{\odot}$ ?

## 22. Подвійні зорі

**1. Загальні характеристики.** Вивчаючи зоряне небо, можна помітити, що є багато зір, розташованих близько одна від одної. Насправді більшість із них рознесені в просторі на великі відстані і лише проєктуються на близькі точки небесної сфери. Такі зорі називають **оптично подвійними**.

На відміну від них фізичними подвійними або кратними називаються системи зір, які під дією сил взаємного тяжіння обертаються навколо спільного центра мас.

Кратні системи налічують від двох до десяти компонентів. За їхньої більшої кількості говорять про *зоряне скупчення*.

У Галактиці близько половини зір об'єднані в кратні системи. Якщо компоненти кратної зорі видно в телескоп нарізно, то її називають **візуальною кратною зорею**.

Компоненти подвійних зір рухаються відповідно до законів Кеплера (§ 9): обидві зорі описують у просторі подібні (тобто з однаковим ексцентриситетом) еліптичні орбіти навколо спільного центра мас. А тому визначення періоду обертання візуально-подвійних зір за відомої відстані до них дозволяє визначити їхні маси.

Іноді різниця зоряних величин компонентів така велика, що побачити близький супутник поряд з яскравою зорею дуже важко, а то й неможливо. Та все ж і в цьому випадку можна виявити подвійність. Замість рівномірного прямолінійного руху небосхилом яскравий компонент буде періодично відхилятися від прямолінійної траєкторії то в один, то в інший бік, бо по прямій рухається тільки центр маси системи. Такі відхилення будуть тим більшими, чим більша маса невидимого супутника.

У наш час відомі десятки тисяч візуально-подвійних зір.

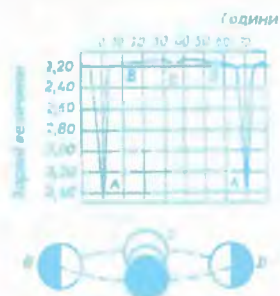
Головну зорю у кратній системі позначають літерою А, супутник – літерою В, якщо є третій компонент – літерою С тощо.

Типовою кратною зорею є  $\alpha$  Кентавра (*Таліман*), яку з території України не видно. У цій системі дві зорі спектрального класу G2 і K5 обертаються навколо спільного центра мас за 80,1 року на відстані 25 а. о., а третій компонент – холодний червоний карлик класу М – рухається навколо них на відстані 50 000 а. о. з періодом у 10 000 років. В сучасну епоху ця маленька зоря – *Проксима* – знаходиться до нас найближче (§ 3).

**2. Затемнювано-подвійні зорі.** Площини, в яких подвійні зорі обертаються навколо спільного центра мас, орієнтовані довільно відносно центра Галактики. Відомо понад 3 000 систем, для яких Земля перебуває у площині їхнього взаємного руху або недалеко від неї. У цих випадках спостерігаються періодичні затемнення одного компонента іншим. Зорі, видима величина яких ритмічно змінюється внаслідок затемнення одного компонента іншим, називаються **затемнювано-подвійними** або **затемнювано-змінними**.

Момент часу, коли система має найменшу видиму зоряну величину (найбільшу яскравість), названо епохою максимуму, а найбільшу – епохою мінімуму. Різниця зоряних величин у мінімумі та максимумі

блиску називається амплітудою, проміжок часу між двома послідовними максимумами чи мінімумами – періодом затемнювано-змінної. Зоря, що має більшу світність – головна, слабкіша – її супутник.



Мал. 22.1. Зміна блиску Алголя

Затемнювано-змінні зорі поділяють на декілька груп або типів.

Найвідоміші серед них – зорі типу Алголя ( $\beta$  Персея). Їхній представник (мал. 22.1) – зоря Алголь (з арабської – «диявольська»), яка спочатку зберігає майже незмінний блиск  $2,2^m$ , потім за 5 годин поступово слабшає до  $3,4^m$ , а згодом за такий же час збільшує свою яскравість до початкового блиску. Тривалість періоду Алголя  $T = 2$  доби 20 год 49 хв.

**3. Спектрально-подвійні зорі.** У спектрах таких зір спостерігається періодичне роздвоєння спектральних ліній відносно середнього положення. Внаслідок *ефекту Доплера–Фізо* найбільшої величини роздвоєння досягає за максимальної променевої швидкості компонентів: одного – у напрямку до спостерігача (лінії відхиляються у фіолетовий бік спектра), а іншого – від нього (лінії відхиляються у червоний бік спектра). Променева швидкість зорі – це складова її руху вздовж променя зору спостерігача. Зорі, подвійність яких можна встановити тільки за допомогою спектральних спостережень, називаються *спектрально-подвійними*.

За наявності дуже слабкого компонента у спектрі будуть спостерігатись лінії тільки головної зорі. Роздвоєння ліній не буде, але буде періодичне коливання їх відносно середнього положення. Таким методом, який називається *методом променевих швидкостей*, можна визначити наявність у системі невидимих супутників, до яких належать планети. Останніми роками, використовуючи цей метод, астрономи відкрили близько п'яти десятків планет біля зір у радіусі 200 св. р.

**4. Тісні подвійні системи.** Пари зір, відстані між якими сумірні з їхніми розмірами, називають тісними подвійними системами. При цьому істотну роль відіграють припливні взаємодії між компонентами. Під дією припливних сил поверхні обох зір перестають бути сферичними, зорі набувають еліпсоїдальної форми, утворюючи спрямовані один до одного припливні горби на зразок місячних припливів в океанах Землі. Іноді зорі у подвійній системі розташовані так тісно, що можуть навіть дотикатись між собою. За тісного розташування зір прискорення сили тяжіння на поверхні, поверненій до «сусідки», значно зменшується і може впасти на нуль. Тоді частинки газу починають належати



Мал. 22.2. Процес обміну речовиною між зорями

не окремому компоненту, а системі в цілому. Починається *процес обміну речовиною* між зорями. Якщо одна зоря розширюється, перетворюючись у червоного гіганта (§ 24), то її речовина починає вільно перетікати на другий компонент, утворюючи навколо неї широкий диск (мал. 22.2). Речовина

дису гальмується, нагрівається, починає світитись, і зрештою осідає з внутрішньої частини диска на поверхню «сусідки», збільшуючи її масу і температуру.



1. Що є критерієм для поділу зір на кратні системи і зоряні скупчення?
2. За якої умови подвійна зоря стає затемнювано-подвійною?
3. Яка природа спектрально-подвійних зір?
4. Яким методом користуються для пошуків планет біля інших зір?
5. Про які особливості тісних подвійних систем Ви знаєте?

## § 23. Фізичні змінні зорі

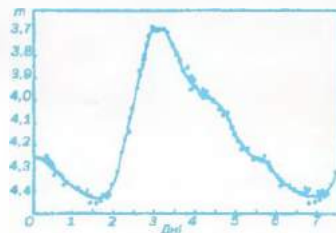
У 1596 р. німецький астроном Д. Фабриціус у сузір'ї Кита відкрив нову зорю  $2^m$ . Деякий час він слідкував за нею, а потім вона зникла. Та несподівано 1609 р. зоря з'явилась на небі знову. Так було відкрито першу змінну зорю, яка дуже сильно змінювала свій блиск: то ставала невидимою для ока, то спалахувала знову. У зоряні атласи вона потрапила під назвою *Mira* (з лат. – «дивовижна»).

Ця зоря належить до сімейства фізичних змінних зір, зміна блиску яких зумовлена процесами, що відбуваються у їхніх надрах. Зараз достовірно виявлено кілька десятків тисяч фізичних змінних зір у нашій Галактиці й десятки тисяч в інших галактиках. Їхня кількість постійно зростає завдяки спостереженням з телескопами, винесеними в космос.

Фізичні змінні зорі поділяють на дві основні групи: *пульсуючі* та *спалахуючі* змінні зорі. Окремим випадком спалахуючих змінних зір є *нові* та *наднові* зорі.

**1. Пульсуючі змінні зорі.** Найвідомішими серед пульсуючих змінних зір є цефеїди, які отримали назву від однієї з найтипівіших їхніх представниць – зорі  $\delta$  Цефея. Її змінність було відкрито ще 1784 р. англійським астрономом Дж. Гудрайком.

Класичні або довгоперіодичні цефеїди відзначаються ритмічними, з точністю доброго годинникового механізму, коливаннями блиску з амплітудою  $0,5-2^m$ . Їхні періоди, як правило, лежать у межах від однієї до 70 діб (мал. 23.1). Поза межами нашої Галактики відомі цефеїди з періодом до 218 діб. Період – одна з найважливіших характеристик цефеїд. Для кожної зорі він постійний з великим ступенем точності.



Мал. 23.1. Зміна блиску цефеїди

Ще 1908 р. було відкрито залежність між світністю (а отже, і абсолютною зоряною величиною) та періодом цефеїд. Таким чином, якщо відомо період цефеїди  $P$ , то за його величиною можна дізнатися про її світність  $L$  і абсолютну зоряну величину  $M$ . Ця залежність дала можливість легко обчислювати відстань до будь-якої цефеїди, якщо визначено її середній блиск і період.

Цефеїди належать до гігантів і надгігантів класів *F* і *G* з великими світностями. Ця обставина дозволяє спостерігати їх з величезних відстаней, зокрема й далеко за межами нашої Галактики. А оскільки розміри галактик невеликі порівняно з відстанями до них, то за допомогою цефеїд визначаються відстані до всіх галактик, де можна знайти подібні зорі, і тому цефеїди називають «маяками Всесвіту».

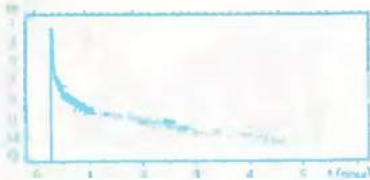
Окрім класичних довгоперіодичних, існує також клас короткоперіодичних цефеїд, типова представниця яких – зоря *RR Ліри*. Їхні періоди становлять від 80 хв до однієї доби.

Є ще довгоперіодичні змінні з періодом від 70 до 1400 діб і амплітудою 3–10<sup>m</sup>. Це – червоні надгіганти класу *M*. Можна провести спостереження за найвідомішим представником цієї групи – зорею *Міра* (о Кита). Її блиск у середньому за кожні 332 доби змінюється від 2<sup>m</sup> до 10<sup>m</sup>. А це означає, що в максимумі блиску зоря випромінює у сотні тисяч разів більше енергії, ніж у мінімумі.

Як пояснити пульсації цих зір? Те, що цефеїди є пульсуючими зорями, встановив американський астроном Х. Шеплі 1914 р. Певні здогади щодо причини пульсації – розширення і стискування зорі – висловив 1917 р. англієць А. Еддінгтон, вказавши два можливі джерела поповнення їхньої енергії: періодичне посилення інтенсивності ядерних реакцій у надрах зорі або ж зміна здатності зовнішніх шарів пропускати потік енергії, що виходить на поверхню.

Зараз відомо, що цефеїди – це зорі, протяжні оболонки яких здатні нагромаджувати енергію, що йде з глибин, а потім віддавати її. Зоря періодично стискається, розігріваючись, і розширюється, охолоджуючись. Тому енергія то поглинається зоряним газом, то знову виділяється. Внаслідок цього світність цефеїди змінюється в кілька разів з періодом у кілька діб. Аналіз показав, що пульсувати можуть лише зорі-гіганти і надгіганти, у яких є протяжні, розріджені оболонки.

**2. Нові зорі.** Зорі, блиск яких раптово зростає в тисячі й навіть мільйони разів (у середньому на 12<sup>m</sup>), називаються новими зорями. При цьому виділяється енергія, яку Сонце випромінює за 100 000 років. Початковий період спалаху нової до досягнення максимуму блиску триває кілька діб, після чого він повільно, впродовж років чи десятків років зменшується до початкового значення (мал. 23.2). Згодом на місці нової залишається карликова зоря з оболонкою, яка розширюється зі швидкістю



Мал. 23.2. Зміна блиску нової зорі

понад 1000 км/с. Це свідчить про відригання від нової зорі її зовнішніх шарів.

До середини 50-х років ХХ ст. природу спалахів нових зір залишалась невідомою. Та от 1954 р. було виявлено, що відома нова зоря *DQ Геркулеса* входить до складу тісної подвійної системи з періодом обертання у кілька годин. Пізніше з'ясувалося, що всі нові зорі – це компоненти таких подвійних систем, у яких одна зоря, як правило, зоря головної послідовності типу Сонця і пізніших спектральних класів, а друга – у сто раз менший від Сонця білий карлик.



Виникнення спалахів нових зір пов'язане з особливостями обміну речовиною в тісних подвійних системах.

Як вже було сказано (§ 22), коли одна із зір у тісній подвійній системі значно збільшує свої розміри (розширюється), її речовина починає вільно перетікати на другий компонент, утворюючи навколо неї так званий акреційний диск. Газ із внутрішньої частини диска осідає на поверхню компактної «сусідки» у щораз більшій кількості, збільшуючи її масу і температуру. У підсумку за характерний час від кількох до сотень років, температура й щільність її поверхневого шару збільшується до таких великих значень, що зіткнення швидких протонів розпочинають термоядерну реакцію синтезу гелію.

Але на відміну від Сонця та інших зір, де ці реакції досить повільно відбуваються у центральних зонах, на поверхні білого карлика через високу щільність речовини вони перебігають надзвичайно стрімко. При цьому виділяється величезна кількість енергії, що й спостерігається як вибух нової зорі зі швидким розширенням скинутої оболонки у навколишній простір. Після спалаху перетікання газу на білий карлик починається знову, і через деякий час ( $\sim 10^3$  років) спалах повторюється. Таким чином, у тісній подвійній системі спалахи нової повторюються багато разів.

За підрахунками щороку в Галактиці спалахує близько 200 нових, однак, виявляють тільки дві-три з них. Дотепер зареєстровано близько 180 спалахів нових у нашій Галактиці та близько 250 – у галактиці Андромеди.

Окрім нових, відомі також повторні нові зорі, спалахи яких мають меншу потужність і повторюються через кілька десятків років. Вони також є подвійними системами.

**3. Наднові зорі.** Спалах наднової зорі (позначається SN) – явище незрівнянно більшого масштабу, ніж спалах нової. Адже її блиск під час спалаху збільшується на десятки зоряних величин упродовж кількох діб. Поява наднової в іншій галактиці демонструє всю грандіозність цього явища, адже її блиск у максимумі стає порівняним з яскравістю всієї зоряної системи, де вона спалахнула, а то й перевершує її (мал. 23.3). Так, наднова 1885 р. у галактиці M31 лише в 4 рази поступалася світловим потоком материнської галактиці. А наднова у галактиці NGC5253 приблизно у 13 разів перевершувала загальну її світність. Назву для таких зір – «наднова» – запропонували американські астрономи Ф. Цвіккі та У. Бааде (1934 р.).



Мал.23.3. Наднова в далекій галактиці

У максимумі блиску світність наднових перевищує сонячну у мільярди разів. Загальна кількість енергії, яку зоря висвічує під час спалаху, порядку  $\sim 10^{44}$  Дж.

Під час вибуху наднова скидає свою оболонку, яка далі розширюється зі швидкістю від 5 000 до 20 000 км/с і через деякий час спостерігається у вигляді туманності специфічної форми.

Найвиразнішою серед них є знаменита *Крабоподібна туманність* (мал. 25.7) у сузір'ї Тельця. Вона розширюється зі швидкістю біля

1 200 км/с і є одним із найпотужніших джерел радіовипромінювання у нашій Галактиці. Сучасні розміри туманності такі, що її розширення могло розпочатись не раніше як 900 років тому, тобто якраз тоді, коли спалахнула Наднова 1054 р., явище якої зафіксовано в китайських хроніках.

У нашій Галактиці за останні 1000 років достовірно спостерігались три наднові зорі: 1054 р. – в Тельці, 1572 р. – в Кассіопеї, 1604 р. – в Змієносі. Можливо також, що надновою була зоря 1006 р. в сузір'ї Вовка. Загалом у Галактиці виявлено (в основному радіоастрономічними методами) понад 100 залишків спалахів наднових.

В наш час відбувається інтенсивне відкриття наднових в інших галактиках (велику роль у цьому відіграють аматорські спостереження). У видимій частині нашої Галактики явище наднової трапляється один раз на 200–300 років. Про природу наднових зір йтиметься у § 24.

**4. Пульсари.** Влітку 1967 р. за допомогою радіотелескопа у Кембриджі (Великобританія) було відкрито пульсуючі джерела радіовипромінювання або просто пульсари (мал. 23.4). Періоди їхніх пульсацій становили трохи більше однієї секунди, а дослідження змінності випромінювання вказували на дуже малий об'єм випромінюючих областей розмірами в кілька десятків кілометрів. Подальше вивчення розподілу пульсарів на небесній сфері показало, що вони найчастіше зустрічаються поблизу площини Молочного Шляху, а отже, є членами нашої Галактики. Коли ж було відкрито досить багато пульсарів, виявилось, що деякі з них спостерігаються в залишках спалахів наднових зір.

Найвідоміший пульсар з періодом 0,033 с знаходиться в Крабоподібній туманності. У січні 1969 р. це джерело радіовипромінювання було ототожене зі слабкою зорею  $16^m$ , яка змінює свій блиск із тим же періодом. З таким же періодом від цього джерела йдуть рентгенівські та гамма-імпульси.

У 1977 р. із зорею було ототожене ще один пульсар – залишок наднової в сузір'ї Вітрила. Він також був джерелом рентгенівського і гамма-випромінювання. Це навело на думку про спорідненість пульсарів зі спалахами наднових.

На початок 2000 р. було відомо понад 700 пульсарів. Переважно їхні періоди  $T$  близькі до 0,75 с. Від більшості з них ніякого іншого випромінювання, крім радіоімпульсів, не надходить.

Згідно з сучасними теоріями, пульсари – це об'єкти, які виникають на заключних етапах еволюції зір (див. § 24).



Мал. 23.4. Схема пульсара



1. Чому пульсуючі змінні цефеїди отримали назву "маяків Всесвіту"?
2. Завдяки яким процесам підтримуються пульсації цефеїд і споріднених з ними змінних зір?
3. Поясніть механізм спалахів нових зір.
4. У чому полягає явище наднової?
5. Що таке пульсар?

## § 24. Еволюція зір. Нейтронні зорі. Чорні діри

**1. Стадія протозорі та головної послідовності.** Як показують дослідження, в міжзоряному середовищі є протяжні газово-пилкові комплекси з масами в тисячі й десятки тисяч мас Сонця, розмірами 10–100 пк (30–300 св.р.) і температурою кілька десятків кельвінів. Такі комплекси гравітаційно нестійкі і з часом дробляться на окремі фрагменти. Саме з таких фрагментів внаслідок гравітаційного стиснення утворюються протозорі (мал. 24.1).

На початку процесу формування протозорі пилкові частинки і газові молекули падають до центра хмари, потенціальна енергія гравітації переходить у кінетичну, а кінетична, внаслідок зіткнень частинок, – у теплову. Таким чином, значна частина гравітаційної енергії стискання витрачається (§ 19) на нагрівання речовини. Газ і пилинки швидко трансформують цю енергію в інфрачервоне випромінювання, яке вільно залишає газово-пилковий комплекс. Тому протозорі є потужними джерелами інфрачервоного випромінювання.

В процесі формування ядра зі значно більшою густиною, ніж у навколишній хмарі, протозоря стає непрозорою для власного інфрачервоного випромінювання, і температура її надр починає стрімко зростати. Енергія від центральних до зовнішніх зон переноситься шляхом конвекції.

Коли температура ядра досягає кількох мільйонів кельвінів, включаються перші термоядерні реакції «вигорання» літію, берилію, бору. Але газового тиску, який існує при таких температурах, недостатньо для припинення стискання.

І тільки через кілька сотень тисяч років для майбутніх масивних зір і через сотні мільйонів років для майбутніх карликових зір, коли температура в центрі в процесі подальшого стискання досягає приблизно 10 млн К, починаються термоядерні реакції перетворення водню на гелій з виділенням величезної кількості енергії. Відтепер сила газового тиску, що підтримується високою температурою, зрівноважує сили гравітації, і стискання припиняється. Протозоря досягає стану гравітаційної рівноваги і перетворюється на молоду зорю, яка відповідно до своєї маси і світності займає певне місце на головній послідовності діаграми спектр-світність.

Що більша маса новонародженої зорі, то вища температура в її надрах (а отже, і на поверхні), більша її світність і тим вище вона розташовується на головній послідовності. Зоря перебуває на ній доти, доки весь водень у центральних її частинах не перетвориться на гелій і не ут-



Мал. 24.1. Протозоря, що формується у газово-пилковій хмарі

вориться гелієве ядро. Для Сонця цей процес триває 10 млрд років, а для зорі масою  $M$

$$t = \frac{10^{10}}{M^3} \text{ років.} \quad (24.1)$$

Наприклад, для блакитного гіганта з масою в 17 разів більшою за сонячну і температурою на поверхні 28 000 К час перебування на головній послідовності дорівнює 8 млн років, а для червоного карлика з масою 0,5 сонячної і температурою поверхні 3 000 К – 80 млрд років.

Таким чином, на головній послідовності зоря проводить основну частину свого «життя», строк якого визначається її початковою масою. Масивна блакитна зоря з великими запасами водневого палива живе набагато менше часу, ніж маленький червоний карлик з його мізерними запасами. Адже інтенсивність термоядерних реакцій у надрах масивної зорі набагато вища, ніж у холодного червоного карлика.

**2. Відхід зорі від головної послідовності.** Як уже відомо (§ 21), після вигорання водню в центрі зорі навколо гелієвого ядра утворюється тонкий сферичний енерговиділяючий шар. Він поділяє зорю на дві зони – вигоріле ядро і зовнішню оболонку. Фізичні процеси у двох зонах зорі розгортаються по-різному.

У міру вичерпання водню цей прошарок щораз далі відсувається від центральної зони, збільшуючи розміри і масу ядра.

**Червоні гіганти.** В дуже товстій оболонці зорі енергія шляхом конвекції переноситься до поверхневих шарів. Потужні конвективні течії виносять в атмосферу продукти згорання (зокрема вуглець та інші), які, переходячи в молекулярний стан, інтенсивно поглинають випромінювання з глибин, через що атмосфера стає непрозорою. Під дією значного тиску випромінювання зсередини оболонка починає розбухати, досягаючи сотень і навіть тисяч радіусів Сонця завтовшки. Для зорі з масою Сонця такий процес починається, коли маса гелієвого ядра досягає  $0,4M_{\odot}$ .

Через велетенські розміри поверхні температура зорі поступово знижується, і вона, пересуваючись праворуч упоперек головної послідовності, поступово зміщується у правий верхній кут діаграми спектр-світність. При цьому зорі-гіганти класу  $B4-O$  з масою понад  $10M_{\odot}$  перетворюються у надгігантів, зорі класів  $A5-B5$  з масою  $2,5-10M_{\odot}$  стають гігантами, а зорі пізніших спектральних класів і меншої маси (наприклад, Сонце) стають субгігантами.

Та врешті-решт шар енерговиділення відсувається так далеко від ядра, що через низьку температуру водневі реакції значно зменшують свою інтенсивність. Тепер температура і тиск у ядрі не можуть підтримуватись на рівні, необхідному для протидії силі гравітації, воно починає стискатись, а температура в ньому за рахунок енергії гравітаційного стиснення зростає. У центрі утворюється дуже щільна гаряча область із гелію з невеликими домішками важчих елементів. Подальший розвиток подій залежить від початкової маси зорі.

Маломасивні зорі (з масою  $< 1,4M_{\odot}$ ), як наше Сонце і менші за нього, утворюють вуглецево-кисневе ядро, яке знаходиться всередині червоного гіганта. Протяжна оболонка гіганта гравітаційно дуже слабко пов'язана з ядром. Під дією тиску випромінювання зсередини вона або поступово стікає у простір, або через 10–20 тис. років відділяється від ядра у вигляді *планетарної туманності*, розширюючись зі швидкістю до 20 км/с. Гаряче гелійове ядро, що залишилося, стає білим карликом – компактним об'єктом із розмірами, які залежно від маси можуть бути навіть меншими від розмірів Землі в десятки разів. Його речовина перебуває в особливому стані, що має назву *виродженого газу* і має цілу низку цікавих властивостей, однією з яких є незалежність тиску від температури. Тиск залишиться високим, навіть якщо температура речовини впаде до абсолютного нуля. Білий карлик перебуває у стані гравітаційної рівноваги, оскільки тиск виродженого газу зрівноважує сили гравітації. Густина речовини білих карликів може становити від  $1 \text{ кг/см}^3$  до  $100 \text{ т/см}^3$ . На діаграмі спектр–світність білі карлики займають лівий нижній кут, де розміщені зорі дуже малої світності та з високою температурою на поверхні.

Таким чином, діаграма спектр–світність набуває глибокого фізичного змісту, бо, демонструючи залежність зоряних характеристик (температура на поверхні та в ядрі, світність, час життя) від початкової маси зорі, дає можливість прослідкувати весь її життєвий шлях від «народження» до «смерті».

По-іншому проходить заключний етап еволюції масивних зір. В залежності від кінцевої маси ядра, яке утворюється після вичерпання всіх можливих видів термоядерного палива, вони можуть закінчити свій життєвий шлях або у вигляді нейтронної зорі, або спалахом наднової зорі, або у вигляді чорної діри.

*Розглянемо коротко кожний із варіантів.*

**Нейтронні зорі.** Як показали теоретичні розрахунки, ядро з масою, більшою ніж  $1,4M_{\odot}$ , але меншою ніж  $2M_{\odot}$ , не може зупинитись на стадії білого карлика. Як тільки у зорі утворилось ядро, що досягло таких меж, тиск газу не може забезпечити протидію силам гравітації і, проминувши стадію білого карлика, ядро продовжує стрімко стискатися практично зі швидкістю вільного падіння. Такий процес називається гравітаційним колапсом.

Розрахунки показують, що для зорі, удвічі масивнішої за Сонце, через деякий час гравітаційний колапс дещо сповільнюється і починається утворення *гарячої нейтронної зорі* – наявні електрони об'єднуються з протонами, утворюючи нейтрони. При досягненні температури  $T = 10^{12} \text{ К}$  і густини  $1 \text{ млрд т/см}^3$  гравітаційний колапс узагалі припиняється, бо сили гравітації зрівноважуються силою тиску нейтронного газу, і вся велетенська маса зорі зосереджується в невеликому об'ємі діаметром близько 10 кілометрів. З охолодженням і перетворенням на *холодну нейтронну зорю* на її поверхні утворюється надзвичайно тверда і міцна *кора* приблизно кілометрової товщини. Вона має кристалічну структуру, складену в основному з ядер заліза, і в мільйон мільярдів разів міцніша за сталь. Під корою нейтрони утворюють рідину, яка без жодного опору може текти

вічно. Зауважимо, що в процесі катастрофічного стиснення зоряного ядра разом зі збільшенням густини і зменшенням радіуса, згідно з законом збереження моменту кількості руху, збільшується швидкість його обертання. При колапсі від розмірів у тисячу кілометрів до десяти кілометрів період обертання зменшується до сотих і навіть тисячних часток секунди, а також дуже сильно ущільнюється магнітне поле. На поверхні нейтронної зорі, де ще є вільні електрони, потужне магнітне поле розганяє їх до швидкостей, близьких до швидкості світла, і викидає у навколишній простір. При цьому електрони випромінюють у напрямку свого руху, утворюючи два вузьких пучки електромагнітних хвиль різних діапазонів.

Як правило, магнітні полюси не збігаються з полюсами обертання, і пучки обертаються навколо осі з періодом, що дорівнює періоду обертання зорі. Якщо конуси випромінювання, описуючи кола у просторі, пробігають по земній поверхні, ми спостерігаємо їх як пульсуюче радіо-, оптичне, рентгенівське або гамма-випромінювання. Так пояснюється явище пульсарів. Отже, назва «пульсари» не зовсім точна, адже ці об'єкти не пульсують, а обертаються.

**Спалахи наднових.** Не всі масивні зорі з наведеними раніше масами ядер перетворюються на нейтронні зорі. За розрахунками, при критичній масі ядра, близькій до значення  $1,44M_{\odot}$ , в момент припинення гравітаційного колапсу може утворитись дуже стиснене ядро і порівняно мало стиснена оболонка. Якщо припинення гравітаційного колапсу відбулося досить різко (наприклад, через різке збільшення відцентрової сили, здатної зрівноважити силу гравітації), зовнішні шари, продовжуючи падати до центра, наштовхуються на щільне ядро, різко гальмуються, і вся кінетична енергія падіння перетворюється на тепло. Температура на поверхні ядра різко зростає до значень 7–8 млрд К, виникає надпотужна ударна хвиля, яка «відскакує» від поверхні ядра і рухається тепер у зворотному напрямку – від центральних зон до периферії. Така хвиля розігріває речовину оболонки до значень, за яких у ній починаються термоядерні реакції з утворенням усіх елементів таблиці Менделєєва. Ланцюгова реакція може охопити і все ядро. При цьому практично миттєво виділяється величезна кількість енергії, тобто відбувається колосальної потужності вибух, під час якого здирається більша частина зовнішніх шарів зорі, речовина з величезною швидкістю (до 10–20 тис. км/с) викидається у простір, а із залишків формується нейтронна зоря.

Через збільшення випромінюючої поверхні блиск зорі збільшується у сотні мільйонів і навіть мільярди разів, внаслідок чого ми спостерігаємо її як спалах надгової. Після розширення і охолодження викинутої речовини видимий блиск надгової спадає. А потім ще сотні, а то й тисячі років на місці вибуху спостерігається волокниста туманність. Саме таке ми спостерігаємо у вже згадуваній Крабоподібній туманності – волокна, які стрімко продовжують розлітатись у всі боки від крихітної нейтронної зорі-пульсара розміром близько 10 км.

Проте найдивовижнішим виявляється кінцевий шлях масивних зір з масами ядер, що удвічі більші за масу Сонця.

**Чорні діри.** Можливість існування *чорних дір* випливає з теорії – для кожного тіла з масою  $M$  існує таке граничне значення радіуса  $R_d$ , так званого гравітаційного радіуса,

$$R_d = \frac{2GM}{c^2}, \quad (24.2)$$

де  $c$  – швидкість світла, за якого гравітаційне поле на поверхні стає таким великим, що друга космічна швидкість дорівнює швидкості світла. Це означає, що навіть електромагнітні хвилі не здатні покинути таке тіло, і воно стає невидимим для спостерігача, перетворюючись на чорну діру.

При виведенні цієї формули скористаємось міркуваннями про другу космічну швидкість, коли одне тіло покидає поверхню іншого тіла. Для цього порівнюємо кінетичну енергію  $E_k$  тіла  $M$ , кинутого вгору з початковою швидкістю  $v$ , а саме:

$$E_k = \frac{Mv^2}{2},$$

з його потенціальною енергією  $E_n$ :

$$E_n = \frac{G m_1 M}{R},$$

де  $m_1$  і  $R$  – маса і радіус «силового центру» (Землі чи будь-якого небесного тіла). Отримуємо

$$v^2 = \frac{2 m_1 G}{R}.$$

Поклавши  $v = c$ , маємо формулу (24.2).

Для Сонця гравітаційний радіус дорівнює 2,95 км, для Землі – 0,886 см. Сфера, яка описується гравітаційним радіусом, називається сферою Шварцшильда (1873–1916) або горизонтом подій.

Виявляється, що на заключних етапах життя зорі за маси ядра понад  $2M_\odot$  гравітаційний колапс може тривати необмежено. За такого колапсу навіть тиск нейтронного газу не здатний зупинити невпинне стискання, зоря може досягти свого гравітаційного радіуса  $R_d \leq 10$  км і перетворитись на такий дивовижний об'єкт, як чорна діра.

Поблизу чорних дір спостерігаються незвичайні фізичні процеси. Величезна сила тяжіння змінює геометрію простору і часу. Простір наче прогинається, як прогинається пружна плівка під важкою кулею, і прямі лінії перестають бути прямими. Це проявляється у викривленні світлових променів, які проходять повз чорну діру. Ми звикли вважати промінь світла еталоном прямої, і ось цей еталон, підкоряючись величезному тяжінню, вигинається навколо чорної діри, а отже, прямою лінією тут буде та, яка точно слідує за ходом променя. Зрозуміло, що геометрія такого простору буде відрізнитись від евклідової. Наприклад, через викривлення простору промінь світла, обійшовши чорну діру, може повернутись назад, і спостерігач без жодного дзеркала побачить предмети за своєю спиною.

Ближче до чорної діри промені закручуються вздовж спіралі, й світло наче засмоктується у гравітаційне провалля, з якого немає виходу.

Окрім зміни траєкторій руху тіл та світлових променів, змінюється сам ритм світлових коливань та інших процесів. Уявімо собі фантастичний зореліт, який, летючи до чорної діри, щосекунди посилає на Землю сигнал. З наближенням до мети ми помітимо, що сигнали починають приходити із все більшим запізненням, неначе передавач працює дедалі повільніше. І ось вже між сигналами замість секундного інтервалу ми наємо тижні, місяці, роки, тисячі й мільйони років. Виявляється, сам час сповільнює свою течію біля чорної діри, а на її межі він зупиняється взагалі, втім, як і світло. Це означає, що ми ніколи не сприймемо від зорельота останнього сигналу, який він пошле перед тим, як потрапить у чорну діру, як ніколи не побачимо самої цієї події.

Як побачити те, чого бачити не можна, що нічого не випромінює, а тільки поглинає? Виявити такий об'єкт можна за побічними ознаками. Якщо він є компонентом подвійної системи, то за відхиленням видимого компонента від прямолінійного руху, а за наявності його спектра – за коливаннями спектральних ліній відносно середнього положення можна визначити масу чорної діри і період обертання. А якщо речовина видимої зорі ще й перетікає на чорну діру, утворюючи акреційний диск, і газ перед падінням генерує потужне рентгенівське випромінювання, то можна зареєструвати і його. Такі рентгенівські джерела випромінювання вже зареєстровані на космічних обсерваторіях – наприклад, джерело *Лебідь X-1*.

Але повернемося до нашого гіпотетичного зорельота. Його аж ніяк не стосується той факт, що для спостерігача його падіння у чорну діру ніколи не відбудеться. Сам він, підкоряючись колосальній силі тяжіння, неминуче і з наростаючою швидкістю перетне горизонт подій. За його годинником мине не вічність, а коротесенька мить. І якщо для зовнішнього спостерігача події поблизу чорної діри завмирають, то для того, хто падає, навпаки, все, що відбувається в навколишньому світі, стрімко прискорює свою ходу. І перш ніж потрапити у чорну діру, він побачить весь подальший перебіг подій у Всесвіті.

### 3.\* «Зоряний попіл для нас» (Утворення хімічних елементів).

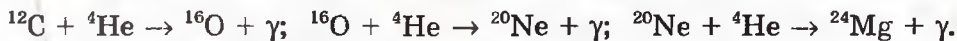
Уважно вивчивши хімічний склад живої речовини, звернімо увагу на те, що, окрім чотирьох основних хімічних елементів – водню, вуглецю, кисню та азоту, що становлять 95% складу живої речовини і споріднюють її з зоряними світами, є ще кальцій, фосфор, хлор, сірка, натрій, йод, залізо, а також мікроелементи: марганець, молібден, кремній, фтор, цинк та мідь, тобто елементи, значно менш поширені у Всесвіті, ніж перші чотири.

Але без них було б неможливим існування тих форм життя, які ми бачимо на Землі, як і самої планети Земля. Як утворилися ці та важчі хімічні елементи?

Ми вже знаємо, що на перших стадіях еволюції у зорях в основному триває процес перетворення водню на гелій за схемою  $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He}$ . Після того як водень у надрах зорі вигорає, і вона покидає головну послідовність, сформувавши гелієве ядро з температурою  $\sim 150$  млн К, наступною стадією в утворенні елементів є так званий *потрійний  $\alpha$ -процес*.



коли три ядра гелію, об'єднуючись, утворюють ядро вуглецю за схемою  $3\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{12}\text{C}$ . Далі, за умови, що температура ще зростає, шляхом захоплення  $^4\text{He}$  можливі реакції з утворенням кисню, неону і магнію:



До речі, реакції з утворенням названих елементів можуть відбуватись і в дуже масивних (з масою понад  $30M_{\odot}$ ) зорях головної послідовності, але досить повільно, і ядер утворюється зовсім мало. Далі можливі ядерні перетворення з утворенням  $^{32}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ .

Слід зазначити, що синтез кожного наступного важчого ядра за участю гелію вимагає дедалі більших енергій, тобто щораз вищих температур, оскільки зі збільшенням порядкового номера елемента зростають сили електричного відштовхування та енергетичний бар'єр, що його мусить подолати позитивно заряджена частинка, наближаючись до позитивно зарядженого ядра. А тому такі реакції можливі тільки у ядрах масивних зір, де виникають умови для створення потрібних тисків і температур. Усі ці реакції супроводжуються подальшим і остаточним вичерпанням гелію.

Водночас у ядрі зорі формуються потужні потоки нейтрино і, зауважимо, такі реакції відбуваються з виділенням тепла, але вони закінчуються на утворенні ядер заліза  $^{56}\text{Fe}$ . Адже для того, щоб із цього ядра утворилося ще важче ядро, треба затратити більше енергії, ніж її виділиться в процесі реакції. Щоб процес утворення елементів тривав і далі, до ядра зорі треба підводити тепло, а не відводити його.

Тому у всіх зорях як завгодно великої маси, доки вони перебувають на головній послідовності, утворення важчих хімічних елементів, ніж залізо, неможливе.

Для синтезу всіх інших елементів таблиці Менделєєва необхідні нейтрино і протони. Теоретичний розгляд таких реакцій виходить далеко за межі нашого підручника. А тому спробуймо зрозуміти хід подій, уявивши собі таку картину.

Нехай ми маємо зорю з масою більше  $8M_{\odot}$ , у ядрі якої вигоріло все термоядерне паливо і утворилися всі можливі елементи аж до заліза. Температура і тиск усередині падають, починається гравітаційний колапс, який ущільнює речовину, і температура починає зростати. За досягнення нею значень 7–8 млрд К ядра заліза починають розпадатись, і з кожного ядра заліза утворюється 13 ядер  $^4\text{He}$  і 4 нейтрони. Ця реакція забирає значну кількість енергії гравітаційного стиснення, і за умов, коли стиснення триває далі, різко збільшуючи густину, температура все ж зростає набагато повільніше.

У той же час в ядрі йде утворення нейтрино і антинейтрино, які, маючи величезну проникну здатність, інтенсивно відводять тепло. Температура і тиск внаслідок цього зменшуються, тому розпочинається гравітаційний колапс — різке зменшення розмірів зорі. Невдовзі, однак, ядро перестає бути прозорим. Коли температура ядра все ж досягає 40 млрд К, а густина  $100\ 000\ \text{т/см}^3$ , виникає нова ситуація: ядро зорі перестає бути прозорим для нейтрино, і вони починають поглинатись нейтронами і протонами, тим самим різко

підвищуючи температуру ядра. Стиснення сповільнюється, і за густини  $10 \text{ млн т/см}^3$  припиняється зовсім, а температура вже перевищує 100 млрд К! Важливу роль у припиненні стиснення відіграє і відцентрова сила, яка стрімко збільшується зі зменшенням розмірів ядра. У той же час оболонка, яка падає зверху, різко гальмується, розігрівається, і хімічні елементи миттєво вступають в реакції з утворенням усього спектра елементів таблиці Менделєєва. Величезна енергія, що при цьому виділяється, спостерігається як спалах наднової. А утворені важкі елементи разом зі скинутою речовиною зорі потрапляють у міжзоряний простір.

Таким чином, тільки через вибухи наднових міжзоряне середовище збагачується прихованими раніше у надрах зір важкими елементами. Проникаючи у хмари газу та пилу, вони входять потім до складу зір другого покоління, які утворюються із вторинної речовини Всесвіту, а разом з тим і до складу планет. Мабуть, саме такий спалах наднової відбувся колись в околицях того газопопилового комплексу, із якого згодом утворилися Сонце – зоря другого покоління – і Сонячна система. Значення вибухів наднових для розвитку життя важко переоцінити. Отже, те, що ми створені з попелу давно згаслих зір – не просто красива фраза. Вона дуже точно відображає події, що відбуваються у Всесвіті.



1. До якого спектрального класу належить Сонце? 2. У чому полягають відмінності між новими і надновими зорями? 3. Що спостерігають на місці спалаху наднової зорі? 4. З яких теоретичних міркувань випливає існування чорних дір? 5.\* Поясніть зміст фрази «Зоряний попіл для нас».

## Вивчивши тему V «ЗОРІ. ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР»

### необхідно знати :

- Світ зір дуже різноманітний, їх розрізняють за масою, температурою, хімічним складом тощо.
- Діаграма спектр-світність – це наочне відображення залежності зоряних характеристик і еволюційного шляху зорі від її маси.
- Зорі часто утворюють подвійні та кратні системи.
- У Всесвіті існують зорі, які періодично змінюють свої фізичні параметри.
- За сучасними уявленнями зорі утворюються із газопопилових хмар.
- Білі карлики, нейтронні зорі, чорні діри – це заключні стадії еволюції зір різної маси.
- Існування чорних дір передбачається теорією і підтверджується непрямыми методами спостережень.
- Внаслідок спалахів наднових зір утворюються важливі для розвитку життя на Землі хімічні елементи.



## VI. НАША ГАЛАКТИКА

Перші дослідження нашої Галактики як зоряної системи розпочав В. Гершель. Російський учений В. Струве (1793–1864) писав: «Явище Молочного Шляху настільки загадкове з першого погляду, що ми повинні майже відмовитись від бажання його пояснити. Проте вчений ніколи не повинен відступати ні перед темрявою явища, ні перед труднощами дослідження». Однією з причин такого песимізму було те, що ми перебуваємо всередині цієї велетенської зоряної системи. Її краї недосяжні для вивчення або з огляду на замалу потужність засобів досліджень, або ж тому, що у вирішальних напрямках далекі зорі екрануються густими комплексами газопопилових хмар. Тому задачу астронома порівнюють із зусиллям людини, яка повинна описати будову великого невідомого міста, опинившись на перехресті двох вулиць у його центрі.

Справжнє відкриття Галактики як фізичного об'єкта відбулося 1924 р., коли Е. Габбл довів, що вона – лише один із багатьох подібних до неї зоряних світів. Збагачення уявлень про Галактику розпочалося з 60-х років ХХ ст. після створення потужних наземних і космічних телескопів.

## § 25. Молочний Шлях.

### Зоряні скупчення та асоціації. Туманності

**1. Молочний Шлях.** Молочний Шлях – це відносно яскрава сріблясто-біла смуга на зоряному небі (мал. 25.1), яку давні греки назвали «галактикос» (від грец. «гала» – «молоко»). У північній півкулі неба Молочний Шлях проходить через сузір'я Близнят,



Мал. 25.1. Молочний Шлях

Тельця, Візничого, Кассіопеї, Цефея, Лебедя. У цьому сузір'ї він роздвоюється і двома смугами проходить через сузір'я Орла, а далі, в південній півкулі неба, Щита, Стрільця, Змієносця і Скорпіона. Описавши дугу на відстані 25° від Південного полюсу світу,

в Україні він з'являється над горизонтом у сузір'ї Великого Пса і Одінога, переходячи в північну півкулю неба через сузір'я Орiona.

Кільце Молочного Шляху утворюють найближчі до нас зорі Галактики, яка як зоряна система має вигляд диска чи двоопуклої лінзи. Для перших її дослідників це кільце створювало враження, нібито Сонце перебуває у центрі Галактики. Як побачимо далі, це зовсім не так.

При обговоренні будови Галактики ще В. Гершель через середину Молочного Шляху провів уявну площину, згодом названу *галактичною*. Підраховуючи кількість зір, що їх видно в телескоп у кожній із 1083 невеличких, але однакових ділянок неба, розташованих на різних



Мал. 25.2. Розсіяне зоряне скупчення Плеяди



Мал. 25.3. Кулясте зоряне скупчення

кутових відстанях від згаданої площини, Гершель побудував першу модель Галактики. У цій моделі Галактика мала вигляд диска діаметром 5 800 і товщиною 1 100 св.р. Тепер можна сказати, що він применшив розміри Галактики в 17 разів, бо не врахував поглинання світла зір міжзоряним газом, про яке тоді було невідомо.

**2. Зоряні скупчення та асоціації.** Деяка частина зір Галактики об'єднана в *скупчення*, тобто в групи, які пов'язані між собою взаємним тяжінням і тому рухаються в просторі як єдине ціле. Розрізняють два види зоряних скупчень: *розсіяні та кулясті*.

Розсіяні зоряні скупчення (мал. 25.2) складаються з декількох десятків, сотень, іноді тисяч зір і мають неправильну форму. Їхні діаметри становлять 10–20 св.р. Майже всі розсіяні зоряні скупчення знаходяться в районі Молочного Шляху або поблизу нього. Їх виявлено близько 1 200, а найвідоміші з них – *Плеяди та Гіади*. Зокрема, в Плеядах неозброєним оком видно лише сім–десять зір, а при спостереженні у телескоп – понад дві сотні.

Кулясті зоряні скупчення (мал. 25.3) мають сферичну або злегка сплюснуту форму діаметром до 300 св. р. Вони налічують сотні тисяч і навіть мільйони зір, які групуються до центра.

Як показали спостереження, більшість кулястих зоряних скупчень знаходяться в одній частині неба в сузір'ї Стрільця. Правильний висновок із цього ще 1918 р. зробив американський астроном Х. Шеплі. Визначивши відстані до 70 кулястих скупчень, він довів, що вони згруповані навколо центра Галактики. Сам же центр Галактики знаходиться в сузір'ї Стрільця дещо нижче зорі  $\chi$ , майже на стику «кордонів» сузір'їв Стрільця, Скорпіона і Змієносця.

На відміну від розсіяних скупчень, усі кулясті скупчення розташовуються сферично-симетрично відносно центра Галактики, помітно концентруючись навколо нього.

Дуже показовою є різниця діаграм спектр–світність для розсіяних і кулястих скупчень. У розсіяних зоряних скупченнях багато масивних яскравих зір, а також змінних, спалахуючих та зір з незвичайним хімічним складом. Всі вони вкладаються на головну послідовність, тоді як червоних гігантів і надгігантів там практично немає. Це свідчить про те, що вік розсіяних скупчень у середньому становить лише 1 млрд років. Кулясті скупчення, навпаки, в більшості складаються з зір маломасивних, на пізніх етапах еволюції. На діаграмі спектр–світність вони від спектрального класу  $F_0$  широкою смугою простягаються практично вертикально вгору до зони червоних гігантів. Вік кулястих скупчень оцінюють у 10–12 млрд років.

У 20-х роках ХХ ст. увагу астрономів привернули групи біло-голубих зір, що згодом отримали назву *OB-асоціацій*. Досліджуючи їх, у 1952 р. В. А. Амбарцумян зробив висновок, що процес групового формування зір продовжується і в наш час. Тоді ж він відкрив групи змінних типу *T Тельця*, які отримали назву *T-асоціацій*. Це – молоді зорі.

**3. Туманності.** Не лише зорі населяють нашу Галактику. Міжзоряний простір заповнено газом та пилом. Ці газ та пил дуже розріджені – одна частинка на  $10 \text{ см}^3$ . Та часом вони утворюють

величезні за розмірами (10–100 пк), досить щільні (10–100 частинок в  $1 \text{ см}^3$ ), неправильної форми хмари – дифузні туманності. Дифузні туманності поділяють на *світлі* й *темні*.

У темні серпневі ночі, коли сузір'я Лебеда майже в зеніті, можна бачити, що Молочний Шлях, починаючи від *Денеба* – найяскравішої зорі у Лебеді, двома іскристими стрічками тягнеться до горизонту і далі під горизонт до сузір'я Кентавра. У багатьох його ділянках є зони, де майже відсутні яскраві зорі. Так проявляють себе темні туманності, які поглинають світло зір, що знаходяться далі (мал. 25.4). Маса окремих із них сягають  $10\,000 M_{\odot}$ .



Мал. 25.4. Темна туманність

Якщо поблизу туманності є достатньо яскрава зоря, то туманність відбиває її світло і завдяки цьому стає світлою туманністю (мал. 25.5). Якщо ж зорі, що знаходяться поблизу або всередині туманності, дуже гарячі (спектрального класу *O* чи *B0*), то, іонізуючи своїм ультрафіолетовим випромінюванням газ, що входить до її складу, вони змушують його світитися так само, як це відбувається в полярних сяйвах на Землі. Тоді до відбитого пилом світла додається власне випромінювання газів туманності.



Мал. 25.5. Світла туманність

Найвідомішою серед світлих туманностей є знаменита *туманність Оріона*, яку видно навіть неозброєним оком як слабеньку хмарку (мал. 25.6). Розмір цієї туманності приблизно 20 св. р., відстань до неї – майже 1 000 св. р. Цікаво, що в цій туманності (як загалом і в інших), окрім молекул і

атомів водню, знайдено молекули кисню, води, ціану, метану, окису вуглецю та складних органічних молекул.

Окрім дифузних, існують також компактні туманності правильної форми. Вони поділяються на *волокнисті* та *планетарні*. І якщо саме з дифузними туманностями пов'язують на сьогоднішній день утворення зір, то волокнисті та планетарні туманності формуються на заключних стадіях розвитку зір зі скинутих ними оболонк.





Мал. 25.6. Туманність Оріона



Мал. 25.8. Туманність Равлик

Принаймні частина волокнистих туманностей – це залишки спалахів наднових (мал. 25.7). Одна з них – вже згадувана *Крабоподібна туманність* із сузір'я Тельця, відстань до якої становить 5 500 св. р., а видима зоряна величина 8,6<sup>m</sup>.

Планетарними названо туманності кільцеподібної форми, які здалека мають вигляд слабких кілець або дисків. Серед них і планетарна туманність *Равлик* із сузір'я Водолія (мал. 25.8). Відстань до неї – всього 650 св. р. Такі туманності розширюються зі швидкостями 20–40 км/с, так що через 10–20 тис. років після «народження» вони розсіюються в просторі і стають невидимими. Планетарні туманності світяться за рахунок ультрафіолетового випромінювання тих зір, чийми оболонками вони колись були.



Мал. 25.7. Крабоподібна туманність

Як уже було згадано, частина речовини у міжзоряному середовищі перебуває в розпорошеному стані. Завдяки поглинанню нею світла від далеких зір у їхніх спектрах виявлено лінії поглинання, що належать атомам і молекулам міжзоряного газу.

1. Які форму і розміри має наша Галактика? 2. Чим відрізняються між собою діаграми спектр-світність для кулястих і розсіяних скупчень? 3. Розташування яких об'єктів на небі дало поштовх до пошуку положення центра Галактики?
4. Чим відрізняються між собою світлі та темні туманності?

25.1 На карті зоряного неба знайдіть: а) положення центра Галактики; б) точку небесної сфери, у напрямку якої рухається Сонце (її координати  $\alpha = 18^{\circ}00'$ ,  $\delta = +30^{\circ}$ )

## § 26. Підсистеми Галактики та її спіральна структура

**1. Типи населення Галактики.** Уявлення про населення Галактики увів 1944 р. німецький астроном В. Бааде (1893–1960). Спочатку воно стосувалося *Туманності Андромеди* (галактика М31). При її фотографуванні через синій і червоний світлофільтри він виявив, що плоский лінзоподібний диск цієї велетенської галактики занурений у більш розріджену зоряну хмару сферичної форми – гало. Оскільки туманність Андромеди дуже схожа на нашу Галактику, Бааде припустив, що подібну структуру має і Молочний Шлях.

Об'єкти спіральних рукавів галактичного диска було названо *населенням I типу*. А зорі гало, які концентруються симетрично щодо центра системи, – *населенням II типу*.

До населення I типу належать, зокрема, зорі розсіяних скупчень, до населення II типу – зорі кулястих скупчень. У наш час зорі спіральних рукавів (населення I типу) ототожнюють

із плоскою складовою, а зорі гало (населення II типу) – зі сферичною складовою нашої Галактики (мал. 26.1). Як показали сучасні дослідження, два типи зоряного населення розрізняються не тільки просторовим розподілом, але й хімічним складом – зорі кулястих скупчень (населення II типу) містять приблизно у 100–300 разів менше металів, ніж зорі спіральних гілок (населення I типу).

Мабуть, кулясті скупчення зберегли хімічний склад тієї бідної на важкі хімічні елементи догалактичної хмари (чи системи хмар), з якої вони формувалися разом з Галактикою. У подальшому розвитку догалактична хмара, яка займала сферичний об'єм, стискалась, утворюючи диск, що обертався. Газ, який одразу не сконденсувався у зорі, при



Мал. 26.1. Будова Галактики

обертанні Галактики поступово осідав до її площини. Водночас у ньому йшло формування зір, які також розташовувались у площині Галактики. Масивні зорі галактичного диска швидко проходили всі етапи свого еволюційного шляху, спалахували як наднові й поповнювали міжзоряне газопопилкове середовище важкими хімічними елементами. З нього формувалися нові зорі. Отже, кожне наступне покоління зір у спіральних рукавах ставало багатшим на важкі хімічні елементи, ніж попереднє.

Водночас еволюціонували і зорі кулястих скупчень. Масивні зорі вже давно припинили своє існування, але молоді за відсутності матеріалу не утворились. Тому там залишилися тільки старі маломасивні зорі, вік яких оцінюється у 10–12 млрд років, а також, напевно, білі карлики, нейтронні зорі, чорні діри.

Таким чином, поділ на населення різних типів (підсистеми Галактики) має глибокий еволюційний зміст і відображає різне походження плоскої та сферичної складових.

**2. Гало, диск і ядро Галактики.** Гало або корона Галактики (I, мал. 26.1) складається в основному з газу, газових хмар і дуже старих неяскравих зір, як поодиноких, так і у вигляді кулястих скупчень. Концентруючись до центра Галактики, вони утворюють так званий балдж (з англ. – «потовщення») у межах кількох тисяч світлових років від нього (II, мал. 26.1). Рухаючись по витягнутих еліптичних орбітах, зорі гало дуже повільно обертаються навколо центра Галактики.

Радіус гало, за останніми даними з Космічного телескопа ім. Габбла, сягає 300 000 св. р. Саме цим радіусом і окреслюються межі Галактики.

Порівняно з гало диск (III, мал. 26.1) обертається набагато швидше. Швидкість його обертання, яка визначається швидкістю руху зір, не однакова на різних відстанях від центра. Вивчаючи особливості обертання диска, можна визначити його масу. Виявилось, що диск має діаметр 100 000 св. р., товщину центральної зони 10 000 св. р., масу 150 млрд  $M_{\odot}$  за загальної кількості зір 400 млрд.

Поблизу площини диска знаходиться дуже багато молодих зір і зоряних скупчень, не старіших за 1 млрд років. Газ у диску також

зосереджений біля його площини. В середньому хімічний склад населення в диску такий же, як і в Сонця.

Ядро Галактики повністю приховане від нас товстим шаром поглинаючої матерії. Але певною мірою «наблизитись» до нього вдалося завдяки спостереженням в інфрачервоному діапазоні. Адже розрахунок показує, що на відстані від центра Галактики до Сонця інфрачервоне випромінювання послаблюється всього у 10 разів, тоді як у видимому діапазоні у  $10^{12}$  разів, тобто на  $30^m$ .

Отже, тепер можна стверджувати, що діаметр ядра Галактики сягає 4 000 св. р. Для нього типова дуже велика концентрація зір – багато тисяч на кубічний світловий рік. Окрім цього, в центральних частинах ядра спостерігається навколоядерний газовий диск радіусом у 1 000 св. р. Ближче до центра відмічено зони іонізованого водню і численні джерела рентгенівського та інфрачервоного випромінювання, що свідчить про інтенсивне зореутворення.

За однією з гіпотез, у центрі Галактики є одинарна або подвійна чорна діра з масою близько  $10^6 M_{\odot}$ , оточена щільним газово-пилковим диском. В центрі Галактики є також яскраве радіоджерело *Стрілець А*, походження якого пов'язують з активністю ядра. Втім, дослідження ядра Галактики лише розпочалося.

**3. Спіральна структура Галактики.** Припущення, за яким наша Галактика є системою спіральних рукавів, було висловлено в середині XIX ст. І лише через сто років під час дослідження розподілу в просторі розсіяних зоряних скупчень виявилось, що вони вкладаються у три вузькі смуги, які можна вважати частинами спіральних рукавів.

Наша Галактика має дуже добре виражену спіральну структуру (мал. 26.2). Певний час складалася думка, нібито в Галактиці чотири спіралі, однак зараз надійно доведено, що їх дві.

На відміну від гало, де прояви зоряної активності надзвичайно рідкісні, в спіральних рукавах триває бурхливе життя: речовина безперервно переходить з міжзоряного простору в зорі під час їхнього утворення і у зворотному напрямку на заключних стадіях еволюції.

Магнітне поле Галактики також зосереджене головним чином у спіралях. За сучасними уявленнями, спіральні рукави в Галактиці утворюються завдяки наявності в центрі системи певного спотворення її форми, наприклад, через наявність перемички в ядрі, яка обертається як тверде тіло.

**4. Місце Сонця в Галактиці.** В околицях Сонця можна прослідкувати ділянки двох спіральних рукавів, віддалених приблизно на 3 000 св.р. За назвами сузір'їв, де вони спостерігаються, їх називають *рукавом Стрільця* і *рукавом Персея*. Сонце знаходиться майже точно посередині між ними. Щоправда, недалеко від Сонця, в сузір'ї



Мал. 26.2. Спіральна структура Галактики

Оріона, проходить ще один, не так явно виражений рукав, який вважається розгалуженням одного з основних спіральних рукавів.

Відстань від Сонця до центру Галактики становить, за різними оцінками, 22–33 тис. св. р. (мал.26.2). Відносно найближчих зір Сонце рухається зі швидкістю 16 км/с в напрямку сузір'я Геркулеса. Разом з усіма близькими зорями Сонце обертається навколо центра Галактики в напрямку на сузір'я Лебеда зі швидкістю близько 250 км/с.

Період обертання Сонця навколо центра Галактики становить приблизно 200 млн. років і називається галактичним роком.

Спіральні рукави як ціле і окремі зорі рухаються навколо центра Галактики з різними швидкостями. Кожна зоря то потрапляє у спіральний рукав, то виходить із нього. І тільки Сонце знаходиться в такому її місці, де його швидкість навколо центра Галактики практично збігається зі швидкістю спірального рукава.

Така ситуація загалом неординарна для Галактики. Саме на цій віддалі від центра за всю історію свого існування Сонце жодного разу не потрапило в спіральні рукави. Для Землі це вкрай сприятливо, бо якби ми потрапили в спіральний рукав, бурхливі процеси, що породжують смертоносне випромінювання, знищили б усе живе на Землі. Отже, наша планета існує у відносно спокійному місці Галактики впродовж мільярдів років, не відчуваючи катастрофічного впливу космічних катаклізмів. І, можливо, саме тому на Землі могло зберегтися життя.

Довгий час положення Сонця серед зір вважалося найзвичайнісіньким. Сьогодні ми знаємо, що це не так: у певному розумінні воно привілейоване. І це треба враховувати, обмірковуючи можливість життя в інших частинах нашої Галактики.



1. У чому принципова різниця між об'єктами, що утворюють населення I і II типу?
2. Який еволюційний зміст мають окремі підсистеми в Галактиці? 3. Розкажіть про можливі причини формування спіральних рукавів Галактики.
4. Чому положення Сонця і Землі в Галактиці можна вважати привілейованим?

## Вивчивши тему VI «НАША ГАЛАКТИКА»

### необхідно знати :

- \* Молочний Шлях — це видима частина Галактики.
- \* Галактика складається із зір, зоряних скупчень, міжзоряного газу, різноманітних полів і випромінювання.
- \* Сонячна система належить Галактиці й знаходиться ближче до її периферії, ніж до центра.
- \* У Галактиці є зоряне населення I і II типів.
- \* Галактика має добре розвинену спіральну структуру.



## VII. БУДОВА І ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ

Основоположниками космології як науки про Всесвіт, про закони його будови і розвитку, були давньогрецькі філософи. Але, запровадивши поняття нескінченного простору і некінченного часу, вони не змогли піти у своїх роздумах далі, ніж замінити уявлення про нескінченний простір сферою зір цілком визначеного радіуса.

Успіхи сучасної астрономії у з'ясуванні особливостей будови і розвитку досяжного для спостережень Всесвіту вражаючі. І все ж, як і для давніх греків та римлян, Всесвіт ще не розкрився перед нами всіма своїми гранями і всім розмаїттям буття. Римський філософ I ст. н. е. Сенека писав: «Успіхи наші великі. Але нашим нащадкам залишиться більшість істин, іще не відкритих».

## § 27. Галактики і квазари

**1. Класифікація галактик.** Дослідження інших велетенських зоряних систем – інших галактик – розпочав В. Гершель наприкінці XVIII ст. Відкривши і склавши каталоги загалом понад 2 500 туманностей, він дослідив їхні форми і значну частину з них виділив в окрему групу «молочних шляхів», які мали б бути подібними до нашої Галактики. Відстані до цих об'єктів Гершель оцінював мільйонами світлових років. Насправді ж ні він сам, ні інші астрономи впродовж усього XIX ст. не знали, як далеко знаходяться ці об'єкти. Тому справжнє відкриття світу галактик настало у XX ст. завдяки працям Е. Габбла.

Світ галактик надзвичайно різноманітний. Але вже 1925 р. Габбл здійснив першу і дуже вдалу спробу класифікувати галактики за їхнім зовнішнім виглядом, запропонувавши відносити їх до одного з таких трьох типів (мал. 27.1): *еліптичні E*, *спіральні S* та *неправильні Ir*.

Еліптичні галактики мають вигляд кругів чи еліпсів (мал. 27.2), яскравість яких плавно зменшується від центра до краю. Їх ділять на 8 підтипів від *E0* (коловий об'єкт) до *E7* (об'єкт істотно сплющений).



Мал. 27.1. «Камертон» Габбла

У спіральних галактиках з перемичкою (тип *SB*) ядро перетинається вздовж діаметра поперечною смугою із зір – *перемичкою* або *баром*, від кінців якого й починаються спіральні рукави (мал. 27.4).

Залежно від ступеня розвитку рукавів галактики *S* і *SB* діляться на підкласи *Sa*, *Sb* та *Sc* (відповідно *SBa*, *SBb* і *SBc*). У галактик

Спіральні галактики складаються з ядра і кількох спіральних рукавів або гілок. У звичайних спіральних галактиках (тип *S*) гілки виходять безпосередньо з ядра (мал. 27.3).



підкласу *Sa* спіралей майже не видно, тоді як у галактик підкласу *Sc* майже вся речовина скупчена в спіральних рукавах.

Проміжними між галактиками *E* і *S* є лінзоподібні галактики (підтип *S0*), яскравість яких від центра до краю змінюється стрибками.

До неправильних галактик (тип *Ir*) належать ті, що не мають чітко вираженого ядра і симетричної структури.

Найближча до нас у північній півкулі неба галактика *Туманність Андромеди* (галактика *M31*, мал. 27.5) – це спіральна галактика. У південній півкулі спостерігаються дві неправильні галактики – *Велика Магелланова Хмара* (*BMX*, мал. 27.6) і *Мала Магелланова Хмара* (*MMX*).

Приблизно 25 % вивчених галактик – еліптичні, 50 % – спіральні (з них половина *SB*), 20 % типу *S0* і лише 5 % – галактики типу *Ir*.

**2. Параметри галактик.** Як уже неодноразово наголошувалось, однією з найважливіших проблем в астрономії є визначення відстаней до космічних об'єктів. Починаючи з 20-х років XX ст., цю проблему щодо галактик майже розв'язано: дотепер розроблено більше 10 методів визначення відстаней до них.

Першим із цих методів – за спостереженнями цефеїд – скористався Е. Габбл у 1924 р. На околицях галактики *M31* (а невдовзі ще декількох) він виявив цефеїди, зумів визначити періоди зміни їхнього блиску, а потім встановити відстані до них.

У далеких галактиках намагаються зареєструвати спалахи нових і особливо наднових зір у момент максимуму їхнього блиску. Покладаючи, що потужності цих об'єктів (явищ) однакові у всіх галактиках, за їхніми видимими величинами встановлюють відстані. Після цього за кутовими розмірами визначають і лінійні діаметри галактик.

Порівнюючи зміщення спектральних ліній у різних частинах галактики (або за розширенням ліній у спектрі), встановлюють факт її обертання навколо своєї осі, а для зір, що перебувають на околицях галактик –



Мал. 27.2. Еліптична галактика



Мал. 27.3. Спіральна галактика



Мал. 27.4. Спіральна галактика з перемичкою

швидкості обертання навколо центра мас системи. Ці дані використовують для визначення мас галактик.

Як виявилось, і наша Галактика, і Туманність Андромеди входять до числа найбільших за масою, світністю і кількістю зір.

Можна з упевненістю твердити, що в спіральних і неправильних галактиках міститься багато білих і блакитних зір, тоді як в еліптичних галактиках – більше червоних. Це означає, що різні типи галактик мають різний вік.

**3. Червоне зміщення** Спостереження показують, що лінії у спектрах усіх відомих галактик (за винятком декількох, найближчих до нас) зміщені у червоний бік порівняно з тими ж лініями у спектрі нерухомого об'єкта.

Це явище, яке отримало назву червоного зміщення галактик, пов'язано з їхнім рухом у просторі в напрямку від спостерігача (*ефект Доплера-Фізо*, мал. 27.7). Із спостережень було встановлено, що швидкість віддалення  $V_r$ , яка відповідає червоному зміщенню  $z = \Delta\lambda / \lambda$ , збільшується в середньому лінійно зі збільшенням відстані  $r$  від галактики:

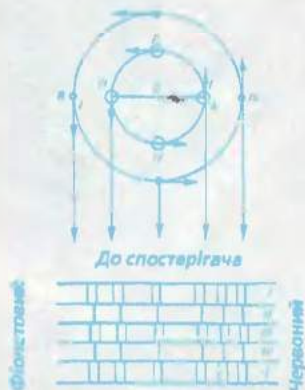
$$V_r = c (\Delta\lambda / \lambda) = H r, \quad (27.1)$$

де відстань  $r$  виражена у мегапарсеках ( $1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пк}$ ).

Ця залежність називається законом Габбла, а коефіцієнт пропорційності  $H$  має назву сталої Габбла. У наш час прийнято значення  $H \approx 75 \text{ км}/(\text{с}\cdot\text{Мпк})$ .

Це питання надзвичайно важливе, адже якщо стала  $H$  відома, за формулою (27.1), знаючи червоне зміщення  $z$  галактики, можна знайти відстань до неї:

$$r = \frac{v}{H} = \frac{c}{H} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{c}{H} z. \quad (27.2)$$



Мал. 27.7 Ефект Доплера-Фізо

Визначивши відстані та швидкості 30 галактик, Габбл виявив, що чим далі від нас знаходиться галактика, тим з більшою швидкістю вона від нас віддаляється. На підставі цього він зробив висновок, що Всесвіт не може бути статичним, як думали раніше, що насправді він неперервно розширюється, і відстані між галактиками весь час зростають.

У наш час червоні зміщення виміряно для понад 10 000 галактик. І для кожної як загодно далекої галактики співвідношення (27.1) зберігається, а це означає, що Всесвіт розширюється.

**4. Активні галактики, радіогалактики і квазари** У всіх галактиках, окрім найменших, виділяється яскрава центральна зона, яка називається *ядром*. У звичайних галактиках, таких як наша, ве-



Мал. 27.5. Галактика Туманність Андромеди



Мал. 27.6. Галактика Велика Магелланова Хмара

лика яскравість ядра пояснюється високою концентрацією зір. Та все ж сумарна кількість зір у ядрі становить лише кілька відсотків від їхньої загальної кількості в галактиці.

Але зустрічаються галактики, що мають особливо яскраві ядра, з яких виривається світний газ, що рухається з величезною швидкістю – тисячі кілометрів за секунду. За деякими даними, так можуть проявляти себе чорні діри (§ 24), оточені щільною хмарою звичайних зір і газу. Під час падіння в гравітаційному полі чорної діри речовина розганяється до швидкостей, близьких до швидкості світла. Потім у разі зіткнень газових мас поблизу чорної діри енергія руху перетворюється у випромінювання електромагнітних хвиль.



Мал. 27.8. Сейфертівська галактика

Подібні потужні процеси, що виявляють себе раптовими викидами велетенських струменів розжареного газу або потужним випромінюванням в оптичному, рентгенівському чи радіодіапазоні, відбуваються в ядрах багатьох галактик. Часто ці струмені мають просторову симетрію – спостерігаються з обох боків галактики уздовж осі її обертання.

Такі галактики називають галактиками з активними ядрами або сейфертівськими (мал. 27.8) на честь американського астронома К. Сейферта, який 1943 р. спостерігав їх уперше.

Впродовж 50 років вивчення галактик проводиться в радіодіапазоні. Як і слід було очікувати, від звичайних галактик до Землі надходить радіовипромінювання, але у мільйон разів слабкіше, ніж в оптичному діапазоні. Проте серед них було виявлено так звані *радіогалактики*, які в радіодіапазоні яскравіші, ніж в оптичному.

Таких галактик відомо кілька сотень. Найближче до нас знаходиться радіоджерело *Лебідь А*. Його ототожнили з галактикою, яка складається з двох ядер, оточених протяжною оболонкою (мал. 27.9). Найцікавішою особливістю джерела



Мал. 27.9. Радіоджерело Лебідь X-1

*Лебідь А* є те, що зона радіовипромінювання не збігається з видимою галактикою, а розташовується двома окремими приблизно еліптичними областями обабіч зони оптичного випромінювання. Центри областей радіовипромінювання знаходяться від видимого подвійного ядра на віддалі близько 80 кпк (260 тис. св. р.). Спочатку було висловлено гіпотезу, за якою спостерігається зіткнення двох галактик, що й викликає потужне випромінювання. Невдовзі цю гіпотезу було відкинуто, бо у жодній взаємодіючій галактики, яких в оптичному діапазоні відомо досить багато,

не було виявлено радіовипромінювання, аналогічне Лебедю А. Отже, це ще одна загадка, яку треба розгадати.

Одними з найпотужніших джерел радіовипромінювання є квазари – квазізоряні радіоджерела. На фотографіях, зроблених в оптичному діапазоні, ці об'єкти мають вигляд звичайних галактик (мал. 27.10). Але спектральні дослідження вказують, що це – дуже віддалені об'єкти. Серед близько 5000 відомих сьогодні квазарів деякі мають червоне зміщення  $z \approx 5$  (для найдальших потужних еліптичних галактик  $z \approx 1-1,2$ ).



Мал. 27.10. Квазари

Враховуючи, що формула (27.1) справедлива для  $v \ll c$ , за швидкостей, що наближаються до величини  $c$ , швидкості руху квазарів із  $z = 4-5$ , обчислені за точною формулою, становлять  $0,92-0,97c$ , а відстані – 3 680–3 880 Мпк (12–12,7 млрд св. р.).

Світності квазарів у сотні разів більші від потужності найбільшої галактики з її сотнями мільярдів зір. Поблизу деяких квазарів виявлено викиди – велетенські потоки речовини. Розглянувши різноманітні гіпотези, астрономи дійшли висновку, що квазари, найімовірніше, – недовговічні стадії розвитку ядер галактик.

**5. Розподіл галактик у просторі** Провівши ретельне дослідження галактик до  $20^m$  за допомогою 2,5-метрового телескопа, Габбл 1934 р. висловив думку, що таких об'єктів на всій небесній сфері налічується близько 5 млн. Зараз вважається, що галактик з величиною до  $30^m$  близько 100 млрд.



Мал. 27.11 Скупчення галактик Діви

Галактики дуже рідко бувають поодинокими (мал. 27.11). Як правило, вони зустрічаються невеликими групами по кілька членів або входять до складу великих скупчень із сотень і тисяч галактик.

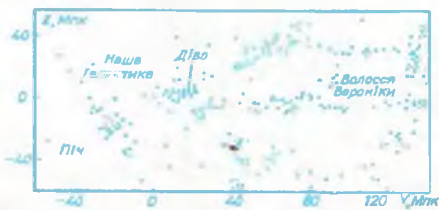
Наша Галактика входить до складу так званої *Місцевої групи*, яка містить ще дві великих спіральних галактики – Туманність Андромеди і галактику в сузір'ї Трикутника, а також більше 20 карликових і неправильних галактик, серед яких найбільшими є Магелланові Хмари.

Розміри скупчень галактик становлять кілька мегапарсек. На сьогодні відомо близько 4000 скупчень, в яких налічуються сотні й тисячі зоряних систем. З багатьма скупченнями пов'язані потужні та

протяжні джерела рентгенівського випромінювання. Між скупченнями є гарячий газ із надзвичайно малою густиною.

У просторовому розподілі галактик існують великі неоднорідності розмірами в десятки мегаларсек. Области з підвищеною густиною галактик чергуються з пустотами, де середня густина галактик значно менша. Найближча до нас область підвищеної густини галактик та їхніх систем називається **Надгалактикою**, або **Місцевим надскупченням**. У його центральній частині знаходиться **скупчення Діви**. **Скупчення Волосся Вероніки** слугує центром іншого, сусіднього надскупчення. Цікаво те, що надскупчення фізично між собою не пов'язані.

В цілому галактики і скупчення галактик розташовуються на певних поверхнях, схожих на стінки комірок, які охоплюють порожнини. Тобто розподіл речовини у Всесвіті має **комірчасту структуру**. Розміри порожнин (каверн) порівнянні з розмірами надскупчень (мал. 27.12).



Мал. 27.12. Комірчаста структура Всесвіту

1. Які типи галактик найчастіше виявляють при спостереженнях? 2. Як зміни зорі цефеїди виправдали свою назву «маяки Всесвіту»? 3. В чому суть червоного зміщення галактик? 4. Як виявляють себе активні галактики? 5. Що таке квазари?

27.1 Червоне зміщення у спектрі галактики  $z = 1$ . Яку довжину має лінія  $L_{\alpha}$  ( $\lambda = 121,6$  нм), виявлена в спектрі цього об'єкта?

## § 28. Проблеми космології

**1. Космологічні моделі.** Космологія – наука про Всесвіт у цілому, про найзагальніші закони його будови і розвитку. Це молода і водночас найпривабливіша галузь астрономії. Вона найповніше використовує такі поняття, як простір і час, які є не тільки фізичними, але й філософськими категоріями. На її «полі» упродовж століть ведеться запекла боротьба між матеріалістичним та ідеалістичним світоглядом.

Загальні закономірності розвитку Всесвіту вивчаються за допомогою космологічних моделей. Інакше кажучи, виводяться рівняння, за якими визначається зміна з часом відстані між двома довільно взятими матеріальними об'єктами у Всесвіті (двома галактиками), а також зміна з часом середньої температури і густини речовини. При цьому, як правило, виходять з так званого **космологічного принципу**, який проголошує, що Всесвіт є однорідним та ізотропним, тобто властивості Всесвіту для кожного заданого моменту часу однакові в усіх його точках і в усіх напрямках.

Сучасна космологія ґрунтується на створеній А. Ейнштейном (1916 р.) **загальній теорії відносності** (ЗТВ), в якій було встановлено, що розвиток і подальша доля Всесвіту значною мірою залежать від значення середньої густини речовини, яка його заповнює. При цьому особлива роль відводиться так званому значенню  $\rho_{кр}$  – критичної густини речовини.

Виявляється: якщо  $\rho > \rho_{кр}$ , то розширення Всесвіту рано чи пізно зупиниться і зміниться його стисненням. Тоді червоні зміщення ліній у спектрах галактик зміняться на фіолетові, оскільки віддалі між галактиками почнуть зменшуватись. У такій моделі Всесвіт пульсує: досягнувши найбільших розмірів, знову стискається. До того ж він замкнений, і світловий промінь, відлетівши у зоряні простори, має зрештою повернутись туди, звідки стартував.

Якщо  $\rho \leq \rho_{кр}$ , то Всесвіт відкритий, нескінченний, і його розширення буде тривати вічно!

Чому ж дорівнює критична густина речовини Всесвіту? Виявилось, що її значення визначається тільки сучасним значенням сталої Габбла, яку точно знайти дуже непросто. Для її обчислення доводиться вимірювати червоні зміщення дуже далеких галактик, оскільки близькі галактики мають значні власні рухи, не зумовлені розширенням Всесвіту.

Обчислена за середнім значенням сталої Габбла критична густина  $\rho_{кр}$  становить мізерну величину – біля  $10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>, або  $10^{-5}$  атомних одиниць маси у кожному кубічному сантиметрі. За такої густини грам речовини міститься у кубі зі стороною 40 тис. км!

Отже, для того щоб дізнатись, якій космологічній моделі відповідає Всесвіт, потрібно визначити середню густина його речовини і порівняти з критичною. Визначення середньої густини – це першочергова задача космології.

Зауважимо, що при введенні поняття Всесвіту, що розширюється, зовсім не йдеться про якусь фізичну точку, від якої відбувається розширення. Ніякого центра розширення не існує. Порівняємо Всесвіт із точками на поверхні повітряної кульки. Коли ми почнемо наповнювати її повітрям, відстані між точками будуть зростати, але жодну точку при цьому не можна вважати центром розширення.

Так і при розширенні Всесвіту – сам простір наче розбухає, галактики віддаляються одна від одної, залишаючи завдяки гравітації незмінними свої об'єми.

Та якщо світ галактик розширюється, то, можливо, певне число років тому всі вони почали свій розліт з деякої так званої *сингулярної точки*? Таке уявлення дозволяє ввести поняття єдиного космологічного часу  $t$ , відлічуваного від моменту, коли розпочалося розширення світу галактик.

**2. Проблема «прихованої маси».** Якщо ми візьмемо в околицях Сонця невеликий об'єм, наприклад куб із стороною 10 пк, то в ньому може виявитись кілька зір і міжзоряна плазма, а в сусідніх 10 пк<sup>3</sup> ми можемо не знайти жодної зорі. Це свідчить про нерівномірність заповнення речовиною найближчого до нас простору. Зорі об'єднуються в галактики, а галактики об'єднуються в скупчення, які теж розташовані нерівномірно. Середня відстань між скупченнями становить близько 30 Мпк. Отже, і в таких об'ємах Всесвіт неоднорідний. Але якщо ми візьмемо куб із стороною 100 Мпк, то побачимо іншу картину: в будь-якому місці Всесвіту всередині таких об'ємів кількість галактик та їхніх скупчень буде майже однаковою.

«Розмазавши» подумки всі галактики по цих об'ємах, ми отримуємо для кожного з них однакову середню густина речовини.



Це приводить до дуже важливого висновку: у великих масштабах Всесвіт однорідний, і значення середньої густини речовини у ньому – це один із найважливіших параметрів.

Проте визначити зі спостережень справжню середню густину Всесвіту, виявляється, ще складніше, ніж знайти сталу Габбла і обчислити критичну густину. З астрономічних спостережень випливає, що середня густина усієї видимої речовини – зір, пилу, газу, а також випромінювання – не перевищує 10% критичної густини. Отже, окрім речовини, яка спостерігається, у Всесвіті, безсумнівно, наявна загадкова «прихована» або темна речовина, яка нічим не проявляє себе, крім гравітації. Її маса у багато разів перевищує масу видимої речовини.

Останніми роками астрономи отримали цілий ряд прямих вказівок на те, що в основному саме ця темна речовина заповнює Всесвіт. Вона утворює протяжні невидимі темні гало галактик і міститься в міжгалактичному просторі, концентруючись біля скупчень галактик.

Яка природа «прихованої» речовини? Можливо, це поки що не відкриті елементарні частинки, а можливо, вакуум має такі властивості, що робить свій внесок у повну густину матерії. Це можуть бути і звичайні несамосвітні тіла невеликої маси, проміжні між зорями і великими планетами. Може бути і «будівельне сміття», що залишилось після епохи утворення галактик.

Та як би там не було, виміряти масу «прихованої» речовини – задача надзвичайно складна. Це якнайважливіше космологічне питання досі залишається відкритим.

**3. Проблема горизонту.** Якщо галактики розлітаються, то перенесімось подумки у минуле і знайдемо момент, коли віддалі між галактиками були такими малими, що вони «торкались» одна одної. Продовжуючи цю подорож у часі, ми неминуче прийдемо до такого моменту, коли вся доступна для спостережень область Всесвіту формально була стягнута в точку, а густина її була нескінченно великою. Звісно, фізично це неможливо, але в рамках моделі припустимо говорити про час життя Всесвіту як такий, що минув від моменту існування нескінченно великої (чи просто великої, але такої, яка ще має фізичний зміст) густини.

Цей час, що називається віком Всесвіту, залежно від прийнятого значення сталої Габбла виявляється близьким до 12–15 млрд років.

Якщо наші математичні моделі вірно описують реальний Всесвіт, то серед астрономічних об'єктів не повинно бути таких, вік яких перевищує вік Всесвіту. І дійсно, вік найстаріших зір як у нашій, так і в інших галактиках, не більший за 15 млрд років.

Будь-який сигнал, що несе інформацію, не може передаватися зі швидкістю, більшою за швидкість світла. Тому «скінченний» вік Всесвіту дозволяє умовно говорити і про розмір спостережуваного Всесвіту, або розмір області  $r_B \approx c/H$ , з якої інформація може дійти до спостерігача за час, що минув від початку розширення.

Оскільки швидкість світла  $c$  має скінченне значення, то і розмір спостережуваного Всесвіту  $r_B$  – також скінченна величина. Тобто

спостережуваний Всесвіт має вигляд сфери скінченного радіуса  $r_B$ , з-за меж якої ніяка інформація не може дійти до нас у принципі. І ніяке вдосконалення техніки не дозволить зазірнути ще далі. На честь Габбла її називають габблівським радіусом, а поверхня, яку він описує, називається абсолютним горизонтом.

На сьогоднішні значення сталої Габбла  $H = 75 \text{ км} / (\text{с} \cdot \text{Мпк})$  габблівський радіус становить 4 000 Мпк.

Але поняття радіуса Всесвіту досить умовне: реальний Всесвіт безмежний і ніде не закінчується. Якщо спостерігач буде рухатись, то його спостережуваний «горизонт» буде відсуватися все далі й далі. Через скінченність швидкості світла величина червоного зміщення у спектрі далекої галактики є водночас і мірою віддалі до неї, і мірою часу, який минув відтоді, коли вона випустила той сигнал, що ми зараз сприймаємо.

Спостерігаючи все віддаленіші галактики, ми зазираємо у їхнє минуле, бо бачимо їх такими, якими вони були мільйони й мільярди років тому.



1. Яка мета ставиться при побудові космологічної моделі? 2. Чому параметр густини речовини такий важливий для долі Всесвіту? 3. У чому суть проблеми «прихованої» маси? 4. Як Ви розумієте поняття «абсолютний горизонт»?

## § 29. Походження і розвиток Всесвіту

**1. Загальна теорія відносності – наріжний камінь моделі Всесвіту.** Всі уявлення про будову та виникнення Всесвіту, що з'явилися у людства до 20-х років ХХ ст., можна вважати теоретичними міркуваннями, бо спостережні дані були вкрай обмежені. І все ж на основі цих даних повільно вимальовувалася картина «будівлі» Всесвіту. На основі роздумів про світ фізичних явищ, критичного аналізу механіки Галілея та Ньютона народилася теорія відносності Ейнштейна, якій було вготовано провести справжній переворот у фізиці.

Теорія відносності виходить з того факту, що всі вимірювання і зміни у просторі і часі відносні і залежать від конкретного спостерігача. Вони втрачають абсолютне значення, а сама структура простору-часу визначається тим чи іншим розподілом мас у Всесвіті. В різних частинах Всесвіту простір по-різному викривлений, і час протікає з різною швидкістю.

У загальній теорії відносності (ЗТВ) Ейнштейна гравітація – не сила (що дивовижно на перший погляд), а тільки викривлення простору-часу. Тіла рухаються по викривлених траєкторіях не тому, що на них діє сила гравітації, – вони рухаються найкоротшим, «найшвидшим» шляхом у викривленому просторі-часі. А викривляють простір-час матеріальні тіла, подібно до того, як масивна кулька прогинає натягнуту плівку.

Матерія за Ейнштейном не занурена у незалежний від неї простір-час, а нероздільно пов'язана з ним і, більше того, визначає його параметри. Звісно, може так статися, що через деякий час положення ЗТВ будуть відхилені в результаті більш досконалих

експериментів, але поки що на рубежі тисячоліть вона є наріжним каменем моделі Всесвіту.

**2. На самому початку...** У 1922 році німецький журнал «Цайтшрифт фіур фізік» надрукував статтю радянського вченого О. Фрідмана, в якій він аналізував космологічну теорію Ейнштейна. На відміну від Ейнштейна, який всупереч власним висновкам із ЗТВ відстоював стаціонарність Всесвіту, на основі уважного аналізу рішення рівнянь Ейнштейна Фрідману вдалося показати, що речовина у Всесвіті не може знаходитися в стаціонарному стані, і Всесвіт з часом змінюється.

За теорією Фрідмана можливі три варіанти розвитку Всесвіту: *Всесвіт закритий, відкритий і пульсуючий*. Всі ці варіанти мають те спільне, що в якийсь момент часу в минулому (10 чи 20 млрд років тому) відстань між сусідніми об'єктами Всесвіту мусила бути рівною нулю. В цей момент, який називається **Великим Вибухом**, густина Всесвіту і кривизна простору мали бути нескінченно великими, тобто Всесвіт мав бути точкою, яку математики називають *сингулярною*. У сингулярній точці всі сучасні закони фізики втрачають свою дію, а тому цю точку можна розглядати як математичний образ нової фізичної реальності.

В теоретичному плані сингулярність відображає «особливий» фізичний стан, у якому густина речовини, кривизна простору-часу і температура нескінченні: вся надгаряча космічна матерія буквально зібрана в точку.

Процес переходу космічної матерії з цього «точкового» стану на стадію розширення і є Великим Вибухом. Від цієї часової межі починається історія нашого Всесвіту. Що передувало Великому Вибуху – невідомо, бо людський розум поки що безсилий підняти завісу над таємницею початкової сингулярності.

**3. Історія дуже раннього Всесвіту.** Отже, в момент Великого Вибуху розміри Всесвіту були близькими до нуля, менші за  $10^{-33}$  см, а всі чотири фундаментальні сили природи – *гравітація* (характерна для кожного тіла і залежна від його маси чи енергії), *електромагнітна* (об'єднує електрично заряджені частинки), *слабка* (властива для всепроникних нейтрино) і *сильна* (об'єднує протони і нейтрони в ядрі атома) – були об'єднані.

Відлік часу починається від  $10^{-43}$  с. У цей час, згідно з припущеннями, гравітація відділяється від трьох інших фундаментальних сил, а вони за надзвичайно високої енергії утворюють єдину силу.

Період від  $10^{-43}$  с до  $10^{-35}$  с називається епохою **Великого об'єднання**. До кінця цієї епохи, за теоретичними міркуваннями, деякі області Всесвіту переохолодилися і знаходились в особливому стані, який називається *псевдовакуумом* або «хибним вакуумом».

У звичайному розумінні вакуум – це порожній простір, у якому практично відсутні будь-які частинки. Фізичний, реальний вакуум не порожній. Він заповнений полями та *віртуальними* частинками, які час від часу матеріалізуються.

Таке поняття вакууму ввів у науку видатний англійський фізик П. Дірак (1902–1984). Звичайних частинок у такому вакуумі справді

немає, але існує велика кількість інших – віртуальних (з англ. – «можливих»). Такі частинки виникають з «нічого», з порожнечі, набуваючи скороминуще буття, перш ніж знову зникнути. І як би ми не намагалися спустошити простір, у ньому завжди буде рій таких частинок.

Таким чином, вакуум постає не безликим і позбавленим життя, а сповненим енергії і нестримного творення. Час життя віртуальних частинок надзвичайно малий (наприклад, для віртуального електрона з масою  $10^{-27}$  г цей час дорівнює  $10^{-21}$  с, а для віртуального протона –  $10^{-24}$  с).

Фізики встановили, що такий вакуум, який називають *квантовим*, може мати дивовижні властивості. Наприклад, виробляти необмежену кількість енергії або мати від'ємний тиск.

Отже, в першу мить народження Всесвіту гравітаційне відштовхування переважало над гравітаційним тяжінням, під дією антигравітаційних сил вакууму і почалось його розширення. Воно відбувалось так стрімко, що отримало спеціальну назву – роздування або інфляція. Саме одна з областей вакууму, яка пройшла фазу інфляції і яка спершу була набагато менша протона, а за мить досягла розмірів апельсина, і стала маленьким Всесвітом.

Кожні  $10^{-34}$  с Всесвіт подвоював свої розміри – роздування йшло вибухоподібним чином. А це і є Великий Вибух!

Але стан псевдовакууму нестійкий. Коли подібний стан зникає, закінчується й інфляційне роздування. Миттєво перейшовши до стану звичної для нас гравітаційної взаємодії в момент  $10^{-35}$  с, Всесвіт продовжував розширюватися за інерцією, за рахунок того поштовху, що був наданий у період інфляції.

Величезний запас потенціальної енергії псевдовакууму, величина якої не зменшувалася при роздуванні, під час фазового переходу Всесвіту із переохолодженого стану виділився у вигляді випромінювання. Температура миттєво зросла до значення  $10^{27}$  К і сильна взаємодія відділилася від слабкої та електромагнітної. Від цього моменту і почалась історія гарячого Всесвіту.

Тоді ж виникла асиметрія у кількості частинок і античастинок. В момент  $10^{-10}$  с за температури  $10^{15}$  К почали утворюватись важкі елементарні частинки, такі як протони і нейтрони. При цьому антипротонів і антинейтронів у ранньому Всесвіті виявилось менше, ніж протонів і нейтронів. Цей факт має надзвичайно важливе значення, бо, як відомо, важкі частинки входять до складу атомних ядер хімічних елементів. І якби всіх частинок було порівну, то після їхньої анігіляції жодного атомного ядра не змогло б утворитися, і той Всесвіт, який ми знаємо, не існував би.

Деякий час Всесвіт перебував у так званому *рівноважному* стані. Відбувалось народження та анігіляція частинок з античастинками з виділенням енергії у вигляді квантів світла. Але розширення тривало, температура продовжувала знижуватись, і масивних частинок утворювалось дедалі менше.

Згодом кількість анігіляції перевищила кількість народжених частинок, всі античастинки знайшли собі пару і анігілювали, перетворившись

на кванти світла, а частинки без пари залишились – одна частинка на мільярд квантів! У Всесвіті залишилась тільки речовина, а антиречовина зникла.

**4. Ранній Всесвіт.** Нарешті температура знизилася настільки, що пари масивних частинок перестали народжуватися зовсім. Енергії вистачало лише на утворення легких частинок – *лептонів*.

Почалась ера лептонів. Через  $10^{-4}$  с Всесвіт став схожим на густий суп, у якому випромінювання (фотони) було змішане з лептонами (в основному електронами, позитронами, нейтрино і антинейтрино) і протонами та нейтронами. У цей період досі зв'язані нейтрино вивільнилися і розлетілися у просторі.

Через 1 секунду після Великого Вибуху, коли температура впала до 10 млрд К, почалась анігіляція електронів і позитронів з виділенням колосальної кількості фотонів. Цей процес тривав 9 с і через 10 с після початку Великого Вибуху випромінювання вже переважало над речовиною – почалась ера випромінювання.

Саме на цьому етапі за температури 1 млрд К почався космологічний нуклеосинтез – утворення ядер гелію, другого після водню за поширеністю у Всесвіті хімічного елемента. Розрахована теоретично концентрація гелію (25 %) збігається з даними астрофізичних спостережень. Цей процес тривав біля 200 хвилин.

Через 1 млн років, при подальшому розширенні та охолодженні речовини до температури 3 000 К, в результаті об'єднання електронів і протонів утворились атоми водню – найпростішого і найпоширенішого хімічного елемента у Всесвіті. Випромінювання відділилось від речовини і у вигляді фотонів розлетілося у просторі. Всесвіт став прозорим.

Настала наступна ера в історії Всесвіту – ера речовини, яка триває і дотепер.

**5. Реліктове випромінювання.** Випромінювання, що виникло на ранніх етапах розвитку Всесвіту, мусить і зараз знаходитися в ньому у вигляді фонового *космічного* або *реліктового випромінювання*. От тільки відтоді через триваюче розширення воно значно охолодилось і, за розрахунками, мусить мати температуру біля 3 К.

Ще в 40-х роках ХХ ст. Г. Гамов передбачив існування реліктового випромінювання. А 1965 р. А. Пензіас і Р. Вілсон несподівано для себе зареєстрували радіовипромінювання, інтенсивність якого з точністю до 0,1% не залежала від орієнтації антени радіотелескопа. Його інтенсивність була однаковою і вдень, і вночі, і впродовж року. Це означало, що джерело випромінювання знаходиться за межами Сонячної системи і навіть за межами Галактики.

Згодом було зроблено висновок, що це радіовипромінювання – не що інше, як *реліктове випромінювання*, передбачене Гамовим. Його температура виявилася рівною 2,73 К, що близько до передбаченої величини. Максимум у спектрі реліктового випромінювання припадає на міліметрову область радіодіапазону.

Таким чином, гіпотеза «гарячого» Всесвіту отримала спостережне підтвердження.

**6. Народження галактик.** Після того як випромінювання відокремилось від речовини, Всесвіт складався із суміші атомів і випромінювання, тобто був наповнений гарячим газом. Можливо, цей газ не був абсолютно однорідним. Можливо, у ньому були ущільнення і розрідження. Хоча остаточно це питання залишається нез'ясованим.

Врахуємо тепер, що зі збільшенням щільності згустка речовини зростає сила гравітації, що діє на нього. А тому будь-яка неоднорідність речовини має тенденцію до нарощування. З часом такі ущільнені хмари відокремились одна від одної і перестали брати участь у розширенні. Гравітація міцно тримала кожен з них групою, а розширення проявлялось у зростанні відстані між ними.

Велетенські й дуже масивні згустки дробились на менші, кожний з яких продовжував ущільнюватись. З таких згустків через 1 млрд років після Великого Вибуху і утворилися надскупчення, скупчення галактик, окремі галактики, а в галактиках – окремі зорі.

Цей сценарій утворення і розвитку Всесвіту підтверджується такими спостережними даними:

- ♦ Найявність реліктового випромінювання як своєрідне відлуння моменту відриву випромінювання від речовини.
- ♦ Відсотковий вміст гелію у речовині, що відповідає розрахунковому за теорією Великого Вибуху (25 % гелію і 75 % водню в загальній масі).
- ♦ Однорідність та ізотропність простору у великих масштабах (100 Мпк).
- ♦ Найявність неоднорідностей у невеликих масштабах як наслідок флуктуацій щільності речовини на початку Всесвіту.
- ♦ Співвідношення між випромінюванням і речовиною (між кількістю фотонів і окремих частинок).



1.\* Що таке епоха Великого об'єднання? 2.\* Яка дивовижна властивість вакууму, за сценарієм розвитку Всесвіту, зіграла вирішальну роль у його творенні? 3. Що таке реліктове випромінювання? 4. Чому вміст гелію в речовині є доказом правильності моделі «гарячого» Всесвіту?

## Вивчивши тему VII «БУДОВА І ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ»

*необхідно знати :*

- ★ Спостерігається віддалення галактик одна від одної, яке пояснюється розширенням Всесвіту.
- ★ Згідно сучасних наукових уявлень, існує абсолютний горизонт – відстань, за яку «зазирнути» ми не можемо у принципі.
- ★ Всесвіт народився з фізичного вакууму, і його подальша доля залежить від значення середньої густини речовини.



## VIII. ЖИТТЯ У ВСЕСВІТІ

## § 30. Про пошуки життя за межами Землі

Попри недостатність надійної інформації, людство завжди замислювалось над таємницею походження життя і Всесвіту. Кожна цивілізація минулого створила свої міфи про виникнення світу і людини. Сучасна цивілізація також проявляє безмежну зацікавленість у цих питаннях. Як і колись, людство сподівається на можливість існування життя ще де-небудь окрім Землі – на планетах Сонячної системи чи взагалі поза її межами, серед зоряних світів. І сьогодні, коли автоматичні станції досліджують міжпланетний простір, а деякі з них вже летять у напрямку далеких зір, проблема існування та пошуку життя у Всесвіті стала ще більш актуальною і хвилюючою. Та перш ніж обміркувати ці проблеми, потрібно задатись іншими питаннями.

**1. Що таке життя?** Даючи відповідь на це питання, зауважимо спочатку, що визначення терміну «життя», як і всі подальші міркування стосовно умов його виникнення, тривалого існування і еволюції, спираються на один-єдиний приклад – знання про життя на Землі. Іншого прикладу у нас поки що немає.

Основні властивості живого такі. Все живе здатне до самовідтворення, тобто до розмноження: клітини діляться, рослини дають насіння, тварини народжують дитинчат тощо; все живе підтримує своє існування за рахунок навколишнього середовища – поглинає енергію (чи то сонячну, чи з інших джерел), дихає, харчується; все живе збирає, зберігає і переробляє інформацію про зовнішнє та внутрішнє середовище з тим, щоб зберегти і підтримати свої власні характеристики; зібрана інформація кодується надзвичайно складними і великими молекулами.

Іншими словами: **ж и т т я** – це високоорганізований стан речовини, здатний до самовідтворення за допомогою певним чином кодованих молекул і до обміну з навколишнім середовищем речовиною, енергією та інформацією.

Життя на Землі ґрунтується на сполуках вуглецю, розчинником для яких слугує вода. Керуючись процесами самовідтворення нуклеїнової кислоти – ДНК, які за величезного розмаїття усього живого використовують для програмування індивідуального розвитку організмів однаково "мову" – один і той же генетичний код.

Така біохімічна єдність свідчить про те, що всі прояви життя на Землі виникли значною мірою однаковими шляхами і мають спільних пращурів.

Хоча на питання, як саме відбувається цей еволюційний процес, також як і на питання, як відбувся перехід від «неживого» до «живого», сучасна наука поки що не може дати точної відповіді. З цього приводу дуже гарно висловився англійський біолог Ф. Крік, який ще 1953 р. разом з американцем Д. Уотсоном розкрив таємницю структури ДНК: «Ми не бачимо шляху від первісного бульйону до природного відбору. Можна дійти висновку, що походження життя – чудо, але це свідчить лише про наше незнання».



Отже, твердження про біохімічну єдиність життя на Землі, у свою чергу, приводить до висновку, що життя на інших планетах може дуже сильно відрізнятись від земного, навіть якщо воно використовує ті ж хімічні елементи. Безперечно, скрізь, де існує життя, повинні бути молекули, які забезпечують самовідтворення. Але побудовані вони можуть бути не так, як земна ДНК, і можуть нести в собі інший генетичний код («розмовлятимуть іншою мовою»). В молекулах білка можуть бути використані інші амінокислоти. А в основі розмноження, зберігання та передачі інформації може лежати інша хімічна система.

**2. Земля – колыска життя.** Приймемо апріорі, що життя може існувати на холодних небесних тілах – планетах. Подивімося, наскільки закономірним чи випадковим був процес зародження життя на Землі.

В численних лабораторних експериментах вже давно було показано, що для утворення складних органічних молекул, які передують виникненню життя, необхідні наступні умови: наявність у складі небесного тіла всіх хімічних елементів, які входять до складу живого; відповідний температурний режим, що забезпечує перебування води у газоподібному і рідкому стані; відсутність кисню в атмосфері планети, бо за його наявності утворюється озоновий екран, що поглинає сонячний ультрафіолет, який, руйнуючи електронні оболонки атомів, дає їм змогу об'єднуватись у складні передбіологічні молекулярні сполуки. Як тільки ці умови виконано, в силу добре відомих законів фізики та хімії негайно починається утворення складних органічних сполук. Тож напевне, початок життя на планеті Земля був цілком закономірним явищем, бо на ній реалізувалися всі необхідні початкові умови.

А от подальший перехід від переджиття до життя, а також його існування стали можливими за підтримання стабільними впродовж мільярдів років цілком певних характеристик зовнішнього середовища. І ця умова також реалізувалась на Землі.

Є три особливості, які роблять Землю унікальною серед інших планет: віддаль від Сонця, розміри і (що, можливо, менш істотно) відносно велика маса природного супутника Місяця. Всі три характеристики виявились важливими для існування і розвитку життя.

Земля знаходиться від Сонця на дуже зручній віддалі – 149 600 000 км. Саме на цій відстані середня температура на поверхні така, що дозволяє воді, яка входить до складу тіл живих істот, знаходитись у рідкому стані, а не у вигляді льоду чи водяної пари.

Якби Земля знаходилась на місці Венери, то велика кількість радіації від Сонця врешті-решт зробила б її схожою на Венеру з потужною атмосферою з вуглекислого газу і занадто високою для існування життя температурою.

Якби Земля перемістилась на орбіту Марса, то зменшення кількості сонячного тепла викликало б охолодження океанів і збільшення площі полярних шапок, що зрештою перетворило б її на неконтрольований холодильник з занадто низькою для існування життя температурою.

Відносно розмірів також зрозуміло. За більших розмірів Земля мала б більшу масу, і більшу силу тяжіння. Тоді її атмосфера нагадувала б атмосферу планет-гігантів – Юпітера чи Сатурна – і для життя була б непридатною. За менших розмірів і маси, як у Меркурія, Земля взагалі не могла б утримати атмосферу.

Таким чином, розміри і відстань від центрального світила – це два вирішальних фактори з точки зору умов для існування життя (в кожному разі, схожого на земне).

Щодо Місяця з його відносно великою масою, то, по-перше, високі припливи і відпливи на морському узбережжі, які він викликає, могли зіграти вирішальну роль в утворенні мікросередовищ, придатних для існування життя; по-друге, Місяць стабілізує орієнтацію осі обертання Землі, що надзвичайно важливо для підтримання більш-менш постійного клімату.

До цього треба додати важливість планет-гігантів, особливо Юпітера, у Сонячній системі. Їхня наявність сприяє стабілізації орбіти Землі, без чого вона могла б бути викинутою за межі планетної сім'ї або впала б на Сонце. До того ж Юпітер як наймасивніша планета в Сонячній системі притягає до себе основну масу метеоритів, які могли б повністю зруйнувати поверхню Землі.

**3. Про імовірність існування життя на інших планетах.** З усього сказаного вище можна зробити дуже важливий висновок: формування переджиття – процес, властивий не тільки Землі.

Оскільки закони фізики і хімії універсальні для усього видимого Всесвіту, на будь-якій планеті, знаходиться вона у Сонячній системі чи в якійсь іншій зоряній системі, за наявності відповідних умов повинні йти схожі процеси. Неорганічне утворення органічних, нехай і простих, сполук з подальшим їхнім ускладненням – це повсюдний космічний процес.

У Всесвіті є всі передумови для того, щоб ми не вважали існування життя та розуму на Землі чимось винятковим. Інша справа – наскільки ймовірно знайти у Всесвіті планети, де б реалізувались умови, подібні доземних. В даному випадку не будемо розглядати можливі екзотичні форми життя, такі як життя на нейтронних зорях, організація галактики в живу систему, життя у величезних міжзоряних хмарах тощо.

**4. Де у Всесвіті шукати планети, придатні для життя?** Дослідження показують, що більшість зір у нашій Галактиці входять до складу кратних систем. Це свідчить про те, що у більшості випадків протозоряна хмара, в якій іде формування зорі, розбивається на фрагменти так, що утворюється одразу кілька об'єктів. Досить часто розподіл мас між ними буває дуже нерівномірним.

Іноді поряд з масивним тілом утворюється одна чи дві невеликі зорі, що мають вигляд червоних карликів. Прикладом слугує вже згадувана потрійна система  $\alpha$  Кентавра. А іноді у залишків речовини, яка не пішла на утворення основної зорі, маса така маленька, що з них можуть утворитися тільки планети – одна чи декілька.

Ясна річ, що не кожна зоря варта уваги з точки зору пошуків біля неї планет, на яких могло б виникнути життя. Знаючи, що для еволюції життя від найпростіших до найвищих форм потрібні величезні проміжки часу, принаймні 3–4 млрд років, відкиньмо у пошуках гарячі білі та блакитні зорі, які не здатні прожити більше 4 млрд років. Адже навіть якщо у них є планетні системи, через короткий строк життя зорі майбутнього для них не існує.

Зорі набагато меншої маси, ніж Сонце, також погані кандидати для пошуків. Щоб отримати потрібну кількість тепла від такої зорі, планета повинна знаходитись до неї набагато ближче, ніж Земля до Сонця. Наприклад, від зорі Барнарда, другої за віддаленістю від Сонячної системи (6 св. р.), планета мусить знаходитись на віддалі 1 млн 300 тис. км. Це лише втричі далі, ніж Місяць від Землі!

За таких близьких відстаней виникають значні труднощі, бо планета, як і Місяць, завжди буде обернена до свого Сонця одним боком. За розрахунками, це повинно значно уповільнити утворення складних хімічних сполук. Та, врахувавши величезний строк життя карликових зір – 100–150 млрд років, погодьмось: у такому далекому майбутньому все можливе. Тільки зараз шукати там життя не має сенсу.

Отже, варто шукати планети тільки біля зір, схожих на Сонце. А їх серед 400 млрд зоряного населення нашої Галактики за підрахунками налічується до 28 млрд. Навіть якщо ми відкинемо ті з них, які знаходяться в центральних районах зоряної системи, оскільки смертоносний рівень радіації, який там панує, знищить життя в самому зародку – все одно на околицях їх залишиться кілька мільярдів. То ж ми напевно маємо надії!

**5. Оптимістичні прогнози.** Побачити планети біля інших зір дуже важко, бо їхня яскравість набагато менша, ніж яскравість основного світила. Та все ж є кілька методів, які дозволяють виявити наявність планет, навіть не бачачи їх. Основним серед них є *метод променевої швидкості*, який за сучасних методик дозволяє реєструвати коливання променевої швидкості зорі навіть у 3 м/с за рахунок наявності невидимого компонента.

Використовуючи цей метод, 1995 р. два швейцарських дослідники М. Майор і Д. Квелоц оголосили про відкриття першої позасонячної планети. Планета масою 0,47 маси Юпітера знаходиться біля непримітної зорі *51 Пегаса* і обертається навколо неї з періодом лише 4,2 земних доби. Відтоді до кінця ХХ ст. було відкрито близько п'яти десятків планет біля зір у радіусі до двохсот світлових років від Сонця. Для пошуків використовуються найпотужніші сучасні наземні оптичні телескопи, такі як 10-метрові «Кек-І» і «Кек-ІІ» та інші.

До пошуків планет підключаються все нові й нові групи дослідників, їм виділяється час на найпотужніших телескопах Землі. Так що немає сумніву – цей список найближчими роками збільшиться в кілька разів. Цей факт свідчить про те, що планетні системи в космосі вельми поширені. На жаль, поки що всі нововідкриті планети подібні до планет-гігантів Сонячної системи, але, напевно, серед них повинні бути і

подібні до Землі. Для їхнього пошуку потрібні нові підходи, нове обладнання; роботи в цьому напрямку вже проводяться. Ідуть експерименти в області оптичної інтерферометрії, розглядаються проекти потужних космічних інтерферометрів.

Разом з тим продовжують плануватися роботи за програмою SETI (від англ. «Search for ExtraTerrestrial Intelligence» – «пошук позаземного розуму»), започатковані ще 1960 р. Ф. Дрейком під більш претензійною назвою SETI – «зв'язок з позаземним розумом». І якщо спочатку пошуки велися в основному в радіо- і оптичному діапазоні, то тепер щораз більша увага приділяється рентгенівському і гамма-діапазонам, як таким, що мають високу здатність передавати велику кількість інформації за одиницю часу. Винесення за межі атмосфери рентгенівських та гамма-приймачів вирішує проблему прийому та передачі сигналів на цих частотах. Окрім цього, можливо, у XXI ст. будуть використовуватися й інші канали зв'язку, такі як нейтрино і гравітаційні хвилі. Обидва канали відзначаються великою проникною здатністю: інформація майже не розсіюється в просторі, а отже, без значних втрат може доносити послання до адресата через колосальні відстані міжзоряного, і навіть міжгалактичного простору.

**6. Песимістична точка зору.** Але серед дослідників є й такі, хто досить скептично оцінює імовірність знайти життя і розум у Всесвіті. Адже мало того, що всі відомі позасонячні планети мають занадто великі маси, вони ще і рухаються по занадто витягнутих орбітах, що призводить до коливань температур, які виходять за межі припустимого для збереження життя. І скоріше за все Сонце з його планетною системою, де колові орбіти акуратно вкладені одна в одну, і сама Земля – це екстраординарна рідкість у Всесвіті.

У своїх доказах, окрім багатьох інших аргументів, вони спираються також на дані спектральних досліджень околиць нашої Галактики. Ці дослідження вказують на бідність вмісту в зорях їхнього зоряного населення таких необхідних для виникнення життя елементів, як залізо, магній і кремній. Ці елементи, утворюючись в ході термоядерних реакцій, розсіюються із надр зір під час їхніх вибухів. Але такі вибухи є величезною рідкістю на межі нашої зоряної системи.

Таким чином, Земля, на якій є не просто життя, а життя розумне, уявляється унікальним витвором природи і чи не єдиним носієм того дивовижного збігу космічних обставин, що забезпечили появу життя і розуму. І якщо Молочний Шлях справді позбавлений присутності інших представників розумного життя, то важливо робити все, щоб зберегти його бодай на Землі.

## § 31. Людина у Всесвіті

Наприкінці XX ст. людство зрозуміло, що життя не позбавлене певного загальнокосмічного змісту і що умови, завдяки яким воно виникло, не є випадковим збігом локальних фізичних обставин, а

найглибшим чином пов'язане з глобальними космологічними причинами – з історією і розвитком Всесвіту в цілому.

З'ясувалося, що виникненню розуму передувала дуже довга еволюція фізичних чинників у Всесвіті. І якби еволюція Всесвіту мала інший характер, життя в ньому навряд чи могло б зародитись. Так чому ж Всесвіт, у якому ми живемо, має саме такі властивості, що сприяють існуванню життя і розуму, а не які-небудь інші? Впродовж досить тривалого часу на це запитання відповіді не було. Лише у другій половині ХХ ст. астрофізик Г. Ідліс звернув увагу на те, що закони фізики, чинні у нашому Всесвіті, «дозволяють» існування атомів, зір, планет і життя.

А згодом космолог А. Зельманов сформулював дуже важливе положення: «Ми є безпосередніми свідками природних процесів визначеного типу, тому що процеси іншого типу відбуваються без свідків», тобто ми живемо у цьому Всесвіті, бо його фізичні властивості це допускають. Англійський астрофізик П. Девіс також висловив думку про те, що наявність життя накладає обмеження на властивості Всесвіту – вони мусять бути тою чи іншою мірою визначеними.

Можливо, в іншому Всесвіті, що має інші властивості, ми просто не змогли б з'явитись, і такий «інший» Всесвіт нікому було б спостерігати і вивчати.

**1. Антропний принцип.** Антропний принцип (АП, від грец. «антропос» – «людина») уперше проголосив фізик Б. Картер 1974 р. Його формулюють так: «Ми існуємо, тому що Всесвіт такий, який він є».

Основна ідея антропного принципу – ідея зв'язку між існуванням людства і фундаментальними властивостями Всесвіту. Сам по собі цей принцип ще нічого не пояснює. Але він дає новий напрямок досліджень, сприяє постановці та вивченню ряду питань, на які раніше не звертали особливої уваги. Одне з цих запитань – які саме властивості Всесвіту забезпечують наше існування?

**2. Життя і фундаментальні константи.** Багаторічна практика астрономічних та астрофізичних спостережень і здоровий глузд привчили нас до думки, що картина навколишнього світу, яку ми бачимо, сама собою зрозуміла і єдино можлива, що інакше і бути не може.

Проте насправді це далеко не так. Як показують теоретичні дослідження, структура нашого Всесвіту дуже нестійка по відношенню до його основних фундаментальних констант. Навіть за невеликих відхилень від їхніх наявних значень Всесвіт мусив би повністю змінити свій вигляд. Його будова, починаючи від елементарних частинок і закінчуючи надскупченнями галактик, спростилася б, а значні структурні складові зникли б. Ці константи забезпечили такий процес еволюції Всесвіту, за якого виникла можливість утворення складних систем і складних форм руху матерії, а отже, життя і людини.

Так, І. Розенталь вважає, що всю структуру Всесвіту та його історію визначають чотири фундаментальні взаємодії – гравітаційна, електромагнітна, сильна і слабка, а також співвідношення:

- ◆ між масою електрона і протона  $m_e / m_p$ , де  $m_e$  – маса електрона,  $m_p$  – маса протона;
- ◆ між масою нейтрона і протона  $\Delta m = m_n - m_p$ , де  $m_n$  і  $m_p$  – маси нейтрона і протона;
- ◆  $N$  – розмірністю фізичного простору.

Саме по відношенню до цієї «магічної сімки» і є дуже чутливим наш Всесвіт: досить внести незначні зміни у їхні значення, і це призведе до радикальних змін природи цілого Всесвіту не тільки на кількісному, але й на якісному рівнях. Ці зміни можуть бути навіть катастрофічними для Всесвіту, наприклад:

- ◆ якби гравітаційна стала зменшилася в кілька разів, то сила тяжіння була б занадто малою для формування із хмар водню галактик і зір; якби, навпаки, гравітаційна стала збільшилася в кілька разів, сила тяжіння виявилася б завеликою і розширення Всесвіту швидко змінилося б стисненням, так що життя у ньому не встигло б розвинути до високого рівня;
- ◆ якби маса електрона була хоча б удвічі більша, ніж вона є, електрон «завалювався» б на протон, і замість атомів водню (і всіх інших елементів) у всьому Всесвіті були б лише нейтрони і нейтронні зорі;
- ◆ якби різниця між масою протона і нейтрона була утричі більшою, то не змогли б утворюватися дейтрони, які відіграють вирішальну роль у реакціях термоядерного синтезу, і тоді увесь Всесвіт склався б виключно з водню;
- ◆ якби сила взаємодії між протонами і нейтронами була хоча б на 5–7 % більшою, Всесвіт склався б із одного гелію; коли б ця сила була на 5–7 % меншою, гелій взагалі не зміг би утворитись.

Так само тісно і досить критичним чином властивості життя на Землі пов'язані з іншими фундаментальними властивостями астрономічного світу, зокрема, з розширенням Всесвіту.

Виявляється, ми не випадково живемо в епоху «червоних зміщень» галактик. Віддалення джерел електромагнітного випромінювання приводить до зсуву їхнього випромінювання у червоний бік спектра, і до зменшення енергії, яку воно несе. Якби галактики зближувались, то замість червоного зміщення ми спостерігали б фіолетове, тобто збільшення частот випромінювання у бік жорстких променів. При цьому на нас падав би такий спопеляючий потік електромагнітної енергії, що життя за таких умов не змогло б існувати. Навіть у тому разі, коли б Всесвіт не розширювався чи розширювався повільніше, інтенсивність випромінювання була б досить високою щоб знищити білкові життя в зародку.

Можна було б спробувати змінити одразу не одну, а кілька фундаментальних сталих. Виявляється, при цьому існує деяка область їхніх

значень, яка дає можливість утворення складних структур, однак час їхнього існування невеликий. У такому світі буде занадто мало часу, щоб виникло що-небудь досить складне.

Отже, можна ще раз підкреслити глибоку доцільність і гармонію фізичних законів і значень фундаментальних сталих. В супротивному разі виникнення складних форм матерії виявиться неможливим. Тільки за наявних їхніх значень структура та історія Всесвіту припускає розвиток життя і появу розуму.

**3. Унікальність нашого Всесвіту.** Порівняно вузькі межі можливих змін фундаментальних фізичних сталих, коли ще можливе існування життя, говорить про унікальність «набору» їхніх значень у нашому Всесвіті. Саме ця їхня винятковість забезпечує можливість існування життя. Виникає питання: оскільки набір фізичних сталих величин у нашому Всесвіті унікальний, а все унікальне малоймовірне, то яким чином такий збіг умов міг здійснитися?

З точки зору антропного принципу, наш Всесвіт пройшов через нескінченну послідовність циклів розширення і стиснення. На початку кожного з них складався свій набір фізичних констант, що змінювався від циклу до циклу. Ми з'явилися в тому циклі, в якому сформувалося поєднання фізичних сталих та інших властивостей, сприятливе для виникнення складних структур і живих систем.

Окрім цього, не виключено, що в матеріальному Космосі існує нескінченна кількість різних всесвітів водночас, у кожному з яких свій набір, свій комплекс фізичних констант і властивостей. У нашому Всесвіті, з нашим комплексом фізичних явищ, зв'язків і фундаментальних фізичних констант, його стабільність забезпечується саме тими законами природи, які реалізувалися в навколишньому світі.

Але можуть існувати й інші, незвичні для нас комплекси явищ, стабільність яких забезпечується іншими законами. Звідси ясно, що можна припустити існування всесвітів з іншими законами, іншими властивостями простору-часу і світовими константами, не менш організованих, ніж наш, і навіть таких, що забезпечують існування негуманоїдних форм життя і розуму.

Отже, ми існуємо у тому Всесвіті, властивості якого дозволяють формування живих організмів; можуть існувати інші всесвіти, де діють інші фундаментальні закони, і можливе існування принципово інших форм життя. І в тому, і в іншому випадках питання про те, як міг реалізуватися випадковим чином унікальний і тому малоймовірний набір фізичних констант, фактично знімається.

Оскільки число можливостей, тобто циклів розширення (різних всесвітів), нескінченне, то в існуванні в одному з цих циклів (в одному з цих всесвітів) необхідного для життя збігу умов з позицій теорії ймовірностей вже немає нічого неможливого.

**4. Проблема існування інших всесвітів.** Питання про нескінченну кількість можливих всесвітів у фізиці та космології, як і всяка інша нова проблема, стикається з неясностями. Якщо інші всесвіти існують, то їхнє існування підкоряється принципово іншим

законам, ніж існування нашого Всесвіту. А це означає, що ми аж ніяк не можемо отримати від них інформацію, адже фізичний зв'язок між різними об'єктами можливий тоді, коли вони живуть за подібними законами.

Як же здійснити зв'язок з тим, що принципово не схоже на наш світ? Окремі вчені припускають, що такими каналами зв'язку можуть слугувати сингулярності, які в нашому Всесвіті мають місце у випадку чорних дір. Можливо, що бар'єри простору-часу, які відокремлюють наш Всесвіт від інших всесвітів, не такі вже й неприступні. Не виключено, що з часом вони будуть подолані наукою і виведуть наші уявлення про Космос на якісно новий рівень.

Ще 1934 р. австрійський вчений К. Гедель сформулював теорему про неповноту наших знань, яка проголошує: «Жодна система не може бути пізнаною до кінця зсередини – поза зв'язком її з іншими системами вищого порядку». Це означає, що неможливо вичерпно описати світ, у якому живе людина, зокрема – описати причину появи та існування Всесвіту, не вийшовши за його межі. А тому з'являється дедалі більше підстав вважати, що без концепції інших всесвітів, що існують водночас у матеріальному Космосі, вже важко обійтись, оскільки вона дозволить зрозуміти властивості нашого Всесвіту.



1. Що таке життя і чи є його існування на Землі за заданих умов випадковим?
2. Які методи пошуку позаземних планет Вам відомі?
3. На чому ґрунтується думка про унікальність Сонячної системи і Землі у Всесвіті?
4. Сформулюйте свою думку щодо питання про життя у Всесвіті.
5. У чому полягає унікальність нашого Всесвіту?

## Вивчивши тему VIII «ЖИТТЯ У ВСЕСВІТІ»

### необхідно знати :

- \* Наш Всесвіт влаштовано так, що в ньому стала можливою поява життя.
- \* За наявності відповідних умов життя може виникнути і на інших планетах.
- \* Не виключено, що в матеріальному Космосі існує нескінченна кількість різних всесвітів.



# ДОДАТКИ

## ВКАЗІВКИ ДО АСТРОНОМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Засвоєння теоретичних знань з астрономії немислиме без поєднання процесу навчання зі спостереженнями. Астрономічні спостереження бажано розпочати на початку навчального року, можливо навіть у формі своєрідної гри. Через погоду спостереження не завжди вдається організувати на шкільному майданчику, тому слід передбачити індивідуальну роботу вдома, навіть з балкона чи з вікна квартири.

**Орієнтовна програма спостережень на весь навчальний рік.**

**1. Вивчення взаємного розташування сузір'їв і найяскравіших зір, з'ясування умов їхньої видимості на небі впродовж року.** Використовуючи карту зоряного неба, знайдіть сузір'я Великої Ведмедиці та Полярну зорку. Запам'ятавши її положення відносно горизонту, спрогнозуйте, куди буде спрямована «ручка ковпа» через 6 і 12 годин і здійсніть відповідну замальовку в журналі спостережень. Повторіть такі спостереження принаймні один раз на місяць і узагальніть їх.

Привчіться сприймати північну частину небосхилу як своєрідний зоряний чи полярний годинник (див. далі).

Принаймні один раз на два тижні відмічайте, які зодіакальні сузір'я можна бачити у південній частині неба через годину після заходу Сонця, а які щойно зійшли. Цю інформацію уточніть, повторюючи спостереження в один і той же час (наприклад, о 22 год.) Приблизно через півроку узагальніть ці дані.

Виберіть щонайменше десять найяскравіших зір неба (Сіріус, Регул, Спіка, Антарес тощо), уважно вивчіть їхнє розташування на зоряній карті і запам'ятайте їхні зоряні величини.

**2. Спостереження Місяця.** Взавши до уваги, що кутовий діаметр Місяця становить  $0,5''$ , спробуйте оцінити впродовж одного вечора напрям руху Місяця серед зір; наносячи на зоряну карту положення Місяця впродовж декількох вечорів на один і той же момент часу, оцініть його кутову швидкість за добу.

Замалуйте положення Місяця на тлі зір у фазі першої чверті впродовж кількох місяців поспіль, узагальніть ці спостереження.

Порівнюючи карту з положенням зір на небосхилі, запам'ятайте положення екліптики відносно них; а проводячи згадані вище спостереження Місяця, зверніть водночас увагу і на те, перебуває він над екліптикою (тобто ближче до Північного полюса світу) чи під нею. За допомогою найпростішого пристрою (наприклад, транспортира з підвішеним виском) виміряйте висоту Місяця в меридіані у першій чверті поблизу дати осіннього рівнодення; зареєструйте це спостереження і проведіть таке ж поблизу дати весняного рівнодення.

Вивчаючи карту видимої з Землі півкулі Місяця, запам'ятайте положення на ньому декількох морів, найбільших кратерів, а також гір – Карпати, Кавказ, Альпи. За можливості спостерігайте їх у бінокль чи телескоп.

**3. Спостереження планет.** Спостереження планет (однієї чи декількох, залежно від умов їхньої видимості) проводьте принаймні один раз на два тижні, замальовуючи їхні положення на тлі зір у журнал. Порівнюючи ці результати з

відповідною ділянкою карти зоряного неба, з'ясуєте особливості їхнього руху – прискорення чи сповільнення, зупинки в русі. Якщо ж планета описала петлю – оцініть дугу її зворотного руху.

**4. Спостереження Сонця.** З інтервалом у два тижні фіксуйте моменти сходу і заходу Сонця і робіть висновок щодо тривалості дня. Якщо є можливість фіксувати (відносно навколишніх далеких предметів) положення точки заходу (сходу), оцініть дугу її зміщення від літнього до зимового сонцестояння.

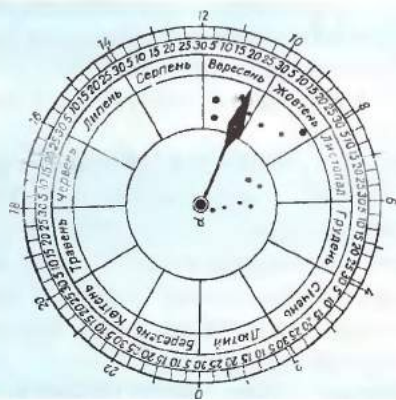
За наявності на шкільному майданчику стовпа (гномона) відомої висоти вимірюйте довжину його тіні 6 і 21 числа кожного місяця в момент верхньої кульмінації Сонця, а за відношенням висоти стовпа до довжини його тіні визначте висоту Сонця над горизонтом у верхній кульмінації. За висотою Сонця 20 березня знайдіть кут нахилу площини небесного екватора до горизонту.

**5. Спостереження в телескоп або бінокль, що проводяться під керівництвом учителя.** Проводьте спостереження поверхні Місяця (найкраще – поблизу фази першої чверті), супутників Юпітера і кільця Сатурна, найпомітніших деталей поверхонь цих планет, зоряного скупчення Плеяди в сузір'ї Тельця, галактики M31 в сузір'ї Андромеди (восени), газової туманності в Оріоні (взимку).

Вдень, проектуючи зображення Сонця на екран, проводьте спостереження сонячних плям. При цьому слід пам'ятати: **категорично забороняється дивитись на Сонце через окуляр інструмента. Це призводить до втрати зору!**

Якщо є можливість, доцільно здійснити вивчення зоряного неба в планетарії, а також ознайомитися з роботою астрономічної обсерваторії.

**6. Зоряний годинник.** Зоряний або полярний годинник дозволяє визначати як місцевий сонячний час  $T_{\lambda}$ , так і зоряний час  $S$ . Для його виготовлення виріжте з картону два круги різного діаметра (наприклад 9 і 10,5 см). Більший із них буде циферблатом. На його обводі у напрямі, протилежному до обертання годинникової стрілки, через однакові проміжки проставте числа 1, 2, 3 ... 23, 0. Менший круг розділіть на 12 частин за кількістю місяців у році. На його обводі



на внутрішньому обводі навпроти стрілки напишіть назви місяців, а відповідні їм дуги розділіть на п'ятиденки. У секторі «вересень» намалуйте Ківш Великої Ведмедиці і через середину прямої, що з'єднає її зорі  $\alpha$  і  $\delta$ , проведіть лінію, яка вказує напрям на точку осіннього рівнодення. Вона і буде стрілкою полярного годинника. Малий круг накладіть на більший, сумістивши їхні центри, і скріпіть так, щоб вони вільно оберталися.

Для вимірювання часу циферблат годинника встановіть цифрою 0 униз. Станьте обличчям до півночі і поверніть мале коло так, щоб зображення Великої

Ведмедиці на ньому зайняло таке ж положення відносно центра годинника і лінії виска, яке займає це сузір'я на небі щодо Полярної зорі. Після цього на циферблаті навпроти стрілки зафіксуйте місцевий зоряний час  $S$ , а навпроти дати спостереження – місцевий сонячний час  $T_{\lambda}$ .

## ДОДАТКИ

## ГРЕЦЬКИЙ АЛФАВІТ

A α альфа	Η η ета	Ν ν ню	Τ τ тау
B β бета	Θ θ тета	Ξ ξ ксі	Υ υ іпсілон
Γ γ гамма	Ι ι йота	Ο ο омікрон	Φ φ фі
Δ δ дельта	Κ κ каппа	Π π пі	Χ χ хі
Ε ε епсілон	Λ λ лямбда	Ρ ρ ро	Ψ ψ псі
Z ζ дзета	Μ μ мю	Σ σ сіґма	Ω ω омега

## АСТРОНОМІЧНІ ЗНАКИ І СИМВОЛИ

Сонце	☉	Земля	♁	Уран	♅
Місяць	☾	Марс	♂	Нептун	♆
Меркурій	☿	Юпітер	♃	Плутон	♇
Венера	♀	Сатурн	♄		
Овен	♈	Лев	♌	Стрілець	♐
Телець	♉	Діва	♍	Козоріг	♏
Близнята	♊	Терези	♎	Водолій	♑
Рак	♋	Скорпіон	♏	Риби	♐

зоря	*	градус дуги	°
змінна	Var	хвилина дуги	'
комета	☄	секунда дуги	"
висхідний вузол	♁	азимут	A
Північ	N	висота	h
Південь	S	годинний кут	t
Схід	E	пряме піднесення	α
рік	a	схилення	δ
доба	d	зоряний час	s
година часу	h	річний паралакс	π
хвилина часу	m	шпрот	φ
секунда часу	s	довгота	λ

## ДЕЯКІ ФІЗИЧНІ ТА АСТРОНОМІЧНІ ВЕЛИЧИНИ

Гравітаційна стала	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Стала Планка	$h = 6,626124 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Маса спокою протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Маса спокою електрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Число Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярна газова стала	$R = 8,31441 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,380652 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$
1 мала калорія	4,1855 Дж
Кількість секунд у тропічному році	$31\,556\,925,9747 \approx 3,16 \cdot 10^7$
1 світловий рік	$9,460530 \cdot 10^{15} \text{ м}$
1 парсек	$3,085678 \cdot 10^{16} \text{ м}$
Поперечник Галактики	$100000 \text{ св.р.} \approx 10^{21} \text{ м}$
Відстань до галактики М 31 (Андромеди)	$2,3 \text{ млн св.р.} \approx 10^{22} \text{ м}$
Стала Габбла	$75 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$

## ЕЛЕМЕНТИ ОРБИТ ПЛАНЕТ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Планета	$a$ [а.о.]	$a$ [млн км]	$T_*$ [р.]	$V$ [км/с]	$T_S$	$e$	$i, ^\circ$
Меркурій	0,39	57,91	0,24	47,87	115,88	0,2056	7,00
Венера	0,72	108,21	0,62	35,02	583,92	0,0068	3,39
Земля	1,00	149,60	1,00	29,79	—	0,0167	—
Марс	1,52	227,94	1,88	24,13	779,94	0,0934	1,85
Юпітер	5,20	778,34	11,86	13,06	398,88	0,0485	1,30
Сатурн	9,54	1427,0	29,46	9,65	378,09	0,0556	2,89
Уран	19,18	2869,6	84,01	6,80	369,66	0,0473	0,77
Нептун	30,06	4496,7	164,79	5,43	367,48	0,0086	1,77
Плутон	39,52	5912,0	247,70	4,7	366,72	0,253	17,14

 $a$  – велика піввісь орбіти $T_S$  – синодичний період обертання $T_*$  – сидеричний період обертання $e$  – ексцентриситет орбіти $V$  – середня швидкість руху по орбіті $i$  – нахил площини орбіти до екліптики

## ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Планета	$m$ [ $m_\oplus$ ]	$R$ [км]	$R$ [ $R_\oplus$ ]	$\rho$ [ $\rho_\oplus$ ]	$P$	$\varepsilon, ^\circ$
Меркурій	0,055	2439	0,383	0,986	58,65 <sup>d</sup>	3,0
Венера	0,815	6052	0,950	0,950	243,16 <sup>d</sup> *	177,4 *
Земля	1,000	6378	1,000	1,000	23 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup>	23,45
Марс	0,107	3393	0,532	0,714	24 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup>	25,2
Юпітер	317,89	71398	11,19	0,241	9 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup>	3,08
Сатурн	95,17	60000	9,41	0,128	10 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup>	26,13
Уран	14,6	26200	4,11	0,286	10 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup> *	97,92
Нептун	17,2	24300	3,81	0,417	19 <sup>h</sup>	28,80
Плутон	0,0025	2500	0,39	0,880	6 <sup>h</sup> 38 <sup>m</sup>	

 $m$  – маса планети в одиницях маси Землі $P$  – сидеричний період обертання $R$  – середній радіус $\varepsilon$  – кут нахилу екватора $\rho$  – густина в одиницях густини Землі

до площини орбіти

\* планета обертається у протилежному напрямку

## ДАНИ ПРО ЗЕМЛЮ

Екваторіальний радіус

$$R_e = 6378,140 \text{ м}$$

Середній радіус

$$R_\oplus = 6371,004 \text{ м}$$

Площа поверхні Землі

$$S_\oplus = 509\,495\,365 \text{ км}^2$$

Маса Землі

$$m_\oplus = 5,973 \cdot 10^{24} \text{ кг}$$

Середня густина Землі

$$\rho_\oplus = 5,574 \text{ г·см}^{-3}$$

Лінійна швидкість на екваторі

$$465,119 \text{ м·с}^{-1}$$

## ДАНИ ПРО СОНЦЕ

Радіус Сонця

$$R_\odot = 6,96 \cdot 10^8 \text{ м} = 696000 \text{ км}$$

Найбільший видимий кутовий діаметр

$$32'35,78''$$

Найменший видимий кутовий діаметр

$$31'31,34''$$

Маса Сонця

$$m_\odot = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ кг} = 332\,946 \text{ } m_\oplus$$

Середня густина

$$\rho_\odot = 1,408 \text{ г·см}^{-3}$$

Лінійна швидкість на екваторі

$$2025 \text{ м·с}^{-1}$$

Друга космічна швидкість на поверхні

$$617,7 \text{ км·с}^{-1}$$

Світність

$$L_\odot = 3,88 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

Ефективна температура поверхні

$$T_e = 5807 \text{ К}$$

Відстань до центра Галактики

$$\sim 10\,000 \text{ пк}$$

Швидкість руху навколо центра Галактики

$$250 \text{ км·с}^{-1}$$

Період обертання навколо центра Галактики

$$200 \text{ млн р.}$$

## ДАНИ ПРО МІСЯЦЬ

Середня відстань від Землі	384 401 км = 60,2682 $R_{\oplus}$
Найбільший видимий кутовий діаметр	33'32"
Найменший видимий кутовий діаметр	29'20"
Радіус Місяця	$R_C = 1738$ км
Маса	$m_C = 7,35 \cdot 10^{22}$ кг = 1 / 81,301 $m_{\oplus}$
Середня густина	$\rho_C = 3,341$ г·см <sup>-3</sup>
Друга космічна швидкість	2,380 км·с <sup>-1</sup>
Середній ексцентриситет орбіти	0,05490 $\approx$ 1/18
Середня швидкість руху по орбіті	1,023 км·с <sup>-1</sup>
Сидеричний місяць	27 <sup>d</sup> ,321661 = 27 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup> 43 <sup>s</sup> 11.47 <sup>s</sup>
Синодичний місяць	29 <sup>d</sup> ,5305882 = 29 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup> 44 <sup>s</sup> 02,78 <sup>s</sup>

## НАЙЯСКРАВІШІ ЗОРІ

№	зоря, сузір'я	власна назва	$m_v$	$\Delta$ , [пк]	$L [L_{\odot}]$
1	$\alpha$ Великого Пса	Сіріус	-1,46	2,67	23
2	$\alpha$ Волопаса	Арктур	-0,05	11,1	102
3	$\alpha$ Ліри	Вега	0,03	8,1	54
4	$\alpha$ Візничого	Капелла	0,08	13,7	150
5	$\beta$ Оріона	Рігель	0,13	333,3	53 700
6	$\alpha$ Малого Пса	Проціон	0,37	3,5	7,8
7	$\alpha$ Оріона	Бетельгейзе	0,42	200,0	21 300
8	$\alpha$ Орла	Альтаір	0,76	5,1	10,2
9	$\alpha$ Тельця	Альдебаран	0,86	20,8	162
10	$\alpha$ Скорпіона	Антарес	0,91	52,6	6 500
11	$\alpha$ Діви	Спіка	0,97	47,6	1 950
12	$\beta$ Близнят	Поллукс	1,14	13,9	34
13	$\alpha$ Лебедя	Денеб	1,25	250	70 000
14	$\alpha$ Лева	Регул	1,35	25,6	148
15	$\alpha$ Близнят	Кастор	1,58	13,9	41
16	$\gamma$ Оріона	Беллатрікс	1,63	38,5	1 780
17	$\epsilon$ Оріона	Алнілам	1,70	500	40 700
18	$\alpha$ Вел. Ведмедиці	Дубхе	1,79	32,3	162
19	$\eta$ Вел. Ведмедиці	Бенетнаш	1,86	250	370
20	$\alpha$ Мал. Ведмедиці	Полярна	2,02	333,3	5 600

$m_v$  – зоряна величина

$\Delta$  – відстань до зорі

$L$  – світність зорі ( $L_{\odot} = 1$ )

## ДАТИ СХОДУ ТА ЗАХОДУ

## ОКРЕМИХ ЯСКРАВИХ ЗІР НА ШИРОТІ 50°

Плеяди	12.V	23.V	04.XII	14.XI
Пояс Оріона	12.V	20.VII	18.I	14.XI
Сіріус	14.V	16.VIII	12.II	15.XI
Проціон	15.VI	8.VIII	5.II	12.XII
Поллукс	13.VII	20.VII	18.I	5.I
Регул	13.VIII	2.IX	27.II	25.I
Спіка	1.X	26.X	23.IV	6.III
Антарес	14.XI	15.XII	18.VI	22.IV
Арктур	2.XII	13.X	10.IV	20.V
Альтаір	29.I	23.XII	1.VII	4.VIII

## ДАТИ НОВОГО МІСЯЦЯ НА ХХ–ХХІ ст.

РОКИ					МІСЯЦІ											
XX	XXI				I, III	II	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
63	82	01	20	39	25	23	23	23	21	21	19	18	17	16	15	
64	83	02	21	40	14	12	12	12	10	10	8	7	6	5	4	
65	84	03	22	41	3	2	2	1–31	29	29	27	26	25	24	23	
66	85	04	23	42	22	20	20	20	18	18	16	15	14	13	12	
67	86	05	24	43	11	9	9	9	7	7	5	4	3	2	1–31	
68	87	06	25	44	30	28	28	28	26	26	24	23	22	21	20	
69	88	07	26	45	19	17	17	17	15	15	13	12	11	10	9	
70	89	08	27	46	8	6	6	6	4	4	2	1	1–30	29	28	
71	90	09	28	47	27	25	25	25	23	23	21	20	19	18	17	
72	91	10	29	48	16	14	14	14	12	12	10	9	8	7	6	
73	92	11	30	49	5	4	4	3	2	1–31	28	27	26	25	24	
74	93	12	31	50	23	21	21	21	19	19	17	16	15	14	13	
75	94	13	32	51	12	10	10	10	8	9	6	5	4	3	2	
76	95	14	33	52	1–31		29	29	27	27	25	24	23	22	21	
77	96	15	34	53	20	18	18	18	16	16	14	13	12	11	10	
78	97	16	35	54	9	7	7	7	5	5	3	2	2–31	30	29	
79	98	17	36	55	28	26	26	26	24	23	22	21	20	19	18	
80	99	18	37	56	17	15	16	15	13	13	11	10	9	8	7	
81	00	19	38	57	6	4	5	4	3	2	1–31	29	28	27	26	

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

## Книжки з різних питань курсу астрономії

- Бронштейн В. А. Гипотезы о звездах и Вселенной, – М., Наука, 1974  
 Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. – М., Наука, 1984  
 Каплан С. А. Физика звезд. – М., Наука, 1977  
 Климишин І. А. Астрономія. – Львів, Світ, 1994  
 Климишин І. А. Небо нашої планети. – Л., Вища школа, 1979  
 Климишин І. А. Перлини зоряного неба. – К., Рад. школа, 1981  
 Климишин І. А. Нариси з історії астрономії. – К., Рад. школа, 1987  
 Климишин І. А., Тельнюк–Адамчук В. В. Шкільний астрономічний довідник. – К., Рад. школа, 1991  
 Климишин І. А. Астрономия наших дней. – М., Наука, 1986  
 Климишин І. А. Элементарная астрономия. – М., Наука, 1991  
 Колчинский И. Г., Корсунь А. А., Родригес М. Г. Астрономы. – К., Наукова думка, 1986  
 Кун М. А. Легенды і міфи Стародавньої Греції. – К., Рад. школа, 1955  
 Новиков И. Д. Эволюция Вселенной. – М., Наука, 1990  
 Физика космоса. Маленькая энциклопедия. – М., Наука, 1986  
 Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. – М., Наука, 1990  
 Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – М., Наука, 1984

## Посібники для проведення спостережень

- Астрономічний календар. – К., видається щорічно  
 Карпенко Ю. А. Названия звездного неба. – М., Наука, 1981  
 Климишин І. А. Атлас зоряного неба. – Л., Вища школа, 1985  
 Колчинский И. Г., Орлов М. Я., Прох Л. З., Пугач А. Ф. Что можно увидеть на небе. – К., Наукова думка, 1988  
 Марленский А. Д. Учебный звездный атлас. – М., Просвещ., 1970  
 Михайлов А. А. Атлас звездного неба. – М., Наука, 1974  
 Новак О. Ф. Збірник задач з курсу загальної астрономії. – К., 1993  
 Навашин М. С. Телескоп астронома-любителя. – М., Наука, 1979  
 Осипов О. К. Карта зоряного неба. – К., Рад. школа. 1966  
 Парандовський Я. Міфологія. – К., Молодь, 1977  
 Сикорук Л. Л. Телескоп для любителей астрономии. – М., Наука, 1982  
 Цесевич В. П. Что и как наблюдать на небе. – М., Наука, 1979  
 Чепрасов В. Г. Практикум з курсу загальної астрономії. – К., 1976  
 Чепрасов В. Г. Завдання, запитання і задачі з астрономії. – К., 1992  
 Чубюмов К. И. Кометы и их наблюдения. – М., Наука, 1980

Навчальне видання

**Климишин Іван Антонович**  
**Крячко Іван Павлович**

# АСТРОНОМІЯ

*Підручник для 11 класу загальноосвітніх навчальних закладів*

Відповідальний за випуск *І. П. Крячко*  
Літературний редактор *В. С. Степашко*  
Комп'ютерна верстка *В. С. Дрьомов*  
Технічний редактор *В. В. Боровик*  
Художник *А. С. Добровольський*

Підписано до друку 5.09.2002. Формат 70×100<sup>1/16</sup>. Папір офсетний. Друк офсетний.  
Гарнітура Шкільна. Умовн. друк. арк. 15,60. Обл.-вид. арк. 20,08.  
Тираж 350 000 прим. (1 з-д 1 – 75 000 прим.). Зам. № 2-675.

Набір та верстка видавництва «Знання України»

Видавництво «Знання України»  
Свідоцтво про державну реєстрацію № 217 ДК від 11.10.2000 р.  
03150, м. Київ-150, вул. В. Васильківська, 57/3.  
Тел.: (044) 227-30-97, 227-41-45

Віддруковано у ВАТ «Харківська книжкова фабрика «Глобус»».  
61012, Харків, вул. Енгельса, 11